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

**Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários
futuros: aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE**

Luciano Alves de Oliveira

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

**Piracicaba
2015**

Luciano Alves de Oliveira
Engenheiro Agrônomo

**Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários futuros:
aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

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

Piracicaba
2015

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

Oliveira, Luciano Alves de

Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários futuros: aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAÍZE / Luciano Alves de Oliveira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
93 p. : il.

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

1. Lâminas de irrigação 2. Modelagem na agricultura 3. Mudanças climáticas I. Título

CDD 633.61
O48m

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

DEDICATÓRIA

Dedico,

Aos meus pais, Claudemir César de Oliveira e Ana Maria Alves de Oliveira, pelo apoio, compreensão e amor;

Aos meus familiares, que de forma direta ou indireta sempre colaboraram e me apoiaram para que conseguisse chegar onde estou;

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos bons e nos momentos ruins e que foram a base de tudo;

Ao meu orientador Jarbas Honorio de Miranda, pelas orientações tanto técnicas quanto pessoais;

À Julia Correia, pela compreensão, força, motivação e apoio em todas as ocasiões, não importando a situação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares;

Aos meus amigos;

Ao meu orientador Jarbas Honorio de Miranda;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa.

Aos professores Sergio Nascimento Duarte, Paulo César Sentelhas, Thiago Libório Romanelli, Sônia Maria Piedade e Fábio Ricardo Marin, pelo ensino e aprendizagem;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Batista Grigolon, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Antônio Agostinho Gozzo (Seu Antônio), Luiz Fernando Novello, Ângela Márcia Derigi Silva, Francisco Bernardo Dias, Davilmar Aparecida Colevatti, Hélio de Toledo Gomes, Luiz Custódio Camargo.

Em especial aos amigos que proporcionaram vários momentos de alegria, descontração e conselhos: Conan Ayade Salvador, Wagner, Bruno Lena, João Paulo. A todas as pessoas que conheci no Departamento de Engenharia de Biossistemas e durante as disciplinas e outros que não foram mencionados. Aos colegas de salinha, Elenilson Moreira Franco, Isaac de Matos Ponciano, Pedro Henrique Chinelato, Carlos Faundez, Katarina Grecco e, em especial ao Guilherme Coelho Portilho, no auxílio de todas as horas com o modelo DSSAT.

EPIGRAFE

“And as we wind on down the road
Our shadows taller than our souls
There walks a lady we all know
Who shines white light and wants to show

How everything still turns to gold
And if you listen very hard
The tune will come to you at last
When all are one and one is all, yeah

To be a rock and not to roll”

(Led Zeppelin)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	21
2 DESENVOLVIMENTO	23
2.1 Revisão Bibliográfica	23
2.1.1 Aspectos na produção de cana-de-açúcar e milho	23
2.1.2 Manejo da água em cana-de-açúcar e milho	29
2.1.3 Modelagem matemática na agricultura	33
2.1.4 Sistema de suporte a decisão e transferência de tecnologia (DSSAT)	35
2.1.5 Mudanças climáticas	37
2.2 Material e Métodos	39
2.2.1 Considerações iniciais sobre os modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE	40
2.2.2 O Modelo DSSAT/CANEGRO	45
2.2.3 O Modelo CERES-MAIZE	51
2.2.4 Cenários Futuros e o Modelo MarkSim	54
2.2.5 Análises Estatísticas	58
2.3 Resultados e Discussão	59
2.3.1 Cana-de-açúcar	59
2.3.2 Milho	71
3 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85

RESUMO

Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários futuros: aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE

Uma das maiores questões que a humanidade vem enfrentando nas últimas décadas é de como suprir a demanda energética. Em meio à exploração do petróleo, várias alternativas surgiram, e uma delas é a exploração de biomassa vegetal para produção de combustíveis. Diante dessa situação, duas culturas vêm se sobressaindo nessa exploração: cana-de-açúcar e milho. Tais culturas são altamente rentáveis no que se refere à produção de carboidratos que são facilmente transformados em etanol, pela fermentação alcoólica. Portanto, a fim de aumentar seus rendimentos, a prática correta da irrigação provê a quantidade ideal de água que a planta necessita para alcançar todo o seu potencial produtivo. O manejo racional da irrigação é considerado uma prática extremamente importante nos dias atuais por estar relacionado com a economia de água, que se trata de um bem natural não renovável e que tem sua disponibilidade futura muito especulada. Juntamente a isso, em termos mais específicos, as culturas da cana-de-açúcar e do milho no estado de São Paulo têm grande importância econômica. Estas culturas vêm, a cada dia, utilizando cada vez mais a irrigação como prática comum. Diante disso, a pesquisa teve como objetivo, com olhos aos cenários futuros, tanto em função da busca por um aumento de produtividade e disponibilidade de água, avaliar lâminas de irrigação para as culturas da cana-de-açúcar e do milho, cultivadas na região de Piracicaba, SP. Para alcançar essa meta, foram aplicados os modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE e o modelo MarkSim, utilizado para a estimativa dos dados para cenários futuros, para alimentar os modelos de suporte à decisão. Para tal, foram utilizadas informações do relatório do IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Changes) tanto para o cenário atual, quanto para os cenários futuros definidos como: A1B, A2 e B1. Foi utilizada uma série de 31 anos de dados climáticos (Temperatura Máxima e Mínima, Radiação Solar e Chuva), período de 1982 a 2012, para a região de Piracicaba, SP, obtida pela Estação Meteorológica pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP. Uma série também de 31 anos, representou os dados climáticos, de cenários futuros, simulados pelo modelo MarkSim e corresponderam ao período de 2062 a 2092, para a região de Piracicaba, SP. As análises estatísticas das lâminas de irrigação foram comparadas pelo método de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Diante dos resultados obtidos, para os cenários futuros, a cana-de-açúcar terá uma redução de produtividade da ordem de 40% em relação ao cenário atual e não será o suprimento hídrico que conseguirá evitar tal redução. As lâminas de irrigação nos cenários futuros também apresentaram reduções da ordem de 40%. Em relação à cultura do milho, para se manter os mesmos níveis de produtividade, será necessário um incremento de 81% nas lâminas de irrigação, diante dos cenários futuros. Conclui-se que diante de cenários futuros, a cana-de-açúcar, para a manutenção de sua produtividade, sugere-se um envolvimento com outros campos de pesquisa, dentre eles a área de genética, buscando desenvolver novas variedades tolerantes a essas variações climáticas e no caso do cultivo do milho o manejo racional da água em dias atuais, passa a ser fundamental.

Palavras-chave: Lâminas de irrigação; Modelagem na agricultura; Mudanças climáticas

ABSTRACT

Water management for sugarcane and maize under future climate scenarios: DSSAT /CANEGRO and CERES- MAIZE models application

Over the last several decades, there have been concerns worldwide about coping with increasing energy demand. Several alternatives to oil have emerged, among them the use of plant biomass for fuel. Sugarcane and maize have exhibited excellent potential in this regard. These crops are highly efficient in producing carbohydrates which can easily be fermented to produce ethanol. Proper irrigation practices, providing the ideal amount of water that the plant needs to reach its full potential yield, are needed to maximize income from these crops. Rational irrigation management is considered an important practice because it promotes sustainable water use. Sugarcane and maize are of great economic importance to the state of São Paulo, where it is common to irrigate these crops. This research aims to determine conditions for increased productivity and water availability for these crops in the region of Piracicaba, SP, under future climate scenarios. To achieve this goal, the DSSAT/CANEGRO and CERES-MAIZE crop growth models were coupled with the MarkSim model for estimating data for future climate scenarios. Information from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was used to generate data for current conditions, as well as for the A1B, A2 and B1 future scenarios. Current climate data (Minimum Temperature and Solar Radiation and Rain) for the period 1982 to 2012 for Piracicaba, SP, were obtained by meteorological station operated by the Department of Biosystems Engineering at ESALQ / USP. MarkSim was used to generate data for the same region for 2062 to 2092. The Tukey method, at a 5% level of significance was used to compare irrigation levels for current and future scenarios. Based on these results, for future scenarios, sugar cane productivity will be reduced by approximately 40%, and there will not be enough water to mitigate such an effect. The water depth in future scenarios was also reduced by approximately 40%. To maintain the same levels of productivity in corn, will be necessary to increase irrigation water by 81%. In conclusion, it is recommended that research be conducted in other areas if sugarcane productivity is to be maintained. Examples include genetic research to develop new varieties tolerant to climate variations. For maize cultivation, it is crucial the rational water management be introduced as soon as possible.

Keywords: Irrigation depths; Agricultural modeling; Climate changes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (A) Médias mensais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e chuva (mm) e (B) Média da Radiação Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Média das Temperaturas Máximas e Mínimas ($^{\circ}\text{C}$), ambos para o período de 1982 a 2012 para Piracicaba, SP (série de 31 anos)	42
Figura 2 - Interface do DSSAT para a inclusão dos dados climáticos nos modelos presentes no pacote.....	43
Figura 3 - Interface do software DSSAT para a edição de dados de solo	44
Figura 4 - Interface da escolha de cultivar dentro do DSSAT/CANEGRO	51
Figura 5 - Banco de dados do pacote DSSAT contendo os coeficientes genéticos para a cultura do milho (em evidência aparece o híbrido BR201, calibrado por Gedanken (1998), utilizado nessa pesquisa).....	53
Figura 6 - Interface do modelo MarkSim, utilizado para gerar dados climáticos de cenários futuros presentes no relatório do IPCC.....	54
Figura 7 – Desvios das Temperaturas Máximas (a), Temperaturas Médias (b) e Temperaturas Mínimas (c) obtidos mediante a comparação entre os cenários Futuros A1B, A2 e B1 com o cenário atual (eq.2).....	56
Figura 8 – Desvios dos valores de chuva (a) e da radiação solar (b) obtidos mediante a comparação entre os cenários Futuros A1B, A2 e B1 com o cenário atual (eq.2).	57
Figura 9 - Interface do MarkSim para a região de Piracicaba	58
Figura 10 - Produtividade de matéria seca e produtividade de sacarose, simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário atual	61
Figura 11 - Valores de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar para o cenário futuro A1B e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), para o cenário atual	63
Figura 12 - Valores de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar para o cenário futuro A2 e valores médios de produtividade de matéria seca (MS)	

	(Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado) para a condição A2	65
Figura 13	- Valores de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar para o cenário futuro B1 e valores médios de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado) para a condição B1	67
Figura 14	- Produtividades relativas de cana-de-açúcar considerando os cenários futuros (A1B, A2 e B1) em relação ao cenário atual para: Matéria Seca (condição Sequeiro) (A), Sacarose (condição Sequeiro) (B), Matéria Seca (condição Irrigado) (C), Sacarose (condição Irrigado) (D)	68
Figura 15	- Produtividade de matéria seca e produtividade de grãos, simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário atual	73
Figura 16	- Valores de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho para o cenário futuro A1B e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado) para a condição A1B	75
Figura 17	- Valores de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho para o cenário futuro A2 e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), para o cenário atual	77
Figura 18	- Valores de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho para o cenário futuro B1 e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), para o cenário atual	79
Figura 19	- Produtividades relativas de milho considerando os cenários futuros (A1B, A2 e B1) em relação ao cenário atual para: Matéria Seca (condição Sequeiro) (A), Grãos (condição Sequeiro) (B), Matéria Seca (condição Irrigado) (C), Grãos (condição Irrigado) (D)	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores de argila, silte e areia presentes no solo utilizado na pesquisa	41
Tabela 2 - Parâmetros de ecótipo do modelo CANEGRO (SINGELS et al., 2008).....	45
Tabela 3 - Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições (SINGELS et al., 2008).	46
Tabela 4 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições (SINGELS et al., 2008).....	47
Tabela 5 - Parâmetros de cultivar referente à variedade RB86-7515 de cana-de-açúcar parametrizada por Nassif (2012).	50
Tabela 6 - Parâmetros genéticos da cultura do milho presente no modelo CERES-MAIZE ..	52
Tabela 7 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário atual.	60
Tabela 8 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário futuro A1B.	62
Tabela 9 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário futuro A2.	64
Tabela 10 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário futuro B1.	66
Tabela 11 - Quantidade de água utilizada pela cultura da cana-de-açúcar e massa de sacarose por milímetro de água utilizada pela cultura da cana-de-açúcar nas condições de sequeiro e irrigado para os cenários atual e futuro, simulados pelo DSSAT/CANEGRO.	69
Tabela 12 - Produtividade de sacarose de cana-de-açúcar por hectare e por mm de água aplicada e lâmina de água aplicada em mm dia^{-1} na cultura da cana-de-açúcar, cenários atual e futuro, simulados pelo DSSAT/CANEGRO.	70
Tabela 13 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de grãos (PG) para as condições de cultivo de milho, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário atual.	72

Tabela 14 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de grãos (PG) para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário A1B.	74
Tabela 15 - Produtividade de matéria seca e produtividade de grãos para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário A2.	76
Tabela 16 - Produtividade de matéria seca e produtividade de grãos para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário B1.....	78
Tabela 17 - Quantidade de água utilizada pela cultura do milho e massa de grãos por milímetro de água utilizada pela cultura do milho nas condições de sequeiro e irrigado para os cenários atual e futuros.	81
Tabela 18 - Produtividade de grãos de milho por hectare e por mm de água aplicada e lâmina de água aplicada em mm dia ⁻¹ na cultura do milho nos diferentes cenários.....	82

1 INTRODUÇÃO

Na conjuntura atual no que se refere à energia renovável, o etanol é um dos principais, se não o mais importante, produto brasileiro. Proveniente da fermentação de açúcares, processo conhecido há séculos, tem se tornado o carro chefe do país como garantia de voz ativa nas discussões energéticas pelo mundo afora.

A primeira política pública importante no país referente ao uso do etanol como combustível foi o programa Pró-Álcool. Criado na década de 70 com o objetivo de amenizar as crises do petróleo que elevaram os preços da gasolina, na época a principal fonte de energia para automóveis.

Atualmente, o etanol em conjunto com a gasolina é uma opção para o consumidor decidir qual combustível utilizar nos automóveis do Brasil. Qualquer carro pode utilizar um desses combustíveis devido ao sucesso da tecnologia de motores bicomustíveis, denominada “carros flex”. Nessa questão energética, o Brasil se encaixa como sendo um dos principais protagonistas por se tratar do maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. No caso do milho, ressalta-se um problema de logística, cuja solução pode ser a produção de etanol. Esses dois fatores, principalmente o primeiro, faz com que o Brasil venha sendo considerado o país com maior potencial em desenvolver energias limpas. Portanto, a fim de otimizar cada vez mais os processos agrícolas e buscar atingir a máxima produção com maior segurança na comercialização dos produtos das safras de cana e milho, surge a necessidade de pesquisas que venham a utilizar ferramentas computacionais (*softwares*) que possam auxiliar na previsão de safra de um determinado cultivo.

Esses *softwares* usualmente utilizam como dados de entrada: dados climáticos da região, características de solo e manejo das culturas além do estado nutricional e sanitário das plantas para indicar qual será a produção da lavoura. Tais modelos são algoritmos que cruzam todas essas informações e, em conjunto, indicam uma decisão final. Um exemplo desses *softwares* é o DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer* ou Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia) que contém internamente modelos que simulam o crescimento e o desenvolvimento de culturas ao longo do tempo, utilizando informações climáticas, pedológicas e da cultura em questão. Em busca de sistemas agrícolas mais sustentáveis, a utilização destes *softwares* é importante para que se tenha alguma noção de qual “caminho” o cultivo está tomando no decorrer do tempo juntamente com o decorrer

dos acontecimentos agrícolas, assim, tornando possível a tomada de decisões sobre o processo produtivo.

Sabe-se também que o manejo racional da irrigação tem demonstrado uma grande importância na agricultura moderna, tendo em vista que cada vez mais há uma busca por redução de perdas e maiores ganhos econômicos, além da grande influência que a mensuração e aplicação correta da água tem sobre uma agricultura sustentável do ponto de vista ambiental. Levando-se em consideração essa importância, constantemente aparecem alternativas de “quando” e “como” deve ser feita a irrigação das culturas, sejam essas alternativas variáveis aos mais diversos custos e tecnologia utilizada.

Juntando a tudo isso a questão das alterações climáticas, há a necessidade de se dispor de vários sistemas para simular cenários climáticos futuros. Os mais utilizados são os relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel of Climate Changes*) os quais indicam diversas variabilidades climatológicas de acordo com o desenvolvimento socioeconômico de cada região. Nessa situação, surge um outro *software* denominado MarkSim (*DSSAT weather file generator*), que se destaca por propiciar essas alterações climáticas (cenários futuros) no formato que o modelo DSSAT necessita, tornando a sua aplicação mais fácil, rápida e eficiente.

Portanto, a presente pesquisa teve como objetivo determinar e comparar lâminas de irrigação para as culturas de cana-de-açúcar e milho, para a região de Piracicaba, SP, mediante a aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE, diante de cenários futuros, os quais simulados pelo modelo MarkSim.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Aspectos na produção de cana-de-açúcar e milho

2.1.1.1 Cana-de-Açúcar

A cultura da cana de açúcar (*Saccharum officinarum*) apresenta grande importância para a economia brasileira por contribuir em grande escala para geração de divisas. Isso se dá, principalmente, pela amplitude de sua utilização, a qual pode ser empregada de modo *in natura*, como forragem na alimentação animal, na produção de açúcar, etanol, energia, aguardente, rapadura e melado.

A história brasileira está diretamente ligada à cana-de-açúcar. Desde os primórdios, na época do descobrimento, colonizadores decidiram implantar a produção de açúcar para a ocupação da terra e fornecer o açúcar ao continente europeu.

Atualmente no Brasil, a cultura da cana-de-açúcar ocupa uma área aproximada de 8,6 milhões de hectares, com produtividade média de 70 t ha⁻¹ obtendo uma safra total de aproximadamente 596 milhões de toneladas ano⁻¹, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor, com uma área de 4,5 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013). É importante lembrar que as pressões mundiais pelo uso de combustíveis renováveis e tentativas de diminuição da emissão de gases que contribuem ao efeito estufa deverão contribuir para um aumento da área de cana-de-açúcar no Brasil para produção de etanol.

