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

Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para a sua minimização em diferentes regiões brasileiras

Murilo dos Santos Vianna

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

**Piracicaba
2014**

Murilo dos Santos Vianna
Engenheiro Ambiental

**Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de
irrigação complementar para a sua minimização
em diferentes regiões brasileiras**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

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

Piracicaba
2014

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

Vianna, Murilo dos Santos

Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para a sua minimização em diferentes regiões brasileiras / Murilo dos Santos Vianna. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2014.

177 p. : il.

Dissertação (Mestrado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.
Bibliografia.

1. Risco climático 2. CSM-CANEGRO 3. Produtividade potencial 4. Produtividade atingível 5. Irrigação complementar I. **Título**

CDD 633.61
V617r

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

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente minha mãe, Ana Paula pelo carinho e afeto durante toda minha jornada, sempre apoiando e indicando os caminhos certos a seguir, além de exemplo para toda a minha vida. Ao meu avô, Augusto Emauz pelo suporte em todos os momentos possíveis e impossíveis.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas, pela excelente orientação e acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho, assim como pela amizade, convivência e ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento acadêmico.

Ao Prof. Dr. Fabio Ricardo Marin, pela orientação durante a graduação, colaboração, amizade, e incentivo para trabalhar na área de agrometeorologia na ESALQ/USP.

À Raissa Radaeli, pelo amor, carinho e principalmente pelo incentivo durante os últimos meses de conclusão deste trabalho.

Aos colegas da “Cúpula”, pelo incentivo, momentos de descontração e trocas de experiências, que ajudaram a abrir caminho a novas discussões neste trabalho.

À Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização deste mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo concedida.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a Agencia Nacional de Águas (ANA) por cederem os dados meteorológicos para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Cana-de-açúcar	13
2.2 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil	19
2.3 Fatores climáticos que afetam a produtividade da cana-de-açúcar	20
2.3.1 Radiação Solar	21
2.3.2 Temperatura	22
2.3.3 Exigências hídricas da cana-de-açúcar	23
2.3.4 Velocidade do vento e condições adversas	26
2.4 Outros fatores que afetam a produtividade da cana-de-açúcar	27
2.5 Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar	30
2.6 Uso da irrigação como uma prática de minimização dos riscos climáticos para a cultura da cana-de-açúcar	31
2.7 Uso de modelos de simulação para avaliação do risco climático de culturas	36
2.8 Modelos de Simulação	37
2.8.1 DSSAT	41
2.8.2 CSM-CANEGRO	46
3 MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1 Dados de Entrada	59
3.1.1 Clima	59
3.1.2 Solo	63
3.2 Cultivar	68
3.3 Simulações	70
3.4 Análise de dados	71
3.4.1 Caracterização climática	71
3.4.2 Avaliação do modelo CSM-CANEGRO	72
3.4.3 Definição do risco climático para a cultura da cana-de-açúcar em função das produtividades potencial e atingível.	75
3.4.4 Determinação dos benefícios da irrigação complementar na produtividade da cana-de-açúcar	76

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1 Caracterização agroclimática das regiões produtoras e de expansão da cana-de-açúcar no Brasil	77
4.2 Teste do modelo CSM-CANEGRO para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em condições operacionais	87
4.3 Avaliação do modelo CSM-CANEGRO para estimar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em diferentes condições edafo-climáticas	90
4.3.1 Piracicaba, SP.....	90
4.3.2 Formosa, GO	93
4.3.3 Santa Maria, RS	97
4.3.4 Marabá, PA	100
4.3.5 João Pessoa, PB.....	103
4.3.6 Petrolina, PE.....	106
4.4 Estimativa da produtividade potencial e atingível para diferentes regiões produtoras do Brasil	109
4.4.1 Produtividade Potencial	109
4.4.2 Produtividade Atingível	112
4.5 Risco climático para a cana-de-açúcar em diferentes regiões produtoras	120
4.5.1 Cenário de menor risco climático	120
4.5.2 Cenário de maior risco climático	124
4.6 Benefícios da irrigação complementar para o incremento de produtividade da cana-de-açúcar	128
5 CONCLUSÕES	137
REFERÊNCIAS.....	139
ANEXOS	153

RESUMO

Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para sua minimização em diferentes regiões brasileiras

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância social, econômica e ambiental para o Brasil. Com o aumento da demanda de etanol pela frota crescente de veículos *flexfuel* e com preço atrativo do açúcar, a cultura vem se expandindo de forma desordenada no país. Assim como as demais culturas, a cana-de-açúcar é dependente das condições climáticas para seu desenvolvimento, as quais são os principais fatores de risco para a cultura. Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi determinar o risco climático para a cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras, com foco nas áreas de expansão, e estabelecer os benefícios de diferentes estratégias de irrigação complementar no incremento de produtividade. Para tanto, utilizou-se o modelo CSM-CANEGRO parametrizado para as condições brasileiras para simular a produtividade da cana-planta de 12 meses em 30 localidades de diferentes regiões do Brasil, com condições agroclimáticas distintas, empregando-se séries históricas de dados meteorológicos, de 1981 a 2010, e para três tipos de solos com diferentes características, em termos da capacidade de retenção de água. A partir dos valores estimados de produtividade potencial (PP) e atingível (PA) foram definidos dois cenários de risco climático de acordo com os níveis de eficiência climática (η), dada pela razão entre PA e PP, sendo um cenário otimista ($\eta \geq 0,65$) e um conservador ($\eta \geq 0,45$). Além disso, foram simulados cinco diferentes condições de irrigação complementar, com lâminas fixas de 30 mm e variando-se o número de irrigações, de zero (sequeiro) a cinco (150 mm no ciclo), durante a estação seca de cada localidade. Os resultados mostraram que mesmo com banco de dados meteorológicos restrito, foi possível caracterizar o clima das principais tradicionais e de expansão da cana-de-açúcar. O modelo CSM-CANEGRO apresentou bom desempenho em estimar a produtividade comercial da cana-de-açúcar em diferentes ambientes, com uma Raiz Quadrado do Erro Médio da ordem de 15 t ha⁻¹. O modelo, ainda, foi capaz de simular o efeito dos diferentes tipos de solo e datas de plantio na produtividade potencial e atingível da cana-de-açúcar, o que possibilitou se caracterizar as diferenças nos riscos climáticos associados à cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil. A região de maior risco climático foi Petrolina, PE, enquanto que as regiões de menores riscos foram aquelas em que as chuvas eram mais intensas, como em Recife, PE, e Araguaína, TO. Por meio das simulações considerando as diferentes estratégias de irrigação, foi possível se observar que a resposta da cana-planta de 12 meses à irrigação complementar depende da combinação entre lâmina aplicada, tipo de solo e data de plantio. Os maiores incrementos de produtividade se deram no solo de textura arenosa, já que nessas condições o déficit hídrico é maior. No entanto, na grande maioria das localidades analisadas, o incremento de produtividade médio para as lâminas aplicadas, de 30 a 150 mm, não passaram de 30%, sendo a única exceção a região de Petrolina, PE.

Palavras-chave: Risco climático; CSM-CANEGRO; Produtividade potencial; Produtividade atingível; Irrigação complementar

ABSTRACT

Climatic risk for sugarcane and complementary irrigation strategies for then minimization in different Brazilian regions

Sugarcane is a crop of major social, economic and environmental importance for Brazil. The increasing demand by ethanol for the national flex fuel cars and the attractive sugar prices in the international market is making this crop to expand in a disorderly manner in the country. As well as the other crops, sugarcane requires specific climatic conditions to develop and produce, which are the main source of risk for this crop. Based on that, the objective of this study was to determine the climatic risk for sugarcane crop in different Brazilian regions, mainly for the areas to where the crop is expanding recently, and to evaluate the benefits of different complementary irrigation strategies for yield increase. For that, the model CSM-CANEGRO, parameterized for Brazilian conditions, was used to simulate the 12-month plant cane crop yield for 30 locations in different regions of Brazil, with varied climates, using a historical climate series from 1981 to 2010 and three types of soils, with distinct soil water holding capacities. With the simulated potential (PP) and attainable (PA) yield data two scenarios of climatic risk were defined, according to the climatic efficiency (η), one optimistic ($\eta \geq 0.65$), and other conservative ($\eta \geq 0.45$). Besides, five different complementary irrigation scenarios were simulated, with a fixed irrigation depth of 30 mm, and with the number of irrigations ranging from zero (rainfed crop) to five (150 mm per cycle), during the dry season of each location. The results showed that even with restricted climate series was possible to characterize the climatic conditions of the traditional and expanding sugarcane areas. The CSM-CANEGRO presented a satisfactory performance to estimate the operational sugarcane yield in different environments, with a Root Mean Square Error of about 15 t ha⁻¹. The crop model was also able to simulate the potential and attainable yield for different soil types and planting dates, which makes possible to characterize the climatic risks associated to the sugarcane crop in the different Brazilian regions. The region with the highest risk was Petrolina, PE, whereas the smallest risk was observed where the rainfall was more intense, as in Recife, PE, and Araguaína, TO. Based on the simulations with the different complementary irrigation strategies, it was possible to understand that the 12-month plant cane response to water depends on the combination among amount of water, soil type and planting date. The highest yield increments were observed in the sandy soils, since this is the condition where the water deficit is more intense. However, for the majority of the locations evaluated, the average yield increment for the irrigation depth applied, between 30 and 150 mm, were not greater than 30%, with the only exception for Petrolina, PE.

Keywords: Climatic risk; CSM-CANEGRO; Potential yield; Attainable yield; Complementary irrigation

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas de maior importância social, econômica e ambiental para o Brasil, atingindo uma produção de 652 milhões de toneladas em 8,8 milhões de hectares, sendo o país o maior produtor mundial da cultura (FAO, 2013). Em constante expansão, a cultura é a principal matéria prima para produção de etanol e açúcar, sendo a região Sudeste a de região de maior produção, principalmente no Estado de São Paulo, com cerca de 50% do total produzido no país (CONAB, 2013).

Por se tratar de uma das mais importantes commodities nacionais, movimentando cerca de 80 bilhões de dólares por ano e com uma produção de 50% do mercado mundial, a cana-de-açúcar possui um papel importante na economia brasileira (NEVES et al., 2009). O reconhecimento do etanol como combustível renovável também tem contribuído para o crescimento da demanda por esta cultura (GOLDEMBERG et al., 2008).

Os principais fatores ambientais que influenciam a produtividade de cana-de-açúcar são a temperatura do ar e a disponibilidade hídrica dos solos. A temperatura afeta vários processos metabólicos da planta, além de interferir na demanda evapotranspirativa. Já a disponibilidade de água no solo abaixo do ideal para a cultura pode causar redução nos perfilhos, na área foliar, estimular a senescência, reduzindo o crescimento dos colmos e, consequentemente, a produtividade (INMAN-BAMBER, 2004), o que torna a cultura muito dependente das condições climáticas.

Um dos modos de se avaliar os efeitos do clima no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade das culturas é por meio do uso de modelos de simulação, os quais são ferramentas muito valiosas no planejamento agrícola, auxiliando na otimização da produção e no gerenciamento da expansão de áreas com potencial produtivo. Existem vários modelos dedicados à simulação do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura da cana-de-açúcar no mundo, entre os quais se tem o AUSCANE (JONES et al., 1989), CSM-CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), QCANE (LIU e KINGSTON, 1995), APSIM-Sugar (KEATING et al., 1999), MOSICAS (MARTINÉ, 2003) e CASUPRO (VILLEGAS et al., 2005) sendo os mais usados o APSIM-Sugar, criado na Austrália, e o CSM-CANEGRO, de origem sul africana.

Por terem sido desenvolvidos em países com o clima semelhante ao brasileiro, os modelos APSIM-Sugar e o CANEGRO são boas alternativas para simulação de cana-de-açúcar no Brasil, desde que calibrados para as características genéticas das cultivares e solos

brasileiros (MARIN et al., 2011). Com essas adaptações, os modelos tornam-se de grande utilidade em estratégias de cultivo de cana-de-açúcar, contribuindo para determinar as áreas de risco e potencial de cultivo, além de permitir se avaliar diferentes estratégias de manejo da cultura, entre elas a irrigação.

Sendo assim, as hipóteses do presente estudo são de que o uso de modelos de simulação possibilita a definição do risco climático associado à produtividade da cultura da cana-de-açúcar nas áreas de expansão e que os mesmos permitirem avaliar os benefícios da irrigação complementar (salvamento) por meio do aumento da produtividade em diferentes regiões do país.

Com base nas hipóteses formuladas, o objetivo geral deste estudo foi determinar os riscos climáticos associados à produção da cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras, incluindo-se aquelas para onde a cultura vem se expandindo de forma desordenada nos últimos anos, por meio da utilização de um modelo mecanístico de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar. Para tanto, foram definidos os objetivos específicos:

- a) Caracterizar as condições agroclimáticas das principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil;
- b) Avaliar e testar o modelo CSM-CANEGRO para a estimativa da produtividade da cultivar RB86-7515 de cana-de-açúcar, comparando-se os resultados com dados operacionais;
- c) Empregar o modelo CSM-CANEGRO para a estimativa das produtividades potencial e atingível da cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras, com base em séries históricas de dados meteorológicos, para diferentes tipos de solo;
- d) Determinar o risco climático para a produção de cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras, com base no déficit hídrico e na produtividade relativa;
- e) Estabelecer, por meio de simulações, os benefícios da irrigação complementar (salvamento) para o incremento de produtividade da cana-de-açúcar nas regiões de maiores riscos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea do gênero *Saccharum* pertencente à família *Poacea*, sendo atualmente subdividida em seis espécies: *S. officinarum*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. sinensi* e *S. edule*. Há relatos de que sua origem tenha sido em Nova Guiné onde foram encontrados registros com mais de 8000 anos (MARIN et al., 2009; MOZAMBANI et al., 2006). Por volta de 1000 a.C. seu cultivo se espalhou gradualmente ao longo das rotas de migração humana para o Sudeste Asiático e na Índia onde já se tornava uma cultura de grande importância econômica na época. Mas os principais disseminadores dessa cultura foram os árabes que por volta dos 700 d.C. levaram a cana-de-açúcar para o mediterrâneo e Europa (MOZAMBANI et al., 2006).

A introdução da cana-de-açúcar nas Américas foi na época colonial, trazida por portugueses e espanhóis, sendo que a sua produção comercial se iniciou no Brasil somente em 1533. No Brasil, foi inicialmente usada na produção de açúcar, expandindo-se para a região nordeste e em seguida para a Zona da Mata nordestina e demais regiões brasileiras, como as capitanias de São Vicente (São Paulo), Bahia, Pernambuco e Alagoas, dando origem à agroindústria (BRASIL, 2007; FIGUEIREDO, 2008). Atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada numa ampla faixa de latitude, desde cerca de 35°N a 30°S e em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.000 m (RODRIGUES, 1995).

Com relação ao seu desenvolvimento, a cana-de-açúcar é uma gramínea tropical perene, que se desenvolve em forma de touceira com perfilhos em sua base de 2 a 4 m de altura e diâmetro com cerca de 0,05 m (JAMES, 2004). Sua parte aérea é formada por colmos, folhas e inflorescências, arranjadas em hastes, e a subterrânea formada por raízes e rizoma (MOZAMBANI et al., 2006).

O sistema radicular da cana-de-açúcar é ramificado, ou fasciculado, com maior quantidade de raízes nas camadas mais superficiais do solo. Estima-se que 85% da massa radicular total encontram-se nos primeiros 0,50 m de profundidade e, cerca de 60%, nos 0,30 m superficiais do solo (MARIN et al., 2009; SEGATO et al., 2006). Através de análises em raízes de diversas cultivares, foram definidas três categorias de raízes para cana-de-açúcar: as superficiais, mais finas e com alta capacidade de absorção de água e nutrientes; as raízes de sustentação, que sustentam a planta e podem atingir até 1,5 m de profundidade; e as raízes

profundas, que chegam a 6 m de profundidade, as quais têm o papel de abastecer a planta com água das camadas mais profundas nos períodos de intensa estiagem (JAMES, 2004).

Ao germinar, a cana-de-açúcar emite um número bastante variável de primórdios radiculares, que crescem e formam o conjunto de raízes. Antes da germinação, os primórdios radiculares ficam abrigados na zona radicular juntamente com a gema, que fica na região nodal da planta (MOZAMBANI et al., 2006). Após a germinação, são desenvolvidos dois tipos de raízes - primeiro, a raiz do tolete, que é mais ramificada e fina e, em seguida, a raiz dos perfilhos, que são mais espessas e menos ramificadas. No começo do desenvolvimento, a planta depende das raízes mais finas para absorção de água e nutrientes, depois essa função passa para as raízes dos novos perfilhos, e a raiz do tolete morre (JAMES, 2004).

Segundo Inforzato e Alvares (1957), o crescimento e a distribuição das raízes de cana-de-açúcar variam fortemente em função da idade da planta, com o maior desenvolvimento ocorrendo durante os primeiros 6 meses no sentido vertical, em profundidade, enquanto que nos meses seguintes apresenta um desenvolvimento muito maior nas primeiras camadas do solo. Tal variação em termos de massa de raiz é de $1,8 \text{ t ha}^{-1}$, para os primeiros seis meses, e de 8 t ha^{-1} quando a cana atinge seu máximo desenvolvimento, em torno do 12º mês. Gonçalves (2006) afirma que o sistema radicular da cana-de-açúcar renova-se anualmente, deixando em média $11,2 \text{ t ha}^{-1}$ de material orgânico no solo, que corresponde a 12% do peso das soqueiras em plantio comercial.

De modo geral, a profundidade e o desenvolvimento do sistema radicular variam em função da textura, aeração e da fertilidade do solo, sendo também função da cultivar, do ciclo e do vigor da cultura (JAMES, 2004; MARIN et al., 2009). Em solos menos férteis ou mais compactados, observa-se maior densidade de raízes nas camadas mais superficiais, enquanto que em solos mais férteis e menos adensados o enraizamento distribui-se de modo mais uniforme no perfil (COSTA, 2005). No Brasil, Koffler e Donzeli (1987) sugerem que, para solos mais adequados para o cultivo da cana-de-açúcar, com textura argilosa, relevo plano e alta fertilidade, as raízes chegam à cerca de 0,60 m de profundidade efetiva, enquanto que, em solos arenosos, pouco férteis e com relevo ondulado, onde o cultivo é considerado desfavorável, observa-se profundidade efetiva do sistema radicular inferior a 0,30 m.

A parte da cana-de-açúcar de maior valor comercial é o colmo, que se constitui num reservatório, onde em condições favoráveis à maturação, é acumulada grande quantidade de sacarose (CARDOZO e SENTELHAS, 2013). O seu desenvolvimento é iniciado por meio do surgimento de perfilhos, que está intimamente relacionado ao tempo térmico e ao estresse hídrico (GLASZIOU et al., 1965; INMAN-BAMBER, 1991).

O colmo é composto por sucessões de entrenós desenvolvidos durante seus estádios fisiológicos e fica acima do solo. Os nós, que consistem em uma gema lateral situada junto à inserção foliar contendo primórdios radiculares e anel de crescimento, são normalmente espaçados em intervalos de 0,15 a 0,25 m, sendo mais espaçados na parte superior do colmo onde ocorre a elongação (BLACKBURN, 1984). Segundo Marin et al. (2009), a distância entre os nós é regulada pelo estresse hídrico e temperatura do ar aos quais a planta está sujeita ao longo do ciclo. Segundo Mozambani et al. (2006), o colmo também é responsável pela sustentação das folhas e das panículas e o seu porte pode ser ereto, semi-ereto ou decumbente, dependendo da cultivar e idade da planta.

Dentre outros aspectos, as cultivares diferenciam-se entre si pelo comprimento do internódio, pelo diâmetro do colmo, pela rigidez e pela coloração. A epiderme do colmo é recoberta por uma camada cerosa que reduz a perda de água e protege o parênquima, que é constituído por células que armazenam o suco e entremeado por fibras que conferem rigidez ao colmo (JAMES, 2004). As células parenquimáticas são também responsáveis pelo acúmulo de sacarose durante o processo de maturação. O colmo como sendo um grande reservatório de sacarose, em condições de maturação acumula grande parte dela em seus entrenós. Os entrenós imaturos, localizados na região do colmo com folhas verdes, são fibrosos, com altas concentrações de hexoses e baixa concentração de sacarose (MARIN et al., 2009).

Durante o período de crescimento, os entrenós podem sofrer variações em sua espessura e comprimento em uma mesma planta, conforme o período de disponibilidade hídrica e de nutrientes no solo em que o entrenó foi formado (JAMES, 2004). À medida que os entrenós desenvolvem-se, a taxa de crescimento diminui, até anular-se, quando ocorre o amadurecimento, o qual é estimulado por baixas temperaturas e/ou pelo estresse hídrico (CARDOZO e SENTELHAS, 2013). Segundo Inman-Bamber et al. (2002), a fração de biomassa total produzida pertencente ao colmo aumenta conforme ocorre o amadurecimento da cana-de-açúcar, atingindo seu valor máximo na maturação. Esta fração é afetada diretamente por estresse hídrico, temperatura e cultivar.

A taxa de acúmulo de sacarose é maior durante a última fase do ciclo da cana-de-açúcar, quando a planta apresenta pequena taxa de crescimento que coincide ou se deve ao período de restrição climática que induz a maturação. Durante o crescimento, o teor de sacarose é maior nos entrenós basais, conforme a taxa de crescimento da planta diminui o teor de sacarose se uniformiza entre os entrenós basais e superiores da planta, caracterizando a maturação comercial (MACHADO, 1987).

A principal interface de trocas gasosas das plantas com a atmosfera são as folhas, que interceptam a radiação solar e convertem a energia em biomassa durante a fotossíntese. Assim como qualquer planta da família *Poaceae* (gramíneas), a cana-de-açúcar é uma planta C4 que forma compostos orgânicos com quatro carbonos durante a fotossíntese, além de apresentar alta taxa fotossintética e de eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera, fazendo dela uma planta de alto acúmulo de biomassa (RODRIGUES, 1995; CASAGRANDE, 1996; SEGATO et al., 2006).

A folha completa da cana-de-açúcar é constituída pela lâmina foliar, bainha e colar. Ao longo de todo o colmo, especificamente na região nodal, a folha é ligada ao colmo, onde forma duas fileiras opostas alternadas (MOZAMBANI et al., 2006). A bainha liga a folha ao colmo da planta na base dos nós, o colar tem importância botânica na identificação da cultivar, e a lâmina foliar é a responsável pelo processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese, podendo chegar a 150 cm de comprimento e 10 cm de largura (JAMES, 2004).

Os estômatos, que consistem em um par de células-guarda, poro estomático e células subsidiárias, regulam a resistência estomática, ou seja, o grau de fechamento dos estômatos, que por sua vez é o inverso da condutância estomática, que é regulada pela planta de forma que a transpiração é proporcional ao balanço de energia, sem induzir o aquecimento excessivo das folhas (TAIZ e ZEIGER, 2009). A presença dos estômatos nas folhas de cana-de-açúcar é tanto na faixa adaxial, quanto na abaxial, sendo que há maior densidade estomática na faixa abaxial da folha, chegando a ser quase que duas vezes maior que na faixa adaxial (JAMES, 2004; PINCELLI, 2010). Segundo Taiz e Zeiger (2009), os estômatos da faixa adaxial da folha são menores e frequentemente protegidos por pelos, que aumentam a resistência à difusão de vapor aumentando a camada limítrofe da folha, fazendo com que a faixa abaxial da folha seja a maior responsável pelas trocas gasosas.

O ciclo de morte e substituição das folhas de cana-de-açúcar ocorre durante todo o período de desenvolvimento da cultura, sendo que o número médio de folhas verdes é da ordem de 9 a 13. Segundo Inman-Bamber (1991), o aparecimento e a morte de folhas estão relacionados à soma térmica (graus-dia) a planta esta sujeita durante seu ciclo.

O florescimento da cana-de-açúcar representa a possibilidade da reprodução sexuada, desejável em programas de melhoramento genético, mas que deve ser evitado em cultivos comerciais devido ao processo de isoporização dos colmos (SEGATO et al., 2006; AMARAL et al., 2012). A inflorescência ou panícula da cana-de-açúcar é também chamada de flecha, bandeira ou flor, com tamanho, cor e formas variáveis dependendo da espécie ou cultivar. É originária da gema apical, com um eixo principal ou ráquis, que é o prolongamento do último

entrenó do ápice da cana. Do ráquis saem os eixos secundários e, destes, os terciários, conferindo à inflorescência um aspecto piramidal (CASAGRANDE, 1996).