Os principais países produtores de cana-de-açúcar atualmente são: Brasil, Índia e China (FNP, 2008), sendo que no Brasil destacam-se os Estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul, Alagoas e Pernambuco. Na média, 50% da produção da cana-de-açúcar brasileira são convertidos em álcool e 40% em açúcar (CONAB, 2013).

Nesse contexto, a cana-de-açúcar destaca-se no âmbito nacional como sendo uma cultura energética e devido à atual preocupação ambiental, mundial, o álcool é o combustível do momento ao lado do biodiesel, tornando o Brasil o país com um grande potencial para produzir e exportar etanol (BRAGION, 2013).

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical perene, que se desenvolve em forma de touceira com perfilhos em sua base com mais de 2 m de altura e diâmetro com cerca de 5 cm (JAMES, 2004).

O sistema radicular é altamente ramificado do tipo fasciculado, melhor observado em sua parte superficial onde 85% encontram-se nos 50 primeiros centímetros e 60% nos primeiros 20 a 30 centímetros de forma orientada para baixo em sentido vertical (SEGATO et al., 2006). Se for levar em conta condições de uma cultura irrigada, Thompson (1976) encontrou em condições de solo argiloso, raízes de cana que absorveram água até 90 cm, enquanto que em solos arenosos a profundidade atingiu 1,2m. Já em condições sem irrigação, foi constatado que as raízes atingiram mais de 4m de profundidade, com absorção significativa de água em até 1,8m de profundidade.

O colmo representa a parte econômica no cultivo da cana-de-açúcar. Ele constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis à maturação, ocorre o acúmulo de grande quantidade de sacarose. O colmo da cana-de-açúcar é uma haste sem ramificações, com secção transversal aproximadamente circular, diferenciadas em segmentos compostos por um nó, que consiste em uma gema lateral situada junto à inserção foliar contendo primórdios radiculares e anel de crescimento, e um entrenó, que chegam de 15 a 25 cm, dependendo das condições meteorológicas experimentadas pela planta, onde ocorre o acúmulo de sacarose da planta (MARIN et al., 2009).

Segundo Inman-Bamber et al. (2002) a fração da biomassa pertencente ao colmo aumenta conforme ocorre o aumento da biomassa total, sendo que esta fração é nula antes do início do crescimento do colmo atingindo seu valor máximo quando ocorre a maturação da cultura. Esta fração é afetada diretamente por estresse hídrico, temperatura e cultivar. Keating et al. (1999) considera como constante o valor de 70% para fração do colmo na planta colhida, já em literatura podem-se encontrar valores entre 59% a 73%.

Durante o ciclo da cultura, ocorre um período de produção intensa de colmos, com pico entre 3º e 5º meses após o plantio de cana-de-açúcar de “ano e meio”, mas em seguida 50% destes são extintos e a população se estabiliza perto dos 9 meses de idade (BULL, 1975). Ao serem descartados durante o processo de competição, não constituem mais a matéria viva e, portanto, não consomem mais energia pelo processo respiratório (BARBIERI, 1993).

A folha da cana-de-açúcar é constituída por duas partes: bainha que liga a folha ao colmo da planta na base dos nós e a lâmina foliar que faz o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese. Trata-se de coletar a energia do meio externo, podendo chegar a 150 cm de comprimento e 10 cm de largura, sendo uma das partes das plantas que diferem as

variedades de cana-de-açúcar. Outras variações ainda podem ocorrer em alguns elementos da bainha como a lígula, a aurícula e o “*dewlap*” (JAMES, 2004).

Apesar de não apresentar benefício para o cultivo comercial por causar um processo chamado de isoporização do colmo, as plantas de cana-de-açúcar emitem inflorescência quando estimuladas. Berding et al. (2005) consideram que as condições para a ocorrência do florescimento são temperatura noturna acima de 21°C e tendência de redução do fotoperíodo. Além do fotoperíodo e da temperatura do ar, a boa disponibilidade de água no solo também é favorável ao florescimento (ALFONSI et al., 1987).

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), a cana-de-açúcar é cultivada em várias regiões localizadas principalmente entre os paralelos de 35°N e 35°S, em altitudes que variam do nível do mar a 1000 metros (Magalhães, 1987), o que engloba vários tipos de clima.

Como a cana-de-açúcar é uma planta do tipo C4, as altas eficiências fotossintéticas deve-se a altas intensidades luminosas. Com elevadas taxas de radiação, os colmos são mais grossos e curtos, as folhas são mais longas e verdes e o perfilhamento é mais intenso. Em condições de baixa irradiância, os colmos são mais finos e longos e as folhas são mais estreitas e amarelas (Rodrigues, 1995). Quanto maior a quantidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura e, logicamente, maior o seu desenvolvimento e acúmulo de açúcares (Barbieri, 1981).

A temperatura é, provavelmente, o fator ambiental que mais influencia no desempenho da cana-de-açúcar. De acordo com Fauconier e Bassereau (1975), temperaturas abaixo de 25°C ocasionam um crescimento lento da planta; entre 30 e 34°C a planta alcança o crescimento máximo e, acima de 35°C, volta a ser lento, tornando-se praticamente nulo sob temperaturas superiores a 38°C. Segundo Barbieri et al. (1979), a temperatura ideal para germinação das gemas da cana-de-açúcar situa-se entre 32 e 38°C. O crescimento ótimo é obtido com temperaturas médias diárias entre 22 a 30°C e, acima de 38°C, o crescimento é muito lento. A taxa de crescimento se reduz com temperaturas abaixo de 20°C, sendo essa a temperatura basal para a cultura. Para a maturação e colheita, são desejáveis temperaturas relativamente baixas, entre 10 e 20°C, pois o tempo frio retarda a taxa de crescimento vegetativo e o enriquecimento da sacarose na cana.

A cana-de-açúcar, por se tratar de uma espécie de grande eficiência fotossintética, tem seu ponto de saturação luminosa elevado. Assim, quanto maior for a intensidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura, o crescimento e o desenvolvimento da cultura serão mais eficientes e haverá um maior acúmulo de açúcares. Segundo Barbieri (1981), o fotoperíodo é um importante fator para o desenvolvimento das culturas e afeta o comprimento

dos colmos. Em fotoperíodos que variam entre 10 e 14 horas há um aumento no tamanho dos colmos. No entanto, em fotoperíodos longos, entre 16 a 18 horas, o colmo sofre redução em seu tamanho.

O aumento da concentração de CO₂ pode afetar os processos biológicos em diferentes níveis de organização (MOONEY et al., 1999). Segundo Warrick (1988), os efeitos de maiores concentrações de CO₂ sobre o crescimento e produtividade das plantas são benéficos e se originam dos efeitos de processos que ocorrem ao nível da folha. O acréscimo de CO₂, também chamado de efeito de fertilização por CO₂, aumenta a resposta fotossintética. Além disso, a elevação do CO₂ reduz a transpiração. Os estômatos das folhas se abrem para permitir a sua entrada para a fotossíntese, mas, ao fazê-lo, a planta inevitavelmente perde umidade por meio da transpiração. Concentrações maiores de CO₂ no ambiente fazem com que os estômatos se fechem parcialmente, o que reduz a condutância estomatal e, portanto, a perda de água. Essa resposta ocorre tanto nas plantas C3 como C4 (KIMBALL; IDSO, 1983; CURE, 1985; MORISON, 1987). O aumento nas taxas fotossintéticas e a melhoria nas relações hídricas observados nas plantas cultivadas em elevadas concentrações de CO₂, normalmente geram incrementos de biomassa e altura nessas plantas (POORTER; PÉREZ-SOBA, 2002; SOUZA, 2007).

Por ser uma planta C4, assim chamada porque os primeiros produtos da fotossíntese têm quatro átomos de carbono por molécula, a cana-de-açúcar experimenta um aumento na eficiência fotossintética em resposta a maiores níveis de dióxido de carbono.

2.1.1.2 Milho

Segundo Fancelli e Lima (1982), o milho pertence à família das Poaceas, à tribo Maydeae e ao gênero *Zea*, sendo o nome científico da espécie *Zea mays* L. A família Poacea, subdividida em várias tribos, a exemplo da Maydeae, a que o milho pertence, compreende sete gêneros, cinco deles asiáticos - Coix (capim rosário), Sclerachne, Polytocha, Chiconachne e Trilobchne - e dois americanos - tripsacum e *Zea*.

A cultura do milho (*Zea mays*) representa um dos principais cereais mais cultivados em todo o mundo, fornecendo produtos largamente utilizados para a alimentação humana e animal e matérias-primas para a indústria, principalmente em função da quantidade e da natureza das reservas acumulada nos grãos. Em função de sua multiplicidade de aplicações, o milho assume papel relevante em termos de aspectos socioeconômicos além de constituir-se

em indispensável matéria-prima para vários complexos agroindustriais (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Historicamente, o milho é um dos principais cultivos de grãos no Brasil. Sendo que no contexto atual, apresenta um apelo muito grande por ser diretamente tratado como alimento animal e humano, e por adquirir um importante papel no que diz respeito à energia renovável com produção de etanol.

Atualmente a cultura do milho ocupa uma área de 14,7 milhões de hectares, com uma produtividade média de 4,9 t ha⁻¹ resultando num total de pouco mais que 72 milhões de toneladas na produção (CONAB, 2013). O Paraná é o maior estado produtor do Brasil com uma produção de quase 17 milhões de toneladas. Os principais países produtores de milho são: China, Estados Unidos e Brasil sendo que no Brasil os estados que mais se destacam são: Paraná, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Rio Grande do Sul (CONAB, 2013).

De acordo com Fancelli e Dourado-Neto (2000), o ciclo da cultura compreende cinco etapas de desenvolvimento: (i) germinação e emergência: ocorre entre a semeadura e o aparecimento da plântula, cujo período varia entre 4 e 12 dias, em função da temperatura e umidade do solo; (ii) crescimento vegetativo, iniciado a partir da emissão da segunda folha, até o início do florescimento, cuja extensão varia em função do genótipo e de fatores climáticos, caracterizando e classificando diferentes genótipos entre ciclos superprecoces, precoces e normais; (iii) florescimento, estabelecido entre o início da polinização e o início da frutificação; (iv) frutificação, compreendida entre a fecundação e o enchimento completo dos grãos, cuja duração varia entre 40 e 60 dias; (v) maturidade: período compreendido entre o final da frutificação e o aparecimento da camada negra, sendo este relativamente curto e indicativo do final do ciclo de vida da planta.

Mangelsdorf (1974) descreve o milho como sendo uma planta altamente especializada para a produção de grãos, dependente do homem para sua sobrevivência, anual, robusta e ereta, medindo de um a quatro metros ou mais de altura, e cujos órgãos vegetativos são tipicamente anuais, não sobrevivendo mais que um período vegetativo. Entretanto, para uma melhor compreensão, é indicado descrever sua estrutura desde a semente.

Uma planta de milho, com cerca de 15 centímetros, dispõe de todas as estruturas formadas, e, posteriormente, seu crescimento é basicamente o aumento do volume e número de células. Para tanto, o embrião desenvolve-se originando o caule, do tipo colmo compacto com nós. Os seis a 10 nós abaixo da linha do solo emitem raízes adventícias responsáveis pela fixação da planta, sendo que o diâmetro do sistema radicular incrementado a cada nó, o que

confere um aspecto de cone invertido. Essas raízes emitem raízes capilares que se desenvolvem rapidamente e são responsáveis pela absorção de água e nutrientes (GOODMAN; SMITH, 1978).

A espiga é formada por uma ráquis, ou sabugo, ao longo do qual estão dispostos alvéolos contendo as espiguetas, sempre aos pares. Cada flor é recoberta por duas glumelas, e as duas flores são recobertas por um par de glumas. A flor é constituída de um ovário contendo apenas um óvulo, de onde se desenvolve um estilo-estigma com a extremidade livre dividida em duas. As glumas são mais curtas que a semente, embora alguns genótipos as apresentem bem desenvolvidas recobrando a semente - esses genótipos são denominados tunicados. Na extremidade superior da planta encontra-se a inflorescência masculina do tipo panícula, denominada pendão ou flecha, formada por um eixo central com ramificações laterais que também podem ramificar (GOODMAN; SMITH, 1978).

O colmo, além de suportar as folhas e partes florais, atua também como órgão de reserva. Tal acúmulo ocorre após o término do desenvolvimento vegetativo e antes do início do enchimento de grãos, já que, até esse ponto, todo carboidrato foi utilizado na formação de novas folhas (MAGALHÃES; PAIVA, 1993). Experimentos com remoção de folhas demonstram que o colmo diminui em peso, enquanto a espiga prossegue seu enchimento normal, indicando que há translocação de fotoassimilados do colmo para os grãos. Desta forma, estresse hídrico nessa etapa pode afetar o comprimento dos internódios, provavelmente pela inibição da elongação das células em desenvolvimento, reduzindo a capacidade de armazenagem de sintetizados no colmo (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000).

Com 85% a 90% da área foliar definida, pode ser observada a perda das quatro primeiras folhas e o desenvolvimento das raízes adventícias (“esporões”), a partir do primeiro nó presente ao nível do solo (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000).

A produção de fotoassimilados não é função direta da área foliar, mas da fotossíntese líquida, que diminui com a idade em razão do auto-sombreamento das folhas. Estudos demonstram que a taxa de fotossíntese por unidade de área da folha é mais alto em folhas que completaram recentemente sua expansão com relação às folhas mais novas e mais velhas. Também a taxa de fotossíntese por unidade de área foliar aumenta com relação à posição superior desta na planta. Alguns autores consideram ainda o sombreamento causado pelos pendões (MAGALHÃES; PAIVA 1993; TANAKA; YAMAGUCHI, 1977).

Quanto ao ciclo, a planta de milho é originalmente de dias curtos; portanto, a ocorrência de dias longos pode aumentar sua fase vegetativa e número de folhas. Contudo, trabalhos recentes demonstram que a resposta ao fotoperíodo só ocorre em latitudes

superiores a 33° (VIEIRA JUNIOR, 1999). O fato fica bem evidenciado nos trabalhos citados por Nickell (1983), em que, com auxílio de refletores, foram cultivadas plantas em ambientes simulando dias curtos e longos até o início do florescimento. Posteriormente, as plantas foram transferidas para condições ambientes de fotoperíodo; as plantas cultivadas em períodos longos de iluminação eram maiores, apresentavam muitas folhas, maior índice de área foliar e maior rendimento de grãos do que aquelas desenvolvidas sob períodos curtos de iluminação.

Berlato e Sutili (1976) destacam que o período correspondente aos estádios reprodutivos apresenta pequena variação segundo a oferta ambiental, assim, os genótipos são classificados quanto ao ciclo segundo o somatório diário das diferenças entre a temperatura média do ambiente e a temperatura basal da planta, em graus-dias. É importante considerar que a planta não apresenta resposta a temperaturas inferiores à temperatura basal, considerada para os germoplasmas brasileiros como 10°C e acima de 30°C, respectivamente o limite inferior e superior, na determinação dos graus-dias (DOURADO NETO, 1999; MAGALHÃES; PAIVA, 1993; TANAKA; YAMAGUCHI, 1977).

2.1.2 Manejo da água em cana-de-açúcar e milho

2.1.2.1 Cana-de-açúcar

Segundo Aude (1993), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia com o estágio vegetativo em que a cultura se encontra e a cultivar utilizada sendo, portanto, uma função da área foliar, estágio fisiológico e densidade radicular. Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é de 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo e o manejo da irrigação deve ser feito de acordo com as tensões de água no solo, recomendadas para cada período do ciclo fenológico.

Souza et al. (1999), utilizando sistema de irrigação por aspersão tipo canhão encontraram para as variedades RB72-454, RB76-418 e SP70-1011, máximas produtividades em colmos de 155,8, 126,9 e 141,9 t ha⁻¹, com lâminas totais de água de 1.568, 1.424 e 1.589 mm, respectivamente, em 13 meses de cultivo. As máximas produtividades em açúcar estimadas para as mesmas variedades foram de 20,7, 17,1 e 19,3 t ha⁻¹, para as lâminas de 1.678, 1.874 e 1.602 mm, respectivamente, nos mesmos 13 meses de cultivo. Gomes (1999) obteve, com cana-planta, variedade RB72-454, e uma lâmina média de 1.195 mm, uma produtividade média de colmos e em açúcar de 130 e 17 t ha⁻¹, respectivamente.

Maule et al. (2001) encontraram no Estado de São Paulo, para a variedade SP79- 1011, produtividades médias de 149, 154 e 170 t ha⁻¹, respectivamente, para precipitações totais de 1.478 mm com 14 meses de cultivo, 1.695 mm com 17 meses de cultivo e 1.829 mm com 19 meses de cultivo; já Azevedo (2002) encontrou para a mesma variedade nos tabuleiros costeiros da Paraíba, produtividades de 52, 79, 93 e 92 t ha⁻¹ para precipitação efetiva mais irrigação de 609, 761, 905 e 1.043 mm, respectivamente, com doze meses de cultivo.

O consumo diário de água pela cana-de-açúcar, nas principais regiões produtoras do país, depende da variedade, do estágio de desenvolvimento da cultura e da demanda evapotranspirométrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial) em geral, e tem variado de 2 a 6 mm dia⁻¹. A cultura necessita de 250 g de água para formar 1 g de matéria seca (BERNARDO, 2005).

Para a cana-de-açúcar, existem basicamente quatro formas de aplicação da água, as quais caracterizam os principais métodos de irrigação: superfície, aspersão, localizada e subsuperficial. Para a escolha do sistema correto, deve-se identificar a aptidão de cada sistema às condições específicas consideradas e, por meio de uma análise técnica e econômica criteriosa, definir qual o sistema mais recomendável (DALRI, 2006).

Por sua vez, os déficits hídricos provocam a redução da área foliar e no acúmulo de biomassa com ligeiro impacto na produção final (WIEDENFELD, 2000). O déficit hídrico severo ocasiona um impacto maior na produtividade dos colmos e de sacarose. Inman-Bamber (1994) concluiu que o acúmulo de biomassa é fortemente reduzido com déficit hídrico superior a 120 mm anuais e o acúmulo de sacarose no colmo é afetado com déficit hídrico superior a 145 mm anuais (ARGETON, 2006). A deficiência hídrica diminui a velocidade e o fluxo de translocação tanto para a região apical como para as raízes diminui à medida que a restrição hídrica se acentua (PARANHOS apud MACHADO, 1987). O consumo de água pela cana-de-açúcar varia de acordo com o estágio de desenvolvimento e depende da variedade. A perda de água pela cultura durante seu ciclo vegetativo é função de sua área foliar, estágio fenológico e densidade do sistema radicular. O consumo de água da cultura da cana-de-açúcar varia em função do ciclo da cultura (cana planta ou soca), do estágio de desenvolvimento da cultura (ciclo fenológico), das condições climáticas, da água disponível no solo, da variedade de cana-de-açúcar e de outros fatores (SANTOS, 2005).

Peres (1988) também concluiu que a relação entre o consumo de água e a produção da cana soca foi de 12,1 mm t⁻¹. Segundo Gava (2011), a irrigação em cana-de-açúcar é responsável por um aumento de até 24% na produção de colmos e um aumento de 23% na

produção de açúcar. Isso mostra a importância da prática na cultura, podendo alcançar regiões que anteriormente não era possível fazer o cultivo.

O déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semi-áridas do mundo, de vez que mesmo em regiões consideradas climaticamente úmidas, a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o crescimento (TAIZ; ZEIGER, 1991). Carretero (1982) obteve aumento de 20 t ha^{-1} , o que corresponde a um acréscimo de 16% em relação à cana não irrigada, primeira soca, na região de Piracicaba, SP, sob condições de irrigação por gotejamento.

2.1.2.2 Milho

De acordo com Doorenbos e Kassan (1994), o milho de ciclo médio requer 500 a 800 mm de água, dependendo do clima, para uma boa produção. Shaw (1977), analisando os resultados obtidos por diferentes autores, verificou que o consumo de água do milho variou de 410 a 610 mm. Fancelli (1991) relata uma exigência mínima de 300 a 350 mm de água para uma produção satisfatória sem uso de irrigação, porém, essa quantidade deve ser bem distribuída durante o ciclo da cultura.

O milho de ciclo médio, cultivado para a produção de grãos secos, consome, em média, de 400 a 700 mm de água durante todo o seu ciclo, dependendo das condições climáticas (RESENDE et al., 2003).

Segundo Albuquerque e Resende (2002), o período de máxima exigência de água no milho é na fase do embonecamento ou um pouco depois dele; por isso, déficits de água que ocorrem nesse período são os que provocam maiores reduções de produtividade. Déficit anterior ao embonecamento reduz a produtividade em 20 a 30%; no embonecamento, em 40 a 50% e após, em 10 a 20%.

Santos e Carlesso (1998), concluíram que plantas cultivadas sob condições adequadas de suprimento hídrico são, normalmente, menos resistentes ao déficit hídrico e, quando da ocorrência rápida do déficit hídrico, os mecanismos morfofisiológicos são severamente afetados, pois a planta necessitaria adaptar-se rapidamente a esta situação de déficit. Entretanto, quando o déficit hídrico ocorre gradualmente e/ou no início do ciclo, mais facilmente ocorre a adaptação das plantas. A tolerância da planta a essa escassez de água parece ser um importante mecanismo de resistência para manter o processo produtivo em condições de baixa disponibilidade de água às plantas.

Para o milho, as maiores exigências em água se concentram na fase de emergência, florescimento e formação do grão (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000). De acordo com Bergonci e Bergamaschi (2002), o maior consumo de água pela cultura de milho é verificado por ocasião do florescimento, uma vez que, nessa fase, o índice de área foliar das plantas é máximo, logo após a emissão da folha bandeira. Assim, a sensibilidade dos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos e, por outro lado, a elevada transpiração que ocorre no mesmo período, justifica a consideração do período compreendido entre a emissão da inflorescência masculina e o início da formação dos grãos como sendo extremamente crítico quanto ao suprimento de água. A necessidade hídrica neste período é ainda mais elevada, pois é necessário que haja máxima fotossíntese mediante a coincidência entre a máxima disponibilidade de radiação solar e a ocorrência de temperaturas entre 25° C e 30° C, para a obtenção de maiores produtividades. Segundo Company (1984), a formação e o desenvolvimento interno das flores masculinas e da espiga, bem como a maturação dos grãos de pólen e dos óvulos requerem pronta disponibilidade de nutrientes na forma assimilável no solo, cuja viabilidade está condicionada à ausência de restrições hídricas. Fancelli e Dourado-Neto (2000) relatam que a ocorrência de deficiência hídrica de uma semana durante o florescimento masculino pode implicar numa queda de produção em torno de 50%, enquanto que após a polinização, sob as mesmas condições, as perdas podem chegar a 25%.

Henckel (1964) afirmou que se houver deficiência hídrica uma semana após a emissão das anteras, pode ocorrer queda de 50% na produção; deficiências posteriores resultarão em danos da ordem de 25 a 30%; de acordo com Aldrich et al. (1982) dois dias de estresse hídrico no florescimento diminui o rendimento em mais de 20% e, de quatro a oito dias, em mais de 50%.

Quanto à água, nos estádios vegetativos iniciais da planta de milho em clima ameno o consumo de água não excede 2,5 mm dia⁻¹, podendo atingir 6,5 a 7,5 mm dia⁻¹ durante a floração e frutificação. Entretanto, em condições de alta temperatura e baixa umidade relativa do ar o consumo máximo pode atingir 10 mm dia⁻¹. Apesar do fato de que as maiores exigências de água se concentram nas fases de emergência, florescimento e formação do grão, o período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após a emissão do pendão é fundamental para o rendimento de grãos; o requerimento de suprimento hídrico satisfatório aliado a temperaturas adequadas torna crítico esse período (VIEIRA JUNIOR, 1999).

2.1.3 Modelagem matemática na agricultura

A arte da agricultura é uma prática resultante da interação entre água-solo-planta e o ambiente em que ela está inserida. Nesse meio deve-se levar em conta todo e qualquer tipo de fator que cause uma reação nas plantas. Este pode ser de ordem climática, edáfica e de manejo. Essa interação tão complexa deve ser estudada com a finalidade de se conseguir prever qual a qualidade e a quantidade do produto final tão esperado.

O'Leary (2000) salientou que devido à complexidade da natureza, os estudos acadêmicos são centrados em pequenas áreas de interesse, no qual gradualmente acumulam-se conhecimento. Para uma análise real do sistema, a reunião de todos esses estudos o torna complexo. Nesse caso, para se fazer um estudo descritivo de alto nível, modelos matemáticos são ferramentas que podem auxiliar tornando o trabalho mais simples.

Segundo Monteith (1996), modelos de simulação de cultura são conjuntos de equações matemáticas que estimam o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura a partir de coeficientes genéticos e variáveis ambientais, os quais permitem diversos componentes da produção.

Tais modelos podem ser divididos em empíricos ou mecanísticos. Os modelos empíricos são descrições de dados observados os quais todas as relações matemáticas são descritas a partir da observação de um sistema. Diz-se que esses modelos são mais convenientes ao produtor rural por serem mais simples.

Já os modelos mecanísticos são mais complexos. São baseados na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da cultura. Dessa forma, oferecem mais possibilidades de manipulação e melhoria do sistema. Wallach et al. (2001) afirmaram que os modelos mecanísticos tornaram-se mais importantes nos últimos anos como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como ferramentas de auxílio na tomada de decisão sobre o manejo das culturas.

As simulações computacionais permitem avaliar várias condições de produção agrícola considerando várias condições ambientais possíveis. As simulações da produção, considerando várias condições ambientais, possibilitam ao produtor, determinar as melhores culturas/variedades e formas de manejo para reduzir os prejuízos devido às condições adversas de cultivo. Além disso, os modelos agrícolas permitem determinar os riscos envolvidos para as culturas em cada região agrícola auxiliando o planejamento de políticas públicas (GODOY, 2007).

Os modelos de crescimento de culturas apresentam potencial de uso para responder questões em pesquisa, manejo de culturas e planejamento, auxiliando no entendimento sobre as interações genéticas, fisiológicas e do ambiente, e nas decisões de práticas culturais antes e durante o período da cultura no campo, como aplicações de fertilizantes e irrigação (BOOTE et al., 1996).

Para a cana-de-açúcar houve uma evolução de modelos de previsão ao longo do tempo. O início se deu com Bull e Tovey (1974) na Austrália sendo que tal estudo gerou a possibilidade do surgimento do APSIM – Sugarcane (KEATING et. al, 1999) e o QCANE (LIU; BULL, 2001). Thompson (1976) elaborou na África do Sul um modelo que é o precursor do atual modelo CANEGRO/DSSAT (BEZUIDENHOUT, 2000; INMAN-BAMBER; KIKER, 1997).

No Brasil, o SIMCANA (PEREIRA; MACHADO, 1986) e o MST (BARBIERI, 1993) tiveram seus primórdios estudados por Ometto (1974). Estes garantiam que um dos fatores importantes para a boa utilização da cana-de-açúcar era a qualidade da matéria prima, porém não levava em conta a fisiologia envolvida na maturação.

Já para o milho, um dos primeiros modelos propostos para a estimativa da produção de fotoassimilados em função da área foliar e ângulo de inserção das folhas, além de considerar outros elementos inerentes ao dossel da cultura, como velocidade do vento, CO₂, radiação e transpiração, foi o SPAM, no qual posteriormente foi incluída uma equação considerando a atividade estomática (DUNCAN, 1975). O modelo ELCROS foi desenvolvido para simular o crescimento da planta de milho (WIT; GOUDRIAAN, 1978), assim como o modelo SIMAIZ (DUNCAN, 1975). Entretanto, todos são limitados, pois não levam em consideração todos os fatores e interações entre o ambiente e a planta, caso do modelo SIMAIZ, que considera que a produção de fotoassimilados seja função única das interações entre radiação, temperatura e área foliar.

Dentre os modelos desenvolvidos para a cultura, destaca-se o CERES-MAIZE, componente de uma série de modelos de simulação dos processos fisiológicos chamada CERES (*Crop Environment Resouce Synthesis*), por levar em consideração dados relacionados às condições atmosféricas, ao solo, às constantes genéticas e às práticas de manejo. O modelo tem sido testado em diversos locais, com bons resultados de estimativa de rendimento. Citações de Lima (1995) sobre trabalhos que utilizam dados históricos de temperatura e precipitação pluvial para representar cenários futuros, substituindo-os por dados reais, e empregando o modelo CERES-MAIZE na previsão de rendimento de safra (nos estados que compõem o “cinturão do milho” (*corn belt*) nos EUA), concluíram que a

variância associada à previsão é relativamente constante até o florescimento, reduzindo durante o ciclo.

2.1.4 Sistema de suporte a decisão e transferência de tecnologia (DSSAT)

O Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia – DSSAT (*Decision Support System Agrotechnology Transfer*) simula o crescimento e desenvolvimento de culturas ao longo do tempo, levando-se em conta fatores climáticos, edáficos, o manejo e os aspectos genéticos da cultura. Também auxilia na organização de dados de clima, solo, observações de campo, condições experimentais e informações genotípicas (JONES et al., 2003).

Trata-se de um programa com modelagem mecanística e baseia-se no enfoque de sistemas, compreendendo as interações dos componentes inseridos em um sistema específico. Dessa forma, pode-se simular interações entre as culturas e o ambiente de diversas maneiras, prever o funcionamento do sistema de produção e observar possíveis distúrbios recorrentes devido a presença de um ou mais componente.

Logo que o usuário está seguro de que o modelo simula o crescimento e desenvolvimento de uma cultura numa localidade, análises mais complexas do desempenho do cultivo podem ser conduzidas para diferentes tipos de solo, cultivares, épocas de semeadura, população de plantas e estratégias de irrigação e adubação, com a finalidade de encontrar práticas que sejam mais favoráveis e que envolvam menor risco (JONES et al., 1996; JAMES; CURTFORTH, 1996; MAVROMATIS et al., 2002).

Para o sistema de produção de cana-de-açúcar, o DSSAT utiliza o modelo DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008). Sendo baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES; KINIRY, 1986) e desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991).

Singels et al. (2008) descreveram as principais características do modelo DSSAT/CANEGRO, que seguem: a emergência do perfilhamento primário é simulada quando um período específico de tempo térmico foi acumulado a partir do plantio ou do corte, o início do crescimento de colmos é simulado quando um período específico de exigência térmica é atingido a partir de um perfilhamento primário. O pico de perfilhamento ocorre após um período de tempo térmico acumulado desde a emergência. 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.

A interceptação da radiação fotossinteticamente ativa é calculada de acordo com a “Lei de Beer”, que utiliza valores de índice de área foliar total e índice de área foliar de folhas verdes para o cálculo da evapotranspiração, utilizando o modelo de Penman-Monteith seguindo a parametrização FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

Segundo Nassif (2010) dentro de cada xFile, deve-se informar as condições do clima local, do solo em que se está trabalhando, qual o cultivar ou variedade ou híbrido utilizado. Dessa forma ambos os modelos conseguirão simular tais condições e estimar a produção das culturas.

Os modelos CERES do programa DSSAT simulam o crescimento diário de gramíneas incluindo o milho. Esses modelos baseiam-se em quatro tipos de variáveis de entrada: solo, clima, manejo do cultivo e genótipos (BOULLON et. al., 1996).

O modelo CERES-MAIZE segundo Jones e Kiniry (1986), é um dos mais detalhados para prever estádios fenológicos e número de folhas do milho. São considerados a sensibilidade ao fotoperíodo e os efeitos da alta temperatura no número final de folhas. Além disso, três componentes do desenvolvimento vegetativo podem ser testados independentemente: iniciação de folhas, aparecimento de primórdios foliares e iniciação da floração masculina (KINIRY, 1991).

O modelo CERES-MAIZE está agrupado em um Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Tecnologia (DSSAT) e tem sido amplamente utilizado em todo o mundo. Ele considera o processo do balanço de água no solo, a interceptação da radiação pelo dossel, a produção de matéria seca e a partição da biomassa (KINIRY et al., 1997). Sua versão 3.1 ensina ao usuário obter o desempenho espacial das simulações e das análises dos resultados (THORNTON et al., 1997).

Freitas et al. (2004), encontraram que o modelo CERES-MAIZE superestima os valores de produtividade, de IAF e de matéria seca total quando a lâmina d’água aplicada é maior que a adequada. Porém, no mesmo trabalho, ele afirma que o modelo apresenta valores de produtividade, IAF e de matéria seca total, pouco superiores ao encontrado nos experimentos.

Borges Alves et al. (2012) testaram o modelo CERES-MAIZE e conseguiram um bom desempenho na determinação das janelas de semeadura do milho bem como a produtividade média esperada. O que mostra ainda mais a importância e a boa utilidade do modelo.

Gedanken et al. (2003) mostraram a partir do modelo CERES-MAIZE que nas regiões de Janaúba e Sete Lagoas no estado de Minas Gerais, sistemas de irrigação, como o aspersão por pivô central, não apresentam bom retorno econômico. Dessa forma, esta é mais uma possibilidade de utilização dos modelos provenientes do pacote DSSAT.

2.1.5 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas podem ter um impacto significativo na economia mundial no século XXI (HOUGHTON et al., 1996), afetando todos os setores econômicos em um certo grau. A produção agrícola, entretanto, é o setor mais sensível e vulnerável, já que o clima é um fator determinante na produtividade das culturas (WATSON et al., 1996).

Essas mudanças afetam diretamente a agricultura e as áreas florestais brasileiras. Nobre (2005) e Nobre et al. (2005) apresentam resultados sobre o comportamento dos biomas brasileiros por meio da aplicação dos cenários do IPCC para 2091-2100 no Modelo de Vegetação Potencial do CPTEC-INPE, no qual se percebe, em maior ou menor grau, a desertificação do semi-árido nordestino e uma “savanização” da Amazônia, como se refere o autor. Embora a valoração dessas alterações seja impraticável, já se antevê uma perda significativa de biodiversidade pela dificuldade de adaptação desses biomas a mudanças climáticas da ordem de poucas décadas (MEDLYN; McMURTRIE, 2005).

Alguns estudos simulando os impactos sobre a agricultura por meio de modelos matemáticos foram apresentados por Siqueira et al. (2001) para o trigo, milho e soja, por Marengo (2001), Pinto et al. (2002) e Assad et al. (2004) para o café, e por Nobre et al. (2005) para o milho, feijão, arroz, soja e café. Estes autores apresentam ainda as perdas econômicas anuais provocadas pelo aumento de 1°C na temperatura, chegando a valores de 375 milhões de dólares para o café, somando os estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo, e 61 milhões de dólares para o milho em São Paulo. Além desses, outros estudos contemplam efeitos sobre pragas, doenças, solos e outros aspectos do sistema produtivo agrícola.

Alexandrov et al. (2002) investigaram a vulnerabilidade e adaptação de culturas em diferentes tipos de solos e às alterações climáticas utilizando-se, para tal, modelos de estimativas de mudanças climáticas regionais validados para a região nordeste da Áustria.

Foram feitas análises estratégicas para avaliar o impacto das mudanças climáticas na produção agrícola e adaptação agrotecnológica com a utilização de modelos de crescimento de culturas. Nesse estudo, foram criados cenários com combinações de alterações de temperatura, precipitação e concentração de gás carbônico na atmosfera. Os autores notaram que os resultados estimados pelos modelos DSSAT CERES e CROPGRO, do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), foram coerentes quando comparados com os dados medidos e que a maioria dos processos fisiológicos será afetada pela temperatura do ar. Segundo os autores, o aquecimento diminui a duração do período de crescimento, como resultado do acentuado desenvolvimento fenológico.