Em termos de acúmulo de matéria seca, Machado (1987) divide as fases de crescimento da cana-de-açúcar em três. A primeira fase apresenta crescimento lento, a segunda apresenta rápido crescimento e acúmulo de matéria seca e na terceira o crescimento volta a ficar mais lento. Usualmente, a fenologia da cana-de-açúcar pode ser dividida em quatro fases características (Figura 1): emergência, estabelecimento, desenvolvimento da cultura e maturação, onde ocorre intenso acúmulo de sacarose (DOORENBOS e KASSAM, 1979; CÂMARA, 1993; SEGATO et al., 2006; MARIN et al., 2009).

Figura 1 - Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar. Adaptado por Marin et al. (2009) de Doorenbos e Kassam (1979) e Gasho e Shih (1983)

Portanto, para um bom desenvolvimento da cultura é crucial escolher a época de plantio adequada que disponibilize condições climáticas ideais para a planta se desenvolver e acumular sacarose. Dentre os fatores para seu crescimento, a cana necessita de alta disponibilidade de água, temperaturas elevadas e alta incidência de radiação solar nas fases de crescimento.

O sistema de produção mais usual de cana-de-açúcar é constituído de uma safra oriunda do plantio do ano anterior, seguido de cinco ou mais safras oriundas da rebrota das soqueiras. Alguns autores classificam a cana-de-açúcar como cultura perene, ou seja, é uma

cultura que não necessita ser replantada ano após ano, pois ela possui a capacidade de rebrota das soqueiras (RODRIGUES, 1995; OLIVEIRA, 2004; RUDOLF, 2007). Em contrapartida, outros autores classificam a cultura como semi-perene, já que após a operação de plantio dos toletes (mudas) a cultura permanece, em média, cinco anos (cortes) no campo (DA SILVA, 2004; SUGUITANI, 2006).

Existe diversas cultivares de cana-de-açúcar, que podem ser diferenciadas pela sua rusticidade, teor de açúcar, resistência a doenças e principalmente, diferenciação quanto ao tempo de maturação (SCARPARI e BEAUCLAIR, 2004). No geral, as cultivares são agrupadas com base em três classes de maturação, sendo, as cultivares de ciclo precoce aquelas que apresentam maturação adequada entre abril e junho; cultivares de ciclo médio, com maturação entre junho e setembro; e cultivares tardias, com máxima concentração de sacarose em outubro e novembro. Após atingir o ponto máximo de acúmulo de sacarose, o atraso na colheita do canavial pode provocar queda no rendimento industrial (MARIN, et al., 2009).

O plantio da cana-de-açúcar é realizado em três épocas diferentes (TOWNSEND, 2000), o que leva a cultura a apresentar diferentes ciclos: cana-de-ano e cana-de-ano-e-meio. Para as condições de clima da Região Centro-Sul do Brasil, é normalmente adotada o sistema de cana-de-ano, com data de plantio entre setembro e novembro e colheita após 12 meses. Dessa forma a planta vegeta durante 8 meses e matura nos 4 meses finais, além de aproveitar o maior fotoperíodo, altas temperaturas e disponibilidade hídrica (SEGATO et al., 2006; MARIN et al., 2009).

O sistema de cana-de-ano-e-meio é normalmente iniciado entre janeiro e abril, com colheita entre maio e novembro do próximo ano. Dessa maneira, após o estabelecimento da cana no campo, a planta passa por uma fase de repouso durante seu primeiro inverno, até sua fase de maior crescimento, durante o verão, até o seu corte no próximo inverno. Assim como na cana-de-ano, o período de maior crescimento estende-se de novembro a abril, contudo, Marin et al. (2009) citam que como o canavial atinge este período já mais desenvolvido, a cana-de-açúcar apresenta-se capaz de responder mais rapidamente às condições ambientais favoráveis à cultura.

O Brasil possui a vantagem de possuir duas regiões produtoras de cana-de-açúcar, em que a época de colheita no período seco varia, ocorrendo de setembro a abril na região Nordeste e de maio a dezembro nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Norte. Isso é um aspecto que confere ao país uma maior competitividade econômica e logística (SCARPARI, 2007; PINTO et al., 2008).

2.2 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil

Atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada em mais de 100 países, sendo o Brasil o país com maior área plantada e produção, seguido de Índia, China e Tailândia. É a cultura que tem mais biomassa colhida no mundo, em torno de 1,8 bilhões de toneladas em 26 milhões de hectares plantados no ano de 2012 (FAO, 2013). O aumento do preço do petróleo na década de 90 e o reconhecimento do etanol como fonte de energia renovável foram fatores que contribuíram para sua expansão nas últimas décadas (VEIGA FILHO et al., 2008).

A cultura da cana-de-açúcar é uma das mais antigas e importantes lavouras exploradas no Brasil e seu cultivo sempre fez parte dos principais acontecimentos históricos no período colonial do país. Por ser a principal matéria prima para a indústria do açúcar, etanol e biomassa, a cultura possui ainda papel fundamental na economia do país. No século XIX, com o aumento da produção de açúcar no mercado mundial, a viabilidade econômica e a importância da atividade no país foram comprometidas. Nesse período, a produção no Brasil ficou restrita aos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, que se tornaram os principais polos produtores da região centro-sul do país. Atualmente, a cultura se encontra espalhada em praticamente todos os estados brasileiros (MARIN et al., 2009).

Após a Revolução Verde, que se iniciou na década de 60, a agricultura sofreu profundas mudanças nos sistemas produtivos por meio do uso de cultivares melhoradas, de fertilizantes industriais e da mecanização. A cana-de-açúcar também foi impulsionada pelas novas tecnologias no campo e pela crise do petróleo, atingindo produção significativa no mercado mundial (COMITRE, 1995).

Em meados da década de 70, a produção de cana-de-açúcar brasileira passou a ganhar destaque, quando o governo criou o Proálcool, programa que visava ao incentivo a qualquer insumo capaz de substituir o petróleo, numa tentativa de minimizar a dependência externa na época (SZMRECSÁNYI e MOREIRA, 1991). A partir disso, a produção de etanol advindo da cultura de cana-de-açúcar no país tomou grandes proporções, saltando de cerca de 600 para 3400 milhões de litros por ano na década de 70 (BORGES et al., 1988).

Após quase quatro décadas da criação de incentivos à produção de cana-de-açúcar, o Brasil ocupa o primeiro lugar no mercado mundial de produção de cana-de-açúcar, sendo responsável por cerca de 50% da produção mundial (NEVES et al., 2009). Segundo dados CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), a cultura da cana continua em expansão no Brasil e a previsão é que ocorra um acréscimo na área de 314 mil hectares somente na

safr 2013/2014. São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul deverão ser os estados com maior acréscimo de áreas da ordem de 95,9 mil hectares, 60,1 mil hectares, 92,5 mil hectares e 81,4 mil hectares, respectivamente. Este crescimento se deve à expansão de novas áreas de plantio das usinas já em funcionamento.

São Paulo é o principal estado produtor de cana-de-açúcar do Brasil, com 55,7% da produção total, seguido de Goiás, com 9,4%, e Minas Gerais com 9,2%. A produção nacional prevista para safra 2013/2014 é de aproximadamente 652 milhões de toneladas em 8,8 milhões de hectares colhidos, atingindo uma produtividade média estimada de 74,1 t.ha⁻¹, 6,7% maior do que a safra 2012/2013 (CONAB, 2013).

Do montante produzido na safra 2012/2013, 49,8% foram destinados à produção de açúcar, devendo alcançar cerca de 38,85 milhões de toneladas do produto. As últimas quebras de produção nas safras de cana-de-açúcar na Índia, segundo maior produtor do mundo, fizeram com que o preço do açúcar subisse no mercado internacional, favorecendo a sua produção. O restante foi destinado à produção de álcool, totalizando um volume de 23,96 bilhões de litros para 2012, sendo 9,74 bilhões de litros de etanol anidro e 14,21 bilhões de litros de etanol hidratado. Outro fator importante considerado no mercado do etanol é o número de veículos bicomustíveis produzidos, que no período de 2005/2006 já havia superado o número de veículos movidos a gasolina. Atualmente, 79,1% da frota nacional de veículos são *flexfuel*, evidenciando um grande potencial de demanda na produção de etanol para o país (ANFAVEA, 2013).

2.3 Fatores climáticos que afetam a produtividade da cana-de-açúcar

Assim como as demais culturas, a cana-de-açúcar tem seu crescimento e desenvolvimento diretamente afetados pelas condições climáticas. Portanto, é preciso avaliar as condições de clima ideais e a disponibilidade hídrica que atendam as necessidades da cultura e propiciem um bom desenvolvimento da planta. Neste caso, a cana-de-açúcar apresentará melhores condições quando ocorrer período quente e úmido, com alta radiação solar durante a fase de crescimento, seguido por um período seco, ensolarado e mais frio durante as fases de maturação e colheita (MARIN et al., 2009).

Para a produção comercial de cana-de-açúcar, não é desejável que o seu florescimento ocorra, pois com isso, parte da energia e sacarose armazenadas para o crescimento é voltada à produção da inflorescência, dando início ao processo chamado de “isoporização” do colmo (SEGATO et al., 2006). O florescimento da cana-de-açúcar depende que alguns parâmetros

físicos e elementos meteorológicos sejam atendidos, como a umidade no solo, fotoperíodo e temperatura do ar durante o período de indução (PEREIRA et al., 1986).

No caso da produção de açúcar, é de grande importância que as exigências climáticas da cana sejam atendidas, devido ao processo de concentração de sacarose da planta que é regulado pelas condições térmicas e hídricas adequadas no período vegetativo e um período de restrição hídrica e térmica para garantir bons níveis de sacarose no seu corte (CARDOZO e SENTELHAS, 2013).

2.3.1 Radiação Solar

O Sol, como principal fonte de energia radiante para a vida no planeta exerce papel fundamental para o desenvolvimento das plantas. Segundo Pereira et al. (2002), a radiação solar é o principal elemento meteorológico, pois é ela que desencadeia todo o processo meteorológico, afetando todos os outros elementos como a temperatura, a pressão, o vento, a chuva e a umidade. Assim como a maioria das poáceas, a cana-de-açúcar é uma planta C4, com alta eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera e taxa fotossintética elevada, além de uma taxa de crescimento e eficiência do uso da água duas a três vezes maiores do que as observadas em plantas de metabolismo C3 (CASAGRANDE, 1996; SEGATO et al., 2006).

A taxa máxima de fotossíntese da cana-de-açúcar está em entorno de 90 mg.dm⁻².h⁻¹, com ponto de compensação de CO₂ próximo de 5 ppm, sem o fenômeno de saturação luminosa, normalmente observado em plantas com ciclo fotossintético do tipo C3 (MACHADO, 1987). Segundo Marin et al. (2009) um dos principais fatores que explicam a absorção de radiação solar por uma cultura é a distribuição do ângulo de inserção das folhas, relação essa que pode ser representada na forma do coeficiente de extinção de radiação solar, que é função da arquitetura do dossel e do ângulo zenital do Sol. Neste caso, folhas com ângulo mais ereto permitem o adensamento de plantas por unidade de área, que pode maximizar os rendimentos da cultura em condições de campo.

Dessa forma, a cana-de-açúcar cresce bem em áreas que recebam radiação solar da ordem de 18 a 36 MJ m⁻² dia⁻¹. O perfilhamento é afetado pela intensidade e duração do brilho solar. Alta intensidade de luz e longa duração do dia promovem o perfilhamento enquanto dias curtos e nublados reduzem a emissão de perfilhos. O crescimento do colmo aumenta quando o fotoperíodo está entre 10 e 14 horas. O índice de área foliar aumenta rapidamente entre o terceiro e o quinto mês, devido à fase de pico de perfilhamento (MONTEIRO, 2012).

Em condição de elevadas taxas de radiação solar, Rodrigues (1995) observou que as folhas da cana são mais longas e mais verdes, e o perfilhamento mais intenso. Em condições de baixa irradiância solar os colmos são mais finos e longos, e as folhas estreitas e amareladas.

2.3.2 Temperatura

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

Em geral, a temperatura ideal do solo para a brotação dos toletes da cana pode variar de 32 a 38°C. Quando a temperatura do solo fica abaixo dos 18°C o crescimento das raízes é desacelerado. Por outro lado, há uma aceleração progressivamente desse crescimento quando a temperatura chega a um patamar ótimo de 35°C. Acima deste limiar de temperatura do solo (35°C) começa a haver um decréscimo na taxa de crescimento da raiz de cana (JAMES, 2004). A taxa de absorção de água pelas raízes da cana-de-açúcar também é afetada pela temperatura do solo, com taxas máximas de absorção entre as temperaturas de 28°C e 30°C, havendo drástica redução entre 10 e 15°C (FAUCONNIER e BESSEREAU, 1970).

Para um desenvolvimento ideal da cana-de-açúcar, que garanta alta produção e rendimentos de açúcar, a temperatura média durante o dia deve estar entre 22 a 30°C. Porém, quando a temperatura do ar é inferior a valores entre 16 e 18°C, durante o período vegetativo, o crescimento da cultura torna-se praticamente nulo (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Portanto, a temperatura mínima para não prejudicar a produção no período vegetativo deve ser de aproximadamente 20°C, sendo que abaixo disso, entre 10 e 20°C, há o favorecimento para o processo de maturação da cana (CÂMARA, 1993; MARIN, 2008). Quando não ocorre a diminuição da temperatura para maturação, necessariamente, deve ocorrer uma seca moderada, resultando no aumento do teor de sacarose (SCARPARI, 2007).

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

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

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

Estudando o desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar, Inman-Bamber (1994) determinou uma temperatura base de 16°C para densidade de colmos, e verificou que o pico de perfilhamento ocorreu aos 500°C dia, estabilizando-se após os 1200°C dia para as cultivares NCo376 e N12. No mesmo experimento, o autor utilizou a temperatura basal de 10°C para o aparecimento de folhas, e determinou um intervalo, ou filocrono, de 109 e 118°C dia para a emissão de folhas até a 14ª folha e de 169 e 200°C dia para o aparecimento das demais, respectivamente para as cultivares NCo376 e N12.

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

2.3.3 Exigências hídricas da cana-de-açúcar

Entre todos os fatores citados, a disponibilidade hídrica desponta como um dos mais importantes para a produção vegetal. A importância ecológica da água está associada ao fato de que quase todos os processos fisiológicos das plantas são, direta ou indiretamente, afetados

pelo suprimento hídrico (KRAMER e BOYER, 1995). Angelocci (2002) relata que a disponibilidade de água é um dos principais fatores no desenvolvimento fisiológico das plantas, e que além de ser o seu principal constituinte, a água serve como um excelente solvente e reagente em processos metabólicos, sendo também responsável pela turgescência e pela regulação térmica dos tecidos da planta por meio da transpiração.

Em varias regiões do mundo a cana-de-açúcar tem a água como principal fator limitante para obtenção de elevadas produtividades. Portanto, o conhecimento da resposta da cultura da cana ao déficit hídrico é fundamental para orientação de programas de melhoramento de culturas, assim como para a elaboração de estudos de zoneamento de risco climático e para aumentar a eficiência do uso da água em cultivos irrigados (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

De modo geral, quanto às necessidades hídricas da cana, é preciso garantir valores de 1.200 a 1.300 milímetros anuais, distribuídos de maneira uniforme durante o período de desenvolvimento vegetativo (MARIN, 2008). No entanto, isso depende basicamente das características climáticas da região de cultivo. Segundo Marin et al. (2009), ao longo do ciclo da cana o consumo hídrico é diferenciado entre os estádios de desenvolvimento, o que é função da área foliar, do estágio fenológico e da densidade do sistema radicular.

Regiões com déficit hídrico entre 10 mm e 180 mm por ano tendem a apresentar uma estação seca moderada, ideal para a cultura; se essa deficiência ficar entre 180 mm e 400 mm por ano, a área pode ser cultivada, mas haverá necessidade de irrigação de salvamento para assegurar a rebrota dos canaviais; acima disso, a área só pode receber um canavial se contar com irrigação intensiva (PINTO et al, 2008).

Em termos práticos, o déficit hídrico é o quanto o sistema solo-planta deixa de evapotranspirar em função da restrição de água no solo (PEREIRA et al., 2002). Já do ponto de vista fisiológico o déficit hídrico pode ser considerado como a diferença entre a transpiração da planta (demanda atmosférica) e o quanto de água a raiz é capaz de absorver do solo (fornecimento de água) (RITCHIE, 1998).

O déficit de água no solo causa decréscimo acentuado nas atividades fisiológicas das plantas, principalmente na divisão e no crescimento celular e, em consequência, no crescimento das plantas. Quando o déficit ocorre em períodos curtos, normalmente após as treze horas do dia, momento de maior demanda de evapotranspiração, seu efeito é mínimo, mas, quando persiste por período maior, seu efeito é mais acentuado (DALRI, 2006).

As necessidades hídricas da cana-de-açúcar se iniciam no processo de germinação do tolete, que tem como fatores abióticos críticos a temperatura e a umidade do solo. Esta fase

inicial exige temperaturas altas e boa umidade do solo para que o processo ocorra rapidamente (MAURI, 2012). Excesso ou falta de água trarão problemas nesta fase do ciclo da cana, comprometendo a emergência da planta (SEGATO et al., 2006). Nas fases de estabelecimento e desenvolvimento, quando ocorre o perfilhamento e o fechamento do dossel, as exigências hídricas da cana-de-açúcar atingem o ponto máximo e a falta de água durante esse período pode prejudicar a sua produtividade final (MARIN et al., 2009).

Para a indução da maturação um dos principais fatores é o déficit hídrico, nessa fase, ocorre a maior taxa de acúmulo de sacarose e a densidade de colmos apresenta-se estável. A síntese de sacarose ocorre predominantemente nas folhas e a sacarose é transportada até o colmo através do floema e acumulada por difusão, através da parede celular, para as células do parênquima. Em condições de estresse hídrico, a atividade das enzimas foliares é reduzida, favorecendo a liberação de outras enzimas que atuam no processo de acúmulo de teor de açúcar nos colmos (MACHADO, 1987).

Doorenbos e Kassam (1979) propuseram coeficientes de resposta ao déficit hídrico (k_y) para a cultura da cana-de-açúcar, esse coeficiente relaciona a queda de rendimento relativo com o déficit de evapotranspiração relativa. Segundo os autores, o fator de resposta à deficiência hídrica (k_y) da cana-de-açúcar é igual a 0,75 nas fases de emergência e estabelecimento, caindo para 0,5 durante a fase de desenvolvimento e atingindo 0,1 durante a fase de maturação.

Estudando a resistência à seca das cultivares de cana-de-açúcar SP81-3250 e RB867515, Barbosa (2010) encontrou queda significativa na população final de touceiras vivas quando a água do solo na zona radicular efetiva foi esgotada. O experimento levou em conta solos com profundidades inferiores a 0,4 m, onde valores acumulados de déficit hídrico maiores que 13 mm durante as primeiras fases de desenvolvimento da cana, causaram queda significativa na população das touceiras. Além disso, a partir de um valor acumulado de 35 mm de déficit hídrico, nenhuma planta sobreviveu. No mesmo sentido, Mauri (2012) observou a morte total de plantas de cana-de-açúcar após o acúmulo de 200 mm de evapotranspiração de referência (E_{To}) diária, considerando também a fase inicial de desenvolvimento da cultura. O mesmo autor afirma que a fase de desenvolvimento mais sensível ao déficit hídrico é a extensão máxima do colmo primário.

Inman-Bamber (2004) mostra que a resposta ao estresse hídrico da cana-de-açúcar pode ser observada pela diminuição do comprimento do colmo e das folhas, com um déficit diário acumulado de 36 mm. A solução seria regular a umidade do solo com irrigação no

momento que a taxa de crescimento potencial do colmo diminuísse 30%. Os autores recomendam um plano de plantio e colheita baseado no mínimo de estresse hídrico possível, principalmente durante as fases críticas de crescimento da cultura, quando o sistema demanda mais água.

Em estudo sobre o desenvolvimento do dossel da cana-de-açúcar em condições de estresse hídrico, Smit e Singels (2006) observaram que a senescência das folhas foi a que apresentou maior sensibilidade ao déficit hídrico, seguida pelo aparecimento de folhas e por último a senescência dos colmos. Os autores afirmam que mais pesquisas são necessárias para entender os complexos mecanismos de interação e de resposta da cultura ao estresse hídrico. No mesmo sentido, Inman-Bamber e Smith (2005) fizeram uma revisão da relação da água na cana-de-açúcar e sua resposta ao déficit hídrico, e também sugerem que mais estudos sobre a resposta da cultura à limitação hídrica devem ser elaborados, no sentido de melhorar a qualidade da cana e a eficiência do uso da água na irrigação.

2.3.4 Velocidade do vento e condições adversas

Não menos importante, o vento também exerce influência na produtividade dos canaviais, interferindo nas trocas gasosas no dossel vegetativo seja elevando a transpiração das plantas, consequência da queda da resistência aerodinâmica ao transporte por difusão de vapor e CO₂, seja favorecendo a assimilação de CO₂, pela renovação das camadas de ar que envolve o dossel da cultura (MARIN et al., 2009).

As condições adversas do tempo também podem prejudicar o rendimento dos canaviais. Marin et al. (2009) enumeram as principais condições adversas que podem causar perdas parciais e até totais em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, entre as quais se destacam a ocorrência de granizo, causando dano mecânico nas plantas e reduzindo a área foliar, os ventos intensos, que pode causar o tombamento ou acamamento da cultura, a geada, que causa danos intensos nas folhas jovens e gemas, e as chuvas intensas que podem prejudicar o brotamento do tolete e também diminuem a concentração de sacarose nos colmos.

2.4 Outros fatores que afetam a produtividade da cana-de-açúcar

Muitos dos tratos culturais da cana-de-açúcar estão intimamente relacionados às condições do ambiente de cada região. A produção e longevidade da cana-de-açúcar estão relacionadas com a boa adequação de diversos fatores, dentre eles: cultivar escolhida, fertilidade do solo, condições climáticas, práticas culturais, controle de pragas e doenças e método de colheita (TOWNSEND, 2000; SEGATO et al., 2006).

Um dos principais fatores determinantes para o bom desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar é o planejamento das datas de plantio e o manejo varietal. Como o clima exerce grande influência no desenvolvimento da cultura, cabe ao planejamento adequar as melhores épocas de plantio e alocar diferentes cultivares comerciais no ambiente de produção que proporcione, em termos relativos, o melhor desempenho agrícola. Segundo Landell et al. (2006) os primeiros estudos sobre o melhoramento de cultivares de cana-de-açúcar ocorreram em torno de 1920, e tinham como principal objetivo encontrar um genótipo resistente às doenças que prejudicavam, e muito, o rendimento da cultura na época.

Durante o século XX, com a evolução do setor sucroalcooleiro, alguns programas de melhoramento foram criados por instituições que se consagraram no Brasil, como no caso do IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira) e a Ridesa (Rede Interinstitucional para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro). Essas três grandes instituições são responsáveis por praticamente todo o material genético de cana-de-açúcar do país, e até hoje lançam anualmente novas cultivares possibilitando a estratificação das áreas cultivadas com um grande número de genótipos.

Atualmente existe aproximadamente mais de 500 genótipos de cana-de-açúcar e esse valor não se deve mais apenas por motivos fitossanitários (NÓBREGA e DORNELAS, 2006). Além de reduzir o risco econômico causado por possíveis epidemias, a grande variabilidade de cultivares possibilita um ganho do rendimento canavieiro adequando a cultura aos diferentes ambientes de cultivo. Assim são definidos três grupos de cultivares quanto à resposta aos ambientes de produção, que são, respectivamente, as cultivares responsivas, as estáveis e as rústicas (LANDELL et al., 2006).

Os principais objetivos do melhoramento genético na cana-de-açúcar são incrementos na produtividade final de colmos, aumento na resistência a pragas e doenças, melhoramento da característica de moagem da biomassa, melhor qualidade do açúcar, elaborar ideótipos da cultura e melhorar o aproveitamento do espaçamento de linhas (BERDING et al., 2004).

Segundo o censo varietal da cana-de-açúcar, as cultivares mais plantadas no Brasil são a RB867515, com aproximadamente 30% da área, e a SP81-3250 com pouco mais de 10% da área plantada no país. Desde a década de 90 não foram atingidos índices de concentração de cultivares tão elevados. O aumento desse índice causa preocupação, pois uma maior concentração eleva o risco fitossanitário, no caso de surgimento de novas doenças, diminuindo assim a vida útil das cultivares (RIDESA, 2013; CTC, 2013).

Os principais estresses bióticos da cana-de-açúcar podem ser divididos em dois grandes grupos, as pragas e as doenças. As pragas são subdivididas de acordo com a parte da planta que se alimentam, sendo elas pragas de solo, as brocas de colmo, as pragas de seiva, as pragas de folhas e um caso particular de pragas vertebradas que são algumas espécies de roedores (LESLIE, 2004). Segundo Bailey (2004) as doenças da cana também podem ser subdivididas, sendo as doenças causadas por fungos, bactérias e vírus.

Além de escolher a cultivar de cana que seja resistente às ameaças fitossanitárias da região, é preciso tomar uma série de medidas de controle, entre elas estão, a prática de inspeção e de *roguing*. Além disso, a relação entre o risco de infecção por doenças em plantas pode ser prevista por modelos agrometeorológicos, que podem, e são utilizados para auxiliar no controle de pragas e doenças (PAVAN, 2007; GILLESPIE e SENTELHAS, 2008; SANTOS, 2013).

O manejo do solo para cana-de-açúcar também pode influenciar na sua produtividade. Em média, o ciclo de vida da cana é de 5 a 6 cortes, e caso o manejo do talhão não seja adequado o perfilhamento da planta pode ser prejudicado, diminuindo a sua produtividade (TOWNSEND, 2000). Segundo Gonçalves (2006), na cultura canavieira, são utilizados três principais sistemas de preparo do solo, denominados de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto.

Apesar de se desenvolver em solos de baixa fertilidade ou com condições físicas desfavoráveis, a cana-de-açúcar é uma cultura que responde aos solos férteis e fisicamente adequados, atingindo altas produtividades nestas condições. São muitas as características que podem influenciar o desenvolvimento da cana-de-açúcar, onde os solos ideais para o seu desenvolvimento devem ser bem arejados e profundos, com boa retenção de umidade e alta fertilidade. O relevo do terreno deve apresentar declives suaves de 2 a 5% para garantir um bom escoamento e infiltração da água das chuvas e o valor do pH em cloreto de cálcio deve ser de aproximadamente 6. As condições químicas e físico-hídricas das camadas superficiais e sub-superficiais dos solos, juntamente com as condições climáticas, formando os chamados

ambientes de produção são um dos principais fatores que afetam a produtividade da cana-de-açúcar (MARIN, 2008; VITTI e PRADO, 2012; MONTEIRO, 2012).

A cana-de-açúcar por ser uma cultura cujo valor comercial está inserido em seus colmos, atualmente é a cultura agrícola que possui mais biomassa colhida no mundo (FAO, 2013). Com esse montante e a extinção das queimadas no seu sistema de colheita, a mecanização nos canaviais é um ponto fundamental para se garantir os ciclos e o manejo dos talhões com maior eficiência. Entretanto, a mecanização intensa nos canaviais causa a compactação do solo, a qual tem afetado de maneira significativa a produtividade da cana-de-açúcar (RODRÍGUEZ et al., 2012).

Os principais prejuízos que a compactação do solo pode causar são a diminuição da capacidade de retenção de água e nutrientes, a diminuição dos macroporos e consequentemente o aumento da resistência à penetração no solo. O desempenho das raízes de cana passa a ser prejudicado na medida em que os índices de densidade do solo superam $1,2 \text{ g cm}^{-3}$. O solo arenoso é pouco afetado pelo efeito da compactação, enquanto que solos com textura mais argilosa, como os latossolos, podem alcançar valores de densidade acima de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ (GONÇALVES, 2006).

A compactação provocada pelos veículos convencionais de transporte de cana atingem as profundidades de 35 a 40 cm do solo, ou seja, quase toda a zona radicular efetiva da cultura (KOFFLER e DONZELI, 1987). Em estudo sobre a compactação do solo em canaviais, Usaborisut e Sukcharoenvipharat (2011) encontraram valores de densidade do solo 12% maiores nas áreas com colheita mecanizada, em comparação à colheita manual, e a resistência à penetração cerca de 20% maior em solos compactados.

O espaçamento entre linhas também exerce influência na produtividade da cana-de-açúcar. Plantas de cana com folhas mais eretas, como observadas nos canaviais atuais, permitem o adensamento das plantas, maximizando o rendimento por área no campo. Alguns autores encontraram produtividades elevadas com a diminuição do espaçamento entre as linhas de plantio de cana, com limite em torno de 1 m de entrelinhas e ganhos de 9 a até 20 t ha^{-1} em produtividade (COLETI et al., 1987; GALVANI et al., 1997).

Os espaçamentos mais utilizados variam de 1 a 1,6 m, além do espaçamento combinado ou “tipo abacaxi”, que combina linhas duplas distanciadas de 0,4 a 0,5 m entre si e 1,4 m entre as duplas. Contudo, a grande prática da cultura canavieira vem se consolidando no espaçamento de 1,5 m entre linhas onde melhor se adaptam as colhedoras existentes no mercado (COLETI e STUPIELLO, 2006).

Espaçamentos mais largos, como o de 1,5 m entre linhas, podem favorecer o aparecimento de plantas invasoras por conta da demora do fechamento do dossel vegetativo e, conseqüentemente, maior tempo de exposição do solo à radiação. Dessa forma, o ponto chave na definição do espaçamento de plantas de cana-de-açúcar é o equilíbrio na competição entre os perfilhos por água, nutrientes e principalmente por energia radiante. Estudando diferentes espaçamentos e a resposta do crescimento e desenvolvimento do dossel da cana-de-açúcar, Singels e Smit (2009) encontraram um aumento médio de 18, 40, 29, 22 e 21% na interceptação da radiação, pico de perfilhamento e densidade de colmos, biomassa e rendimento de colmos respectivamente, para cada metro reduzido no espaçamento. Entretanto, ao estreitar muito o espaçamento a competição intensa no perfilhamento reduz a produtividade, e os autores definiram que espaçamentos acima de 1,37 m não apresentam competição significativa entre as linhas.

2.5 Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar

Existem diversas definições para risco em áreas de conhecimentos variadas. Segundo Kolluru (1996), risco é uma medida potencial do perigo, onde o risco é uma função da natureza perigo, acessibilidade ou acesso de contato (potencial de exposição), características da população exposta (receptores), a probabilidade de ocorrência e a magnitude da exposição e das conseqüências.

Como as adversidades meteorológicas possuem efeito decisivo no desenvolvimento e produção agrícola, os riscos que determinada cultura é submetida definem a probabilidade de sucesso do empreendimento agrícola (SELVARAJU, 2012). Diante disto, os estudos de risco climático utilizam métodos probabilísticos para avaliar o risco de ocorrência de alguma adversidade do clima e com isso, determinar a potencialidade de exploração agrícola em função das condições gerais e restritivas do clima entre outros como solo e ciclo de cada cultura (BRASIL, 2013).

Em estudos sobre risco climático para a cultura da cana-de-açúcar é comum o uso de modelos agrometeorológicos na estimativa produtividade, de modo que se identifiquem os efeitos integrados do ambiente na produção da cultura (EVANGELISTA, 2011; MONTEIRO, 2012; SILVA et al., 2013). Nesse sentido, a determinação do risco climático da cana-de-açúcar é um fator dependente da falta ou excesso de recursos naturais que possam causar estresse à cultura. Portanto, o risco climático é a contabilização de quanto a cultura sofrerá de estresse, considerando uma escala espaço-temporal (SELVARAJU, 2012).

A falta de água e o consequente déficit hídrico são os fatores que mais penalizam o desenvolvimento e crescimento das plantas e, portanto, são os mais utilizados na determinação do risco de culturas agrícolas. Em condições controladas, livre de doenças e com suprimentos ótimos de energia, água e nutrientes é possível contabilizar o máximo rendimento e o consumo hídrico das culturas (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Em condições de campo, não controladas, a cultura apresentará rendimento inferior à condição ótima, e essa diferença pode ser adotada como um indicador da viabilidade agrícola da cultura no local.

Entretanto a resposta do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar aos diferentes tipos de estresse ainda não foram exaustivamente estudados (SMIT e SINGELS, 2006). E o estudo do desenvolvimento fisiológico da cana-de-açúcar, sob condições de estresse é peça fundamental para a determinação do risco e a tomada de decisão nos canaviais.

2.6 Uso da irrigação como uma prática de minimização dos riscos climáticos para a cultura da cana-de-açúcar

A irrigação é uma operação agrícola que tem por objetivo suprir as necessidades hídricas das plantas e viabilizar os cultivos nos locais onde a escassez de água limita a atividade agrícola (CINTRA et al., 2008). Sendo assim, ela é imprescindível nas áreas áridas e semi-áridas, pois nestas regiões a chuva, na maioria das vezes, é insuficiente para o bom desenvolvimento das culturas. Em locais que apresentam períodos de déficit hídrico em determinado período do ano, a irrigação pode se tornar necessária para a obtenção de elevada produtividade ou evitar a quebra de produção (DALRI, 2006).

O uso da irrigação tem aumentado nas últimas décadas, sendo que a área irrigada no mundo praticamente dobrou nos últimos 30 anos. Atualmente, cerca de 20% das terras cultivadas no mundo são irrigadas, podendo variar sensivelmente de acordo com o tipo de cultura e disponibilidade hídrica de cada região. A agricultura consome cerca de 70% da água captada no mundo sendo a Índia o país que mais consome água na irrigação, com 688.000 km³ ano⁻¹, seguida de China, com 358.000 km³ ano⁻¹ e Estado Unidos da América, com 177.403 km³ ano⁻¹. Embora alguns países não possuam esse volume de irrigação, grande parte, ou até toda a sua área agrícola depende dessa prática (FRENKEN e GILLET, 2012).

No Brasil, a irrigação para a cana-de-açúcar é pouco utilizada e varia conforme o nível tecnológico de cada região. Enquanto que em outros países, como Austrália e a África do Sul,

cerca de 60% e 40% respectivamente da área cultivada de cana-de-açúcar é irrigada, sendo que em alguns países o plantio de cana não é viável sem um incremento de água por irrigação (INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

Os benefícios do uso da irrigação na cana-de-açúcar podem ser divididos em dois, os benefícios diretos e os benefícios indiretos. Os benefícios diretos consistem nos aumentos de produtividade agrícola e longevidade das soqueiras, enquanto os benefícios indiretos são aqueles relacionados com a redução de custos no processo produtivo agrícola, proporcionados pelo aumento de produtividade (MATIOLI, 1998), ou seja, redução da área de cultivo e dos gastos com renovação dos canaviais, menores gastos com arrendamento de áreas e transporte e maior estabilidade da produção.

A irrigação é considerada como um uso consuntivo da água e a outorga para sua implementação pode gerar altos custos. Por isso, alguns produtores preferem utilizar a irrigação somente nas fases fenológicas mais sensíveis ao déficit hídrico ou em períodos de menores índices de precipitação (CINTRA et al., 2008). Segundo Rezende e Andrade (2008), para a cana-de-açúcar é comum o uso das seguintes formas: plena, complementar com déficit hídrico e de salvamento.

O método de irrigação plena é quando toda a água necessária para atender a demanda hídrica das culturas é aplicada via irrigação. Deve ser praticada em regiões áridas ou onde a precipitação é insignificante. Atualmente, são raros os projetos de irrigação de cana-de-açúcar que empregam irrigação plena (DALRI e CRUZ, 2008).

Para as regiões Centro-Oeste e Nordeste recomenda-se a irrigação complementar, considerada uma alternativa para aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção de cana-de-açúcar (CINTRA et al., 2008). Ela consiste em suprir as deficiências hídricas das soqueiras de cana-de-açúcar apenas no seu primeiro estágio de desenvolvimento (estabelecimento + vegetativo), porque este é o período que proporciona as maiores reduções de produtividade, quando a cultura é sujeita a deficiência hídrica. Portanto, o período da irrigação complementar tem início imediatamente após a colheita da cana-de-açúcar e término no final do 1º estágio de desenvolvimento da cana (SANTOS, 2005).

A prática da irrigação de salvamento consiste em irrigar somente num período relativamente curto ou em um estágio do cultivo. No caso da cana-de-açúcar, a aplicação é feita em uma ou duas irrigações de 30 mm por mês, após os cortes, para cana-soca. A aplicação de vinhaça junto à água de irrigação neste caso é comum para reposição dos nutrientes no solo (REZENDE e ANDRADE, 2008; PIRES e FERREIRA, 2008).

A irrigação, aliada a outras técnicas de manejo, aumenta a competitividade econômica e agrônômica da cana-de-açúcar, elevando a rentabilidade do empreendimento agrícola e diminuindo os riscos climáticos para a cultura. Rezende e Andrade (2008) apresentaram a comparação entre diferentes cultivares de cana, cultivadas em sistema irrigado e de sequeiro (Tabela 1), mostrando o incremento de produtividade quando do uso da irrigação.

Tabela 1 - Produtividade de cana-de-açúcar em sistema de sequeiro e irrigado, para diferentes regiões do Brasil

Cultivar	Colheita	Produtividade (t ha ⁻¹)		Estado
		Sequeiro	Irigada	
SP79-1011	soca e ressoca	89	111	AL
SP80-1842	cana-planta	144	173	SP
NA56-79	soca e ressoca	121	140	SP
SP70-1011	cana-planta	90	140	RJ
RB72454	cana-planta	88	155	RJ
RB72454	cana-planta	98	144	SP
Média de nove cultivares	cana-planta	não informado	200	GO

Fonte: Rezende e Andrade (2008).

Em estudo sobre o rendimento da cana-de-açúcar com irrigação complementar na região noroeste do estado de São Paulo, Matioli (1998) verificou que ao aplicar uma lâmina de 30 mm em uma cana-soca, nas primeiras fases de desenvolvimento, plantada de maio a julho proporcionou um aumento na produtividade em 30,4 t ha⁻¹. Ao aplicar a mesma lâmina, porém em épocas de corte diferentes (setembro a novembro), o incremento na produtividade foi reduzido, pois na época da aplicação a precipitação da região pôde suprir adequadamente as necessidades hídricas da planta.

Como o principal objetivo da irrigação é suprir um determinado déficit de água que a planta pode sofrer em seu ciclo, é fundamental conhecer o consumo hídrico da cultura irrigada. Sobre o consumo hídrico da cana-de-açúcar, vários autores têm procurado determinar as necessidades hídricas da cultura, mas os resultados diferem-se significativamente, consoante os métodos de cálculo e as condições do experimento (MARIN et al., 2009). Na Tabela 2 é ilustrada essa variabilidade nos valores encontrados do consumo hídrico da cana para diferentes locais, cultivares e fases fenológicas.

Tabela 2 - Consumo hídrico da cana-de-açúcar, em diferentes regiões do mundo

Ciclo	Consumo de água (mm dia ⁻¹)			Local	Referência
	Mínimo	Médio	Máximo		
Planta	4,1	5,7	8,6	EUA (Havai)	Campbell et al. (1959)
Planta	2,3	-	6,1	África do Sul	Thompson et al. (1963)
Planta	1,8	3,7	5,7	África do Sul	Thompson (1965)
Planta e Soca	2,2	4,8	7,7	Taiwan	Chang & Wang (1968)
Planta	2,5	3,9	6,6	África do Sul	Thompson & Boyce (1971)
Planta	1,5	3,1	4,6	Filipinas	Early & Gregório (1974)
Planta e Soca	3,4	4,4	5,1	Argentina	Fogilata (1974)
1ª Soca	2,5	3,9	7,8	África do Sul	Thompson (1976)
2ª Soca	1,8	3,6	5,9	África do Sul	Thompson (1976)
Planta e Soca	1,3	3,4	6,8	EUA (Flórida)	Shih & Gascho (1980)
Planta	0,5	2,5	6,0	Brasil	Barbieri (1981)
Planta	-	2,3	-	Taiwan	Chang et al. (1983)
1ª Soca	-	3,1	-	Taiwan	Chang et al. (1983)
2ª Soca	-	3,1	-	Taiwan	Chang et al. (1983)
Planta	2,7	3,3	3,7	Colômbia	Yang et al. (1985)
1ª Soca	3,2	3,6	4,0	Colômbia	Yang et al. (1985)
Média Geral	2,3	3,6	6,1		

Fonte: Peres (1988).

Há uma vasta quantidade de métodos para se estimar o consumo hídrico das culturas. Entretanto o mais consagrado e aceito método é baseado na relação entre a evapotranspiração máxima de uma cultura (ET_c), que cresce e se desenvolve livre de doenças e com suprimentos ótimos de energia, água e nutrientes, e a evapotranspiração de referência (ET_o) (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Essa relação (ET_c/ET_o) resulta em um coeficiente empírico denominado de coeficiente de cultura (K_c), o qual é função do tipo de cultura, da fase fenológica e da área foliar.

Valores de K_c para diferentes fases fenológicas da cana-de-açúcar foram determinados por diversos autores, e apresentam uma variabilidade quanto os resultados e as diferenças na definição das fases fenológicas (DOORENBOS e KASSAM, 1979; BARBIERI, 1981; PERES, 1988; INMAN-BAMBER e MCGLINCHEY, 2003; DA SILVA et al., 2012). Entretanto é possível afirmar que o consumo hídrico da cana-de-açúcar atinge o nível máximo quando ocorre o fechamento total do dossel vegetativo, coincidindo com o pico de perfilhamento. O consumo então decresce em função da senescência dos perfilhos e das folhas até a estabilização da densidade de colmos dando início ao processo de maturação (Tabela 3).

Tabela 3 - Coeficientes de cultura (Kc) para a cana-de-açúcar

Estádio de desenvolvimento	Kc
Do plantio até 0,25 de cobertura	0,40 a 0,60
De 0,25 a 0,5 de cobertura	0,75 a 0,85
De 0,5 a 0,75 de cobertura	0,90 a 1,00
De 0,75 a cobertura completa	1,00 a 1,20
Utilização máxima	1,05 a 1,30
Início da maturação	0,80 a 1,05
Maturação	0,60 a 0,75

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979).

Existem também dois termos que são amplamente utilizados e que são muito importantes na quantificação das necessidades hídricas da planta, são eles a eficiência do uso da água (EUA) e a produtividade da água (PA) no ciclo (INMAM-BAMBER e SIMTH, 2005). Ambos os termos, representam basicamente a relação entre o rendimento da cana e o volume de água utilizado pela planta no ciclo (g L^{-1}).

Em levantamento de valores de eficiência do uso da água na cana, Inmam-bamber e Smith (2005) encontraram valores na literatura variando de 4,8 a 20,94 t ML^{-1} na Austrália, África do Sul e Havaí. Segundo os autores, essa variação da eficiência no uso da água é devida aos diferentes valores de quantidade de matéria seca do colmo e de déficit de pressão de vapor que a planta enfrenta durante o ciclo, e assim, o conceito do coeficiente de eficiência da transpiração (ϵ) é empregado (g kPa kg^{-1}).

No Brasil, Mauri (2012) encontrou valores de eficiência do uso da água durante fase inicial da cana-de-açúcar igual a 3,21 g L^{-1} sem déficit hídrico. Quando submetida a déficit hídrico, a cana apresentou redução significativa nos valores de produtividade de água, que variaram de 0,16 a 3,21 g L^{-1} . Para biomassa fresca de colmo da cana-de-açúcar, Maschio (2011) observou uma variação de produtividade de água na faixa de 1,622 a 2,921 g L^{-1} em diferentes cultivares de cana. Enquanto que para os valores de produtividade de água em biomassa de açúcar total recuperável, o autor observou valores entre 0,195 e 0,384 g L^{-1} .

Estudando a viabilidade do uso da irrigação suplementar na cana-de-açúcar, Santos e Frizzone (2006) verificaram que essa técnica pode ser inviabilizada caso o aumento de produtividade proporcionado pela irrigação, seja menor que 0,100 $\text{t mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$. A irrigação é uma prática fundamental para a minimização do risco climático da cana-de-açúcar no Brasil e em diversos países. Entretanto é sabido que a água doce é um recurso cada vez mais escasso em função do crescimento e da demanda populacional. Entender como são supridas as necessidades hídricas da cana-de-açúcar sem comprometer a sua produtividade é um ponto

chave para preservação desse recurso e manter a competitividade econômica. Dessa forma, a resposta da cultura em diferentes níveis fisiológicos ao estresse hídrico, torna-se uma informação de suma importância para tomada de decisão nos canaviais.

2.7 Uso de modelos de simulação para avaliação do risco climático de culturas

Entender como a planta se desenvolve e como responde às interações com o ambiente é fundamental para melhorar a eficiência agrícola e o uso de recursos naturais. A partir dessa premissa, o uso de modelos de crescimento de plantas são ferramentas de grande importância para auxiliar nesse entendimento, sendo igualmente importante nas ações de planejamento e de tomadas de decisão na agricultura.

O número de modelos de simulação desenvolvidos, publicados e usados aumentou nas últimas três décadas. Essa tendência ocorreu em vários campos de pesquisa ao passo que a evolução do poder computacional tornou viável o estudo tanto de sistemas complexos naturais, como sistemas antrópicos (JONES et al., 2006). Modelos matemáticos possibilitam simular realisticamente o crescimento e o desenvolvimento fenológico de culturas sob ampla gama de condições ambientais e de manejo, tudo isso a um baixo custo (CARDOSO et al., 2004).

Sob uma visão prática, Andrade et al. (2009) mostram que os modelos de crescimento de culturas podem ser usados na avaliação do risco climático e no prognóstico de safras. E que a utilização dos modelos pode auxiliar os agricultores na tomada de decisão, diretamente, ao fornecer informações necessárias sobre o resultado esperado e o risco associado, e indiretamente, por meio de mudanças de políticas agrícolas que influenciam a produção e comercialização dos produtos agrícolas.

Um modelo que é amplamente usado no Brasil é o do Zoneamento Agrícola de Risco Climático, que é um instrumento de política agrícola e gestão de risco na agricultura. Usado pela primeira vez em 1996, para a cultura do trigo, atualmente recebe revisão anual e é publicado na forma de portarias contemplando cerca de 40 culturas (BRASIL, 2013). O zoneamento também engloba a cultura da cana-de-açúcar, porém alguns trabalhos envolvendo diferentes modelos são avaliados em diferentes regiões ou escalas em busca de uma melhor representação do rendimento da cultura (SILVA et al., 2013).

Para a cana-de-açúcar, Evangelista (2011) utilizou dois modelos, o CSM-CANEGRO e o SARRA/SARRAZON, para encontrar em escala espacial a produtividade e o risco climático para a cultura no cerrado. Monteiro (2012) utilizou um modelo agrometeorológico

associado a um fator de penalização por baixas temperaturas para determinar a produtividade potencial e atingível de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Aplicando isso a séries históricas é possível determinar a eficiência climática, e consequentemente o risco climático agrícola de uma região.

O uso de cenários de mudanças climáticas é outra aplicação nos modelos para entender como o risco para cultura da cana irá variar na escala espaço-temporal, em determinada região. No Brasil, alguns trabalhos foram desenvolvidos nesse sentido para cana-de-açúcar em diferentes regiões e modelos (PINTO et al., 2008; MARIN et al., 2013; SILVA et al., 2013).

O entendimento da ocorrência de secas e seus efeitos nas culturas são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de cultivo, como data de semeadura, população de plantas e adubação, que minimizem os seus efeitos (ANDRADE et al., 2009). Segundo Singh e Srinivas (2007), como as interações entre planta, solo e clima são complexas, os modelos podem ser empregados para estudar abordagens estratégicas (de longo prazo) e táticas (curto prazo – na estação de cultivo) para convivência com este tipo de problema.

2.8 Modelos de Simulação

Modelos de simulação de culturas, assim como qualquer outra forma de modelo, têm como objetivo reproduzir de maneira mais próxima da realidade os processos fisiológicos de uma cultura por meio de suas interações com o sistema solo-atmosfera, por meio de equações matemáticas (ANDRADE et al., 2009). Dessa forma, é possível minimizar a necessidade de se fazer estudos de campo, que exigem investimentos, tempo e esforços para serem conduzidos. Além disso, Thornley e Johnson (2000) afirmam que modelos matemáticos podem contribuir com o aumento do conhecimento e auxiliar aplicações práticas na agricultura.

Os modelos capazes de simular o rendimento final de culturas têm sido estudados intensivamente em várias partes do mundo (HOOGENBOOM, 2000). Wallach (2006) divide os modelos de crescimento de culturas em dois grupos. A primeira é do modelo dinâmico (mecanístico), o qual se refere a um conjunto de equações diferenciais que são empregadas para descrever as interações do sistema solo-planta-atmosfera, onde a integração das equações diferenciais no tempo gera os valores das variáveis ou saídas do modelo. Portanto, têm a vantagem de permitir que passos intermediários dos processos envolvidos no crescimento da

cultura possam ser avaliados e isto é interessante, sobretudo quando estes são empregados em pesquisa.

A outra forma consiste em modelos como um conjunto de equações do tipo funções de resposta a variáveis explanatórias (empírico), onde a solução das equações gera variáveis de saída permitindo que o desempenho geral do modelo seja analisado diretamente (WALLACH, 2006).

De forma geral, os modelos empíricos procedem diretamente para as variáveis de interesse sobre a cultura, sempre relacionando as variáveis de entrada e saída em qualquer caminho que apresente um bom ajuste dos dados. Já, o modelo mecanístico, tem uma rota relativamente mais tortuosa, pois é preciso obedecer à ordem dos processos fisiológicos e a resposta às interações solo-planta-atmosfera em diferentes níveis fisiológicos (Figura 2). Com auxílio de equações diferenciais integrais, define-se o sistema vegetal, chegando-se às variáveis de interesse da cultura (THORNLEY e JOHNSON, 2000).