Marin et al. (2009) relataram que a simulação de cenários futuros é útil para se quantificar a vulnerabilidade dos setores produtivos e também para planejar ações de acordo com essas novas condições. Ainda utilizando o modelo CANEGRO, observaram uma tendência de elevação da produtividade para o estado de São Paulo em regiões localizadas ao sul do estado.

Além desses aspectos há um modelo que vem sendo utilizado juntamente ao DSSAT para simular cenários futuros, denominado MarkSim. Sua facilidade consiste em disponibilizar os dados climatológicos nos formatos utilizados pelo DSSAT.

MarkSim® é uma terceira ordem de Markov gerador de precipitação (JONES; THORNTON, 1993, 1997, 1999, 2000; JONES et al., 2002), que foi desenvolvido por mais de 20 anos. O algoritmo básico do MarkSim é um simulador de chuvas diárias que utiliza uma cadeia de Markov de terceira ordem com um processo para prever a ocorrência de um dia de chuva. Um modelo de terceira ordem mostrou-se necessário para climas tropicais, enquanto que um modelo de ordem menor pode ser suficiente para climas temperados (JONES; THORNTON, 1993).

O ponto crucial para a eficiência do modelo MarkSim em simular a variância real de precipitação observada tanto nas regiões tropicais e temperadas é a sua inovadora forma de usar reamostragem dos parâmetros do processo de Markov. Para fazer isso, são necessárias 12 probabilidades mensais de transferência de linha de base (ou seja, a probabilidade de um dia chuvoso e mais três consecutivos dias secos), os coeficientes de probabilidade relacionados com o efeito de cada um dos três dias anteriores e a matriz de correlação de 12 probabilidades de linha de base.

Seus cenários são A1b, A2 e B1 e para obtê-los é necessária apenas a posição geográfica da localidade. A partir da posição geográfica da localidade, o modelo MarkSim utiliza os dados climáticos atuais da região e a partir das projeções do IPCC, gera dados

climáticos para anos futuros. Atualmente, a máxima projeção existente é para o ano de 2095, o qual será utilizado nessa pesquisa.

Hartkamp et al. (2003) diz ainda que com eventos extremos interpretados com cuidado e com dados de previsão climática insatisfatórios, o MarkSim é uma opção viável de simulação, podendo suprir a necessidade de dados para cenários futuros e obtendo bons resultados.

Por outro lado, Jones e Thornton (2013) dizem que o modelo MarkSim trata-se de uma forma direta em se estudar os potenciais impactos das mudanças climáticas nos sistemas agrícolas nas próximas décadas.

Os três cenários presentes no modelo MarkSim foram provenientes do relatório do IPCC (Intergovernmental Panel Climate Changes) de 2001 (INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGES - IPCC, 2001a, 2001b, 2001c) são o A1B, A2 e B1. Cada um possui suas respectivas características que são as seguintes:

A1B: Crescimento Econômico rápido; população global atinge seu pico na metade do século e depois passa a declinar; globalização com redução das diferenças regionais; redução das diferenças nas rendas per capita regionais; equilíbrio na utilização de fontes de combustíveis fósseis e não fósseis.

A2: Mundo heterogêneo; manutenção de identidades locais; crescimento contínuo da população; desenvolvimento econômico orientado para o âmbito regional; desenvolvimento tecnológico fragmentado.

B1: Soluções locais para sustentabilidade econômica, social e ambiental; população crescente e contínua, porém em taxas mais baixas; desenvolvimento econômico e tecnológico menos acelerado e diversificado, orientado em direção à proteção ambiental e igualdade social.

2.2 Material e Métodos

A pesquisa foi realizada junto ao Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, situada no município de Piracicaba, SP, clima Cwa segundo a classificação de Köppen, (22° 43’ 33” de latitude sul e 47° 38’ 00” de longitude oeste, com 546 m de altitude) e conduzida em 3 etapas distintas: 1) entendimento dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE e utilização/elaboração de um banco de dados climáticos, dados edáficos para a cidade de Piracicaba,SP; 2)

entendimento dos cenários futuros e as projeções do IPCC (*Intergovernmental Panel Climate Changes*) para simular diferentes cenários de mudanças climáticas, elaboração e utilização de um banco de dados climatológicos mediante a aplicação do modelo MarkSim e 3) análise estatística feita para os dois cultivos (cana-de-açúcar e milho) visando obter eventuais diferenças entre o manejo de irrigação adotado na época atual em relação a cenários futuros, simulados pelos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE.

2.2.1 Considerações iniciais sobre os modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE

Os modelos CANEGRO e CERES-MAIZE, presentes no DSSAT, dependem de dados de entrada de clima, solo e da cultura para que se possa executá-los. Dessa forma, deve-se criar perfis para a entrada desses dados e cada perfil é denominado de “xFile”.

Os dados climáticos foram obtidos junto ao banco de dados da estação meteorológica convencional da Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, em Piracicaba, SP, referente ao período de 1982 a 2012, totalizando uma série de dados de 31 anos. Os dados coletados foram: radiação solar MJ m⁻² dia⁻¹, temperatura máxima e mínima diárias do ar (°C), precipitação (mm) os quais foram empregados na estimativa da evapotranspiração potencial, com base na equação de Penman-Monteith (Equação 1) no balanço hídrico climatológico, no balanço hídrico de cultura e nas produtividades potencial e real da cana-de-açúcar e do milho.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta \left(R_n - G \right) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

em que:

ET_o - evapotranspiração de referência, mm d⁻¹

Δ - gradiente da curva pressão vapor vs temperatura, kPa °C⁻¹

R_n - radiação solar líquida disponível, MJ m⁻² d⁻¹

G - fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹

γ - constante psicrométrica, kPa °C⁻¹

u₂ - velocidade do vento a 2 m, m s⁻¹

e_s - pressão de saturação do vapor de água atmosférico, kPa

e_a - pressão atual do vapor de água atmosférico, kPa

Ta - temperatura média diária do ar, °C

Pelas Figuras 1A e 1B podem ser conferidos os valores de chuva (mm), Temperatura Média (°C), Temperaturas Máximas e Mínimas (°C) e Radiação Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para a cidade de Piracicaba, SP referente ao período de 1982 a 2012 (série de 31 anos).

Pela Figura 2 pode ser conferida a interface do DSSAT para inclusão dos dados climatológicos em seu banco de dados.

É importante ressaltar que a fase de inclusão de dados climatológicos no DSSAT exige certo cuidado por parte do usuário devido ao fato de que há constantes alterações pelo próprio modelo no tratamento dos dados, devido às unidades das grandezas físicas necessárias. No caso dessa pesquisa escolheu-se trabalhar com o “*YEARDOY*” que é a forma como o modelo interpreta o dia do ano, o qual é expresso pelo dia Juliano seguido pelo ano (Ex: 01/01/2014 = 00114). As temperaturas foram inseridas em graus Celsius (°C), a radiação solar em Mega Joule por metro quadrado dia ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e a chuva em milímetro (mm).

2.2.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi um Latossolo Vermelho localizado em área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas LEB/ESALQ/USP (ROCHA, 2013).

Os dados de solo relevantes ao modelo são: teores de argila, silte e areia (Tabela 1), coloração do solo, drenagem profunda, escoamento superficial, declividade, profundidade, horizonte principal, teor de carbono, teor total de nitrogênio, CTC (capacidade de troca catiônica) e pH em água.

Tabela 1 - Teores de argila, silte e areia presentes no solo utilizado na pesquisa

Profundidade (cm)	Horizonte	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
20	A	61	17	22
40	AA	61	19	20
120	AB	61	17	22

Figura 1 - (A) Médias mensais de temperatura (°C) e chuva (mm) e (B) Média da Radiação Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Média das Temperaturas Máximas e Mínimas (°C), ambos para o período de 1982 a 2012 para Piracicaba, SP (série de 31 anos)

Figura 2 - Interface do DSSAT para a inclusão dos dados climáticos nos modelos presentes no pacote

Os teores de argila, areia e silte são importantes para se definir a classe textural do solo e muitas vezes influenciam na coloração. Nesse caso, o solo apresenta coloração avermelhada, muito típica de solos tropicais bem drenados.

Esses fatores são de extrema importância para mostrar se há possibilidade de erosão ou se a água terá maior estabilidade na superfície, hipoxia ou se a água irá percolar rapidamente pelo perfil. O solo utilizado na pesquisa apresenta drenagem moderadamente boa, escoamento superficial moderadamente baixo e 12% de declividade. Esses dados garantem que não há riscos de erosão, não haverá hipoxia das raízes e nem perdas significativas de nutrientes na percolação.

Solos poucos profundos e que apresentem horizonte principal que dificultem o crescimento das raízes das plantas são problemáticos, pois podem interferir na produção final e prejudicar o desenvolvimento de pesquisas e trabalhos. No caso da pesquisa o solo apresenta profundidade propício ao desenvolvimento tanto da cana-de-açúcar quanto do milho e seu horizonte principal é o B latossólico, com altos teores de argila, bastante espesso e bem drenado.

Esses teores estão relacionados com a presença de matéria orgânica no solo o que pode auxiliar no aumento da capacidade de troca catiônica e retenção de nutrientes. O solo da pesquisa apresenta em todo o perfil teor de 1,4% de carbono e 0,1% de nitrogênio. Esses

valores são característicos de um solo bem intemperizado e de clima tropical, no qual a matéria orgânica é consumida por microorganismos presentes no solo.

A CTC (capacidade de troca catiônica) é um parâmetro importante, pois indica o quanto que o solo pode armazenar de íons em suas cargas negativas. São nessas cargas negativas que ficam locados os nutrientes da planta ou íons de hidrogênio (H^+) e Alumínio (Al^{+3}). Os principais cátions nutrientes são os de Potássio (K^+), Cálcio (Ca^{+2}) e Magnésio (Mg^{+2}). O solo da pesquisa apresenta ctc de 10, 9 e 8 cmolc kg^{-1} nas respectivas camadas.

Já o pH indica a quantidade de íons H^+ presentes no solo. No solo da pesquisa o pH de todas as camadas tem o valor 5, valor ideal para as culturas de cana-de-açúcar e milho.

A entrada de dados de solo no modelo DSSAT pode ser conferida pela Figura 3.

Figura 3 - Interface do software DSSAT para a edição de dados de solo

Os dados da cultura são parâmetros presentes no próprio pacote do DSSAT informados pelos autores, porém esses podem ser obtidos com parametrizações acompanhando experimentos de campo através de análises biométricas. No caso dessa pesquisa, os parâmetros foram obtidos na literatura e serão informados adiante.

Para os fins deste estudo, considerou-se suficiente usar dados meteorológicos simulados. Estes foram gerados utilizando o modelo MarkSim (JONES; THORNTON, 2000) com base na localidade, a qual o MarkSim usa para gerar as informações meteorológicas. Este modelo tem sido amplamente utilizada e fornece uma simulação realista de temperatura, precipitação e distribuições de radiação solar.

2.2.2 O Modelo DSSAT/CANEGRO

O modelo DSSAT/CANEGRO deve ser calibrado para que se tenha um bom desempenho. Esta calibração deve ser de acordo com a variedade de cana-de-açúcar escolhida e ao todo são 74 parâmetros, sendo: 31 parâmetros de ecotipos (Tabela 2), 20 parâmetros de cultivares (Tabela 3) e 23 parâmetros de espécie (Tabela 4).

Tabela 2 - Parâmetros de ecótipo do modelo CANEGRO (SINGELS et al., 2008)

(continua)

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 particionamento 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 da largura da linha
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
LFNMEXT	nº folhas	Número de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas)
AREAMX_CF(1)		Parâmetro de cultivar para a equação quadrática definindo a máxima área foliar
AREAMX_CF(2)		Parâmetro de cultivar para a equação quadrática definindo a máxima área foliar
AREAMX_CF(3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
WIDCOR		Parâmetro que influencia a largura das folhas
WMAX_CF (1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo máxima largura de folhas por numero de folhas
WMAX_CF (2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo máxima largura de folhas por numero de folhas
WMAX_CF (3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo máxima largura de folhas por numero de folhas
LMAX_CF (1)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo máximo comprimento de folhas por numero de folhas
LMAX_CF (2)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo máximo comprimento de folhas por numero de folhas
LMAX_CF (3)		Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo máximo comprimento de folhas por numero de folhas
MAXLFLENGHT	cm	Máximo comprimento absoluto da folha
MAXLFWIDTH	cm	Máxima largura absoluta da folha

Tabela 2 - Parâmetros de ecótipo do modelo CANEGRO (SINGELS et al., 2008)

(conclusão)

POPCF (1)		Coeficientes de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF (2)		Coeficientes de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY		Fração de perfilhos sobre população madura (com 1600 °Cd) que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	°C	Temperatura Base para emergência e início da elongação do colmo
TTBASELFEX	°C	Temperatura Base para fenologia de folha
TTBASEPOP	°C	Temperatura Base para fenologia de colmos
TBASEPER	°C	Temperatura Base para extensão da planta
LG_AMRANGE	t ha ⁻¹	Variação na massa na parte aérea do início ao final do acamamento
LG_GP_REDUCE		Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total como fração
LG_FI_REDUCE		Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Tabela 3 - Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições (SINGELS et al., 2008)

(continua)

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 aérea
STKPFMAX	t t ⁻¹ base massa seca	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura
SUCA	t t ⁻¹	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo
TBFT	°C	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo
Tthalf	GD	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento

Tabela 3 - Parâmetros de cultivares do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições (SINGELS et al., 2008)

(conclusão)

<i>Tbase</i>	GD	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	nº folhas	Numero máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este numero.
MXLFAREA	cm ²	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o numero de folhas MXLFARNO (cm2)
MXLFARNO	nº folhas	Numero de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
PI1	GD	Intervalo de filocrono 1 (para numero de folhas abaixo do Pswitch)
PI2	GD	Intervalo de filocrono 1 (para numero 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
CHUIBASE	GD	Graus-dia para o inicio 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 inicio do acamamento

Tabela 4 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições (SINGELS et al., 2008)

(continua)

Parâmetros	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

Tabela 4 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições (SINGELS et al., 2008)

(conclusão)

PCB		Coefficiente 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 particionamento 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		Coefficiente 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	Coefficiente 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	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

Os parâmetros de cultivares, ecótipos e espécies pretendem juntos representar as características genéticas da cultura da cultura em diferentes níveis de especificidade (NASSIF, 2010). Os dados de cultivares 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 da cultura, descrevendo características como fotossíntese, respiração, particionamento, crescimento de raízes e resposta da cultura ao acamamento e estresse hídrico (SINGELS et al., 2008).

No desenvolvimento da cultura, o DSSAT/CANEGRO utiliza um método de índice de área foliar derivado do desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos baseado na soma térmica. Este método simula o desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos, onde a área foliar de cada perfilho é extrapolado para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual pelo número de perfilhos por unidade de área (NASSIF, 2010).

A expansão foliar é calculada pela taxa de expansão da planta (cm dia^{-1}) e a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa é calculada de acordo com a Lei de Beer, que utiliza valores de índice de área foliar total e índice de área foliar de folhas verdes para cálculo da evapotranspiração, utilizando o modelo de Penman-Monteith seguindo a parametrização FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

A densidade de população é simulada utilizando alguns parâmetros de ecótipos, que determinam a taxa de perfilhamento sem déficit hídrico e a senescência em função de tempo térmico, e alguns parâmetros de cultivares 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). O modelo DSSAT/CANEGRO também simula o acúmulo de biomassa e particionamento de fotoassimilados, descritos por Singels e Bezuidenhout (2002) em que o modelo calcula o aumento diário na biomassa total utilizando a radiação fotossinteticamente ativa e eficiência de conversão (g MJ^{-1}).

A variedade utilizada nessa pesquisa foi a RB86-7515, calibrada e parametrizada por Nassif et al. (2012) e os parâmetros de cultivar podem ser conferidos pela Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de cultivar referente à variedade RB86-7515 de cana-de-açúcar parametrizada por Nassif (2012)

Parâmetro	Unidade	RB 86-7515
MaxPARCE	g MJ ⁻¹	12,86
APFMX	t t ⁻¹	0,843
STKPFMAX	t t ⁻¹ base massa seca	0,699
SUCA	t t ⁻¹	0,68
TBFT	°C	25
Tthalf	GD	250,8
Tbase	GD	15,71
LFMAX	nº folhas	9,96
MXLFAREA	cm ²	500,2
MXLFARNO	nº folhas	17,19
PI1	GD	89
PI2	GD	150
PSWITCH		16,14
TTPLNTEM	colmos m ⁻²	300,4
TTRATNEM	colmos m ⁻²	290,9
CHUPIBASE	GD	855
TT_POPGROWTH	GD	650,4
MAX_POP	GD	20,35
POPTT16	GD	8,19
LG_AMBASE	t ha ⁻¹	220

Nassif et al. (2012), na pesquisa em que parametrizou o modelo CANEGRO para a variedade RB86-7515, concluiu que este é uma ferramenta promissora para a simulação de sistemas produtivos, principalmente no caso da cana-de-açúcar, obtendo relevantes resultados estatísticos que justificassem tal afirmação

No caso da cana-de-açúcar (Figura 4), as simulações foram feitas apresentando sempre o dia 10/03 como data de plantio para os anos de 1982 a 2012. Assim, todos os anos da série tiveram o plantio realizado nesse dia. O ciclo de vida da planta foi em média de 530 dias, sendo, portanto todos considerados “cana de ano e meio”. Partiu-se do princípio que todas as necessidades nutricionais da cultura foram supridas, para que a única variável fosse a presença de irrigação e as variações climáticas no decorrer do tempo.

Figura 4 - Interface da escolha de cultivar dentro do DSSAT/CANEGRO

A população de plantas foi de 14 plantas m^{-2} , o espaçamento entre linhas de 120 cm, e com uma profundidade de plantio de 10 cm. Nas simulações com irrigação, esta foi feita por gotejamento e acionada sempre que fosse necessária para suprir a deficiência de chuva.