Figura 2 - Representação esquemática da relação entre modelagem empírica e mecanística. Adaptado de Thornley e Johnson (2000)

Nos dois casos é possível incluir elementos randômicos nas equações e, assim, impor aos modelos características estocásticas. As duas formas podem ser complementares nos modelos de culturas (WALLACH, 2006). Nem todos os modelos de culturas agregam todos os processos fisiológicos e interações solo-planta. A inclusão dessas variáveis no modelo dependerá de sua aplicação e a escala em que será aplicado (ANDRADE et al., 2009). Sendo que nos modelos mecanístico há, na maioria das vezes, uma extrapolação da formação de um tecido vegetal para a formação de um conjunto ou população de plantas e essa passagem de

escala (*upscaling*) exige uma correção, dependendo do uso dos dados de saída do modelo (JARVIS e MCNAUGHTON, 1986).

Thornley e Johnson (2000) dividem os modelos de simulação de culturas em dois tipos, os modelos de aplicação à pesquisa e os modelos de aplicação prática. Este último é considerado mais simples e se baseia em equações empíricas, e necessariamente deve apresentar bom ajuste aos dados observados. Os modelos de aplicação à pesquisa exigem uma quantidade maior de variáveis de entrada, por serem mais detalhados e baseados em processos. Devido a essas características, tendem a apresentar respostas mais próximas da realidade e não necessariamente necessitam do melhor ajuste dos dados observados.

Ambos os tipos de modelo possuem sua importância, sendo os empíricos mais voltados à aplicação prática, voltada diretamente ao produtor, e os mecanísticos voltados ao ensino, devido ao grande número de variáveis e conceitos mais profundos sobre a resposta e o desenvolvimento da planta. Dessa forma, os modelos mecanísticos vêm contribuindo nos últimos anos como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como ferramentas de auxílio à tomada de decisão na agricultura (WALLACH et al., 2001).

De acordo com Pavan (2007), os principais modelos utilizados na área agrícola atualmente, são:

APSIM – O *Agricultural Production Systems sIMulator*, concebido na Austrália, contém um conjunto de módulos que permitem a simulação de sistemas que cobrem uma variedade de vegetais, animais, solo, clima e interações de gestão. Ele está em desenvolvimento contínuo, com os lançamentos regulares de versões oficiais ao longo do tempo (APSIM, 2013).

Daisy – É um modelo agroecológico monodimensional de simulação de culturas. Considerando o balanço de água e de calor, o balanço de matéria orgânica, a dinâmica do amônio e do nitrato, baseando-se em informações de práticas gerenciais e dados climáticos, permitindo a simulação de cenários complexos e construção de estratégias de gerenciamento e rotação de culturas (PAVAN, 2007).

Century – Desenvolvido por Parton et al. (1987), este modelo foi especialmente desenvolvido para lidar com uma vasta gama de rotações do sistema de cultivo e práticas de preparo para a análise dos efeitos do sistema de gestão e mudanças globais. Simula a

dinâmica de C, nutrientes (N, P e S) e matéria orgânica por meio de um ciclo anual em escala temporal de séculos e milênios e pode ser aplicado em sistemas de agricultura e pastagem, floresta ou sistema de savana. Devido à eficiência desse modelo para simulação de resíduos, o Century foi inserido na plataforma DSSAT, tornando-a mais adequada para simulação de sistemas de baixo consumo e realização de análises de sustentabilidade a longo prazo (ICASA, 2013).

DSSAT – Basicamente é um sistema que combina dados de solo e séries de dados de clima com modelos de crescimento de culturas e programas de aplicação, tentando representar ao máximo o ambiente agrícola para simular resultados em vários ciclos que permitam testar uma melhor estratégia de gestão de culturas. Os modelos do DSSAT contêm embasamento fisiológico e integram os principais fatores de produção (solo, clima e manejo) permitindo ao usuário simular vários ambientes de produção, além de possibilitar a validação de dados obtidos por meio de modelos com dados observados (HOOGENBOOM et al., 2010).

Brisson et al. (2006) reviram os conceitos fundamentais de modelos de culturas, explicando o desenvolvimento e a evolução de cinco principais modelos: AZODYN, CERES-EGC, CROPGRO, CROPSYST e STICS. O AZODYN é um dos modelos mais especializados, feito para simular trigo de inverno. O modelo CERES-EGC que simula leguminosas, como soja, amendoim, feijão e ervilha, e não leguminosas, como tomate, pimentão e forragens. Já o modelo CROPSYST simula todas as culturas industriais de maior valor, incluindo pastagens. Dentre os cinco modelos, o STICS é capaz de simular todas as culturas anteriores, incluindo alface, banana, uva, culturas de ciclo muito curto e cultivos intercalares. Em todos os modelos revisados por Brisson et al. (2006), o subsistema planta é caracterizado pelo índice de área foliar (IAF) e pela sua fitomassa aérea.

Para a cana-de-açúcar, existem vários modelos dedicados à simulação dos componentes de produção no mundo, entre os quais estão o APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999), AUSCANE (JONES et al., 1989), CANEGRO (INMAM-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), CASUPRO (VILLEGAS et al., 2005), QCANE (LIU e KINGSTON, 1995), MOSICAS (MARTINÉ, 2003) e FAO-MZA (MONTEIRO e SENTELHAS, 2013). Entretanto os mais usados e difundidos atualmente são o APSIM-Sugarcane, de origem australiana e o CANEGRO, de origem sul-africana. Embora esses dois modelos tenham sido desenvolvidos independentemente, ambos possuem origem e abordagens semelhantes para simular a fenologia, formação do dossel e particionamento da biomassa aérea, sendo que

alguns modelos precursores deles ainda estão em uso (O'LEARY, 2000; LISSON et al., 2006).

Até a década passada, o uso de modelos de simulação de crescimento ainda não era rotina no Brasil. Suguitani (2006) afirma que são muitas as pesquisas relevantes com a cultura da cana-de-açúcar, mas os experimentos que inter-relacionam fatores como solo, clima e cultivares com a fenologia da cana-de-açúcar ainda são poucos. Dentre alguns modelos brasileiros, pode-se citar o SIMCANA proposto por Ometto (1974), sendo um modelo matemático-fisiológico do crescimento da cultura, tendo como variáveis de entrada a radiação solar global, temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar. Machado (1981) também apresentou um modelo matemático-fisiológico para simulação do acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar a partir de informações meteorológicas.

2.8.1 DSSAT

O DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é um software desenvolvido em conjunto por cientistas da Universidade da Flórida, da Universidade da Geórgia, da Universidade de Guelph, Universidade do Havaí, o Centro Internacional para o Desenvolvimento Agrícola e Fertilidade do Solo, Universidade do Estado de Iowa e outros cientistas associados ao Consórcio Internacional para aplicações de sistemas agrícolas (ICASA- *International Consortium for Agricultural Systems Applications*). É uma plataforma bastante difundida no e usada a mais de 20 anos por pesquisadores, educadores, consultores, extensionistas, produtores na tomada de decisão em mais de 100 países no mundo (HOOGENBOOM et al., 2010).

Para o seu funcionamento o software possui uma base de dados, que pode ser modificada ou alimentada, de solo, clima, manejo da cultura e dados experimentais. Essa base de dados dá suporte aos modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas, inseridos no DSSAT. Segundo HOOGENBOOM et al., (2010), existem cinco componentes primários que são responsáveis por interagir com os modelos de crescimento de culturas trocando informações de clima e tempo, manejo, solo, água no sistema solo-planta-atmosfera e modelos de crescimento. As informações de saída dos modelos são organizadas de acordo com a escolha do usuário na interface do programa.

Atualmente, o DSSAT está em sua versão 4.5 e contém 28 modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas. O software conta também com um pacote de ferramentas de suporte para auxiliar na manipulação de dados de clima, solo, observações de

campo, condições experimentais e informações genotípicas (Figura 3). Além disso, o sistema inclui programas para aplicações sazonais e análises de sequência, que permitem avaliar os riscos econômicos, bem como impactos associados à irrigação, fertilizantes, gestão de nutrientes, mudanças climáticas, sequestro de carbono do solo, variabilidade climática e gestão de precisão (HOOGENBOOM et al., 2010).

Figura 3 - Diagrama da base de dados, aplicação, e componentes de software e seus usos com modelos de culturas para aplicações no DSSAT. Adaptado de Jones et al. (2003)

Na simulação, o DSSAT funciona separado por módulos, que consideram o crescimento, desenvolvimento e rendimento de uma cultura em uma área uniforme de terreno, assim como mudanças no conteúdo da água do solo, carbono e nitrogênio que ocorrem durante o tempo (PAVAN, 2007). Para simulação é preciso atender aos requisitos mínimos de dados de entrada de clima (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2010), que são: a) localização geográfica da estação meteorológica; b) valores diários de radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); c) temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$); e d) precipitação (mm dia^{-1}).

O sistema conta com uma ferramenta de suporte ao preenchimento de falhas em séries históricas, onde é possível fazer correções e gerar séries com modelos estatísticos, baseados em valores médios e desvios padrões de elementos climáticos para uma determinada região. Como um gerador de dados diários e mensais, a ferramenta apresenta métodos e funções estatísticas e probabilísticas robustos, como cadeias de Markov de segunda ordem, para

determinação de dias secos e chuvosos, distribuição Gamma, processos estocásticos multivariados, médias, variâncias e desvio padrão. A probabilidade de ocorrência de chuvas está condicionada ao dia anterior, e as estimativas de radiação solar e temperaturas máximas e mínimas também estão condicionadas às ocorrências de dias secos ou chuvosos (PICKERING et al., 1994; SENTELHAS et al., 2001).

Além dessas ferramentas, o DSSAT contém um módulo de tempo e clima que interage com outros módulos primários e fornece as variáveis de acordo com as necessidades de cada modelo de crescimento de plantas. Nele também é possível gerar séries instantâneas (ou sintéticas) para simulações, baseadas nos parâmetros estatísticos de cada elemento climático. Segundo Porter et al. (2010), são dois os métodos utilizados na geração dos dados diários sintéticos, o WGEN, desenvolvido por Richard e Wright (1984), e o SIMMIN, que é baseado no SIMMETEO desenvolvido por Geng et al. (1986).

Dentre as aplicações de clima desse módulo, ainda é possível contabilizar a concentração de CO₂ atmosférico e definir cenários de mudanças climáticas. O módulo de clima conta também com uma sub-rotina para cálculo da radiação solar, que leva em conta o fator de nebulosidade para o uso nas rotinas de fotossíntese e evapotranspiração. Sendo que as variáveis meteorológicas de temperatura, radiação fotossinteticamente ativa (*PAR*), radiação solar, fração de difusão da radiação e umidade relativa são computadas na escala horária (PORTER et al., 2010).

Além dos dados climáticos, é preciso atender aos requisitos mínimos de dados pedológicos. Segundo HOOGENBOOM et al. (2010), é preciso inserir informações de classificação do solo, declividade, cor, permeabilidade e drenagem, além das seguintes variáveis de entrada por camada: a) profundidade superior e inferior do horizonte do solo; b) densidade do solo; c) carbono orgânico; d) pH da água; e) saturação de alumínio; f) e informação sobre o crescimento de raízes. Todos esses valores exercem influência nos cálculos do módulo de balanço de água no solo do DSSAT.

O balanço de água no solo utilizado no DSSAT (Figura 4) segue o padrão do tipo “cascata”. Baseado na metodologia proposta por Ritchie (1998), o método computa a quantidade de água disponível em cada camada do perfil levando em conta o ponto de murcha permanente, a capacidade de campo e o ponto de saturação do solo como limites de potencial mátrico. A infiltração é computada como a diferença entre a irrigação/precipitação e o escoamento. O movimento de água descendente de água é semelhante à de um sistema de reservatórios em série linear. Se a soma da quantidade de água infiltrada e presente no solo

superar a capacidade de retenção (*HOLD*), o volume excedido é drenado para a camada inferior. O cálculo de fluxo ascendente de água entre as camadas do solo é baseado na teoria da capilaridade proposta por Jones et al., (1986). A retirada de água pelas raízes é computada em função do potencial de absorção de água pela planta, a demanda atmosférica e o volume de raiz em cada camada (PORTER et al., 2004a).

Figura 4 - Representação esquemática do balanço de água no solo simulado pelo DSSAT. Em que, SAT é o ponto de saturação, C.C. é a capacidade de campo, P.M.P. é o ponto de murcha permanente e a C.A.D. é a capacidade de água disponível para planta. Adaptado de Ines et al. (2001)

Dentre os principais módulos de cálculo inseridos no DSSAT o da interação solo-planta-atmosfera é responsável pelo cômputo das taxas de troca entre os componentes do balanço de energia. Este módulo reúne dados de entrada de solo, planta e atmosfera necessários para o cálculo da interceptação da radiação solar pelo dossel, evapotranspiração potencial como também da evaporação atual do solo e transpiração da planta. Além disso, o módulo também determina o montante de água extraído pelas raízes das plantas, isso, para cada camada do perfil. Dessa forma, é fundamental a interação entre os módulos que fornecem dados de clima e características do solo, assim como o índice de área foliar (IAF) e a densidade radicular em cada camada do perfil (JONES et al., 2003; PORTER et al., 2004b).

No cálculo da evapotranspiração potencial, o módulo utiliza uma combinação entre o albedo do solo e do dossel vegetativo, sendo que enquanto não houver emergência da cultura, o albedo utilizado é igual ao determinado pelas características de cor do solo (RITCHIE,

1998). De acordo com os dados de entrada disponíveis, o módulo possui duas opções de estimativa da evapotranspiração potencial. O método padrão é o de Priestley-Taylor (1972), que requer apenas informações de radiação solar e temperatura diária, o segundo método é de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que adicionalmente requer dados de velocidade do vento e umidade.

Baseando-se em uma função exponencial negativa de IAF, o módulo ainda possui uma sub-rotina que particiona o potencial de evapotranspiração no potencial de evaporação de água do solo. O cômputo da evaporação atual do solo segue a metodologia proposta por Ritchie (1972), em que a evaporação atual do solo é função das características físico-hídricas e da evaporação potencial do solo. Com a evaporação atual do solo é possível obter a transpiração potencial da planta, que também leva em conta o coeficiente de extinção do dossel da cultura (parâmetro de espécie), o IAF, a evapotranspiração potencial e um fator que reduz a transpiração da planta, contabilizando o efeito do aumento das concentrações atmosféricas de CO₂ na resistência estomática (PORTER et al., 2004b).

Para determinar como a demanda atmosférica e o solo limitam a transpiração da planta, o módulo possui uma rotina que calcula o fluxo máximo de água nas raízes somando o potencial de absorção de água pelas raízes em cada camada do solo. Segundo Jones et al. (2003) a equação que computa o potencial de extração de água pelas raízes em cada camada é um aproximação da equação de fluxo radial, que leva em conta o efeito da textura do solo na condutividade hidráulica, o diâmetro da raiz e a diferença máxima do potencial hídrico entre as raízes e o solo.

A taxa de transpiração atual da planta é computada então como o mínimo de potencial de transpiração da planta e o potencial de absorção de água pela raiz. Dessa forma a atmosfera pode limitar a transpiração por meio de baixos valores de temperatura e radiação, assim como o dossel vegetativo pode limita-la pelo valor de IAF (JONES et al., 2003). Se a transpiração atual da cultura limitar a absorção de água potencial pelas raízes, esses valores são reduzidos proporcionalmente em cada camada do solo, de acordo com um fator de absorção de água. O solo passa a ser fator limitante na transpiração da planta, caso o valor de água disponível na camada decresça até o ponto de murcha permanente (PORTER, et al., 2004b).

O sistema DSSAT conta ainda com a integração de demais módulos de dinâmica do solo, nutrientes e matéria orgânica. Atualmente, na versão 4.5, um módulo que contabiliza o efeito das pragas e doenças está conectado diretamente aos modelos de simulação de culturas,

enquanto que o módulo de operações de manejo ainda está em construção (HOOGENBOOM et al., 2010).

Existem algumas condições ambientais e de manejo, como o plantio direto, plantio consorciado, excesso de água no solo, salinidade e disponibilidade e estresse de fósforo, que o DSSAT ainda não é capaz de incluir nas simulações (ANDRADE et al., 2009). Segundo Ines et al. (2001), a performance dos modelos inseridos no DSSAT pode não ser boa em condições de estresse ambiental severo. Entretanto, os modelos podem apresentar melhor desempenho em regiões em que somente o clima, a água e/ou o nitrogênio são fatores que afetam o rendimento da cultura.

2.8.2 CSM-CANEGRO

Entre os modelos inseridos na plataforma DSSAT encontra-se o modelo CANEGRO, criado especialmente para simular o crescimento e o rendimento da cana-de-açúcar, o qual evoluiu a partir do modelo CERES-Maize (JONES e KINIRY, 1986). Inicialmente, o CANEGRO foi concebido para a África do Sul a partir da necessidade de simular o efeito do estresse hídrico e da irrigação na cultura da cana, que eram motivos de preocupação no país naquele momento (INMAN-BAMBER, 1991). Porém, o modelo não possuía interface amigável com os usuários e o seu uso exigia conhecimento computacional técnico, que não contribuía para difusão do modelo entre outras instituições de pesquisa, justificando o esforço de compatibilização com a plataforma DSSAT, permitindo que não-especialistas pudessem criar, executar e analisar simulações (JONES et al., 2007).

A partir disso, Inman-Bamber e Kiker (1997) trabalharam na compatibilização do modelo no formato do DSSAT na versão 3.1, que foi atualizado por Singels et al. (2008), para versão 4.5 da plataforma (Figura 5). Atualmente o modelo possui uma versão atualizada no sistema DSSAT v4.5, seguindo as metodologias propostas por Inman-Bamber (1991) e Singels e Bezuidenhout (2002). O modelo CSM-CANEGRO pode ser considerado como um dos principais modelos de crescimento de cana-de-açúcar que vem sendo usado extensivamente em pesquisas e manejo (SINGELS et al., 2008).

Figura 5 - Representação esquemática do CSM-CANEGRO, como um módulo inserido no DSSAT, em que IAF é o índice de área foliar, o I.L. é a interceptação de luz, as siglas DWTD e GRORT são, respectivamente, as rotinas de cálculo dos componentes aéreos e de raiz. Adaptado de Singels et al. (2008)

Essencialmente, o CSM-CANEGRO baseia-se na modelagem de processos, que além de permitir a estimativa da produtividade, também torna possível conhecer como se deu o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo de cultivo. Ele considera os processos envolvendo o consumo de água, o balanço hídrico no solo, a fenologia, desenvolvimento do dossel, perfilhamento, acúmulo e partição de biomassa, crescimento de raízes, estresse hídrico e acamamento da cultura (SINGELS et al., 2008; JONES et al., 2007). Além disso, o CSM-CANEGRO conta com 74 parâmetros de cultura, sub-divididos em três tipos: espécie (Tabela 6); cultivar (Tabela 5); e ecótipos (Tabela 4). Porém sugere-se que somente os parâmetros de ecótipo e de cultivares devem sejam ajustados pelo usuário (SINGELS et al., 2008).

Tabela 4 - Parâmetros de ecótipos do modelo CSM-CANEGRO e suas descrições (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	°C dia m ⁻¹	Graus-dia necessário para o dossel ajustar-se à metade da largura da linha
dPERdT	mm h ⁻¹ °C ⁻¹	Mudança na taxa de crescimento da planta por unidade de temperatura efetivaNúmero
EXTCFN	-	Máximo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
EXTCFST	-	Mínimo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
LFNMXEXT	nº folhas	Número de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas) onde ocorre a máxima extinção da radiação
AREAMX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar ($y = cf1 + cf2 x + cf3 x^2$)
AREAMX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para 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 a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
LMAX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
MAXLFLENGTH	cm	Máximo comprimento absoluto de folha
MAXLFWIDTH	cm	Máxima largura absoluta de folha
POPCF(1)	-	Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF(2)	-	Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY	-	Fração de perfilhos sobre a população madura (com 1600 °Cd), que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	°C	Temperatura base para emergência e início da elongação do colmo
TTBASEPOP	°C	Temperatura base para fenologia de colmos
TBASEPER	°C	Temperatura base para extensão da planta

Tabela 4 - Parâmetros de ecótipos do modelo CSM-CANEGRO e suas descrições (Singels et al., 2008)

Parâmetro	Unidade	Descrição
LG_AMRANGE	t ha ⁻¹	Variação na massa da parte aérea do início ao final do acamamento
LG_GP_REDUC	-	Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total, como fração
LG_FI_REDUC	-	Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Tabela 5 - Parâmetros de cultivar do modelo CSM-CANEGRO e suas descrições (Singels et al., 2008).

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
Tthalfo	°C dia	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento
Tbase	°C dia	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	nº folhas	Número máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este número.
MXLFAREA	cm ²	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o número de folhas MXLFARNO (cm ²)
MXLFARNO	nº folhas	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
PI1	°C dia	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas abaixo do Pswitch)
PI2	°C dia	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas acima do Pswitch)
PSWITCH	nº	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	°C dia	Graus-dia para emergência da cana-planta
TTRATNEM	°C dia	Graus-dia para emergência da soqueira
CHUPIBASE	°C dia	Graus-dia para o início do crescimento do colmo
TT_POPGROWTH	°C dia	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento
LG_AMBASE	t ha ⁻¹	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o início do acamamento

Tabela 6 - Parâmetros de espécie do modelo CSM-CANEGRO, e suas descrições (Singels et al., 2008)

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

Singels et al. (2008) apresentaram alguns ajustes em relação a versão 3.5, principalmente no que se diz respeito ao cálculo de acúmulo de biomassa e partição dos foto-assimilados. Os autores descrevem as principais características do modelo e o seu funcionamento em sua nova versão, adaptado para a plataforma DSSAT. O modelo, além de

simular o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, é capaz de simular: o desenvolvimento do dossel ao nível de folhas e colmo; captação de radiação, por meio do IAF; o balanço hídrico, utilizando princípios da dinâmica solo-planta-atmosfera; o acúmulo de biomassa, seguindo uma abordagem de eficiência do uso de radiação/respiração; e o particionamento da biomassa para diferentes componentes da planta.

A fenologia é regulada pelo acúmulo de graus-dia (GD), dessa forma a emergência do perfilhamento primário é simulada quando um período específico de tempo térmico é acumulado a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM). O início do crescimento de colmos é simulado quando um período específico de exigência térmica (CHUPIBASE) é atingido, considerando a emergência do perfilho primário. O pico de perfilhamento ocorre após um período de tempo térmico acumulado a partir da emergência, através do parâmetro TT_POPGROWTH. Na modelagem, a fase de perfilhamento dura desde a emergência dos primeiros perfilhos até o pico de perfilhamento, enquanto que o crescimento dos colmos ocorre desde o início do crescimento até a colheita. A fase de senescência de perfilhos é modelada após o pico de perfilhamento até a colheita. O florescimento não é simulado pelo modelo (SINGELS et al., 2008).

No desenvolvimento da parte aérea, o CSM-CANEGRO utiliza um método de índice de área foliar derivado do desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos baseado no tempo térmico. Este método simula o desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos, onde a área foliar de cada perfilho é extrapolada para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual pelo número de perfilhos por unidade de área. Com o valor de área foliar total, a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (*PAR*) é calculada de acordo com a lei de Beer, onde o coeficiente de extinção irá variar de acordo com o número de folhas formada no colmo primário e parâmetros de ecótipo (LFNMEXT, EXTFCST e EXTFCFN, Tabela 4).

O que determina o aparecimento de folhas e o perfilhamento é o tempo térmico, que é definido nos parâmetros de cultivar e ecótipo (Tabela 5 e Tabela 4). A taxa de perfilhamento é inversamente proporcional ao espaçamento entre as linhas, enquanto que a senescência dos perfilhos depende do tempo térmico e do estresse hídrico. Para o aparecimento das folhas o modelo considera dois filocronos, (tempo térmico requerido para o aparecimento de uma folha) que variam em função de um limiar de número de folhas emergidas (Tabela 5).

A senescência das folhas é acelerada pelo estresse hídrico e ocorre quando um valor máximo de folha por colmo é atingido. O modelo calcula a expansão foliar através da taxa de

expansão da planta (PER , cm dia^{-1}), que pode ser computada pelos parâmetros de ecótipos através da eq. (1). Os valores de área laminar aumentam para as folhas subsequentes até o número específico de folhas ($MXLARN0$) e a máxima área da lâmina foliar é estipulada pelo parâmetro $MXLFAREA$.

$$PER = SWDF_2 \times dPERdT \times GD \times \frac{24}{10} \quad (1)$$

em que: PER é a taxa de expansão da planta (cm dia^{-1}), $SWDF_2$ é o fator de estresse hídrico para expansão da planta (adimensional), $dPERdT$ é a taxa de extensão da planta sem estresse hídrico ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ h}^{-1}$), GD são os graus-dia ($^\circ\text{C}$), utilizando temperatura base de 10°C ($TBASEPER$, Tabela 4). O termo $24/10$ é um fator de integração.