O mesmo procedimento foi realizado para os cenários futuros, dessa forma, as variações que ocorreram foram previstas pela simulação do modelo MarkSim, diante da presença e a ausência de irrigação.

Para comparação das lâminas de irrigação utilizadas, a produtividade, e quantos kg de grãos são produzidos para cada mm de água aplicada, foi utilizado o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de 5% de significância.

2.2.3 O Modelo CERES-MAIZE

O modelo CERES-Maize necessita ter seus coeficientes genéticos calibrados para prever o crescimento e desenvolvimento do milho. Os coeficientes genéticos P1, P2 e P5 definem a fenologia da cultura enquanto que os G2 e G3 estão relacionados com a definição do rendimento em grão (Tabela 6).

Tabela 6 - Parâmetros genéticos da cultura do milho presente no modelo CERES-MAIZE

Parâmetro	Unidade	Descrição
P1	°Cd	Tempo térmico da emergência até o final da fase juvenil (expresso em graus-dia acima da temperatura basal de 8°C) durante o qual a planta não apresenta resposta ao fotoperíodo
P2	h	Extensão do atraso no desenvolvimento (expresso em dias) por cada hora de incremento no fotoperíodo acima do qual o desenvolvimento procede à taxa máxima (o qual é considerado ser 12,5 horas);
P5	°Cd	Tempo térmico entre o florescimento feminino e a maturidade fisiológica (expresso em graus-dias acima da temperatura basal de 8 °C)
G2	grãos planta ⁻¹	Número máximo de grãos por planta
G3	mg d ⁻¹	Taxa de enchimento do grão durante a fase linear sob condições ótimas (mgdia ⁻¹)
PHY	°Cd	Intervalo correspondente ao filocron em tempo térmico (graus-dia) entre a aparição de folhas subseqüentes (Hoogenboom et al., 1994)

O híbrido utilizado nessa pesquisa foi o BR201 e calibrado por Gedanken (1998), apresentando coeficiente genético P1 275,2, o que significa que este necessita de 275,2 °Cd para atingir o final da fase juvenil. O valor de P2 foi de 0,75, porém não foi simulado resposta ao fotoperíodo devido à duração do dia durante a época da “safrinha” ser menor do que o fotoperíodo crítico (12,5 horas). O coeficiente genético P5 está relacionado com o tempo térmico desde o florescimento feminino até a maturidade fisiológica, sendo de 780°Cd. O coeficiente genético G2 está relacionado com o número máximo possível de grãos por planta, tendo o valor de 902. Para o G3, foi encontrado que o híbrido BR201 o valor de 5 mg d⁻¹. O filocron (PHY) é o intervalo em tempo térmico (graus-dia) entre a aparição de folhas subseqüentes com o valor de 43 °Cd (Figura 5).

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
IB0010 F478 X W705A	. IB0001	140.0	0.000	685.0 907.9 10.00 38.90
IB0011 DEKALBXL45	. IB0001	150.0	0.400	685.0 907.9 10.15 38.90
IB0012 P10 3382	. IB0001	160.0	0.700	950.0 845.0 8.40 38.90 !kjb 1/2/12
IB0013 P10 3382	. IB0001	160.0	0.700	890.0 825.0 8.50 38.90
IB0013 B59*OH43	. IB0001	162.0	0.800	685.0 862.4 6.90 38.90
IB0014 F16 X F19	. IB0001	165.0	0.000	685.0 907.9 10.00 38.90
IB0015 WASHINGTON	. IB0001	165.0	0.400	715.0 825.0 11.00 38.90
IB0016 B14*OH43	. IB0001	172.0	0.300	685.0 907.9 8.50 38.90
IB0017 R1* (N32*B14)	. IB0001	172.0	0.800	685.0 907.9 10.15 38.90
IB0018 B60*R71	. IB0001	172.0	0.800	685.0 781.4 7.70 38.90
IB0019 W9*P37	. IB0001	172.0	0.800	685.0 907.9 10.15 38.90
IB0020 B59*C103	. IB0001	172.0	0.800	685.0 907.9 10.15 38.90
IB0021 Garst 8702	. IB0001	175.0	0.200	960.0 855.8 6.00 38.90
IB0022 B14*C103	. IB0001	180.0	0.500	685.0 907.9 10.15 38.90
IB0023 B14*C131A	. IB0001	180.0	0.500	685.0 907.9 10.15 38.90
IB0024 P10 3720	. IB0001	180.0	0.800	685.0 907.9 10.00 38.90
IB0025 WASH/GRAIN-1	. IB0001	185.0	0.400	775.0 836.0 12.00 38.90
IB0026 A632 X W117	. IB0001	187.0	0.000	685.0 907.9 10.00 38.90
IB0027 Garst 8750	. IB0001	190.0	0.200	930.0 891.0 6.30 38.90
IB0028 TAINAN-11	. IB0001	200.0	0.800	670.0 803.0 6.80 38.90
IB0029 P10 3541	. IB0001	200.0	0.300	800.0 770.0 8.50 38.90
IB0030 P10 3707	. IB0001	200.0	0.700	800.0 649.0 6.30 38.90
IB0031 P10 3475*	. IB0001	200.0	0.700	800.0 797.5 8.60 38.90
IB0032 P10 3382*	. IB0001	200.0	0.700	800.0 715.0 8.50 38.90
IB0033 P10 3780	. IB0001	200.0	0.760	685.0 660.0 9.60 38.90
IB0034 P10 3780*	. IB0001	200.0	0.760	685.0 797.5 9.60 38.90
IB0035 Mccurdy 84aa	. IB0001	265.0	0.300	920.0 890.0 8.00 43.00 !P1 was 200 !kjb 1/2/12
IB0035 Mccurdy 84aa	. IB0001	265.0	0.300	920.0 890.0 8.50 43.00 !P1 was 200
IB0036 C281	. IB0001	202.0	0.300	685.0 907.9 5.80 38.90
IB0037 SWEET CORN	. IB0001	210.0	0.520	625.0 907.5 10.00 38.90
IB0038 Garst 8555	. IB0001	215.0	0.400	890.0 880.0 9.00 38.90
IB0039 P10 3901	. IB0001	215.0	0.760	600.0 616.0 9.00 38.90
IB0040 B8*153R	. IB0001	218.0	0.300	760.0 632.5 8.80 38.90
IB0041 Garst 8808	. IB0001	220.0	0.400	780.0 858.0 8.50 38.90
IB0042 B73 X M017	. IB0001	220.0	0.520	880.0 803.0 10.00 38.90
IB0043 P10 511A	. IB0001	220.0	0.300	685.0 709.5 10.50 38.90
IB0044 W69A X F546	. IB0001	240.0	0.300	685.0 907.9 10.00 38.90
IB0045 A632 X W26	. IB0001	240.0	0.300	685.0 907.9 10.00 38.90
IB0046 W64A X W117	. IB0001	245.0	0.000	685.0 907.9 8.00 38.90
IB0047 P10 3147	. IB0001	255.0	0.760	685.0 917.4 10.00 38.90
IB0048 W9*P37	. IB0001	260.0	0.800	710.0 907.9 6.50 38.90
IB0049 NEB 611	. IB0001	260.0	0.300	720.0 907.5 9.00 38.90
IB0050 PV825	. IB0001	260.0	0.500	750.0 660.0 8.50 38.90
IB0051 PV765	. IB0001	260.0	0.500	750.0 660.0 8.50 38.90
IB0052 P10 3183	. IB0001	260.0	0.500	750.0 660.0 8.50 38.90
IB0053 CESDA-28	. IB0001	260.0	0.500	669.0 858.0 7.10 38.90
IB0054 B14*OH43	. IB0001	265.0	0.800	665.0 858.0 6.90 38.90
IB0055 MCCURDY 6714	. IB0001	265.0	0.300	825.0 907.9 9.80 38.90
IB0056 FM 6	. IB0001	276.0	0.520	867.0 677.6 10.70 38.90
IB0057 TOCORON-3	. IB0001	276.0	0.520	867.0 660.0 8.12 38.90
IB0058 NC+59	. IB0001	280.0	0.300	750.0 907.5 10.00 38.90

Figura 5 - Banco de dados do pacote DSSAT contendo os coeficientes genéticos para a cultura do milho (em evidência aparece o híbrido BR201, calibrado por Gedanken (1998), utilizado nessa pesquisa)

Freitas et al. (2004) utilizaram este híbrido para simular a produtividade do milho com diferentes lâminas de água e diferentes uniformidades de aplicação e concluíram que para tratamentos que utilizaram lâminas de água acima da considerada adequada naquela pesquisa, o modelo apresentou consistência.

Na presente pesquisa, as simulações foram feitas apresentando sempre o dia 26/02 como data de semeadura para o período de 1982 a 2012. Portanto, todos os anos da série tiveram a cultura do milho semeada nesse dia. Isso para poder simular o período de segunda safra, quando o milho da primeira já foi colhido. Partiu-se do princípio que todas as necessidades nutricionais da cultura foram supridas, para que a única variável fosse a presença de irrigação e as variações climáticas no decorrer do tempo.

A população de plantas foi de 7 plantas m^{-2} , o espaçamento entre linhas de 60cm, e com uma profundidade de 7 cm. Nas simulações com irrigação, esta foi feita por gotejamento e acionada sempre que fosse necessária para suprir a deficiência de chuva.

O mesmo procedimento foi realizado para os cenários futuros, dessa forma, as variações que ocorreram foram feitas pela simulação do modelo MarkSim, diante da presença e ausência de irrigação.

Para comparação das lâminas de irrigação utilizadas, a produtividade, e quantos kg de grãos são produzidos para cada mm de água aplicada foi utilizado o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de 5% de significância.

2.2.4 Cenários Futuros e o Modelo MarkSim

Os anos simulados para os três cenários foram os mesmos: uma série de 31 anos de 2062 a 2092. A interface do software pode ser conferida pela Figura 6.

Figura 6 - Interface do modelo MarkSim, utilizado para gerar dados climáticos de cenários futuros presentes no relatório do IPCC

O MarkSim oferece os dados climáticos na forma adequada para que o DSSAT possa efetuar as leituras, com as unidades mais comuns ao programa e de fácil utilização. Assim, logo que é feito o *download* dos arquivos pelo MarkSim, rapidamente é feita a inclusão dos dados.

Além disso, deve-se atentar para as falhas desses dados incluídos, afim de que nenhum erro possa ser considerado nas análises. Se os dados não forem inseridos de forma correta, certamente haverá a ocorrência de erros.

A equação 2 indica a forma como foram calculados os desvios presentes na comparação dos dados climáticos dos cenários futuros em relação ao cenário atual:

$$\text{Desvio} = (\text{Cen Fut} - \text{Cen Atual})$$

Em que:

Desvio - diferença entre o dado do cenário atual e o cenário futuro

Cen Fut - dado climático referente ao cenário futuro

Cen tual - dado climático referente ao cenário atual

Vale lembrar que quando os valores dos desvios são positivos, significa que a variável em questão apresentará um aumento em seu valor no cenário futuro em relação ao cenário atual. Por outro lado, quando os valores dos desvios forem negativos, a variável em questão apresentará uma diminuição no cenário futuro em relação ao cenário atual.

Observa-se, de modo geral, que os cenários futuros apresentarão um aumento de temperatura nos meses de janeiro e novembro, bem como os valores das temperaturas mínimas terão um aumento em relação aos valores das temperaturas máximas (7A, 7B e 7C).

Pelas Figuras 8A e 8B podem ser conferidos os valores dos desvios de Chuva (mm) e Radiação Solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para a cidade de Piracicaba, SP, para os anos de 2062 a 2092 simuladas pelo modelo MarkSim para os cenários A1B, A2 e B1 presentes no relatório do IPCC de 2001.

Em termos de distribuição de chuvas (Figura 8A) pode-se notar que para o cenário A1B houve uma maior concentração de chuvas ocorrendo nos meses de verão, porém com um grau muito mais acentuado para o mês de janeiro. Por outro lado, nos meses do inverno a diminuição das chuvas irá ocorrer com maior intensidade tornando o período com meses secos um pouco maior que o cenário atual.

Outra observação que se pode fazer é que a radiação solar irá diminuir conforme se dá o aumento das chuvas. Isso se dá pela presença de nebulosidade que diminui a incidência de radiação na superfície. Também, pode ser observado um aumento muito claro nos valores da radiação solar nos meses de fevereiro e março, em relação ao cenário atual.

Para os cenários A1B e A2, as diferenças não são tão notadas, porém entre o cenário A2 e o atual, a concentração das chuvas no verão e o aumento do período de seca no inverno, bem como o aumento das temperaturas máximas e o aumento da radiação solar nos meses de fevereiro e março, ocorreram de forma semelhante ao cenário A1B (Figuras 8A e 8B).

A mesma situação aconteceu para o cenário B1. Entre este cenário e os outros dois cenários futuros, as diferenças não foram tão perceptíveis. Porém, em comparação ao cenário atual, observou-se um aumento da concentração das chuvas no verão e um aumento do período de seca no inverno. Além de apresentar um aumento nas temperaturas máximas, bem como na radiação solar nos meses de fevereiro e março.

(a)

(b)

(c)

Figura 7 – Desvios das Temperaturas Máximas (a), Temperaturas Médias (b) e Temperaturas Mínimas (c) obtidos mediante a comparação entre os cenários Futuros A1B, A2 e B1 com o cenário atual (eq.2).

(a)

(b)

Figura 8 – Desvios dos valores de chuva (a) e da radiação solar (b) obtidos mediante a comparação entre os cenários Futuros A1B, A2 e B1 com o cenário atual (eq.2).

Figura 9 - Interface do MarkSim para a região de Piracicaba

2.2.5 Análises Estatísticas

Após a obtenção dos resultados de: produtividade de matéria seca (kg ha^{-1}), produtividade de grãos (kg ha^{-1}), produtividade de sacarose (kg ha^{-1}), água utilizada pela planta (mm dia^{-1}), água aplicada via irrigação (mm dia^{-1}), produtividade de grãos por quantidade de água no regime de sequeiro (kg grãos mm^{-1}), produtividade de grãos por quantidade de água no regime irrigado (kg grãos mm^{-1}), produtividade de grãos por quantidade de água aplicada ($\text{kg de grãos mm}^{-1}$), produtividade de sacarose por quantidade de água no regime de sequeiro (kg grãos mm^{-1}), produtividade de sacarose por quantidade de água no regime irrigado (kg grãos mm^{-1}), produtividade de sacarose por quantidade de água aplicada ($\text{kg de grãos mm}^{-1}$), foram feitas análises estatísticas de comparação de médias pelo método de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, com o objetivo de determinar se o manejo da irrigação utilizado nos dias atuais pode ser aplicado em cenários futuros.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Cana-de-açúcar

2.3.1.1 Produtividade de matéria seca e de sacarose

Pela Tabela 7 podem ser conferidos os valores de produtividade em kg ha^{-1} de matéria seca e de sacarose para a cana-de-açúcar em condições de sequeiro e irrigado no cenário atual. Isso também se dá pela restrição hídrica, que com certeza ocasionou uma diminuição na evapotranspiração da cultura. Nota-se novamente que no ambiente irrigado, em comparação à condição de sequeiro, em termos de produtividade de matéria seca e de sacarose, foram obtidos maiores valores e de maneira uniforme. Em diferentes culturas, nota-se que a irrigação supre a demanda hídrica das plantas e promove aumento da produtividade potencial. Atenta-se para o ano de 2011, o qual apresentou uma produtividade muito maior que os anos anteriores, no valor de $170.580 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 10), muito disso deve-se ao fato de, naquele ano, ter ocorrido maiores valores de radiação solar, propiciando à planta uma maior mobilização de CO_2 e consequentemente maior produtividade.

Em condições de sequeiro, pela mesma Figura 10, pode-se conferir a variação ano a ano da quantidade de produtividade de matéria seca de cana juntamente com sua produtividade de sacarose. Observa-se a influência do déficit hídrico nas condições de sequeiro em comparação com o suprimento total de água nas condições irrigadas. Nota-se um menor valor de produtividade ($95.470 \text{ kg ha}^{-1}$) para o ano de 1985, muito devido ao fato pela falta de chuvas naquele ano. Isso explica o motivo pelo qual a utilização da irrigação elevou a produtividade no patamar da produtividade potencial da variedade.

Tabela 7 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário atual

Cenário	Condição Atual Sequeiro		Condição Atual Irrigado	
Ano	PMS	PS	PMS	PS
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
1982	143.280	25.050	150.640	26.610
1983	122.800	21.280	133.260	27.410
1984	129.010	22.890	141.800	24.750
1985	95.470	15.680	135.610	22.860
1986	115.010	20.280	133.360	23.340
1987	112.290	19.600	131.920	23.360
1988	98.970	16.890	128.350	23.180
1989	104.010	17.330	132.260	23.050
1990	114.870	20.370	134.970	24.390
1991	97.410	17.240	133.650	24.810
1992	122.800	21.770	133.260	23.640
1993	122.540	21.750	134.230	23.460
1994	112.500	18.770	130.650	21.730
1995	111.570	17.790	130.880	22.040
1996	118.590	20.520	135.160	24.020
1997	122.970	21.250	132.780	22.510
1998	121.070	20.530	133.630	22.760
1999	110.020	18.850	138.050	24.150
2000	127.490	21.040	135.640	22.590
2001	120.630	20.300	135.130	22.980
2002	114.950	18.920	129.900	20.930
2003	109.480	19.890	138.730	25.520
2004	105.350	17.580	135.540	23.830
2005	115.190	19.890	134.750	23.350
2006	114.910	19.190	136.330	23.070
2007	135.140	25.080	142.190	25.360
2008	107.190	18.670	137.220	23.010
2009	129.050	21.420	134.210	21.890
2010	121.670	20.990	135.200	22.250
2011	131.450	23.570	170.580	23.860
Média	116.922,67	20.146,00	136.329,33	23.557,00

Figura 10 - Produtividade de matéria seca e produtividade de sacarose, simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário atual

Diante das condições de cenários futuros, para a cana-de-açúcar, observou-se uma queda na produtividade, da ordem de 40%, quando comparado com a condição atual, tanto em quedas de produtividade, quanto de matéria seca e sacarose. Isso provavelmente ocorreu devido às alterações climáticas e não somente pelo déficit hídrico. Pode-se dizer isso pois quando utilizada a irrigação, suprimindo suas necessidades hídricas, ainda ocorre uma acentuada queda de produtividade.

Para o cenário A1B, cenário intermediário de mudanças climáticas do IPCC, observou-se que em média a produtividade nas condições de sequeiro foi de 78.000 kg ha⁻¹, enquanto que para as condições irrigadas a produtividade foi em torno de 90.000 kg ha⁻¹. Esses valores são bem diferentes do cenário atual, o qual apresenta médias de 120.000 e 140.000 kg ha⁻¹ de matéria seca de cana-de-açúcar (Tabela 8).

Já para a produtividade de sacarose os valores médios são de 14.000 kg ha⁻¹ e 16.000 kg ha⁻¹ nas condições de sequeiro e irrigado. Tais valores ficam abaixo dos valores médios atuais que são da ordem de 20.000 kg ha⁻¹ e 23.000 kg ha⁻¹, para as condições de sequeiro e irrigado, respectivamente. Isso pode ser devido ao déficit de radiação solar e ao aumento das temperaturas médias para o período de cultivo da cana-de-açúcar, o que interfere no seu metabolismo e no seu acúmulo de sacarose, mostrando ser necessária uma intervenção de

ordem genética para se obter os mesmos níveis de produtividade que os conseguidos atualmente.

Tabela 8 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário futuro A1B

Cenário	Cenário Futuro A1B Sequeiro		Cenário Futuro A1B Irrigado	
Ano	PMS	PS	PMS	PS
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
2062	77.310	13.930	83.960	14.950
2063	77.530	13.980	87.700	15.230
2064	78.800	14.210	89.140	15.670
2065	77.850	13.800	89.430	15.650
2066	77.960	13.780	89.060	15.610
2067	75.590	13.300	88.840	15.520
2068	76.520	13.500	84.760	14.920
2069	75.900	13.370	88.670	15.380
2070	76.490	13.470	89.900	15.600
2071	76.850	13.580	90.790	15.690
2072	77.200	13.720	91.400	15.960
2073	76.930	13.620	89.550	15.280
2074	76.670	13.540	88.760	15.110
2075	75.670	13.340	90.060	15.370
2076	78.660	14.140	89.580	15.530
2077	77.650	13.870	89.430	15.260
2078	80.170	14.280	91.420	15.420
2079	76.720	13.530	89.410	15.470
2080	77.810	13.800	90.740	15.750
2081	78.480	14.060	92.160	15.520
2082	79.350	14.310	95.800	16.510
2083	76.160	13.560	92.410	15.830
2084	76.340	13.610	92.170	15.840
2085	75.460	13.380	91.430	15.580
2086	75.060	13.190	95.300	16.570
2087	75.380	13.290	93.220	16.150
2088	78.610	13.980	91.740	15.730
2089	76.950	13.840	91.890	16.230
2090	77.690	13.930	91.490	15.670
2091	77.080	13.850	91.320	16.100
Média	77.161,33	13.725,33	90.384,33	15.636,67

Pela Figura 11 podem ser conferidas as produtividades de matéria seca e sacarose de cana-de-açúcar e sua variação ao longo do tempo. Nota-se que o uso da irrigação trará ganhos de produtividade, porém não conseguirá atingir a produtividade alcançada na atualidade. Isso ocorre certamente por maiores variações ambientais, como aumento da temperatura e a relação

com que a planta tem com essas mudanças. Uma solução para a produtividade aumentar é o investimento em novas tecnologias genéticas.

Figura 11 - Valores de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar para o cenário futuro A1B e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), para o cenário atual

Os valores de produtividade de matéria seca e sacarose da cana-de-açúcar podem ser conferidos pela Tabela 9. Tal como no cenário A1B, percebeu-se uma queda relevante nos valores de produtividade e a não recuperação quando utilizada a irrigação. Este cenário é um pouco menos penalizado, pois nele a globalização ocorre mais aparente, assim o desenvolvimento desenfreado ocasiona instabilidade climática, porém há maiores índices de emissão de CO₂ o que ocasiona um maior aproveitamento pelas plantas e produtividades um pouco superiores ao cenário anterior com médias de 80.000 kg ha⁻¹ para a condição de sequeiro e 91.000 kg ha⁻¹ para a condição irrigada, ainda abaixo dos valores médios apresentados pelo cenário atual de 120.000 kg ha⁻¹ e 140.000 kg ha⁻¹ para as condições de sequeiro e irrigado, respectivamente. A sacarose sofre a mesma consequência tendo leves aumentos de produtividades apresentando valores médios de 14.300 kg ha⁻¹ na condição de sequeiro e 16.000 kg ha⁻¹ na condição irrigada, abaixo dos valores de 20.000 kg ha⁻¹ e 23.000

kg ha⁻¹ apresentados pelo cenário atual para as condições de sequeiro e irrigado, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário futuro A2

Cenário	Cenário Futuro A2 Sequeiro		Cenário Futuro A2 Irrigado	
Ano	PMS	PS	PMS	PS
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
2062	76.450	13.550	82.310	14.660
2063	77.320	13.750	87.830	14.870
2064	77.840	13.770	88.640	15.010
2065	78.050	13.800	88.850	15.040
2066	78.280	13.860	89.130	15.000
2067	78.530	13.980	89.180	15.060
2068	79.670	14.280	90.290	15.310
2069	78.420	13.970	89.830	15.390
2070	77.900	13.870	91.340	16.010
2071	78.050	13.900	91.050	15.950
2072	79.640	14.180	92.340	16.240
2073	78.970	14.090	92.030	16.120
2074	79.290	14.170	92.590	16.300
2075	79.880	14.280	90.920	15.890
2076	80.430	14.280	92.530	16.210
2077	79.730	14.220	92.790	16.050
2078	80.130	14.280	93.490	16.170
2079	81.220	14.560	94.360	16.370
2080	86.070	15.190	95.740	16.430
2081	83.390	15.040	92.880	16.100
2082	82.600	14.800	93.700	16.180
2083	83.330	14.950	91.720	16.230
2084	79.650	14.300	87.790	15.760
2085	79.310	14.180	88.250	15.600
2086	79.930	14.300	89.180	15.840
2087	80.150	14.570	89.100	15.810
2088	81.390	14.840	89.930	16.250
2089	81.130	14.720	90.110	16.270
2090	80.890	14.610	92.560	15.980
2091	80.960	14.610	94.920	16.680
Média	79.953,33	14.296,67	90.846,00	15.826,00

As variações de produtividade para o cenário A2 podem ser conferidos pela Figura 12, na qual quando utilizada a irrigação, praticamente mantém as produtividades de matéria seca

e a produtividade de sacarose. Aqui fica claro que a prática de irrigação dá indícios de não ser tão relevante nos cenários futuros.

Figura 12 - Valores de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar para o cenário futuro A2 e valores médios de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado) para a condição A2

O cenário B1 para a cultura da cana-de-açúcar não promoveu aumento de produtividade de matéria seca nem de sacarose. Mais uma vez, certamente outros eventos das mudanças climáticas influenciam tais produtividades além da presença ou não de irrigação. Os valores atingidos não expressam o potencial produtivo da variedade mesmo com a necessidade hídrica da cultura sendo suprida, dando condições de haver produtividade potencial (Tabela 10).

As médias de produtividade de matéria seca ficaram em torno de 77.000 kg ha⁻¹ para a condição de sequeiro e de 89.000 kg ha⁻¹ para a condição irrigada bem abaixo das médias apresentadas pelo cenário atual, com valores de 120.000 kg ha⁻¹ e 140.000 kg ha⁻¹ para as condições de sequeiro e irrigado, respectivamente. Já para a produtividade de sacarose os valores médios foram de 14.000 kg ha⁻¹ para a condição de sequeiro e 16.500 kg ha⁻¹ para a condição irrigada, também abaixo da média do cenário atual que apresentou valores de 20.000 kg ha⁻¹ e 23.000 kg ha⁻¹ para as condições de sequeiro e irrigado, respectivamente (Figura 13).

Sugere-se que as condições de temperatura e radiação solar terão grande influência no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, logo se acredita que avanços em genética serão as soluções para atingir os mesmos níveis de produtividade que o cenário atual.

Tabela 10 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de sacarose (PS) para as condições de cultivo de cana-de-açúcar, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário futuro B1

Cenário	Cenário Futuro B1 Sequeiro		Cenário Futuro B1 Irrigado	
Ano	PMS	PS	PMS	PS
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
2062	70.310	12.760	78.950	14.490
2063	70.460	12.790	87.240	15.920
2064	70.090	12.710	85.950	15.690
2065	70.190	12.700	85.180	15.170
2066	72.610	13.240	87.370	15.990
2067	77.620	14.260	90.340	16.570
2068	79.390	14.660	91.970	16.780
2069	77.540	14.210	90.740	16.620
2070	78.270	14.410	90.610	16.650
2071	77.700	14.240	90.910	16.720
2072	77.430	14.200	91.440	16.660
2073	77.890	14.360	91.760	16.760
2074	76.920	14.060	90.460	16.570
2075	76.940	14.050	91.890	16.880
2076	77.880	14.280	91.100	16.570
2077	77.170	14.120	88.250	16.360
2078	77.490	14.150	91.330	16.650
2079	77.590	14.180	88.250	16.280
2080	77.800	14.230	88.940	16.330
2081	77.570	14.220	90.350	16.520
2082	75.870	13.940	89.000	16.340
2083	78.480	14.220	91.110	16.710
2084	79.410	14.460	89.340	16.350
2085	79.300	14.300	88.870	16.270
2086	79.270	14.370	88.760	16.210
2087	79.450	14.350	88.320	16.210
2088	78.980	14.140	87.140	15.740
2089	76.860	13.740	85.260	15.030
2090	78.990	14.250	87.330	15.560
2091	77.820	14.010	85.060	15.220
Média	76.776,33	13.987,00	88.774,00	16.194,00

Pela Figura 13 pode-se conferir a variação das produtividades de matéria seca e de sacarose ao longo dos anos. Os baixos valores em comparação às produtividades do cenário

atual servem como alerta para o desenvolvimento de tecnologias genéticas que supram as necessidades futuras e até mesmo um alerta para as condições climáticas que o IPCC tenta prever para tomarmos precauções ambientais.

Figura 13 - Valores de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo DSSAT/CANEGRO, para as condições de cultivo de cana-de-açúcar para o cenário futuro B1 e valores médios de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e produtividade de sacarose (S) (Sequeiro e Irrigado) para a condição B1

2.3.1.2 Produtividade relativa entre os cenários futuros e o cenário atual

Uma das maneiras de se conseguir comparar as produtividades de cana-de-açúcar dos diferentes cenários foi a aplicação do conceito de produtividade relativa, ou seja, o que um determinado cenário apresenta em termos de produtividade quando comparado com a condição atual.

Portanto, pela Figura 14A, pode-se observar que as produtividades relativas de matéria seca no ambiente de sequeiro dos três cenários futuros giram em torno de 65% da produtividade obtida pelo cenário atual (indicando uma redução de produtividade em torno de 35%). Vale ressaltar que o maior valor encontrado foi para o cenário A2, por volta de 70%, e o menor valor para o cenário B1, por volta de 60%. Em termos da produtividade relativa de sacarose para o ambiente de sequeiro notou-se as mesmas características observadas, girando

em torno de 70% (Figura 14B). O maior valor encontrado também foi para o cenário A2, 75%, e o menor valor para o cenário B1, pouco menos que 65%.

Já para o ambiente irrigado, a produtividade relativa de matéria seca, os valores giram em torno de 65%, bem como na condição de sequeiro, tanto o cenário A2 quanto o cenário A1B atingem o valor de 70%, enquanto que somente o cenário B1 apresenta um valor abaixo de 60% (Figura 14C). Porém, quando se trata da produtividade relativa de sacarose, o cenário B1 se destaca, apresentando valores acima de 70%, juntamente com cenário A1B. Essas diferenças se devem principalmente ao fato de haver alterações na disponibilidade de radiação solar à planta, bem como o aumento das temperaturas, que auxiliam no acúmulo de carboidratos para aumentar a matéria seca da planta e produção de sacarose.

Figura 14 - Produtividades relativas de cana-de-açúcar considerando os cenários futuros (A1B, A2 e B1) em relação ao cenário atual para: Matéria Seca (condição Sequeiro) (A), Sacarose (condição Sequeiro) (B), Matéria Seca (condição Irrigado) (C), Sacarose (condição Irrigado) (D)

2.3.1.3 Quantidade de água utilizada pela planta em regime de sequeiro e irrigado

Pela Tabela 11 podem ser conferidas as quantidades de água utilizadas pela cultura da cana (mm dia^{-1}) e a massa de sacarose produzida para cada milímetro de água utilizada pela

cultura tanto nas condições de sequeiro quanto irrigado e para os diferentes cenários. Pode-se notar que nas condições de irrigação, a cultura da cana também utiliza mais água que nas condições de sequeiro. Isso se dá por não haver déficit hídrico, possibilitando a ocorrência da máxima transpiração da cultura. Junto a isso, observa-se que no ambiente irrigado produz-se a mesma quantidade de sacarose para cada milímetro de água utilizado pela planta. Isso se dá, provavelmente pela influência de mais parâmetros climáticos, como a temperatura, quantidade de CO₂ e radiação solar.

Tabela 11 - Quantidade de água utilizada pela cultura da cana-de-açúcar e massa de sacarose por milímetro de água utilizada pela cultura da cana-de-açúcar nas condições de sequeiro e irrigado para os cenários atual e futuro, simulados pelo DSSAT/CANEGRO

Cenário	Sequeiro	Irigado	kg mm ⁻¹ H ₂ O	
	mm dia ⁻¹	mm dia ⁻¹	Sequeiro	Irigado
atual	3,13	3,96	71,7	65,6
A1B	3,16	3,63	46,2	47,1
A2	3,10	3,57	48,9	48,1
B1	3,38	3,78	43,0	44,4

Pela Tabela 11 pôde-se notar que a cultura da cana no cenário atual é a que mais se destaca em aproveitamento da água pois produz quase 70 kg de sacarose por milímetro de água disponível enquanto que nos cenários futuros a produtividade é de em média 47 kg de sacarose por milímetro de água disponível. Observando a massa de sacarose produzida para cada mm de água utilizado pela planta, conclui-se que a irrigação não parece ser uma prática interessante, pois nas condições de sequeiro a massa de sacarose produzida é bem maior do que quando utilizada a irrigação.

2.3.1.4 Comparação da produtividade de sacarose nos diferentes cenários e lâmina aplicada

Com o objetivo de avaliar as produtividades de cana-de-açúcar e verificar se o manejo de irrigação utilizado na atualidade pode ser utilizado em cenários futuros, procurou-se comparar a quantidade de sacarose produzida (kg ha⁻¹) nos diferentes cenários e diferentes condições de cultivo, bem como a comparação das lâminas de irrigação utilizadas (mm dia⁻¹).

Pôde-se observar que na condição de cultivo de sequeiro, os cenários futuros têm produtividade de sacarose menores que a atualidade, analisando ao nível de 5% de probabilidade, apresentando produtividades médias da ordem de 14.000 kg ha⁻¹ enquanto que

no cenário atual a produtividade chegou ao valor de 20.146 kg ha⁻¹. Porém, com a utilização de irrigação, tais produtividades aumentam ficando num valor médio de 15.800 kg ha⁻¹, porém, não conseguem chegar aos valores do cenário atual que apresenta 23.600 kg ha⁻¹, ao nível de 5% de probabilidade.

Outro ponto a ser avaliado é a massa de sacarose produzidos para cada mm de água aplicado. Nota-se que o cenário B1, o mais otimista dos cenários estudados, é aquele que mais aproveitará a água aplicada. Feita a análise de comparação de médias de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, a irrigação terá maior influência para o cenário B1 do que para os outros cenários (Tabela 12).

Tabela 12 - Produtividade de sacarose de cana-de-açúcar por hectare e por mm de água aplicada e lâmina de água aplicada em mm dia⁻¹ na cultura da cana-de-açúcar, cenários atual e futuro, simulados pelo DSSAT/CANEGRO

Cenário	Produtividade de sacarose		Lâmina Aplicada mm dia ⁻¹	Produtividade de sacarose por mm de água aplicado kg mm ⁻¹
	Sequeiro kg ha ⁻¹	Irrigado kg ha ⁻¹		
atual	20146,00 a	23557,00 a	0,83 a	44,5 a
A1B	13725,33 b	15636,67 b	0,47 b	52,9 ab
A2	14296,67 b	15826,00 b	0,44 bc	46,6 ab
B1	13987,00 b	16194,00 b	0,39 c	58,00 b

*em letras minúsculas há a indicação do resultado da comparação de médias das colunas feita pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Enfim, analisando-se estatisticamente os valores das lâminas de água aplicadas, pôde-se concluir que o manejo utilizado atualmente é bem maior, sendo praticamente o dobro que os que serão necessários nos cenários futuros. Porém, isso deve ser um alerta, pois se o manejo utilizado atualmente for utilizado em algum dos cenários futuros, certamente haverá desperdício de água (Tabela 12). O que espera-se é justamente o contrário, economia de água. Assim, não adiantará aumentar a irrigação, sendo que o fator limitante da produtividade é outro. Uma sugestão para que a produtividade atinja o mesmo patamar que o atual, ou seja maior é o desenvolvimento de novas variedades, mais tecnológicas, a fim de que aproveitem melhor os recursos disponíveis, tanto nutricionais quanto hídricos.

2.3.2 Milho

2.3.2.1 Produtividade de matéria seca e grãos

A Tabela 13 apresenta os valores de produtividade (kg ha^{-1}) de matéria seca e de grãos de milho para as condições de sequeiro e irrigado no cenário atual. Nota-se uma variação clara na produtividade na condição de sequeiro. Isso se dá certamente pela restrição hídrica, que com certeza ocasionou uma diminuição na evapotranspiração da cultura. Nota-se em seguida, que no ambiente irrigado a produtividade de matéria seca e de grãos aumenta e se estabiliza. Isso se dá pela necessidade hídrica ser sempre suprida.