O crescimento de colmo ($SHGT$) e dossel ($CANHEIGHT$) também dependem da taxa de expansão da planta (PER), como segue nas eq. (2) e (3) descritas por Singels et al. (2008). Ambas sofrem influencia de parâmetros de espécies ($PERcoeff$ e $CHTCoeff$) no seu cálculo.

$$SHGT = SHGT + (PER \times PERcoeff) \quad (2)$$

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

$$CANHEIGHT = \frac{\{SHGT + LMAX[LFN(1) \times CHTCoeff]\}}{100} \quad (3)$$

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

O modelo CSM-CANEGRO também simula o acúmulo de biomassa e o particionamento de fotoassimilados que são descritos com detalhe por Singels e Bezuidenhout (2002). A eq. (4) descreve como o modelo calcula o incremento diário na biomassa total, utilizando a eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa ($PARCE$), a quantidade de radiação interceptada ($IPAR$), o tamanho da planta (TOT) e também o nível de estresse hídrico ($SWDF1$).

$$\frac{dTOT}{dt} = (1 - RespGcf) \times (PARCE \times 10^{-6} \times IPAR - Rm \times TOT) \times SWDF1 \quad (4)$$

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

É importante ressaltar que a eficiência de conversão da radiação ($PARCE$) e a respiração de manutenção (Rm) são dependentes da temperatura (SINGELS et al., 2005). A $PARCE$ possui relação direta com a temperatura do ar e diminui por uma função exponencial, levando em conta uma temperatura basal para fotossíntese, e o seu valor não pode exceder um máximo estipulado para a espécie ($Tbasephotos$ e $PARCEmax$, Tabela 6). A fração do incremento de biomassa consumida pela respiração de manutenção também varia exponencialmente com a temperatura do ar, considerando que essa variação ocorre em função de uma temperatura de referência de $10\ ^\circ C$.

A partição dos fotoassimilados entre raízes e a parte aérea é simulada por função não-linear da biomassa total, na qual a máxima fração de incremento diário da biomassa particionada para a parte aérea e para a raiz, é especificada em parâmetros de cultivar e espécie (Tabela 5 e Tabela 6). A fração do incremento particionado em relação à parte aérea, que será destinada ao colmo é dependente do tempo térmico e de um valor máximo específico de cultivar (Tabela 5). O particionamento da massa seca entre os tecidos estruturais do colmo e o acúmulo de sacarose é ditado pelas condições de crescimento (temperatura e água), a massa de colmo atual, e características de cultivar (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

O crescimento radicular tem um algoritmo expresso em termos de extensão da profundidade de raízes, bem como o aumento da massa radicular e do comprimento das raízes por camada de solo. Este último, junto às condições hídricas do solo, determina o potencial de absorção (extração) de água pela planta, usado posteriormente para o cálculo do nível de estresse hídrico.

O incremento na densidade de comprimento de raiz (RLV) é computado pela conversão da biomassa particionada ($GRORT$) para as raízes em um comprimento total de raiz por unidade de área ($RLNEW$, $cm\ cm^{-2}$). A eq. (5) descreve a conversão assumindo um comprimento radicular específico que é parâmetro de espécie ($RTcmpg$, Tabela 6).

$$RLNEW = GRORT \times 0,0001 \times RTcmpg \quad (5)$$

em que: RLNEW é o comprimento total de raiz por unidade de área (cm cm^{-2}), GRORT é o incremento de biomassa particionada para as raízes (t), e RTcmpg é o comprimento radicular específico (cm g^{-1}).

O incremento total de raiz (RLNEW) é posteriormente repartido entre as camadas de solo que contém raízes, de acordo com fator de ponderação, que é indicado no arquivo de perfil de solo.

O modelo assume que 0,5% da densidade de comprimento de raiz (RLV) são perdidas em cada dia, devido à respiração e/ou senescência, sendo que o valor de RLV em uma camada do solo não pode ser menor que um dado limiar. Para cana-planta, o modelo considera um valor de RLV inicial igual para todas as camadas de $0,02 \text{ cm cm}^{-3}$, enquanto que para cana-soca o valor inicial é de $0,2 \text{ cm cm}^{-3}$ na camada superficial, decrescendo conforme a profundidade do solo.

O aumento diário da profundidade da raiz é calculado assumindo uma penetração de $2,2 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, com temperatura base de $16 ^\circ\text{C}$, até a raiz alcançar o seu comprimento máximo. O valor de profundidade de raiz começa no zero, para cana-planta, e assume a profundidade radicular do ciclo anterior, para cana-soca (SINGELS, et al., 2008).

A absorção de água pelas raízes é calculada assumindo a lei do limitador (*law of the limiting*), considerando que a resistência do solo e da raiz ou a demanda atmosférica dominam a taxa fluxo de água pelas raízes. Dessa forma, a taxa de fluxo é calculada considerando o movimento radial de água de uma única raiz (RLV) e que as raízes estão uniformemente distribuídas entre as camadas do solo (RITCHIE, 1998). Primeiramente, o modelo calcula o potencial de absorção de água por unidade de raiz, que é governado pelo conteúdo de água no solo, ponto de murcha permanente e da densidade de comprimento de raiz (RLV) (eq. (6)).

$$RWU_{(L)} = \left[\frac{SWCON 1 \times \exp(SWCON 2 \times (SW_{(L)} - LL_{(L)}))}{SWCON 3 - \ln(RLV_{(L)})} \right] \times Z_{(L)} \times RLV_{(L)} \quad (6)$$

em que: $RWU_{(L)}$ é o potencial de absorção de água pelas raízes em uma camada de solo ($\text{cm}^3 \text{ dia}^{-1}$); SWCON1, SWCON 2 e SWCON 3 são coeficientes de condutividade solo-raiz; $SW_{(L)}$ e $LL_{(L)}$ são respectivamente o conteúdo atual de água no solo e o ponto de murcha permanente na camada (cm^3); $RLV_{(L)}$ é a densidade de comprimento de raiz (cm cm^{-3}); e $Z_{(L)}$ é a profundidade da camada (cm).

A absorção máxima de água por unidade (cm) de raiz é limitada pelo parâmetro de espécie RWUMX (Tabela 6), limitando a absorção em $0,07 \text{ cm}^3$ de água por cm de raiz (RLV). Os coeficientes de condutividade do solo SWCON1 e SWCON3 são respectivamente 0,00267 e 6,68 (RITCHIE, 1998), entretanto outro valor de SWCON1 proposto por Van Antwerpen (1998) vem sendo usado (SWCON1=0,00132) em estudos de absorção de água pela raiz de cana-de-açúcar (SINGELS et al., 2010). O SWCON2 é calculado através de uma função linear dependente do ponto de murcha permanente (LL) e o termo exponencial da equação em que é usado, não pode superar o valor de $40 (\text{cm}^3 \text{ cm}^{-1})$. Dessa forma o modelo contabiliza o potencial de absorção de água total do solo (TRWU), somando os valores de $\text{RWU}_{(L)}$ de todas as camadas (RITCHIE, 1998; PORTER et al. 2004a).

Uma fração (eq. (7)) de absorção de água é calculada para reduzir o potencial total de absorção do solo (TRWU) caso esse valor seja maior que a transpiração potencial da planta (EOP). Caso o valor de WUF for menor ou igual a 1, a planta é considerada livre de estresse hídrico, para o cálculo de absorção de água e então o valor de TRWU é igualado ao EOP. Se o valor dessa fração for maior que 1, então o valor de transpiração máxima da cultura (EOP) será igualado ao valor de absorção potencial total de água do solo (TRWU), tornando assim o valor de absorção atual da cultura.

$$WUF = \frac{EOP}{TRWU} \quad (7)$$

em que: WUF é a fração de absorção de água, EOP a transpiração potencial (ou máxima) da planta ($\text{cm}^3 \text{ dia}^{-1}$), e TRWU é o potencial de absorção de água total do solo ($\text{cm}^3 \text{ dia}^{-1}$).

A simulação de estresse hídrico é realizada através do impacto da deficiência de água na regulação dos diferentes processos da planta (assimilação de carbono, crescimento) por diferentes fatores de estresse hídrico (SWDF_i). Esses diferentes fatores de estresse hídrico (i), no CSM-CANEGRO se resumem a dois, SWDF_1 para fotossíntese e respiração, e SWDF_2 para o crescimento. Ambos são calculados pela razão entre a demanda atmosférica (transpiração máxima) e a quantidade de água disponível no solo (eq. (8)), seguindo o modelo proposto por Jones et al. (1986).

$$\text{SWDF}_i = F_i \times \frac{TRWU}{EOP} \quad (8)$$

em que: $SWDF_i$ é o fator de estresse hídrico (0-1); F_i é o parâmetro específico de cada processo (adimensional); TRWU é o potencial de absorção de água do solo pelas raízes ($\text{cm}^3 \text{ dia}^{-1}$); e EOP é a transpiração máxima da planta ($\text{cm}^3 \text{ dia}^{-1}$).

A transpiração máxima (EOP) é calculada a partir da demanda evaporativa da atmosfera, pela evapotranspiração de referência (FAO-56), modificada pelo coeficiente de cultura (EORATIO, Tabela 6) e o coeficiente de cobertura do dossel, que varia em função do IAF da cultura. A absorção de água pelas raízes (TRWU) é calculada de acordo com a metodologia do modelo CERES Maize (JONES et al., 1986; RITCHIE, 1998), sendo que o máximo de absorção de água pelas raízes de cana-de-açúcar por dia é definido em $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1}$ (RWUMX, Tabela 6).

No CSM-CANEGRO, os parâmetros específicos de cada processo (F_1 e F_2) são respectivamente o inverso dos valores de espécie RWUEP1 e RWUEP2 (Tabela 6). Atualmente esses valores de F_1 e F_2 são, respectivamente, 1,0 e 0,5, representando que a taxa de expansão da planta é duas vezes mais sensível ao estresse hídrico que a assimilação de CO_2 pela fotossíntese (Figura 6). O modelo considera ainda que quando submetida a estresse hídrico severo, a fotossíntese somente se recuperará após um determinado tempo térmico (Tabela 6).

Figura 6 - Relação usada para o cálculo dos fatores SWDF1 e SWDF2, usados para incorporar o efeito do estresse hídrico no modelo. Adaptado de Ritchie (1998)

Além do estresse hídrico, o modelo considera o fator de tombamento da cultura quanto à resistência a ventos severos como também à resistência da estrutura dos colmos. O tombamento reduz a produtividade e influencia diretamente a interceptação de radiação pelo dossel vegetativo. Segundo Singels et al (2008), existe um erro no cálculo da profundidade da raiz que ainda não foi corrigido.

No Brasil, o modelo CSM-CANEGRO vem sendo utilizado basicamente na área de pesquisa, fazendo parte de trabalhos voltados ao desenvolvimento fisiológico da cana-de-açúcar, irrigação e mudanças climáticas (NASSIF, 2010; EVANGELISTA, 2011; MARIN et al., 2013b). Marin et al. (2011) obtiveram resultados satisfatórios do modelo, avaliando quatro cultivares de cana e comparando os resultados do modelo com observações de campo, como: perfilhamento, altura do colmo, IAF, número de folhas verdes e fitomassa da parte aérea. Outro estudo, conduzido por Nassif (2010), envolveu a parametrização e avaliação do CSM-CANEGRO para cultivares brasileiras de cana-de-açúcar. Este estudo apontou a boa eficiência da ferramenta GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) para a parametrização de cultivares de cana-de-açúcar, porém com resultados razoáveis na estimativa da produtividade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado por meio da utilização de um modelo mecanístico de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, o qual contabiliza os efeitos das condições meteorológicas e do estresse hídrico no crescimento e desenvolvimento de modo a estimar a produtividade da cultura da cana de açúcar em diferentes regiões do país, tanto nas áreas tradicionalmente produtoras dessa cultura como também nas regiões para onde a cultura tem se expandido.

O modelo utilizado foi o CSM-CANEGRO, o qual faz parte do sistema DSSAT v4.5 (*Decision Support System Agrotechnology Transfer*). Com o modelo é possível simular o crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, incluindo valores de massa do colmo, biomassa da raiz, área foliar, altura, concentração de sacarose, entre outros, além do estresse hídrico ao qual a cultura foi submetida (SINGELS et al., 2008; HOOGENBOOM et al., 2010).

O modelo utiliza como dados de entrada informações diárias de clima, como temperatura máxima, mínima, precipitação e radiação solar global, considerando também as datas de plantio e colheita, irrigação e fertilização. Valores de umidade relativa do ar e velocidade do vento não são essenciais para as simulações, mas seu uso é recomendado quando disponíveis (PORTER et al., 2010; MARIN et al., 2011). Para o seu funcionamento, é preciso incluir ainda dados de solo, referentes à classificação, granulometria, declividade e drenagem.

Com os valores meteorológicos e pedológicos, junto às características genotípicas da cana-de-açúcar, o modelo é capaz de simular o desenvolvimento e crescimento da cultura utilizando métodos detalhados de balanço hídrico e da dinâmica solo-planta-atmosfera (RITCHIE, 1998; PORTER et al., 2010; HOOGENBOOM et al., 2010).

3.1 Dados de Entrada

3.1.1 Clima

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no total de 30 localidades com dados de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima do ar e insolação, todos em escala diária contendo pelo menos

30 anos de dados, de 1980 a 2010. Uma pré-análise de consistência foi feita nos dados para filtrar as estações meteorológicas que continham os maiores períodos de dados consecutivos e menos falhas. As estações que foram selecionadas para o estudo são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Estações meteorológicas do INMET empregadas no presente estudo, suas coordenadas geográficas, altitude, período de dados disponíveis (Início-Fim) e sigla de cada localidade (as duas primeiras letras representam o estado e as duas últimas o município)

Local	UF	Latitude (Graus)	Longitude	Altitude (m)	Início	Fim	Sigla
Maceió	AL	-9,66	-35,70	65	1961	2010	ALMA
Barreiras	BA	-12,15	-45,00	439	1961	2010	BABA
Pirenópolis	GO	-15,85	-48,96	740	1977	2010	GOPI
Formosa	GO	-15,53	-47,33	935	1961	2010	GOFO
Jataí	GO	-17,88	-51,71	663	1978	2010	GOJA
Balsas	MA	-7,53	-46,03	259	1973	2010	MABA
Capinópolis	MG	-18,71	-49,55	621	1970	2010	MGCA
Uberaba	MG	-19,73	-47,95	737	1961	2010	MGUB
Mocambinho	MG	-15,08	-44,01	452	1976	2010	MGMO
Pompeu	MG	-19,21	-45,00	691	1973	2010	MGPO
João Pinheiro	MG	-17,70	-46,16	760	1961	2010	MGJO
Ivinhema	MS	-22,30	-53,81	369	1966	2010	MSIV
Diamantino	MT	-14,40	-56,45	286	1961	2010	MTDI
Marabá	PA	-5,36	-49,13	95	1973	2010	PAMA
João Pessoa	PB	-7,10	-34,86	7	1961	2010	PBJO
Petrolina	PE	-9,36	-40,46	370	1962	2010	PEPE
Recife	PE	-8,05	-34,95	10	1961	2010	PERE
Bom Jesus do Piauí	PI	-9,10	-44,11	332	1971	2010	PIBO
Floriano	PI	-6,76	-43,01	123	1970	2010	PIFL
Maringá	PR	-23,40	-51,91	542	1961	2010	PRMA
Natal	RN	-5,91	-35,20	49	1961	2010	RNNA
Santa Maria	RS	-29,70	-53,70	95	1961	2010	RSSA
Aracaju	SE	-10,95	-37,04	5	1961	2010	SEAR
Piracicaba	SP	-22,71	-47,42	580	1978	2011	SPPI
Presidente Prudente	SP	-22,11	-51,38	436	1961	2010	SPPR
Catanduva	SP	-21,11	-48,93	570	1961	2010	SPCA
Votuporanga	SP	-20,41	-49,98	503	1976	2010	SPVO
Peixe	TO	-12,01	-48,35	242	1975	2010	TOPE
Araguaína	TO	-7,20	-48,20	229	1980	2010	TOAR
Palmas	TO	-10,19	-48,30	280	1961	2010	TOPA

As localidades foram selecionadas em função de já serem tradicionais produtoras de cana-de-açúcar, assim como por apresentarem potenciais de expansão da cultura no país, sendo que para a região sudeste e centro-oeste essa seleção foi feita com base nas informações apresentadas pelo CANASAT (2012), como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Localização das estações meteorológicas do INMET empregadas no presente estudo, áreas de expansão da cana-de-açúcar (INPE, 2013) e principais municípios produtores em 2012 (IBGE, 2013)

Para correção dos dados faltantes de precipitação, foi utilizado o critério da estação mais próxima, sendo essas estações provenientes da rede pluviométrica da Agência Nacional de Aguas (ANA) no raio de no máximo 20 km de cada estação. Mesmo próximas, em algumas localidades onde as chuvas não eram homogêneas, devido a diferenças de altitude, optou-se por se coletar os dados faltantes junto à estação que tivesse a condição geográfica mais próxima da estação do INMET em questão. Isso ocorreu principalmente nas regiões litorâneas do nordeste.

Como o CSM-CANEGRO exige dados diários de radiação solar global (Q_g) e esses não estavam disponíveis nas séries históricas do INMET, foi necessário se estimar esses valores com base na equação de Angström, a qual emprega dados de insolação (n), fotoperíodo (N) e irradiância solar extraterrestre (Q_0), de modo a considerar os efeitos da nebulosidade, presença de poluentes e vapor d'água e a época do ano. Os valores de Q_0 e N são obtidos por equações astronômicas, como segue:

$$Q_o = 37,6 \times \left(\frac{d}{D}\right)^2 \times \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) \times h_n \times \sin\phi \times \sin\delta + \cos\phi \times \sin\delta \times \sinh_n \right] \quad (9)$$

em que: Q_o é a radiação solar global extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); 37,6 é a constante solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $(d/D)^2$ é o fator de correção para distância relativa Terra-Sol; δ é a declinação solar; ϕ é a latitude do local (em graus e décimos) e h_n é o ângulo horário do nascer do sol, dado por:

$$h_n = \cos^{-1}(-\tan\phi \times \tan\delta) \quad (10)$$

Primeiramente, quando o valor diário de insolação (n) estava disponível foi utilizado o método de Angström-Prescott para estimar a radiação solar global, empregando-se os coeficientes a e b sugeridos por Glover e McCulloch (1958). O método se baseia na latitude e na relação entre as horas de brilho solar e o fotoperíodo, como descrito na eq. (11). Quando o dado de insolação era faltante ou duvidoso, os dados de Q_g foram estimados pela equação 13, seguindo a proposta de Hargreaves (1994) e recomendação do boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998):

$$Q_g = Q_o \times \left[0,29 \times \cos\phi + 0,52 \times \left(\frac{n}{N}\right) \right] \quad (11)$$

em que: Q_g é a irradiância solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Q_o é a irradiância solar global extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ϕ é a latitude do local (grau decimal), n é a insolação diária (horas), e N é o fotoperíodo (horas) como segue:

$$N = 2 \times \left(\frac{h_n}{15}\right) \quad (12)$$

Para as situações em que o dados de insolação não estava disponível, empregou-se o método proposto por Hargreaves (1994) para a estimativa da radiação solar, o qual assume a premissa de que a amplitude térmica diária é diretamente relacionada à nebulosidade do local. Sob céu aberto, a expectativa é que a temperatura máxima atinja altos valores em decorrência da radiação solar incidente e, durante a noite, a queda de temperatura é também acentuada devido à emissão de radiação de ondas longas. Assim, o método é descrito por:

$$Q_g = k \times \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} \times Q_o \quad (13)$$

em que: $T_{\max}$ e $T_{\min}$ são as temperaturas máxima e mínima diária (°C) e k é o coeficiente empírico do método, para corrigir o efeito da continentalidade. Allen et al. (1998) propõem dois valores para o coeficiente “ k ”, sendo um para regiões litorâneas ($k = 0,19$) e outro para regiões continentais ($k = 0,16$).

Para o preenchimento de falhas de dados de temperatura menores ou iguais há três dias, foi feita uma interpolação linear entre os dados do dia anterior e posterior ao período faltante. Após esses tratamentos os dados foram inseridos na ferramenta WeatherMan, que faz parte do pacote de ferramentas DSSAT45. O WeatherMan é uma ferramenta de importação, análise e exportação de formatos distintos de dados climáticos para uso nos modelos de simulação de crescimento e produção de culturas, entre outras aplicações. Como gerador de dados diários e mensais, o aplicativo apresenta métodos e funções estatísticas e probabilísticas robustos, como a cadeia de Markov de segunda ordem, para determinação de dias secos e chuvosos, distribuição Gamma, processos estocásticos multivariados, médias, variâncias e desvio padrão. A probabilidade de ocorrência de chuvas está condicionada ao dia anterior, e as estimativas de radiação solar e temperaturas máximas e mínimas também estão condicionadas às ocorrências de dias secos ou chuvosos (PICKERING et al., 1994; SENTELHAS et al., 2001). Dessa forma, para os períodos com falhas de dados mais longos nas series de dados meteorológicos foram preenchidos pelo WeatherMan, utilizando a média mensal e processos estocásticos. As séries foram padronizadas para início em 1978 e término em 2010.

3.1.2 Solo

O DSSAT conta com uma ferramenta para cadastramento de dados de perfis de solo, onde é possível inserir características físico-hídricas e químicas destes solos, além de estimar valores de umidade por meio de equações de pedotransferência. Para o cadastramento de um perfil de solo é preciso atender aos seguintes requisitos de dados:

- a) Classificação e localização espacial;
- b) Parâmetros de superfície: cor, drenagem, declividade, potencial de escoamento superficial (*Curve Number*) e fator de fertilidade;

- c) Características físico-hídricas: teores de argila e silte (%), capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade aparente, saturação, condutividade hidráulica;
- d) Características químicas: Carbono orgânico, PH em água, Capacidade de Troca Catiônica e N total (%);
- e) Fator de crescimento e distribuição radicular ao longo do perfil do solo.

Como foram utilizadas 30 estações em localidades distintas, nem sempre os perfis de solo para cada região dispunham dos dados requeridos pelo modelo. Portanto, foram utilizados três perfis de solo, representando solos de textura arenosa (<15% de teor de argila), média (15-35% de teor de argila) e argilosa (> 35% de teor de argila) (DALMAGO et al., 2009; LOPES-ASSAD, 2007), obtendo-se três cenários, que representam baixa, média e alta capacidade de água disponível (CAD) no solo (Solos tipo 1, 2 e 3), critério que se assemelha ao adotado para operacionalização do zoneamento agrícola de risco climático do Brasil (EMBRAPA, 2010).

A granulometria dos solos usados nesse trabalho originaram-se do banco de dados RadamBrasil, sendo um perfil de Latossolo Roxo distrófico de textura argilosa, representando o cenário de maior retenção de água (CAD = 152 mm); um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura média, que representa o cenário de média retenção (CAD = 71 mm); e um Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd) de baixo teor de argila para representar o cenário de baixa retenção de água (CAD = 48 mm).

Os valores que dizem respeito às características físico-hídricas do solo, como a condutividade hidráulica, a densidade e os teores de água no solo podem ser estimados pelo DSSAT através de funções de pedotransferência. Contudo, as funções de pedotransferência do programa para estimar a curva de retenção de água no solo estão ajustadas para solos de clima temperado, não sendo apropriadas para estimar os valores em solos brasileiros (MARIN et al., 2011). Portanto, para estimar os valores de ponto de murcha permanente (-1500 kPa), capacidade de campo (-10 kPa), e ponto de saturação do solo, foi utilizado o método de curva de retenção de água proposto por van Genuchten (1980), descrito pela eq. (14), a qual depende de alguns parâmetros específicos:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha |\psi|)^n\right]^m} \quad (14)$$

em que: θ é conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_s e θ_r são respectivamente o conteúdo de água saturada e residual do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), Ψ é o valor do potencial mátrico (kPa), α (kPa^{-1}), n , e m são parâmetros de ajuste da equação. Assumindo que $m=1 - 1/n$.