Alguns anos tipicamente secos fazem com que a produtividade reduza notavelmente, tornando a agricultura sem a prática da irrigação inviável. É o caso dos anos de 1984, 2000 e 2009 que apresentaram produtividades de 5.105, 7.785 e 7590 kg ha^{-1} , respectivamente. Vale ressaltar que, nesses mesmos anos, utilizada a irrigação, a produtividade aumentou consideravelmente apresentando 18.793, 20.657 e 20.745 kg ha^{-1} , mostrando a importância da prática. Esse aumento ocorreu, provavelmente, por ter-se céu aberto e, consequentemente, altos valores de radiação solar disponíveis a planta, além de ter altas taxas de transpiração supridas pela presença de água de irrigação.

Tais variações de produtividade podem ser sanadas com a utilização da irrigação, pois esta garante que a necessidade hídrica da planta seja suprida (Figura 15). Por outro lado, deve-se ressaltar que o milho, sendo uma planta C4, depende bastante da disponibilidade de energia sendo que nos anos que apresentaram maiores valores de radiação solar no período do cultivo, foram os anos que apresentaram as maiores produtividades como em 1982, 1985 e 2009.

Tabela 13 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de grãos (PG) para as condições de cultivo de milho, em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário atual

Cenário	Cenário Atual Sequeiro		Cenário Atual Irrigado	
Ano	PMS	PG	PMS	PG
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
1982	13.354	4.017	20.878	7.107
1983	19.220	7.674	19.220	7.674
1984	5.105	955	18.793	6.994
1985	15.014	2.862	22.378	8.689
1986	14.638	4.446	15.901	5.348
1987	14.772	5.323	14.796	5.324
1988	15.840	6.254	15.840	6.254
1989	16.896	6.749	17.180	7.018
1990	13.556	4.720	16.487	6.597
1991	16.893	6.351	16.894	6.353
1992	14.449	4.977	14.512	4.991
1993	16.046	6.031	16.046	6.031
1994	15.489	5.520	15.489	5.520
1995	15.394	5.379	15.484	5.469
1996	9.541	2.439	16.132	6.026
1997	8.289	1.916	16.708	5.615
1998	17.950	7.133	18.064	7.246
1999	18.717	6.273	20.002	7.157
2000	7.785	247	20.657	7.130
2001	11.743	2.920	19.276	6.861
2002	14.505	4.415	16.086	5.424
2003	14.836	4.863	17.980	6.835
2004	15.141	5.303	15.141	5.303
2005	11.013	2.335	17.932	6.452
2006	11.753	2.146	18.289	6.055
2007	10.556	2.964	18.271	6.858
2008	19.003	6.892	19.606	7.405
2009	7.590	387	20.745	7.654
2010	14.097	3.399	18.229	6.368
2011	16.538	5.206	19.599	7.346
2012	16.105	6.462	18.340	6.704
Média	13.929,94	4.405,10	17.772,74	6.509,94

Figura 15 - Produtividade de matéria seca e produtividade de grãos, simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado, para o cenário atual

No caso dos cenários futuros, tem-se primeiro a condição do cenário A1B. Este é o cenário intermediário, mas fica claro que houve uma queda acentuada de produtividade de matéria seca na condição de sequeiro que apresenta valores médios de 7.800 kg ha^{-1} na condição de sequeiro e $17.000 \text{ kg ha}^{-1}$ na condição irrigada. A produtividade de grãos apresenta 1.800 kg ha^{-1} para a condição de sequeiro e 7.000 kg ha^{-1} na condição irrigada. Tais valores, quando comparados às médias obtidas no cenário atual, mostra que na condição de sequeiro, as produtividades do cenário A1B ficarão bem abaixo enquanto que para a condição irrigada, os valores serão semelhantes ou até maiores (Figura 16).

O que se pode dizer dessa situação é que a irrigação tem um papel fundamental para a manutenção da produtividade tanto de matéria seca quanto para grãos, caso esse cenário futuro ocorra.

Foi possível notar, também, uma estabilidade de produtividade devido às projeções feitas sobre o clima atual para prever o que pode ocorrer no futuro. Quando utilizada a irrigação, há um aumento da produtividade de matéria seca e de grãos, explorando todo o potencial do híbrido em questão, unindo disponibilidade hídrica, de radiação solar e da cultura. As produtividades referentes a esse cenário podem ser conferidas pela Tabela 14.

Tabela 14 - Produtividade de matéria seca (PMS) e produtividade de grãos (PG) para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário A1B

Cenário	Cenário A1B Sequeiro		Cenário A1B Irrigado	
Ano	PMS	PG	PMS	PG
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
2062	7.693	1.904	17.610	7.814
2063	7.704	1.871	17.603	7.011
2064	7.721	1.874	16.733	7.035
2065	7.740	1.870	16.740	6.996
2066	7.735	1.804	16.916	6.908
2067	7.782	1.865	16.883	7.042
2068	7.730	1.797	17.005	6.940
2069	7.787	1.816	16.969	6.948
2070	7.788	1.800	17.054	6.966
2071	7.804	1.803	17.078	6.983
2072	7.775	1.769	16.894	6.842
2073	7.793	1.764	16.980	6.873
2074	7.753	1.743	17.001	6.876
2075	7.781	1.752	17.042	6.885
2076	7.887	1.855	17.606	7.502
2077	7.891	1.850	17.673	7.514
2078	7.925	1.844	17.487	7.371
2079	7.878	1.804	17.552	7.371
2080	7.871	1.807	17.553	7.379
2081	7.878	1.793	17.617	7.390
2082	7.880	1.767	17.424	7.231
2083	7.838	1.830	15.937	6.511
2084	7.831	1.835	15.904	6.513
2085	7.734	1.806	15.847	6.568
2086	7.669	1.758	15.962	6.590
2087	7.681	1.765	15.981	6.608
2088	7.539	1.652	15.963	6.575
2089	7.582	1.662	15.931	6.558
2090	7.411	1.559	15.786	6.427
2091	7.406	1.502	15.699	6.227
2092	7.405	1.538	15.797	6.410
Média	7.738,45	1.776,10	16.781,52	6.931,10

O que melhor se pode ver nesse cenário é a produtividade tendo um leve aumento com o passar dos anos e entrando em um processo de queda ao final. Certamente se deve ao fato de haver aumento das temperaturas máxima e mínima, ambas extremamente importantes para o desenvolvimento da cultura do milho. Esse fato se observa nas condições de milho irrigado também, pois apesar de haver o suprimento correto de água, as temperaturas não se alteram, e

afetam a respiração e transpiração da planta, ocasionando consumo de fotoassimilados (Figura 16).

Figura 16 - Valores de produtividade de matéria seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho para o cenário futuro A1B e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado) para a condição A1B

Para o cenário A2, cenário mais pessimista do IPCC, as produtividades são um pouco maiores que aquelas vistas no cenário A1B (Tabela 15). Com uma queda um pouco mais suavizada, ainda sim há diminuição tanto na produtividade de matéria seca, quanto de grãos por hectare, que apresentaram 7.800 kg ha⁻¹ para produtividade de matéria seca e 1.700 kg ha⁻¹ de grãos para a condição de sequeiro. Já para a condição irrigada, apresentou 17.400 kg ha⁻¹ de produtividade de matéria seca e 7.300 kg ha⁻¹ de grãos. As quedas de produtividade também se dão pela concentração de chuvas nos períodos das águas e aumento das temperaturas máxima e mínima. No entanto, o suprimento de água quando a cultura necessitar pode auxiliar na produtividade potencial do híbrido em questão.

Tabela 15 - Produtividade de matéria seca e produtividade de grãos para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário A2

Cenário	Cenário A2 Sequeiro		Cenário A2 Irigado	
Ano	PMS	PG	PMS	PG
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
1982	7.782	1.786	17.438	7.641
1983	7.676	1.772	17.877	7.665
1984	7.665	1.743	17.992	7.702
1985	7.664	1.711	17.799	7.601
1986	7.661	1.664	17.945	7.631
1987	7.749	1.699	17.613	7.582
1988	7.774	1.623	17.688	7.443
1989	7.751	1.610	17.728	7.480
1990	7.712	1.636	17.752	7.486
1991	7.714	1.631	17.798	7.489
1992	7.734	1.586	17.841	7.363
1993	7.704	1.551	17.905	7.400
1994	7.931	1.768	17.298	7.384
1995	7.909	1.752	17.365	7.417
1996	7.867	1.702	17.211	7.281
1997	7.864	1.696	17.257	7.291
1998	7.804	1.663	17.324	7.311
1999	7.726	1.634	17.389	7.239
2000	7.706	1.602	17.257	7.099
2001	7.807	1.700	17.381	7.138
2002	7.796	1.677	17.512	7.173
2003	7.738	1.647	17.564	7.181
2004	7.654	1.603	17.413	7.037
2005	7.653	1.602	17.473	7.062
2006	7.850	1.931	16.452	7.079
2007	7.696	1.861	16.526	7.100
2008	7.527	1.775	16.397	6.965
2009	7.529	1.766	16.430	6.962
2010	7.387	1.694	16.542	6.984
2011	7.781	1.826	16.601	6.992
2012	7.600	1.747	16.717	7.002
Média	7.722,94	1.698,65	17.338,23	7.296,13

Pela Figura 17 podem ser conferidas as variações de produtividade para o cenário A2, no qual quando utilizada a irrigação, praticamente dobram-se as produtividades de matéria seca e aumenta-se em média quatro vezes a produtividade de grãos. Aqui fica claro a grande importância que a prática da irrigação terá em cenários futuros.

Figura 17 - Valores de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho para o cenário futuro A2 e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), para o cenário atual

O cenário B1 é considerado o cenário mais otimista das projeções do IPCC (Tabela 16). Isso porque é considerado como aquele que garante o desenvolvimento regional a fim de promover a sustentabilidade. Dessa forma, ele apresenta produtividades na condição de sequeiro maiores que os outros dois cenários futuros. A produtividade de matéria seca é de 9.000 kg ha⁻¹ na condição de sequeiro ficando abaixo da média apresentada pelo cenário atual (14.000 kg ha⁻¹) e 18.000 kg ha⁻¹ na condição irrigada atingindo em alguns momentos a média apresentada no cenário atual. Já para a produtividade de grãos, 2.400 kg ha⁻¹ na condição de sequeiro fica bem abaixo da média do cenário atual (Figura 18), porém, na condição irrigada apresenta 8.000 kg ha⁻¹ mostrando-se superior ao encontrado na atualidade. Isso deixa clara a importância da irrigação no cenário futuro, pois esta prática conseguirá promover a manutenção e possivelmente o aumento da produtividade do milho mesmo com alterações climáticas.

Tabela 16 - Produtividade de matéria seca e produtividade de grãos para as condições de cultivo de milho em ambiente de sequeiro e irrigado para o cenário B1

Cenário	Cenário B1 Sequeiro		Cenário B1 Irigado	
Ano	PMS	PG	PMS	PG
	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹
1982	8.847	2.409	18.078	7.957
1983	8.827	2.407	18.109	7.994
1984	8.842	2.436	17.836	7.976
1985	8.843	2.444	17.803	7.973
1986	8.736	2.401	17.695	7.896
1987	9.624	2.674	17.774	7.910
1988	9.681	2.702	17.791	7.923
1989	9.666	2.677	17.629	7.779
1990	9.334	2.376	18.363	8.010
1991	9.352	2.383	18.356	8.007
1992	9.398	2.403	18.451	8.029
1993	9.490	2.483	18.342	8.146
1994	9.396	2.441	18.143	8.009
1995	9.469	2.468	18.139	8.002
1996	9.471	2.465	17.868	7.913
1997	9.415	2.427	18.286	8.055
1998	9.523	2.482	18.137	8.062
1999	9.437	2.439	17.977	7.933
2000	9.397	2.419	18.012	7.969
2001	9.472	2.426	18.138	7.992
2002	9.269	2.347	17.983	7.848
2003	8.774	2.034	17.984	7.849
2004	8.891	2.195	16.922	7.135
2005	8.980	2.290	17.593	7.719
2006	9.022	2.375	17.449	7.796
2007	8.961	2.335	17.552	7.849
2008	9.024	2.368	17.560	7.850
2009	7.772	2.081	17.615	7.857
2010	7.689	2.002	17.854	7.810
2011	7.690	2.007	17.897	7.851
2012	7.356	1.725	17.884	7.856
Média	9.020,90	2.358,74	17.910,32	7.901,77

No cenário B1 as variações de produtividade são um pouco maiores que nos outros cenários futuros. Porém, observa-se a mesma condição vista nos anteriores: cultivo de sequeiro com baixa produtividade de matéria seca e de grãos e cultivo irrigado explorando todo o potencial do híbrido. Mais uma vez ressalta-se a importância da irrigação nos tempos

futuros, pois esta conseguirá manter e aumentar os rendimentos de culturas importantes à alimentação da população (Figura 18).

Figura 18 - Valores de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), simulados pelo CERES-MAIZE, para as condições de cultivo de milho para o cenário futuro B1 e valores médios de Produtividade de Matéria Seca (MS) (Sequeiro e Irrigado) e Produtividade de Grãos (G) (Sequeiro e Irrigado), para o cenário atual

2.3.2.2 Produtividade Relativa entre os cenários futuros e o cenário atual

A Figura 19A apresenta a produtividade relativa de matéria seca no ambiente de sequeiro. Nota-se que os valores estão em torno de 60% em relação ao cenário atual. Outro ponto interessante é que o cenário B1 foi aquele que apresentou os maiores valores, chegando a atingir 70% da produtividade atual, enquanto que o cenário A2 apresentou valores abaixo de 60%. O mesmo padrão pode ser encontrado para a produtividade de grãos (Figura 19B). Porém os valores médios ficaram em torno de 50%, tendo os maiores valores apresentados pelo cenário B1, cerca de 60%, e os menores valores apresentados pelo cenário A2, cerca de 40%. Na condição irrigada, apresentou-se uma situação diferente do observado até o presente momento. A produtividade relativa de matéria seca nos cenários futuros apresentou valores semelhantes ao cenário atual, mostrando que a prática de irrigação consegue suprir as demandas ambientais da planta de milho (Figura 19C). Isso se dá, provavelmente pela planta

ter passado por um estresse devido unicamente à falta de água, no ambiente de sequeiro. Porém, o que mais chamou a atenção, foi a produtividade de grãos. Os três cenários futuros ultrapassaram a produtividade apresentada pelo cenário atual em cerca de 15%, em média. O cenário B1 se destacou apresentando valores maiores que 20% de produtividade, acima daquele apresentado pelo cenário atual. Isso quer dizer que a prática de irrigação aumentará a produtividade do milho em cenários futuros (Figura 19C e 19D).

Figura 19 - Produtividades relativas de milho considerando os cenários futuros (A1B, A2 e B1) em relação ao cenário atual para: Matéria Seca (condição Sequeiro) (A), Grãos (condição Sequeiro) (B), Matéria Seca (condição Irrigado) (C), Grãos (condição Irrigado) (D)

2.3.2.3 Água utilizada pela planta em regime de sequeiro e irrigado

Tratando-se de irrigação e cenários futuros é importante dar atenção ao manejo da água. Como a irrigação é uma das práticas que mais se emprega água, ressalta-se a importância dos estudos nessa questão.

Pela Tabela 17 podem ser conferidas as quantidades de água utilizadas pela cultura do milho e a massa de grãos produzida para cada milímetro de água utilizada pela cultura tanto nas condições de sequeiro quanto irrigado e para os diferentes cenários. Pode-se notar que nas

condições de irrigação, a cultura do milho utiliza mais água que nas condições de sequeiro, média de 3,8 mm dia⁻¹ contra 1,7 mm dia⁻¹. Isso se dá por não haver déficit hídrico, possibilitando a ocorrência da máxima transpiração da cultura. Junto a isso, observa-se que no ambiente irrigado produz-se bem mais grãos de milho para cada milímetro de água utilizado pela planta. Esta pode ser considerada uma otimização de produtividade do híbrido.

Tabela 17 - Quantidade de água utilizada pela cultura do milho e massa de grãos por milímetro de água utilizada pela cultura do milho nas condições de sequeiro e irrigado para os cenários atual e futuros

Cenário	Sequeiro	Irigado	kg mm ⁻¹ H ₂ O	
	mm dia ⁻¹	mm dia ⁻¹	Sequeiro	irrigado
atual	2,91	3,98	10,8	11,9
A1B	1,38	3,66	10,7	15,7
A2	1,44	3,67	9,8	16,4
B1	1,70	3,65	10,8	16,8

Ainda analisando a Tabela 17, verifica-se que o melhor aproveitamento de água se dá no cenário B1, das projeções do IPCC, no qual se produz em média cerca de 11 kg de grãos para cada mm de água absorvido pela planta. Neste cenário é quando ocorre o maior aproveitamento de água pela planta, ao passo que no cenário A2, mais pessimista, é quando a planta tem a menor eficiência de utilização de água.

Nos cenários futuros, a produtividade de grãos terá média na ordem de 16 kg por milímetro de água disponível, enquanto que no cenário atual apresenta 12 kg por milímetro de água disponível na condição irrigada. Já para a condição de sequeiro, os cenários futuros apresentam valor médio de 10,4 kg por milímetro de água disponível enquanto que no cenário atual esse valor é de 10,8 kg por milímetro de água disponível.

2.3.2.4 Comparação da produtividade de grãos nos diferentes cenários e lâmina aplicada

A fim de avaliar as produtividades de milho e se o manejo de irrigação utilizado na atualidade pode ser utilizado nos cenários futuros, procurou-se comparar a quantidade de grãos produzida (kg ha⁻¹) nos diferentes cenários e diferentes condições de cultivo, bem como a comparação das lâminas de irrigação utilizadas (mm).

Pode-se observar que na condição de cultivo de sequeiro, os cenários futuros têm produtividade de grãos menores que a atualidade apresentando valores de 2.000 e 4.405 kg ha⁻¹, respectivamente, analisando ao nível de 5% de probabilidade. Porém, com a utilização de

irrigação, tais produtividades são estatisticamente iguais, ao nível de 5% de probabilidade. O que mostra a devida importância que a prática da irrigação deve continuar recebendo, bem como o manejo racional da água.

Outro ponto a ser avaliado é a massa de grãos produzidos para cada mm de água aplicado. Nota-se que o cenário B1, o mais otimista dos cenários estudados, foi aquele que mais aproveitará a água aplicada apresentando 21,7 kg de grãos por milímetro de água disponível. Feita a análise de comparação de médias de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, a irrigação terá maior influência para o cenário B1 do que para os outros cenários. Além de haver um aumento de mais de 100% de produtividade de grãos para cada mm de água aplicada via irrigação comparando-se com o cenário atual.

Tabela 18 - Produtividade de grãos de milho por hectare e por mm de água aplicada e lâmina de água aplicada em mm dia⁻¹ na cultura do milho nos diferentes cenários

Cenário	Produtividade de Grãos		Lâmina Aplicada	Produtividade de Grãos por mm de água aplicado
	Sequeiro	Irrigado		
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	mm dia ⁻¹	kg mm ⁻¹
atual	4405,10 a	6509,94 a	1,2 a	9,7 a
A1B	1776,10 b	6931,10 a	2,3 b	18,7 b
A2	1698,65 b	7296,13 a	2,2 b	20,7 bc
B1	2358,75 b	7901,77 a	2,0 b	21,7 c

*em minúsculos há a indicação do resultado da comparação de médias das colunas feita pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Por fim, a comparação das lâminas de água aplicadas na cultura do milho em mm dia⁻¹ indica que em nenhum dos cenários futuros a lâmina utilizada atualmente poderá ser utilizada. Sabendo que o déficit hídrico foi sempre inexistente nas simulações, qualquer lâmina de água inferior à proposta pela Tabela 18 indicaria queda na produtividade. Dessa forma, a necessidade hídrica futuramente será muito maior que a atual. Assim, ressalta-se a importância do manejo racional da água. O cenário B1, o mais otimista, é aquele que apresenta uma menor demanda hídrica comparando-se a outros cenários futuros.

3 CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos pela simulação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE, tomando-se por base a análise dos testes de comparação de médias de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, pode-se concluir que:

- 1) No caso da cana-de-açúcar, o manejo da irrigação, em cenários futuros, não deverá seguir os moldes do cenário atual. Se adotado o mesmo manejo, haveria desperdício de água, algo que é inconcebível atualmente, visto que busca-se a economia e o manejo racional da água. A produtividade da cana-de-açúcar irá decair, segundo as respostas dos modelos, dessa forma, para que o déficit hídrico fosse suprido, a lâmina necessária seria de em média 0,45 mm dia⁻¹;
- 2) A irrigação auxiliará na estabilização da produtividade da cana-de-açúcar, porém não será a única prática que ajudará a manter a produtividade. Além dela, sugere-se que outras técnicas, tais como genética e tecnologias que auxiliem a tolerância a altas temperaturas, sejam pesquisadas.
- 3) No cultivo do milho, o manejo da irrigação utilizado nos dias atuais não será suficiente para cenários futuros, pois os níveis de produtividade desejáveis não seriam mantidos. Para que estes níveis sejam atingidos, será necessário um incremento de água aplicada, em média de 2,2 mm dia⁻¹.
- 4) Ainda sobre o cultivo do milho, a irrigação é uma prática de vital importância para manutenção das produtividades, sempre tomando-se os devidos cuidados com a preservação e uso racional da água.
- 5) Os modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE são ferramentas que permitem o estudo o desempenho de culturas em cenários futuros. Porém, cabe ressaltar a importância e desempenho do modelo MarkSim que propiciou o fornecimento dos dados de cenários futuros indicados pelo IPCC, os quais “alimentaram” ambos os modelos.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P.E.P. de; RESENDE, M. **Cultivo do milho: manejo de irrigação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 8 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 47).
- ALDRICH, S.R.; SCOTT, W.O.; LENG, R.E. **Modern corn production**. 2nd ed. Champaign: A & L Publication, 1982. 371 p.
- ALEXANDROV, V.; EITZINGER, J.; CAJIC, V.; OBERFORSTER, M. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, p. 372-389, 2002.
- ALFONSI, R.R.; PEDRO JR., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)**. Rome: FAO, 1998. 328 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARGETON, P.E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*), na região de Piracicaba**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- ASSAD, E.D.; PINTO H.S., ZULLO JR., J., ÁVILA, A.M.H. DE. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p.1057-1064. 2004.
- AUDE, M.I.S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.
- AZEVEDO, H.M. de. **Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba**. 2002. 112 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) –Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.
- BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.
- _____. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-acucar (*Saccharum spp.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais...** Mossoró: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1979. p. 6-8.

BERDING, N.; HURNEY, A.P.; SALTER, B.; BONNETT, G.D. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1, p. 203-217, 2005.

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H. Ecofisiologia do milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., Florianópolis, 2002. **Anais...** Florianópolis: ABMS, 2002. 1 CD-ROM.

BERLATO, M.A.; SUTILI, V.R. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência – pendoamento e emergência – espigamento de 3 cultivares de milho. In: REUNIÃO TÉCNICA DE MILHO E SORGO, 21., 1976, Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre: FEPAGRO, 1976. p. 26.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Impressa Universitária, 2005. 611 p.

BEZUIDENHOUT, C.N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. Durban: MTech Technikon Natal, 2000. 78 p.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.

BORGES ALVES, M.E.; PAIXÃO, J.S.; ANDRADE, C.L.T.; AMARAL, T.A.; STEIDLE NETO, A.J.; SILVA, D.F.; FERREIRA RODRIGUES, C.C. Épocas de semeadura de milho em Minas Gerais: utilização do modelo DSSAT para análise do risco climático. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., 2012, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: ABMS, 2012. p. 3591-3597

BOULLON, D.R.; RODRIGUEZ, G.R.; MAGRIN, G.O. Aplicación de CERES-maize a la estimación de rendimientos regionales. In: REUNIÓN ARGENTINA DE FISILOGIA VEGETAL, 21., 1996, Buenos Aires. **Actas...** Buenos Aires: INTA Castelar, 1996. p. 168-170.

BRAGION, L. **O próalcool renasce**. Disponível em: <<http://comciencia.br/comciencia/?section=8&edicao=23&id=254&tipo=0>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

BULL, T.; TOVEY, D.A. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: Sugar Journal, 1974. p. 1021-1032.

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

CARRETERO, M.V. **Utilização do tanque de evaporação classe “A” para controle da irrigação por gotejamento em soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1982. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Piracicaba, 1982.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar safra 2012/2013.** Comparativo de área, produção e produtividade. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 11 jan. 2013.

_____. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos safra 2012/2013.** Comparativo de área, produção e produtividade. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 11 jan. 2013.

COMPANY, M.L. **EI maíz, su cultivo y aprovechamiento.** Madrid. Ed. Mundi Prensa, 1984. 318 p

CURE, J. D. Carbon dioxide doubling response: a crop survey. In: STRAIN, B. R.; CURE, J. D. (Ed.). **Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation.** Washington: Carbon Dioxide Research Division, U. S. Department of Energy 1985. p. 99-116.

DALRI, A.B. Irrigação em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: FEALQ, 2006. p. 157-169.

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

_____. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Campina Grande: FAO, 1994. 306 p. (Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO NETO, D. **Modelos fitotécnicos referentes à cultura de milho.** 1999. 227 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

DUNCAN, W.G. Maize. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology: some case histories.** Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 23-50.

FANCELLI, A.L. Milho e feijão: elementos de manejo em agricultura irrigada. In: _____. **Fertirrigação: algumas considerações.** Piracicaba: ESALQ, 1991. p. 156-167.

FANCELLI, A.L.; LIMA, U.A. **Milho: produção, pré-processamento e transformação agroindustrial.** São Paulo: FEALQ, 1982. 112 p.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, A.H. **La canã de azucar.** Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FNP CONSULTORIA & COMERCIO. Cana-de-açúcar. In: _____. **AGRIANUAL 2008: anuário da agricultura brasileira.** São Paulo, 2008. p. 235-264.

FREITAS, P.S.L. de; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; COSTA, L.C. Simulação da produtividade do milho pelo modelo CERES-Maize em função da lâmina e da uniformidade de aplicação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 225-232, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662004000200010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 11 jan. 2013.

GAVA, G.J.C.; SILVA, M.A.; SILVA, R.C. da; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KÖLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662011000300005&lng=en&tlng=pt>. Acesso em: 18 nov. 2013.

GEDANKEN, A.; MANTOVANI, E.C.; MANTOVANI, B.H.M.; COSTA, L.C.; SANS, L.M.A.; FREITAS, P.S.L. Utilização do modelo CERES-Maize para avaliar estratégias de irrigação em duas regiões de Minas Gerais. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 439-447, 2003.

GODOY, A.P. **Modelagem de processos de acumulação de biomassa e de açúcar da cana-de-açúcar via sistemas nebulosos**. 2007. 254 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

GOMES, M.C.R. **Efeito da irrigação suplementar na produtividade da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes**. 1999. 51 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 1999.

GOODMAN, M.M.; SMITH, J.S.C. Botânica. In: PATERNIANI, E. (Coord.). **Melhoramento e produção do milho no Brasil**. Piracicaba: Ed. Marprint, 1978. p. 32-61.

HARTKAMP, A.D.; WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G. Comparison of three weather generators for crop modeling: a case study for subtropical environments. **Agricultural Systems**, Essex, v. 76, p. 539–560, 2003.

HENCKEL, P.A. Physiology of plants under drought. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 15, p. 363-86, 1964.

HOUGHTON, J.; MEIRA FILHO, L.; CALLANDER, B.; HARRIS, N. ATTENBERG, A.; MASKELL, K. (Ed). **Climate change 1995: the science of climate change**. Cambridge: Contribution of the Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC, 1996. 570 p.

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**, Mount Edgecombe, v. 8, n. 2, p. 93-99, Feb. 1991.

_____. Temperature and season effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G.; KIKER, G. **CANEGRO 3.10: DSSAT version 3.1 1998** distribution software. Honolulu: University of Hawaii, 1997. 78 p.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, M.; ROBERTSON, J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 71-84, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001: the Scientific Basis-Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report.** Cambridge: Cambridge University Press, 2001a. 98 p.

_____. **Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability - Contribution of Working Group 2 to the IPCC Third Assessment Report.** Cambridge: Cambridge University Press, 2001b. 98 p.

_____. **Climate change 2001: the Scientific Basis-Summary for Policy makers and Technical Summary of the Working Group I Report.** Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 98 p.

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

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

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

JONES, J.; TSUJI, G.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L.; THORNTON, P.; WILKENS, P.; IMAMURA, D.; BOWEN, W.; SINGH, U. Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT. In: TSUJI, G.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. (Ed.). **International benchmark sites network for agrotechnology transfer: a system approach to research and decision makins.** Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1996. v. 3.

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

JONES, P.G.; THORNTON, P.K. A rainfall generator for agricultural applications in the tropics. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 63, p. 1 19, 1993.

_____. Spatial and temporal variability of rainfall related to a thirdorder Markov model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 86, p. 127-138, 1997.

_____. Linking a third-order Markov rainfall model to interpolated climate surfaces. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, n. 3, p. 213-231, 1999.

_____. **MarkSim software to generate daily weather data for Latin America and Africa.** Amsterdam: American Society of Agronomy, 2000.

_____. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 114, p. 1-5, 2013.

JONES, P.G.; THORNTON, P.K.; DIAZ, W.; WILKENS, P.W. **MarkSim: a computer tool that generates simulated weather data for crop modeling and risk assessment.** Cali: CIAT, 2002. 1 CD-ROM.

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**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KIMBALL, B.A.; IDSO, S.B. Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. **Agriculture and Water Management**, Connecticut, v. 7, p. 55-72, 1983.

KINIRY, J.R. Maize phasic development. In: HANKS, J.; RITCHIE, J.T. (Ed.). **Modeling plant and soil systems**. Madison: ASA, 1991. chap. 4, p. 55-70.

KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; VANDERLIP, R.L.; ATWOOD, J.D.; REICOSKY, D.C.; MULLIKEN, J.; COX, W.J.; MASCANI JR., H.J.; HOLLINGER, S.E.; WIEBOLD, W.J. Evaluation of two maize models for nine U. S. locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 421-426, 1997.

LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo Ceres-maize em condições tropicais do Brasil**. 1995. 119 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

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

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo de carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Coord.). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p. 113-118.

MAGALHÃES, P.C.; PAIVA, E. Fisiologia da produção de milho. In: EMBRAPA. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Brasília: EMBRAPA, SPI, 1993. p. 85-92.

MANGELSDORF, P.C. **Corn: its origin, evolution, and improvement**. Cambridge: Harvard University Press, 1974. 262 p.

MARENGO, J.A. Impactos das condições climáticas e da variabilidade e mudanças do clima sobre a produção e os preços agrícolas: ondas de frio e seu impacto sobre a cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: LIMA, M.A. de; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. (Ed.). **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 97-123.

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

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA JUNIOR, G. B. Produtividade Agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 295-301, 2001.

MAVROMATIS, T.; BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; WILKERSON, G.G.; HOOGENBOOM, G. Repeatability of model genetic coefficients derived from soybean performance trials across different states. **Crop Science**, Madison, v. 42, p. 76-89, 2002.

MEDLYN, B.E. MCMURTRIE, R.E. Effects of CO₂ on plants at different timescales. In: EHLENGER, J.R.; CERLING, T.E.; DEARING, D.M. (Ed.). **A history of Atmospheric CO₂ and its effects on plants, animals, and ecosystems**. New York: Springer, 2005. p. 530.

MONTEITH, J. The quest balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison v. 88, p. 695-697, 1996.

MOONEY, H.A.; CANADELL, J.; CHAPIN, F.S.; EHLENGER, J.R.; KÖRNER, C.; McMURTIE, R.E.; ARTON, W.J.; PITELKA, L.F.; SCHULZE, E.D. Ecosystem physiology responses to global change. In: WALKER, B.; STEFFEN, W.; CANADELL, J.; INGRAM, J. **The terrestrial biosphere global change**. London: Cambridge University Press, 1999. p. 141-189.

MORISON, J.I.L. Intercellular CO₂ concentration and stomata response to CO₂. In: ZEIGER, E.; FARQUHAR, G.D.; COWAN, I.R. (Ed.). **Stomata function**. Stanford: Stanford University, 1987. p. 229-251.

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, J.W.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311-318, mar. 2012.

NICKELL, L.G. **Plant growth regulating chemicals**. Boca Raton: CRC Press, 1983. 2 v.

NOBRE, C.A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima. In: INSTITUTO DE PESQUISA EM ECONOMIA APLICADA. **Mudança do clima**. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Secretaria de Comunicação do Governo e Gestão Estratégica. 2005. v. 1. (Cadernos Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 3).

NOBRE, C.A.; ASSAD, E.D.; OYAMA, M.D. Mudança ambiental no Brasil: o impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura. **Scientific American Brasil**, New York, n. 12, p. 70-75, set. 2005.

O’LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

OMETTO, J.C. **Uma equação para estimativa de evapotranspiração potencial: sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba- SP**. 1974. 129 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas. Fundação Cargill, 1987. v. 1, 431 p.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 45, p. 107-122, 1986.

PERES, F.C. **Determinação dos coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar: ciclo de cana soca**. 1988. 94 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; ZULLO Jr, BRUNINI, O. O aquecimento global e a agricultura. **Revista Eletrônica do Jornalismo Científico**, Rio de Janeiro, v. 35, p. 1-6, 2002.

POORTER, H.; PÉREZ-SOBA, M. Plant growth at elevated CO₂. In: *ENCYCLOPEDIA of global environmental change*. Chichester: John Wiley 2002. p. 489-496.

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. **Cultura do milho irrigado**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2003. 317 p.

ROCHA, F.J. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça**. 2013. 94 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. UNESP, Instituto de Biociências. 1995. 99 p. <Disponível em: <http://www.residenciaagronomica.ufpr.br/bibliografia/MATURAD.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

SANTOS, M.A.L. **Irrigação suplementar em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 101 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 19-36.

SHAW, R.H. **Corn and corn improvement**. Madison: American Society of Agronomy, 1977. 591 p.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT V.4.5 DSSAT/CANEGRO: sugarcane plant module, scientific documentation**. Mont Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling; South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34 p.

SIQUEIRA, O.J. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A. de; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. (Ed.). **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 65-96.

SOUZA, A.P. **A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO₂ sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de *Saccharum spp.*** 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Estrutural) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SOUZA, E.F.; BERNADO, S.; CARVALHO, J.A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três variedades em Campos dos Goytacazes. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 28-12, 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Rewood City: Benjamin/Cummings, 1991. 565 p.

TANAKA, A.; YAMAGUCHI, J. **Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz**. Chapingo: Colegió de Postgraduados, 1977. 124 p.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **The South African Sugar Journal**, Durban, v. 60, n. 11, p. 592-600, 1976.

THORNTON, P.K.; BOOLTINK, H.W.G.; STOORVOGEL, J.J. A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model outputs. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 620-627, 1997

VIEIRA JUNIOR, P.A. Milho. In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. (Ed.). **Ecofisiologia dos cultivos anuais**. São Paulo: Nobel, 1999. p. 41-72.

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

WARRICK, R.A. Carbon dioxide, climatic change and agriculture. **The Geographical Journal**, Oxford, v. 154, n. 2, p. 221-233, 1988.

WATSON, R.T.; ZINYOWERA, M.C.; MOSS, R.H. **Climate change 1995: impacts, adaptation and mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 878 p.

WIEDENFELD, R.P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, p. 173–182, 2000.

WIT, C.T.; GOUDRIAAN, A.H. **Simulation of ecological processes**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1978. 140 p.