Os parâmetros de ajuste utilizados para o cálculo da curva de retenção foram os propostos por Tomasella et al. (2000), que ajustaram os parâmetros da equação com base em diversas localidades brasileiras. Dessa forma, as principais características físico-hídricas dos perfis dos solos utilizados neste estudo são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de profundidade, horizonte e granulometria coletados do projeto Radam Brasil e características físico-hídricas estimadas pelas funções de pedotransferência

Prof. (cm)	Horiz.	Argila (%)	Silte (%)	Condu. Hid (cm/h)	Densidade (g/cm^3)	PMP -----	CC (cm^3/cm^3)	θ_s (SAT) -----	CAD (mm)
<u>Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)</u>									
20	A	5,4	3,8	21,00	1,45	0,071	0,119	0,431	10
45	AC	6,6	4,1	21,00	1,50	0,074	0,126	0,413	13
70	C1	7,6	4,4	6,11	1,56	0,075	0,132	0,390	14
90	C2	7,6	4,4	6,11	1,56	0,075	0,132	0,390	11
<u>Latossolo Vermelho-Escuro distrófico (LVEd)</u>									
10	Ap	14,2	14,6	2,59	1,46	0,126	0,208	0,451	8
25	A3	14	10,4	2,59	1,50	0,115	0,189	0,430	11
55	B1	17,4	11,2	2,59	1,52	0,129	0,207	0,422	23
90	B21	20,8	11,2	0,43	1,57	0,140	0,220	0,402	28
<u>Latossolo Roxo distrófico (LRd)</u>									
15	Ap	50,9	30,3	0,06	1,23	0,277	0,391	0,554	17
30	A3	54,3	34,5	0,06	1,26	0,282	0,406	0,548	19
50	B1	54,2	32,8	0,06	1,28	0,281	0,398	0,535	23
90	B21	53,8	36,5	0,06	1,30	0,278	0,405	0,531	51
120	B22	51,1	40,9	0,09	1,34	0,267	0,409	0,517	43

PMP: ponto de murcha permanente (-1500 kPa); CC: capacidade de campo (-10 kPa); θ_s : saturação do solo.

No cadastramento do solo é preciso inserir as coordenadas geográficas de cada perfil, além de selecionar uma cor, potencial de escoamento superficial, drenagem, declividade e fertilidade do solo. Para cada escolha o modelo determina um valor de albedo, no caso da cor; um valor de taxa de drenagem (adimensional 0-1); e através dos dados de declividade e drenagem inseridos, o modelo determina um valor de *Curve Number* (CN), que determina o escoamento superficial de cada perfil (Figura 8).

Figura 8 - Conceito do número da curva (*Curve number* - CN) do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Adaptado de Ritchie (1998)

De modo geral, o balanço hídrico é a contabilização da água do solo, resultante da aplicação do Princípio de Conservação de Massa num volume de solo vegetado. Dessa maneira, o balanço contabiliza a variação do volume de água no solo, considerando o total de volume infiltrado e o perdido por drenagem profunda ou evapotranspiração (PEREIRA et al., 2002). A eq. (15) descreve, de modo geral, como é contabilizado o balanço hídrico pelo DSSAT, assumindo que os volumes de água originados do orvalho (máximo de $0,5 \text{ mm d}^{-1}$) e da ascensão capilar do lençol freático são desprezíveis (PORTER et al., 2004a):

$$\Delta S = P + I - EP - ES - R - D \quad (15)$$

em que: ΔS é a variação do conteúdo de água no solo; P e I são, respectivamente, a precipitação e a irrigação; EP é a transpiração (absorção pela raiz); ES a evaporação de água do solo; R é o escoamento superficial; e D é a perda de água por drenagem profunda.

O balanço hídrico usado no DSSAT v4.5 é baseado no método de Ritchie (1998), conhecido pelo movimento de água no solo do tipo “cascata” (Figura 4), ou seja, assim que a umidade da camada superior do solo atinge um valor acima da capacidade de campo (CC), o excedente será drenado para a próxima camada, e assim sucessivamente para as demais camadas. A drenagem obedece a uma taxa, que determina o tempo e o volume drenado em cada camada. O valor de albedo atua no fluxo ascendente de água no solo, assim enquanto não ocorre a emergência da planta o valor de albedo do solo é mantido para o cálculo da evaporação do solo. Quando ocorre a emergência da planta, o albedo é modificado em função

do IAF e, posteriormente, usado no método de Priestley & Taylor (1972) para determinar a evaporação de água do solo. Os valores de CN, taxa de drenagem e albedo para cada solo são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de número de curva (CN), drenagem e albedo estimados pelo modelo DSSAT45 para os solos cadastrados

Solos	CN (30 - 100)	Taxa Drenagem (0-1)	Albedo (0-1)
NQd	61	0,95	0,17
LVEd	76	0,75	0,14
LRd	80	0,25	0,13

Outro coeficiente de grande importância que está inserido no arquivo de solo é o fator de enraizamento (SRGF). Este coeficiente determina o crescimento das raízes em cada camada do solo e é calculado pelo DSSAT de acordo com as características físico-hídricas de cada perfil (Tabela 10). O modelo CSM-CANEGRO, por sua vez, utiliza esse fator para distribuir a biomassa particionada para as raízes em cada camada. Dessa forma o crescimento das raízes está diretamente relacionado a este fator, que consequentemente, exerce influência no potencial de absorção de água da planta.

Tabela 10 - Fator de enraizamento (0-1) de acordo com o tipo de solo e camada

Camada	NQd	LVEd	LRd
1	1,00	1,00	1,00
2	0,52	1,00	1,00
3	0,32	0,45	0,47
4	0,32	0,19	0,22
5	-	-	0,08

Como o sistema de plantio é o de cana-planta, o balanço de água no solo considera um valor inicial de densidade de comprimento de raiz (RLV) igual a $0,02 \text{ cm cm}^{-3}$ em todas as camadas (PORTER et al. 2004a). À medida que ocorre o aumento da biomassa, a fração do incremento diário é particionada para as raízes, e distribuída em função do fator de enraizamento (Figura 9). Em solos mais arenosos em que a capacidade de retenção de água é menor, as raízes alcançam maiores profundidades em busca de água. Enquanto que em solos com boa capacidade de retenção de água, as raízes de cana-de-açúcar tendem a se concentrar nas camadas mais superficiais do solo, desde que o solo não apresente restrição nutricional.

Figura 9 - Porcentagem de distribuição da biomassa particionada para as raízes em função da profundidade em cada tipo de solo

3.2 Cultivar

A cultivar de cana-de-açúcar usada foi a RB86-7515 calibrada de modo a aproximar os parâmetros da realidade comercial brasileira, já que os valores predefinidos no DSSAT estão adequados às cultivares sul-africanas. A cultivar usada ocupa cerca de 30% da área plantada de cana-de-açúcar no Brasil e foi calibrada para seis localidades do país, representando condições distintas de solo e clima (MARIN et al., 2013a). A calibração foi feita com medidas em experimento de campo de fenologia, população de colmos, cobertura do dossel e frações de partição de biomassa (Tabela 11).

Tabela 11 - Parâmetros para a cultivar RB86-7515 calibrados para condições brasileiras (adaptado de MARIN et al., 2013a)

(continua)			
Parâmetro	Descrição	Unidades	RB867515
PARCEMAX	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR	g MJ ⁻¹	11,1
APFMX	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuído a massa seca da parte aérea	t t ⁻¹	0,88
STKPFMAX	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura	t t ⁻¹ base massa seca	0,65
LFMAX	Número máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este número.	nº folhas	10

Tabela 11 - Parâmetros para a cultivar RB86-7515 calibrados para condições brasileiras (adaptado de MARIN et al., 2013a)

Parâmetro	Descrição	Unidades	(conclusão)
			RB867515
MXLFAREA	Área da lamina foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o número de folhas MXLFARNO (cm ²)	cm ²	546
MXLFARNO	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA	nº folhas	22
PI1	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas abaixo do Pswitch)	°C dia	89
PI2	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas acima do Pswitch)	°C dia	107
PSWITCH	Número da folha em que há mudança no filocrono	nº	18
TTPLNTEM	Graus-dia para emergência da cana-planta	°C dia	208
TTRATNEM	Graus-dia para emergência da soqueira	°C dia	120
CHUIBASE	Graus-dia para o início do crescimento do colmo	°C dia	448
TT_POPGROWTH	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento	°C dia	628
MAX_POP	População de perfilhos máxima	colmos m ⁻²	12
POPTT16	População de colmos após 1600 graus-dia	colmos m ⁻²	10
LG_AMBASE	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o início do acamamento	t ha ⁻¹	220

Com os novos parâmetros o modelo apresentou resultados satisfatórios na estimativa da produtividade e do índice de área foliar (Tabela 12). Vale ressaltar que os valores nessa comparação, foram de condições experimentais, onde ocorre o mínimo de estresse nutricional, hídrico e biótico na planta. Esta condição é dificilmente encontrada em condições de produção comercial.

Tabela 12 - Índices estatísticos de desempenho do modelo CSM-CANEGRO para simulação da produtividade e do índice de área foliar da cana-de-açúcar, cultivar RB86-7515 (adaptado de MARIN et al., 2013a)

Índice	Produtividade	IAF
	(t ha ⁻¹)	
REMQ	17,8	1,0
r	0,96	0,63
Média Obs.	87,8	3,4
Média Sim.	88,2	2,7

REMQ: raiz do erro quadrático médio; r: coeficiente de correlação.

3.3 Simulações

As simulações no CSM-CANEGRO são feitas no “XBuild” que é um módulo para edição dos arquivos de simulação, inserido na plataforma do DSSAT. Em cada simulação é necessário selecionar no mínimo, a cultivar, as datas de plantio e colheita, e as séries históricas. Nas opções de simulação é possível definir a data de início da simulação, quantos anos serão considerados e quantas replicações podem ser feitas. O modelo apresenta ainda diversas opções envolvendo o cálculo de variáveis climáticas, condições de solo, infiltração, fotossíntese, hidrologia, matéria orgânica no solo, evaporação do solo e distribuição das camadas do solo. Além de dar opções de manejo, como tipo de plantio, irrigação, aplicação de nitrogênio e tipos de colheita (HOOGENBOON et al., 2010).

As únicas diferenciações entre cana-soca e cana-planta que o CSM-CANEGRO considera é o número de graus-dia necessários para a emergência do perfilho primário, e a profundidade da raiz entre os ciclos da cultura (SINGELS et al., 2008). O modelo não considera o fator da compactação do solo que influencia significativamente a produtividade da cana. Portanto, o plantio utilizado nas simulações foi de cana planta, com ciclo anual (12 meses), distribuído em linhas com espaçamento de 1,40 m. As datas de plantio e colheita foram sempre no primeiro dia de cada mês, do ano de 1980 até o final de 2010. As simulações foram replicadas para cada local e para os três cenários de CAD.

Foram definidas cinco estratégias de irrigação de salvamento, variando conforme o número de aplicações consecutivas e datas de plantio da região considerada. Como as áreas de expansão da cana-de-açúcar no Brasil estão concentradas em regiões com climas distintos, portanto foram definidas duas grandes áreas conforme o regime pluviométrico para a aplicação das lâminas (Tabela 13).

Tabela 13 - Esquema dos tratamentos de irrigação indicando o mês e número de lâminas a serem aplicadas, variando de uma (IR01) a cinco (IR05) líquidas de 30 mm, para cada região

Tratamentos	Continental	Zona da Mata nordestina
	Meses de aplicação	
IR01	Mai	Dez
IR02	Mai e Jun	Dez e Jan
IR03	Mai, Jun e Jul	Dez, Jan e Fev
IR04	Mai, Jun, Jul e Ago	Dez, Jan, Fev e Mar
IR05	Mai, Jun, Jul, Ago e Set	Dez, Jan, Fev, Mar e Abr

O sistema mais utilizado para irrigação complementar (salvamento) da cana-de-açúcar é aquele por aspersão, em que a água é geralmente aplicada por sistemas de autopropelido, linear móvel e pivô central (REZENDE e ANDRADE, 2008). Considerando-se uma lâmina de irrigação complementar comum para cana-de-açúcar igual a 30 mm (CINTRA, 2008), e que o sistema de irrigação possui uma eficiência média de 75%, a lâmina bruta aplicada nas simulações foi de 40 mm.

As simulações para as diferentes condições do estudo foram concebidas em três partes, a primeira, em nível potencial onde a opção de balanço de água no solo foi desabilitada e assim o modelo gerou os valores de produtividade sem restrição hídrica; a segunda, foram as simulações com o balanço de água habilitado para contabilização da produtividade de sequeiro; e a terceira, foram as simulações com as aplicações das lâminas de irrigação para avaliar o incremento na produtividade pela irrigação complementar.

3.4 Análise de dados

3.4.1 Caracterização climática

Foram feitas análises climatológicas com objetivo de caracterizar o clima de cada região. Inicialmente foi utilizado o sistema de classificação climatológico de Köppen, baseado na premissa de que plantas nativas e vegetação são o melhor indicador do clima de uma região e assim foram delimitadas cinco macro-zonas climáticas de acordo com o tipo de vegetação: floresta; vegetação de desertos quentes; florestas temperadas decíduais; floresta boreal; e tundra. Dessa forma, as regiões analisadas foram enquadradas de acordo com a sua localização geográfica na classificação de Köppen (WMO, 2013).

Além disso, os dados climatológicos foram organizados e foi gerada a estatística descritiva para cada localidade. Com os dados médios de temperatura e precipitação da série de 1980 a 2010, foi calculado o balanço hídrico normal para cada localidade seguindo a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955) em que a evapotranspiração de referencia (ET_o) foi calculada pelo método de Thornhwaite (1948). O método foi aplicado considerando o valor padrão de capacidade armazenamento de água (CAD) igual a 100 mm (PEREIRA et al., 2002). O mesmo método foi aplicado de modo sequencial para definição dos valores médios de déficit e do excedente hídrico para cada localidade empregada nesse estudo.

3.4.2 Avaliação do modelo CSM-CANEGRO

Para avaliar a simulação do desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar, foram selecionadas seis localidades do estudo em condições agroclimáticas distintas, sendo elas: Santa Maria, RS; Piracicaba, SP; Formosa, GO; Petrolina, PE; João Pessoa, PB; e Marabá, PA. As simulações levaram em conta duas datas de plantio, sendo uma para a Zona da Mata Nordestina, em 01/Março, e outra para as demais regiões, em 01/Novembro. O solo para cada local foi estabelecido de acordo com a sua predominância na região, dessa forma, utilizou-se o perfil de boa capacidade de retenção de água (LRd) para as regiões de Piracicaba e Santa Maria, o de capacidade intermediária (LVEd) para Formosa, e o de baixa capacidade de retenção (NQd) para Petrolina, João Pessoa e Marabá. O tipo de plantio foi de cana-planta de 12 meses com espaçamento entre linhas de 1,40 m e as simulações foram feitas para o sistema de sequeiro considerando os 30 anos de cada série (1980 a 2010).

Em cada simulação foi observado o desenvolvimento de diferentes componentes da planta durante o ciclo e a sua variação temporal. As variáveis de saída do CSM-CANEGRO em cada simulação (Tabela 14) foram agrupadas para geração dos valores médios durante o ciclo, com exceção da produtividade final de colmos (STKW, $t\ ha^{-1}$), que foi analisada de acordo com a sua distribuição interanual.

Tabela 14 - Variáveis de saída do modelo CSM-CANEGRO utilizadas para sua avaliação em diferentes condições agroclimáticas do Brasil

Variável	Unidade	Descrição
TAD	n° colmo m^{-2}	Densidade de perfilhos
RTLD	$cm\ cm^{-2}$	Densidade total de raízes
IAF	-	Índice de área foliar
T#SD	n°	n° de folhas emergidas por colmo
WSPD	0-1	Fator de estresse hídrico para a fotossíntese
WSGD	0-1	Fator de estresse hídrico para o crescimento
WSTD	0-1	Fator de estresse hídrico para o perfilhamento
STKW	$t\ ha^{-1}$	Matéria fresca de colmos
P	$mm\ decendio^{-1}$	Precipitação
ET	$mm\ dia^{-1}$	Evapotranspiração real
EO	$mm\ dia^{-1}$	Evapotranspiração potencial
SWXD	mm	Volume total de água extraível do solo

O desempenho do modelo em estimar a produtividade comercial da cana-de-açúcar foi testado, considerando-se dados de produtividade de usinas da região sudeste e nordeste do Brasil. Para região sudeste foram usados dados de uma usina localizada em Piracicaba, SP (Lat: 22°35'S; Long: 47°35'O; Alt: 610 m). Os dados meteorológicos utilizados para essas simulações foram os da estação meteorológica automática da ESALQ/USP. Os solos da referida usina são uma combinação de Argissolos e Cambissolos, empregando-se um perfil pré-cadastrado no DSSAT para o município de Piracicaba, cuja CAD é igual a 124 mm.

Na região nordeste, os valores de produtividade da cana-planta utilizados (10 ciclos) foram obtidos junto à Usina Japungu, localizada no município de Capim, PB (Lat: 6°57'S; Long: 35°08'O; Alt: 59 m). Os dados meteorológicos do local foram obtidos da estação meteorológica automática do INPE em Capim, no período de 2006 a 2011, enquanto que o valor da CAD foi informado pela usina, sendo igual a 23 mm. Dessa forma as simulações foram feitas utilizando um perfil de solo de textura arenosa, que apresentou CAD igual ao valor informado, e os dados da estação meteorológica de Capim, PB.

Vale ressaltar que as produtividades consideradas nessa avaliação foram apenas as relativas às safras de cana-planta sem sistema de irrigação (sequeiro). As mesmas datas de plantio e colheita das safras foram adotadas nas simulações e com os valores finais de produtividade gerados pelo modelo foram calculados os índices estatísticos de desempenho do modelo CSM-CANEGRO.

Para a avaliação das estimativas empregou-se o erro médio (EM), o qual é a média de todos os erros de predição em relação aos dados observados (eq. (16)), sendo que valores positivos indicam que em média o modelo está subestimando o valor observado e quando negativos representam que na média ele superestima o valor observado:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (16)$$

em que: EM é o erro médio, N é o número de observações, e Y_i e $\hat{Y}_i$ são, respectivamente, o valor observado e o valor estimado pelo modelo.

A raiz do erro médio quadrático (REMQU) é um índice que representa o desvio médio dos dados simulados em relação aos observados. Dessa forma, quanto menor for o seu valor, melhor será o desempenho do modelo:

$$REM Q = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i)^2 \right]} \quad (17)$$

em que: N é o número de observações, e D_i é a diferença entre o valor observado e estimado.

O coeficiente de determinação (r^2) representa a precisão dos valores estimados (eq. (18)). Em termos práticos ele é a raiz quadrada do índice de correlação (r) e quanto mais próximo de 1, maior a precisão do modelo.

$$r^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [(Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2}} \right\}^2 \quad (18)$$

em que: r^2 é o índice de determinação, Y_i e $\hat{Y}_i$ são os valores observados e os estimados pelo modelo, $\bar{Y}$ e $\bar{\hat{Y}}$ são as médias, respectivamente, dos valores observados e estimados.

Apenas o índice de determinação não é suficiente para avaliar o desempenho de um modelo em estimar a variável de interesse. Desse modo, Willmott (1981) propôs um índice de concordância (d) que representa a acurácia do modelo (eq. (19)), sendo que o valor 1 indica elevada acurácia das estimativas do modelo. Dessa forma é possível avaliar o desempenho do modelo utilizando os índices estatísticos de precisão (r^2) e acurácia (d), em que o produto entre a raiz do índice de determinação (r^2) e o índice de acurácia (d) resultam no índice de confiabilidade (c), cujos critérios de interpretação foram propostos por Camargo e Sentelhas (1997).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right] \quad (19)$$

em que: Y_i e $\hat{Y}_i$ são os valores observados e os estimados pelo modelo, e $\bar{Y}$ é a média dos valores observados.

3.4.3 Definição do risco climático para a cultura da cana-de-açúcar em função das produtividades potencial e atingível.

Inicialmente os valores de produtividade potencial e atingível foram organizados por tipo de solo e data de plantio. A partir dos valores simulados de produtividade ($t\ ha^{-1}$) de sequeiro, foram feitas comparações entre as produtividades de cada local para cada tipo de solo e clima, além de verificar a relação da produtividade com o volume de água precipitado durante os ciclos da cana.

O risco foi classificado de acordo com a relação probabilística entre as produtividades de atingível ou de sequeiro (PA) e potenciais (PP), gerando um coeficiente de eficiência climática (η) para cada combinação de local, tipo de solo e data de plantio (MONTEIRO, 2012), como apresentado na eq. (20):

$$\eta = \frac{PA}{PP} \quad (20)$$

em que: η é a eficiência climática, PA é a produtividade atingível ($t\ ha^{-1}$), e PP é a produtividade potencial ($t\ ha^{-1}$).

O critério de classificação dos riscos climáticos foi semelhante ao utilizado no zoneamento de risco climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2013), em que foram considerados dois cenários de risco de acordo com o nível de eficiência climática (η), sendo eles: a) otimista, quando os valores de eficiência climática superam o limiar de 0,65; e b) conservador, quando os valores de eficiência climática superam o limiar de 0,45. Dessa forma foram estipuladas classes de risco de acordo com a probabilidade de ocorrência da eficiência climática (η) para os dois cenários (Tabela 15). Dessa forma, as condições de risco climático foram determinadas e organizadas de acordo os valores de probabilidade para cada local, tipo de solo e data de plantio.

Tabela 15 - Classes de risco climático em função das probabilidades de ocorrência de valores de eficiência climática (η) maiores que 0,65 (cenário otimista) ou 0,45 (cenário conservador)

Probabilidade (%)	Classe
> 80	Baixo Risco
80 - 60	Moderado
60 - 40	Alto
< 40	Muito Alto

3.4.4 Determinação dos benefícios da irrigação complementar na produtividade da cana-de-açúcar.

A definição dos benefícios da irrigação complementar na produtividade da cana-de-açúcar foi diretamente relacionada ao incremento na produtividade de colmos ($t\ ha^{-1}$) em relação ao número de aplicações das lâminas de irrigação. Os valores de incremento na produtividade de cana-planta para cada simulação foram organizados de acordo com as condições de solo, local e data de plantio, e para diferentes números de aplicações de água. Com isso, buscou-se avaliar as condições agroclimáticas que mais se beneficiam, em termos de produtividade ($t\ ha^{-1}$), com a implantação da irrigação complementar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização agroclimática das regiões produtoras e de expansão da cana-de-açúcar no Brasil

Em função da faixa de latitude em que se encontra e do relevo com altitudes pouco pronunciadas, o território brasileiro apresenta macroclimas do tipo A, B e C, seguindo a classificação climática de Köppen (Figura 10). A estação de Petrolina (PEPE) é a única inserida em clima do tipo B (BSH e BWh), que são considerados como semi-árido quente, com temperatura média anual acima de 18°C e representam o sertão nordestino com a maior parte do ano seco. A maioria das estações está inserida em clima megatérmico, do tipo A (Af, Am, Aw), considerado como tropical úmido, este clima possui temperatura média do mês mais frio acima de 18°C e representa as regiões amazônicas, centro-oeste (Cerrado) e grande parte da região litorânea (Mata Atlântica), nas quais a estação seca é bastante variável. As demais estações se encontram em clima mesotérmico, que ocorrem em grande parte do sudeste e do sul do Brasil, sendo este clima caracterizado pela sazonalidade térmica sendo que em alguns casos ocorre período de estiagem no inverno (Cwa e Cwb). O clima característico da região sul é subtropical e marcado pela ausência de período seco (Cfa e Cfb).

Figura 10 - Locais do estudo de acordo com a classificação climática de Köppen (WMO, 2013)

A grande maioria das áreas de expansão para a cana-de-açúcar encontram-se em clima megatérmico típico de cerrado (Aw). Este tipo de clima se mostra favorável à produção de cana-de-açúcar por apresentar chuvas máximas de verão e período de estiagem, que é um dos fatores climáticos que induzem à maturação dos colmos. A atual região produtora de cana-de-açúcar encontra-se em clima subtropical de altitude (Cwa e Cwb), que apresenta período de estiagem e temperaturas baixas no inverno, que contribuem para a maturação dos colmos, além de chuvas acompanhadas de boa disponibilidade de radiação solar no verão, que ajudam no crescimento da planta (Tabela 16). Outro tipo de clima é o que ocorre na região da Zona da Mata nordestina, o qual é classificado como clima tropical de altitude do tipo Csa, que apresenta estiagem de verão. Neste caso, as datas de plantio para a cultura são praticamente opostas às praticadas no centro-sul do país, já que o regime de chuvas dessa região nordestina se concentra nos meses de inverno. Esse fator eleva a competitividade econômica do Brasil no âmbito internacional, já que a cana-de-açúcar pode ser colhida ao longo de todo o ano no país (SCARPARI, 2007; PINTO et al., 2008).

Tabela 16 - Descrição dos macroclimas do Brasil pela classificação climática de Köppen (PEREIRA et al., 2002)

Sigla	Classificação
Af	Com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e ausência de estação seca, como na Amazônia ocidental e parte do litoral sudeste;
Am	com pequena estação seca, sob influencia de monções; ocorrem em boa parte da Amazônia oriental;
Aw	denominado clima de savanas, com inverno seco e chuvas máximas de verão, presente nas regiões norte, centro-oeste e parte do sudeste;
BSh	clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude, clima semi-árido do sertão nordestino;
BWh	clima das regiões desérticas quentes de baixa latitude e altitude, clima semi-árido do interior do sertão nordestino;
Cfa	subtropical, sem estação seca e temperatura do mês mais quente maior que 22°C;
Cfb	subtropical, sem estação seca e temperatura do mês mais quente inferior a 22°C;
Cwa	tropical de altitude, com inverno seco e temperatura do mês mais quente maior que 22°C e;
Cwb	tropical de altitude, com inverno seco e temperatura do mês mais quente inferior a 22°C;

As regiões inseridas nos macroclimas subtropical (Cfa e Cfb) possuem boa distribuição de chuvas durante o ano, sem apresentar período de estiagem, fator que prejudica normalmente o processo de maturação dos colmos. No entanto, as baixas temperaturas dessas áreas atuam como inibidoras do crescimento, favorecendo, assim, o processo de maturação. Outro fator que deve ser considerado na produção de cana-de-açúcar nessas regiões é o alto risco de geadas, o que pode comprometer parcial ou totalmente uma lavoura de cana, dependendo do tempo de exposição e da fase fenológica da cultura em que ela ocorre (MARIN et al., 2009).

Todas as localidades avaliadas apresentam variação sazonal das variáveis meteorológicas. Para a precipitação anual, observou-se variação entre as localidades analisadas de 485 a 2.267 mm (Tabela 17). O regime pluviométrico na região litorânea do nordeste apresentou maiores valores de precipitação entre os meses de maio e agosto, enquanto que nas demais regiões, os maiores índices pluviométricos ocorreram entre novembro e fevereiro. A estação de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, foi a única que não apresentou variação pluviométrica sazonal.

Os menores índices pluviométricos foram observados em Petrolina (PEPE), Mocambinho (MGMO) e Florianópolis (PIFL), onde a precipitação anual não chegou a 1.000 mm anuais, sendo que em Petrolina a média anual foi de 485 mm (Tabela 17). Em contrapartida, o valor anual médio de precipitação em Recife (PERE) foi de 2.267 mm. Esses valores ilustram a grande influência do relevo no clima nordestino, sendo que no litoral ocorrem altos índices pluviométricos, enquanto que na região continental há escassez de chuvas. Nas demais regiões do país, as precipitações anuais oscilaram entre 1.000 e 2.000 mm, sendo que na região sudeste, maior produtora de cana-de-açúcar, essas não ultrapassaram os 1.500 mm.

Tabela 17 - Precipitação média total, mensal e anual das estações INMET corrigidas no período de 1978 a 2010
(continua)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
ALMA	73,7	99,2	135,2	224,7	299,9	340,6	273,0	197,9	132,2	61,9	44,9	40,4	1.924
BABA	189,1	147,8	145,4	73,9	23,3	3,6	0,9	1,7	11,8	65,1	179,1	196,4	1.038
GOPI	289,4	248,4	226,4	153,2	27,7	9,0	5,7	13,8	54,1	147,9	245,8	310,0	1.731
GOFO	239,2	210,3	210,6	96,7	23,2	4,3	3,5	11,1	35,1	124,4	219,0	279,6	1.457
GOJA	266,7	241,6	267,1	109,2	48,9	18,4	7,8	24,1	63,5	131,1	196,7	282,2	1.657
MABA	201,1	185,5	208,1	137,0	47,6	5,7	2,1	4,2	32,9	90,8	145,8	202,5	1.263
MGCA	299,8	241,8	190,5	85,5	39,8	15,2	5,6	15,3	46,9	121,0	175,4	256,2	1.493
MGUB	329,9	246,4	226,4	115,2	51,7	16,1	13,1	16,4	56,0	135,1	186,0	310,7	1.703
MGMO	175,2	110,3	110,1	58,9	8,3	2,2	0,6	1,2	7,9	55,2	143,4	182,5	856
MGPO	259,7	169,8	180,9	60,3	28,7	10,5	7,7	12,7	32,2	68,1	201,9	273,6	1.306

Tabela 17 - Precipitação média total, mensal e anual das estações INMET corrigidas no período de 1978 a 2010 (conclusão)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
MGJO	269,5	166,6	199,5	69,6	26,5	5,2	6,0	10,2	25,3	84,3	232,1	274,0	1.369
MSIV	202,8	162,9	115,6	109,6	108,6	69,3	51,4	60,2	141,5	157,8	162,3	182,3	1.524
MTDI	299,1	302,4	273,5	131,2	52,3	12,2	9,8	24,0	81,3	173,5	223,8	274,5	1.858
PAMA	272,2	305,5	364,6	252,5	114,2	27,9	15,1	15,8	49,3	96,1	143,8	234,6	1.892
PBJO	70,5	104,9	198,7	272,8	285,3	336,5	288,4	157,6	73,3	32,9	31,8	33,6	1.886
PEPE	94,0	88,5	111,6	48,1	15,5	5,2	4,1	1,2	2,5	9,7	54,6	50,3	485
PERE	102,0	142,8	215,5	285,8	307,4	391,2	348,1	211,3	110,4	56,8	42,3	53,6	2.267
PIBO	186,8	166,4	168,0	109,7	26,9	2,2	0,5	1,3	17,1	77,5	121,6	158,8	1.037
PIFL	165,3	163,9	174,7	138,3	59,4	10,1	1,1	1,1	7,9	56,4	74,4	122,3	975
PRMA	205,5	195,3	136,7	121,4	128,7	96,6	64,4	55,3	137,6	161,3	159,6	187,9	1.650
RNNA	67,8	94,3	210,3	288,5	236,8	336,9	236,8	140,0	48,4	22,1	26,5	27,3	1.736
RSSA	149,9	117,6	117,3	143,1	143,4	174,2	155,7	108,8	143,1	158,2	124,8	140,6	1.677
SEAR	48,0	83,7	92,3	182,5	234,8	198,0	162,1	102,9	62,1	54,7	48,1	27,7	1.297
SPPI	237,2	176,3	158,4	74,3	74,4	41,9	34,3	31,3	65,4	112,1	139,7	185,9	1.331
SPPR	218,9	176,8	135,8	77,2	84,9	47,8	44,7	42,1	91,2	119,6	126,9	169,3	1.335
SPCA	266,1	204,6	152,0	69,3	65,2	25,0	23,7	24,3	52,2	100,1	115,5	217,4	1.315
SPVO	287,1	190,7	151,0	89,7	59,8	21,7	19,6	18,7	59,3	112,8	138,0	209,8	1.358
TOPE	286,1	222,5	241,4	128,0	25,8	4,7	1,9	2,9	34,1	108,1	188,2	277,4	1.521
TOAR	250,5	270,8	288,1	234,7	98,4	16,7	11,1	13,0	57,4	144,3	189,4	236,6	1.811
TOPA	296,5	267,6	241,5	139,4	46,0	4,7	4,0	5,1	44,2	137,1	212,2	270,5	1.669

As temperaturas médias anuais oscilaram entre 19,9 e 28,5 °C nos locais em estudo (Tabela 18). A sazonalidade foi maior nas estações da região sudeste e sul, com valores de temperatura do ar mais baixos entre os meses de maio e agosto, e maiores entre novembro e fevereiro. Nas demais regiões, principalmente nas regiões situadas ao norte e nordeste, as temperaturas médias do ar não sofreram grande variação sazonal. Essa variação sazonal se deve principalmente à influência direta do fotoperíodo e da irradiância solar, influenciadas pela latitude, ou seja, quanto maior a latitude maior a variação sazonal do fotoperíodo, da irradiância solar e, consequentemente, na temperatura do ar.

Florianópolis (PIFL) foi a localidade que apresentou a maior temperatura média anual, chegando a 28,5 °C. Todas as demais localidades localizadas na região norte e nordeste apresentaram valores de temperatura média anual acima de 25 °C, enquanto que as demais localidades estudadas tiveram suas temperaturas médias anuais oscilando entre 22 e 25 °C, com exceção para Santa Maria, RS (RSSA), onde a temperatura média anual é de 19,9 °C, a menor dentre as localidades analisadas.

Tabela 18 - Temperatura média mensal e anual das estações INMET corrigidas no período de 1978 a 2010

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
ALMA	26,2	26,5	26,6	26,1	25,4	24,2	23,6	23,6	24,1	25,1	25,7	26,1	25,3
BABA	26,1	26,0	25,9	25,9	25,2	23,7	23,6	24,7	27,1	28,1	27,0	26,2	25,8
GOPI	24,2	24,5	24,4	24,2	23,0	21,9	22,1	23,8	25,4	25,4	24,5	24,1	24,0
GOFO	23,3	23,6	23,4	23,1	22,0	20,5	20,5	22,0	23,9	24,6	23,4	23,2	22,8
GOJA	25,2	25,2	25,0	24,2	21,6	20,3	20,2	22,3	24,4	25,4	25,2	25,1	23,7
MABA	26,4	26,5	26,7	27,0	27,0	26,6	26,3	27,4	28,6	28,2	27,2	26,4	27,0
MGCA	25,4	25,8	25,8	25,0	22,8	22,0	22,1	23,9	25,7	26,5	25,9	25,6	24,7
MGUB	24,6	24,7	24,6	23,5	20,9	20,1	20,2	21,8	23,6	24,7	24,4	24,5	23,1
MGMO	26,4	26,7	26,3	25,8	24,6	23,0	22,7	23,6	25,7	27,3	26,5	26,3	25,4
MGPO	24,9	25,1	24,7	23,5	21,2	19,7	19,9	21,5	23,4	24,9	24,6	24,6	23,2
MGJO	24,7	25,1	24,9	24,3	22,8	21,5	21,4	22,9	24,5	25,5	24,5	24,1	23,9
MSIV	26,6	26,8	26,2	24,4	20,9	20,3	20,7	21,5	22,3	25,2	25,4	26,6	23,9
MTDI	27,0	27,2	27,2	26,9	25,5	24,6	24,5	26,3	27,4	27,8	27,5	27,2	26,6
PAMA	27,1	27,1	27,3	27,8	28,1	27,9	28,0	28,5	28,7	28,4	27,9	27,3	27,8
PBJO	27,7	27,7	27,6	27,1	26,5	25,6	25,0	25,1	25,9	26,9	27,5	27,7	26,7
PEPE	28,0	27,9	27,8	27,4	26,6	25,2	24,7	25,2	26,8	28,2	28,5	28,6	27,1
PERE	26,8	26,9	26,8	26,4	25,8	25,0	24,4	24,4	24,9	25,8	26,3	26,6	25,8
PIBO	26,3	26,3	26,1	26,3	26,4	26,3	26,4	27,5	28,7	28,5	27,4	26,7	26,9
PIFL	27,4	27,1	27,3	27,5	27,7	27,7	28,3	29,5	30,8	30,7	29,5	28,2	28,5
PRMA	25,4	25,3	25,1	23,4	20,1	19,1	18,8	20,9	21,5	23,6	24,4	25,0	22,7
RNNA	27,3	27,5	27,3	26,7	26,2	25,1	24,5	24,7	25,5	26,5	27,0	27,3	26,3
RSSA	25,2	24,5	23,6	20,2	16,6	14,9	14,2	15,8	17,3	20,2	21,7	24,6	19,9
SEAR	27,0	27,1	27,2	26,8	26,1	25,1	24,6	24,6	25,3	26,0	26,5	26,8	26,1
SPPI	24,8	25,1	24,5	22,6	19,5	18,0	18,0	19,5	21,0	23,0	23,9	24,4	22,0
SPPR	26,3	26,3	26,0	24,6	21,4	20,4	20,5	22,2	22,9	24,9	25,2	26,0	23,9
SPCA	25,5	25,7	25,5	24,2	21,6	20,6	20,8	22,6	23,6	25,0	25,3	25,4	23,8
SPVO	25,9	26,2	26,0	24,9	22,3	21,5	21,6	23,4	24,4	26,1	26,0	26,1	24,5
TOPE	26,9	27,0	27,1	27,3	26,9	25,6	25,6	27,0	28,7	28,5	27,5	26,8	27,1
TOAR	26,2	26,3	26,3	26,4	26,4	25,5	25,3	26,1	26,9	26,6	26,4	26,2	26,2
TOPA	26,6	26,6	26,8	27,0	26,7	25,8	26,1	27,1	28,6	28,1	27,3	26,7	26,9

Por ser indiretamente influenciada pelo fotoperíodo e pela irradiância solar e por esses serem dependentes da latitude e da época do ano, é possível se observar a clara relação entre os valores de temperatura média do ar e a latitude das localidades analisadas (Figura 11), o que demonstra a variabilidade das condições de temperatura empregadas no presente estudo.

Figura 11 - Relação entre os valores médios anuais de temperatura máxima (□), média (Δ) e mínima (○) do ar e a latitude das localidades analisadas

A radiação solar é a maior fonte de energia para Terra, sendo também o principal elemento meteorológico, pois é ela que desencadeia todo o processo meteorológico afetando todos os outros elementos (PEREIRA et al., 2002). Os valores médios anuais de irradiância solar global das localidades analisadas no presente estudo variaram entre 16,9 e 23,0 MJ m⁻² dia⁻¹ (Tabela 19). A quantidade de radiação incidente está diretamente relacionada ao fotoperíodo, dessa forma observados valores médios de radiação solar global acima de 20,0 MJ m⁻² dia⁻¹ na maioria das localidades do nordeste e norte, sendo Natal, RN (RNNA) o local com maior irradiância solar, atingindo 23,0 MJ m⁻² dia⁻¹. Nas localidades analisadas nas regiões do Sudeste e Centro-oeste os valores de irradiância solar global ficaram abaixo dos 20,0 MJ m⁻² dia⁻¹. Já em Santa Maria, RS (RSSA) observou-se o menor valor dessa variável, da ordem de 16,9 MJ m⁻² dia⁻¹.

Tabela 19 - Radiação solar global média mensal e anual das estações INMET corrigidas no período de 1978 a 2010

Local	(continua)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
ALMA	24,2	23,4	21,8	20,1	17,9	15,7	16,0	18,4	20,0	23,0	24,5	24,8	20,8
BABA	21,0	20,3	20,2	19,2	18,3	17,5	18,0	20,1	21,3	21,7	20,0	20,0	19,8
GOPI	19,2	19,8	18,9	19,2	18,3	17,8	18,7	20,6	20,1	21,0	19,3	18,3	19,3
GOFO	20,1	21,0	19,6	19,4	18,4	18,0	18,8	21,2	21,5	21,2	19,4	18,4	19,8
GOJA	19,4	19,4	18,6	18,7	16,9	16,1	17,1	18,9	18,7	20,3	20,5	19,5	18,7
MABA	18,7	18,9	19,3	19,4	20,1	20,9	22,0	23,8	23,6	21,0	19,2	17,9	20,4
MGCA	21,2	22,0	20,5	20,1	18,2	17,4	18,2	20,0	20,3	22,3	22,0	21,5	20,3
MGUB	20,9	21,6	20,5	19,6	17,6	16,4	17,4	19,6	20,4	22,2	21,9	20,9	19,9
MGMO	23,6	24,2	22,5	21,5	19,3	18,6	19,5	22,1	23,3	23,9	21,5	21,8	21,8

Tabela 19 - Radiação solar global média mensal e anual das estações INMET corrigidas no período de 1978 a 2010

Local													(conclusão)
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
MGPO	20,6	21,6	19,7	18,8	16,1	14,7	15,7	17,8	19,2	21,0	20,0	20,1	18,8
MGJO	22,5	23,4	21,4	20,5	18,6	17,7	18,4	20,7	22,7	22,7	21,8	21,3	21,0
MSIV	22,8	22,1	21,0	18,2	14,8	13,4	14,6	16,5	17,4	20,6	23,2	23,5	19,0
MTDI	16,5	17,3	16,7	16,4	15,8	16,4	18,5	21,1	20,9	20,0	18,8	16,1	17,9
PAMA	18,6	18,6	18,5	18,9	19,4	20,5	21,0	21,8	20,1	18,6	17,6	17,1	19,2
PBJO	20,7	20,9	19,8	18,0	16,4	15,2	15,5	17,9	19,9	21,6	21,7	21,5	19,1
PEPE	23,9	24,1	23,1	21,7	19,4	18,3	19,3	22,2	24,7	26,0	25,6	24,9	22,8
PERE	21,0	20,8	20,0	18,0	15,8	14,3	15,1	17,0	19,5	21,3	21,9	21,4	18,9
PIBO	20,3	20,2	19,4	20,3	20,7	20,9	21,9	24,0	24,5	23,1	21,7	20,0	21,4
PIFL	17,4	17,0	17,4	17,9	17,8	18,4	19,5	21,6	22,8	21,7	20,0	18,2	19,1
PRMA	22,6	22,0	20,4	17,5	14,0	13,1	14,3	16,4	18,3	21,2	24,0	23,1	18,9
RNNA	24,6	24,5	23,4	21,1	19,9	18,0	19,3	22,0	24,9	26,5	26,3	25,9	23,0
RSSA	24,2	21,6	18,5	14,5	11,0	8,7	9,7	12,2	15,7	19,0	22,8	24,4	16,9
SEAR	25,9	25,0	23,6	21,1	17,8	16,0	16,8	19,1	22,7	25,3	26,1	26,1	22,1
SPPI	19,7	19,9	18,9	18,1	14,7	13,6	14,6	17,4	18,4	20,0	21,4	20,4	18,1
SPPR	21,9	21,3	20,5	18,6	14,9	13,8	15,1	17,4	18,6	21,6	23,3	22,1	19,1
SPCA	20,2	21,2	20,4	18,6	15,7	15,0	15,9	18,4	18,7	21,1	22,6	20,8	19,0
SPVO	21,2	22,0	20,9	19,5	16,2	15,0	16,4	18,7	19,4	21,7	22,7	22,2	19,7
TOPE	19,9	19,7	19,2	20,0	20,0	20,1	21,1	22,8	21,3	21,2	20,1	19,2	20,4
TOAR	18,0	17,6	16,3	17,0	18,8	20,3	21,6	22,9	20,4	18,1	17,8	16,9	18,8
TOPA	19,2	19,7	19,0	19,7	19,9	20,5	21,6	23,1	22,1	21,1	20,2	19,2	20,5

A variação sazonal e espacial da radiação solar global é influenciada, em grande parte, pelo fotoperíodo e, conseqüentemente, pela época do ano e a latitude (Figura 12). Entretanto, as condições atmosféricas também exercem grande influência na radiação solar global incidente na superfície. Algumas localidades da região Sudeste e Centro-oeste apresentaram radiação solar global acima dos $20,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, o que se deve, principalmente, à menor nebulosidade dessas regiões, durante o inverno, que corresponde à estação seca. No caso de Mocambinho (MGMO), a ausência de nebulosidade, indicada pelo baixo índice pluviométrico (855 mm ano^{-1}), atenuou menos a radiação extraterrestre (Q_0), resultando em um valor médio de radiação solar global elevado, da ordem de $21,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Por outro lado, em Recife, PE (PERE), a nebulosidade foi um dos principais fatores de atenuação da Q_0 , fazendo com que a irradiância solar global média anual seja da ordem de $18,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Figura 12 - Distribuição dos valores médios anuais de radiação solar global em função da latitude

A disponibilidade hídrica no solo limita o crescimento da cultura e somente os valores de precipitação não são suficientes para determinar a melhor estratégia de manejo de irrigação. Portanto, os valores de balanço hídrico normal para cada localidade são apresentados na Tabela 20. Os valores de déficit hídrico normal anual (valores negativos apenas para fins de distinção do excedente na tabela) variaram entre 0 e 1.297 mm, assim como o excedente normal, que variou de 0 a 959 mm entre as localidades. A variação sazonal da disponibilidade hídrica variou conforme a distribuição sazonal das chuvas e da evapotranspiração de referência de cada região. Na Zona da Mata nordestina o déficit hídrico normal ocorreu entre os meses de novembro e fevereiro, enquanto que nas demais regiões os déficits foram mais acentuados entre os meses de maio e setembro.

As estações com os menores índices pluviométricos, Petrolina (PEPE) e Floriano (PIFL), apresentaram déficits hídricos normais anuais acima de 1.000 mm, sendo que Petrolina foi o único local que apresentou déficit hídrico em todos os meses do ano. Em Floriano (PIFL) e Mocambinho (MGMO), não ocorreu excedente hídrico em nenhum mês. Os baixos índices pluviométricos associados à elevada evapotranspiração de referência, resultado das altas temperaturas, contribui para o cenário de escassez hídrica nesses locais. Em contrapartida, em Santa Maria (RSSA) não houve déficit hídrico em nenhum mês, enquanto que o excedente hídrico anual foi de 711 mm. Recife (PERE) foi o local que apresentou o maior excedente hídrico normal anual, com 959 mm.

Tabela 20 - Deficiências e excedentes hídricos determinados pelo balanço hídrico climatológico normal para as localidades estudadas, considerando-se uma capacidade de água disponível do solo (CAD) de 100 mm. Os valores negativos representam o déficit hídrico e os positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
ALMA	-58	-30	-10	0	181	244	182	106	35	-13	-50	-83	-245 / 749
BABA	37	24	13	-11	-55	-70	-80	-100	-130	-108	0	0	-554 / 74
GOPI	177	141	113	50	-15	-38	-56	-74	-61	0	57	195	-244 / 733
GOFO	135	112	107	3	-14	-35	-47	-61	-62	0	28	173	-219 / 559
GOJA	138	125	144	6	-3	-14	-30	-42	-34	0	0	140	-123 / 552
MABA	29	57	66	0	-38	-98	-118	-146	-145	-86	-4	0	-635 / 152
MGCA	169	117	57	-3	-16	-33	-52	-71	-69	-22	0	64	-268 / 407
MGUB	209	134	108	18	-1	-13	-26	-44	-34	0	0	187	-118 / 655
MGMO	0	-10	-16	-45	-83	-72	-74	-88	-111	-101	0	0	-599 / 0
MGPO	135	52	60	-6	-18	-28	-38	-52	-57	-51	0	135	-251 / 382
MGJO	149	51	79	-5	-28	-44	-53	-70	-78	-43	19	158	-321 / 455
MSIV	50	20	-3	0	23	14	0	-1	47	34	33	25	-5 / 246
MTDI	146	158	118	0	-20	-55	-74	-98	-66	0	0	81	-312 / 503
PAMA	104	170	210	94	-13	-89	-138	-161	-131	-84	-20	0	-635 / 578
PBJO	-92	-47	0	63	150	224	181	48	-10	-72	-111	-130	-461 / 666
PEPE	-79	-68	-57	-102	-119	-100	-94	-108	-134	-168	-127	-141	-1.297 / 0
PERE	-41	0	0	131	182	285	248	111	2	-20	-63	-82	-205 / 959
PIBO	0	6	37	-2	-51	-102	-123	-149	-162	-107	-34	0	-730 / 43
PIFL	0	0	0	-4	-61	-123	-164	-205	-239	-201	-136	-57	-1.190 / 0
PRMA	69	72	10	26	67	46	15	-1	51	56	41	54	-1 / 506
RNNA	-86	-52	0	104	106	229	136	35	-18	-83	-109	-129	-478 / 611
RSSA	10	0	0	69	97	141	125	69	92	78	28	4	0 / 711
SEAR	-102	-57	-63	0	51	92	61	0	-10	-43	-74	-116	-466 / 204
SPPI	109	56	38	-1	0	0	-1	-7	-3	0	0	58	-12 / 260
SPPR	48	42	0	-5	0	-1	-4	-14	0	0	0	0	-24 / 90
SPCA	121	79	21	-5	-2	-15	-23	-43	-36	-19	-11	0	-154 / 222
SPVO	118	59	14	-2	-4	-19	-30	-55	-37	-22	0	0	-170 / 191
TOPE	138	84	89	-2	-59	-89	-104	-137	-143	-75	0	56	-609 / 367
TOAR	118	145	152	102	-6	-53	-86	-108	-81	0	0	55	-333 / 572
TOPA	155	137	96	0	-32	-83	-110	-137	-131	-38	0	81	-531 / 469

Nas regiões produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, representadas por Piracicaba (SPPI), Presidente Prudente (SPPR), Catanduva (SPCA) e Votuporanga (SPVO), as deficiências hídricas anuais não ultrapassaram os 170 mm, o que de acordo com Pinto et al. (2008), não exige o emprego de irrigação para a obtenção de níveis satisfatórios de produtividade, o mesmo ocorrendo em Uberaba, Ivinhema, Maringá. Nas demais regiões, onde a deficiência hídrica anual normal supera os 180 mm, esses autores recomendam o uso da irrigação, seja ela complementar ou plena.

Apesar de grande parte dos estudos considerarem o balanço hídrico normal como parâmetro para a definição do uso da irrigação na cultura da cana-de-açúcar, nem sempre esse tipo de balanço representa adequadamente o que ocorre na região com relação ao déficit hídrico anual. Normalmente, o balanço hídrico normal subestima os valores de excedente e déficit hídrico que realmente ocorrem no local, quando calculados de com o balanço hídrico sequencial. A Tabela 21 apresenta os valores anuais de deficiência hídrica e excedente hídrico, calculados para cada região pelos balanços hídricos normal e sequencial. Verifica-se que em todas as localidades os valores de déficit e excedente hídricos foram maiores quando se calculou o balanço hídrico sequencialmente. Dessa forma, por meio dos valores médios de déficit hídrico do balanço hídrico sequencial, é possível verificar que até mesmo nas regiões tracionais de produção de cana-de-açúcar, como em Piracicaba, ocorrem déficits hídricos que justificam o uso da irrigação complementar. Ao se deslocar para a região Centro-oeste e para o Triângulo Mineiro, onde há grandes áreas de expansão de cana-de-açúcar (Figura 7), o déficit hídrico médio anual torna-se cada vez mais acentuado e ao se aproximar do interior do nordeste esse atinge níveis máximos, chegando a mais de 1.300 mm anuais. O extrato do balanço hídrico médio para cada localidade é apresentado detalhadamente no ANEXO A.

Tabela 21 - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando-se uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial (médio). Os valores negativos representam o déficit hídrico e os positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

(continua)

Local	Balanço hídrico médio (mm)			Balanço hídrico normal (mm)		
	Deficiência (anual)	Excedente (anual)	Amplitude (mensal)	Deficiência (anual)	Excedente (anual)	Amplitude (mensal)
ALMA	-385	883	-85 / 237	-245	749	-83 / 244
BABA	-744	251	-133 / 77	-554	74	-130 / 37
GOPI	-335	814	-78 / 190	-244	733	-74 / 195
GOFO	-344	674	-72 / 168	-219	559	-62 / 173
GOJA	-244	661	-54 / 149	-123	552	-42 / 144
MABA	-829	330	-149 / 74	-635	152	-146 / 66
MGCA	-422	544	-81 / 169	-268	407	-71 / 169
MGUB	-229	753	-51 / 207	-118	655	-44 / 209
MGMO	-787	177	-118 / 55	-599	0	-111 / 0
MGPO	-362	481	-64 / 144	-251	382	-57 / 135
MGJO	-440	559	-83 / 154	-321	455	-78 / 158
MSIV	-209	421	-28 / 58	-5	246	-3 / 50
MTDI	-484	651	-107 / 163	-312	503	-98 / 158
PAMA	-790	717	-166 / 207	-635	578	-161 / 210
PBJO	-612	810	-131 / 213	-461	666	-130 / 224
PEPE	-1350	33	-171 / 13	-1297	0	-168 / -57

Tabela 21 - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando-se uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial (médio). Os valores negativos representam o déficit hídrico e os positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

Local	(conclusão)					
	Balanço hídrico médio (mm)			Balanço hídrico normal (mm)		
	Deficiência (anual)	Excedente (anual)	Amplitude (mensal)	Deficiência (anual)	Excedente (anual)	Amplitude (mensal)
PERE	-373	1124	-91 / 280	-205	959	-82 / 285
PIBO	-954	237	-166 / 60	-730	43	-162 / 37
PIFL	-1354	139	-241 / 44	-1190	0	-239 / 0
PRMA	-128	613	-17 / 79	-1	506	-1 / 72
RNNA	-616	740	-129 / 220	-478	611	-129 / 229
RSSA	-130	822	-28 / 133	0	711	0 / 141
SEAR	-603	334	-113 / 97	-466	204	-116 / 92
SPPI	-156	390	-22 / 103	-12	260	-7 / 109
SPPR	-266	307	-34 / 76	-24	90	-14 / 48
SPCA	-309	360	-52 / 127	-154	222	-43 / 121
SPVO	-358	359	-61 / 137	-170	191	-55 / 118
TOPE	-749	490	-148 / 136	-609	367	-143 / 138
TOAR	-448	681	-112 / 153	-333	572	-108 / 152
TOPA	-703	616	-142 / 160	-531	469	-137 / 155

Portanto, o balanço hídrico sequencial é uma ferramenta muito útil para se avaliar o risco de quebra de produtividade (MONTEIRO, 2012) ou de morte das plantas de cana-de-açúcar (BARBOSA, 2011; MAURI, 2012), indicando claramente as regiões em que há a necessidade do uso da irrigação para viabilizar o seu cultivo.

Nesse caso, espera-se uma quebra significativa na produtividade de cana-de-açúcar para as regiões do interior nordestino, principalmente na região de Petrolina, PE e Floriano, PI que tiveram déficit hídrico anual médio acima de 1.300 mm. Enquanto que em locais do sudeste e sul do país espera-se menor quebra da produtividade de cana-de-açúcar devida ao menor déficit hídrico, ficando as localidades das regiões Centro-oeste e Norte em situação intermediária.

4.2 Teste do modelo CSM-CANEGRO para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em condições operacionais

Empregando-se a calibração do modelo CSM-CANEGRO proposta por Marin et al. (2011) para variedades brasileiras de cana-de-açúcar, testou-se o desempenho do referido

modelo em estimar a produtividade em condições operacionais de regiões com condições edafo-climáticas bastante distintas, Capim, PB, e Piracicaba, SP.

Em geral, o modelo CSM-CANEGRO apresentou um bom desempenho ao simular a produtividade final da cana-planta para a condição de sequeiro, tanto na região Nordeste, na Paraíba, quanto na região Sudeste, em São Paulo. A Tabela 22 apresenta os valores de produtividade observada e simulada pelo modelo, com os quais é possível se verificar as diferenças expressivas entre os níveis de produtividade das duas regiões, assim como comparar os dados estimados e observados. A média das produtividades de cana-planta observadas para a região de Piracicaba foi de 124,6 t ha⁻¹, enquanto que a média simulada ficou próxima de 121,0 t ha⁻¹. Para a região de Capim, o valor médio observado de produtividade ficou em torno de 50,1 t ha⁻¹ enquanto que o simulado foi de 50,4 t ha⁻¹.

Tabela 22 - Produtividades comerciais de cana-planta observadas e simuladas pelo CSM-CANEGRO, em diferentes condições edafo-climáticas, nas regiões de Piracicaba, SP, e em Capim, PB

Ciclo (meses)	Cultivar	Plantio	Colheita	Real	Simulado	UF
				----- TCH (t ha ⁻¹) -----	-----	
18	RB86-7515	Abr-05	Ago-06	137,0	117,1	SP
12	SP81-3250	Jun-10	Ago-11	89,0	121,9	SP
12	RB85-5156	Jun-02	Mai-03	139,0	115,9	SP
12	RB86-7515	Mai-10	Jul-11	137,0	123,9	SP
12	RB86-7515	Jul-06	Out-07	121,0	126,5	SP
12	Várias	Ago-06	Ago-07	43,6	43,2	PB
15	Várias	Jul-06	Out-07	34,9	54,3	PB
15	Várias	Ago-06	Nov-07	39,2	55,3	PB
15	Várias	Out-07	Jan-08	54,4	52,6	PB
19	Várias	Jul-07	Fev-08	76,5	59,4	PB
12	Várias	Jul-07	Jul-08	43,3	32,5	PB
15	Várias	Jul-07	Out-08	51,3	48,2	PB
16	Várias	Jul-07	Nov-08	49,9	49,1	PB
17	Várias	Jul-07	Dez-08	53,8	49,1	PB
14	Várias	Jun-08	Ago-09	54,0	60,3	PB

Os índices estatísticos de desempenho do modelo em estimar a produtividade final da cana-planta (Tabela 23) indicam que o CSM-CANEGRO superestimou os valores de produtividade em 1,05 t ha⁻¹ e apresentou raiz do erro médio quadrático (REMQ) igual a 14,89 t ha⁻¹. Esse valor de REMQ é inferior aos encontrados por Nassif et al. (2012) e Marin et al. (2013), empregando o mesmo modelo para diferentes cultivares brasileiras.

Tabela 23 - Índices estatísticos de desempenho do modelo CSM-CANEGRO em simular a produtividade comercial da cana-de-açúcar nas regiões de Piracicaba, SP, e Capim, PB

Índice	Valor
EM (t ha ⁻¹)	-1,05
REMQ (t ha ⁻¹)	14,89
r ²	0,85
d	0,96
c	0,88
Desempenho	Ótimo

O índice estatístico que indica a precisão do modelo (r^2) foi igual a 0,85 enquanto que o valor do índice de Willmott (d), que indica a acurácia, foi de 0,96 (Tabela 23). O modelo foi considerado como ótimo pelo critério de interpretação do índice (c) de confiança do modelo (CAMARGO e SENTELHAS, 1997). Por meio da Figura 13 nota-se o bom desempenho do modelo CSM-CANEGRO na previsão da produtividade final de cana-planta para as condições de Piracicaba, SP e Capim, PB. A dispersão observada por meio da Figura 13 é comum quando se empregam dados comerciais, já que o modelo não considera fatores que afetam a produtividade associados ao manejo da cultura, como adubação, pragas, doenças, plantas daninhas, compactação do solo, falhas no plantio e na colheita.

Figura 13 – Realção entre as produtividades de cana-planta observadas e estimadas pelo modelo CSM-CANEGRO para as regiões de Piracicaba, SP, e Capim, PB, em condições de sequeiro

4.3 Avaliação do modelo CSM-CANEGRO para estimar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em diferentes condições edafo-climáticas

Ao simular o desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar, o modelo CSM-CANEGRO apresentou diferentes respostas quando aplicado em condições agroclimáticas distintas. A seguir são apresentadas as diferentes respostas da cana-de-açúcar que o modelo foi capaz de estimar para as localidades selecionadas para este estudo.

4.3.1 Piracicaba, SP

Piracicaba é uma das regiões produtoras mais tradicionais de cana-de-açúcar do país (CONAB, 2013), portanto, apresenta condições climáticas e edáficas adequadas à produção da cultura. Os solos da região são em grande parte de textura argilosa e de boa capacidade de retenção de água (ANEXO B). A época de plantio que mais favorece a cana-planta (12 meses) é no início do período chuvoso, entre setembro e novembro, quando a cultura tem seu período de grande crescimento coincidindo com a estação chuvosa e quente, seguida de um período ameno e seco que contribuem para o processo de maturação.

Ao simular o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar para as condições de Piracicaba, com o plantio em 01/Novembro, o modelo CSM-CANEGRO estimou que a emergência da cana-planta ocorre, em média, 12 dias após o plantio. O valor de pico de perfilhamento foi atingido próximo ao 40º dia após o plantio (12 colmos m⁻², Tabela 11), mantendo-se esse valor até o 150º dia, quando começou a haver o processo de senescência, se estabilizando próximo de 10 colmos m⁻² após o 200º dia do ciclo (Figura 14a). Essa pequena variação entre o pico de perfilhamento e a estabilização após a senescência de colmos é normalmente observada em cana-planta, como relatado por Singels et al. (2005) e Suguitani (2006). Entretanto, o perfilhamento simulado ocorreu de maneira muito acelerada, partindo de zero até o pico (12 colmos m⁻²) em apenas 28 dias (Figura 14a), enquanto que o pico deveria ocorrer próximo ao 90º dia após o plantio, quando o tempo térmico ($T_b = 16^{\circ}\text{C}$) atingiu os 628 °C dia (Tabela 11).

Figura 14 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Piracicaba, para as seguintes variáveis: a) densidade de perfilhos (TAD), densidade total de raízes (RTLD) e índice de área foliar (IAF); e b) número de folhas emergidas e índice de área foliar em condição potencial (T#SD-P e IAF-P) e sequeiro (T#SD e IAF) considerando-se o acúmulo de graus-dias a partir da emergência ($T_b = 10^{\circ}\text{C}$)

O índice de área foliar (IAF) atingiu seu valor máximo (3) próximo de 150 dias após o plantio, coincidindo com o início da senescência dos perfilhos que, conseqüentemente, contribuiu para a diminuição do IAF até o 300º dia do ciclo. O modelo calcula o IAF por meio da extrapolação da área média de folhas verdes para cada perfilho e pela densidade de perfilhos (SINGELS et al., 2008). O número de folhas verdes, por sua vez é função do aparecimento de folhas por colmo que é dependente do tempo térmico e do estresse hídrico que a cultura sofre no período (Figura 14b). Inman-Bamber (1991) considera que sob déficit hídrico a emergência de folhas por colmo é paralisada, e quando esse período de estresse hídrico cessa, a cana pode emergir até três folhas simultaneamente, retornando à condição potencial folhas emergidas em um curto período (Figura 14b). Isso explica, em parte, o aumento do IAF simulado após o 300º dia do ciclo da cana-de-açúcar em Piracicaba, quando os índices pluviométricos voltam a aumentar (Figura 15a).

Singels et al. (2008) explicam que o CSM-CANEGRO considera o desenvolvimento da folha dependente, basicamente, da temperatura, do estresse hídrico e de parâmetros específicos de ecótipo e cultivar, que determinam a quantidade de folhas verdes e a área de cada uma delas. Enquanto que a senescência dos perfilhos não se inicia, o IAF continua crescendo até atingir o número máximo de folhas verdes (LFAREA) e a área máxima de cada uma delas (MXLFAREA) (Tabela 11).

A densidade de raiz é constante no início do ciclo da cultura e o seu crescimento é regulado conforme o desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar. A fração do incremento de biomassa particionado para a raiz é elevado no início do ciclo e conforme a

parte aérea se desenvolve a fração da biomassa particionada para a raiz diminui, além de que é considerada uma perda diária de 0,5% da densidade total de raízes (RTLTD) devido à respiração e/ou senescência (SINGELS et al., 2008).

Figura 15 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Piracicaba, SP, para as seguintes variáveis: a) evapotranspiração potencial (EO) e real (ET), precipitação média decenal (P); e b) água total extraível do solo (SWXD) e fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD), na fotossíntese (WSPD) e no perfilhamento (WSTD)

A evapotranspiração real da cultura (ET) variou conforme a disponibilidade hídrica no solo (SWXD), que foi maior durante os primeiros 100 dias de ciclo, decaindo devido ao início do período seco com valores mínimos de água extraível no solo, próximos a 70 mm no 300º dia do ciclo da cana. Na Figura 15b é possível observar os fatores de estresse hídrico aumentando conforme a disponibilidade de água no solo é reduzida. Os valores de fator de estresse hídrico para o perfilhamento (WSTD), que considera a falta de água na planta somente nos 0,30 m superficiais do solo, não foram elevados o suficiente para afetar significativamente o perfilhamento e não passou de 0,1 em todo ciclo. Em contrapartida, os valores de estresse hídrico na fotossíntese (WSPD) e na expansão de crescimento (WSGD) foram acentuados durante o período de menor disponibilidade de água no solo. A sensibilidade do fator de estresse hídrico na expansão da cana-de-açúcar foi maior do que a do fator de estresse hídrico na fotossíntese em todo o ciclo (RITCHIE, 1998; SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002).

O fator de estresse hídrico de crescimento (WSGD) indica que a taxa de expansão da planta foi afetada, implicando em um menor desenvolvimento da parte aérea da planta (altura do dossel e IAF) e, conseqüentemente, da interceptação de radiação solar (IPAR), influenciando indiretamente o processo da fotossíntese (equação 4), enquanto que o fator de estresse na fotossíntese (WSPD) indica o fechamento parcial dos estômatos em resposta aos

déficits hídricos mais elevados, penalizando diretamente o processo de fotossíntese e transpiração (RITCHIE, 1998). Dessa forma, o acúmulo da biomassa simulada pelo modelo durante os períodos de estresse hídrico é penalizado.

Após atingir um determinado tempo térmico (CHUPIBASE, Tabela 11), o incremento diário de biomassa aérea é particionado para os colmos, dando início ao seu crescimento (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002). Para as condições de Piracicaba, o início do acúmulo de matéria fresca de colmo ($t\ ha^{-1}$) iniciou-se em média após o 50º dia do ciclo (Figura 16), e na maioria dos anos apresentou taxa de crescimento estável até 110 dias de ciclo. A partir do 110º dia, cujo período coincide com o início da estação seca, a ocorrência de anos com estiagens mais prolongadas afeta a produtividade. Porém, na maioria dos anos (TCH - Q1) notam-se produtividades finais acima dos $85\ t\ ha^{-1}$, sendo que em média esse valor foi superior a $100\ t\ ha^{-1}$, chegando até $120\ t\ ha^{-1}$ em sua melhor condição (Figura 16).

Figura 16 - Distribuição dos valores máximos e mínimos e dos quartis (Q1, Q2 e Q3) da produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmo por hectare (TCH) da cana-planta de novembro em Piracicaba, SP, considerando-se os dias após o plantio, para a série histórica de 1980 a 2010

4.3.2 Formosa, GO

O estado de Goiás é um dos estados da região Centro-Oeste em que o setor canavieiro mais vem se expandindo (EVANGELISTA, 2011). Apenas na região de Formosa na Safra 2013/2014 houve uma expansão da área cultivada com cana-de-açúcar da ordem de 2.000 ha (INPE, 2013).

O clima na região de Formosa é semelhante ao de savana, com inverno seco e chuvas máximas no verão, e a região apresenta solos com predominância em textura média (ANEXO B). Dessa forma, a época de plantio que mais favorece a cana-planta de 12 meses na região é entre os meses de outubro e novembro, quando a cultura tem seu período de grande crescimento coincidindo com a estação chuvosa e quente no período em que há uma maior demanda hídrica, seguida de um período seco que contribui para o processo de maturação.

Ao simular o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar para as condições de Formosa, com o plantio em 01/Novembro, o modelo CSM-CANEGRO estimou a emergência da cana-planta, em média, 12 dias após o plantio. O pico de perfilhamento foi atingido aos 40 dias após o plantio (12 colmos m^{-2} , Tabela 11), mantendo esse valor até o 170º dia do ciclo, quando se iniciou a senescência dos colmos, que se estabilizaram em 10 colmos m^{-2} após os 250 dias de ciclo (Figura 17a). Assim como em Piracicaba, o perfilhamento simulado se deu de maneira muito acelerada, atingindo o pico antes do tempo térmico estipulado nos parâmetros específicos de cultivar (TT_POPGROWTH, Tabela 11), o que sugere ajustes nos parâmetros de população de colmos POPCF (1) e POPCF (2) que regulam a curva de perfilhamento em relação aos graus-dias acumulados (INMAN-BAMBER, 1994).

Figura 17 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Formosa, GO, para as seguintes variáveis: a) densidade de perfilhos (TAD), densidade total de raízes (RTLD) e índice de área foliar (IAF); e b) número de folhas emergidas e índice de área foliar em condição potencial (T#SD-P e IAF-P) e sequeiro (T#SD e IAF) considerando-se o acúmulo de graus-dias a partir da emergência ($T_b = 10^\circ C$)

O IAF atingiu o valor máximo de 2,3 que ocorreu em média aos 170 dias após o plantio (Figura 17), o que foi afetado pela senescência das folhas foi muito acentuada, coincidindo com a senescência dos perfilhos e com o início do período de seca (Figura 18a). Como a região apresenta inverno seco, com temperaturas médias do ar acima dos $20^\circ C$ e boa

disponibilidade de radiação solar, a demanda de água pela atmosfera é maior neste período (Figura 18a), aumentando o déficit hídrico para as condições de sequeiro. Dessa forma, o IAF decresce de acordo com a disponibilidade hídrica no solo (SWXD) até o valor mínimo de 0,2. Até esse período o modelo considerou a senescência de 5 folhas por colmo para cada 100 dias de estresse hídrico (SINGELS et al., 2008). Como o modelo considera que a planta de cana-de-açúcar permanece no período vegetativo, sem maturar ou florescer (JONES e SINGELS, 2008), com o retorno do período chuvoso o IAF volta a subir, o que ocorreu por volta dos 300º dia após o plantio para as condições de Formosa, GO.

A densidade total raiz (Figura 17a) cresceu em decorrência do acúmulo de matéria seca da planta, assim como da formação do dossel vegetativo. Conforme a parte aérea da cana-de-açúcar vai se desenvolvendo a fração do incremento diário de biomassa particionada para as raízes diminui (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002). Após os 150 dias do ciclo, com a paralização do acúmulo de biomassa devido às condições climáticas de Formosa, a densidade total de raízes começou a decair em decorrência da diminuição de biomassa particionada para as raízes, associada à perda diária de 0,5% da RTLD (SINGELS et al., 2008).

Figura 18 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Formosa, GO, para as seguintes variáveis: a) evapotranspiração potencial (EO) e real (ET), precipitação média decendial (P); e b) água total extraível do solo (SWXD) e fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD), na fotossíntese (WSPD) e no perfilhamento (WSTD)

Os valores de fator de estresse hídrico no perfilhamento (WSTD) foram mínimos durante o início do ciclo e aumentaram durante o período de seca (Figura 18b). Como o processo de perfilhamento já havia ocorrido, a população de colmos simulada pelo modelo não sofreu influência por estresse hídrico. Por outro lado, os fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD) e na fotossíntese (WSPD) começaram a aumentar por volta do 75º dia

do ciclo. Isso se deveu à elevada demanda hídrica da atmosfera, o que foi ainda mais agravado pela menor capacidade de retenção de água do solo da região. Com o início do período seco aos 150 dias após o plantio, os valores de estresse hídrico aumentaram e o acúmulo de matéria seca foi praticamente paralisado.

O CSM-CANEGRO simulou que o acúmulo de matéria fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) para as condições de Formosa, GO, começou de forma mais acentuada por volta do 50º dia após o plantio (Figura 19), aumentando até por volta dos 200 dias do ciclo, sendo paralisada a partir de então em função do estresse hídrico acentuado ao qual a cultura é normalmente submetida na região. Apesar de o intenso estresse hídrico limitar o crescimento da cultura a partir dos 200 dias de ciclo, tais condições favorecem uma alta concentração de sacarose nos colmos (CARDOZO e SENTELHAS, 2013). Nas simulações para as condições de Formosa, GO, o modelo apresentou produtividade final de colmos entre 50 e 90 $t\ ha^{-1}$ sendo que na maioria dos anos (TCH - Q1) apresentou produtividades acima de 60 $t\ ha^{-1}$, sendo a média de 75 $t\ ha^{-1}$.

Figura 19 - Distribuição dos valores máximos e mínimos e em quartis (Q1, Q2 e Q3) da produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmo por hectare (TCH) da cana-planta de novembro em Formosa, GO, considerando-se os dias após o plantio, para a série de 1980 a 2010

4.3.3 Santa Maria, RS

A região sul do Brasil também possui áreas produtoras de cana-de-açúcar. Segundo o levantamento da safra 2013/2014 feito pela CONAB, o estado Rio Grande do Sul atingiu uma produtividade média de 62 t ha^{-1} que foi 193,8 % superior à safra anterior. O incremento da área de produção desta cultura no RS vem crescendo aos incentivos dados pelo governo para a bioenergia e ao desenvolvimento de variedades específicas para o clima da região.

Em Santa Maria, RS, o regime pluviométrico é bem distribuído durante o ano, não havendo uma estação seca definida e a temperatura do mês mais quente é maior que 22°C (Figura 10). Além disso, a região sofre grande influência dos fenômenos ENOS (El Niño Oscilação Sul), o que provoca grande variabilidade interanual das chuvas (SIMON et al., 2006; DE PAULA et al., 2010). O tipo de solo predominante na região de Santa Maria, RS, é de textura argilosa com maior capacidade de retenção de água (ANEXO B). Como o risco de ocorrência de geadas na região é elevado (MARIN et al., 2009), o plantio da cana-de-açúcar é feito no início da época mais quente do ano, entre outubro a novembro.

Ao simular o crescimento e desenvolvimento da cana-planta para as condições de Santa Maria com plantio em 01/Novembro, o modelo CSM-CANEGRO estimou que a emergência da cana-planta ocorreu, em média, aos 16 dias após o plantio. O pico de perfilhamento foi atingido em torno dos 45 dias após o plantio (12 colmos m^{-2} , Tabela 11), mantendo-se com esse valor até os 150 dias do ciclo, quando iniciou-se a senescência, com declínio contínuo do número de colmos até se atingir 10 colmos m^{-2} no final do ciclo (Figura 20a). Isso se deve às baixas temperaturas da região de Santa Maria, especialmente no outono e inverno, e ao fato do modelo considerar o acúmulo de graus-dia para a simulação do desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Dessa forma, os valores médios de IAF da cana-de-açúcar em Santa Maria atingiram o valor máximo de 3,6 somente aos 270 dias após o plantio. Como o modelo CSM-CANEGRO considera o desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar como função da temperatura do ar, a taxa de expansão da lâmina foliar e a emergência de folhas por colmo foram menos acentuadas para as condições de Santa Maria, RS (Figura 20). Após o pico, os valores de IAF diminuíram o final do ciclo, atingindo um valor médio igual a 3.

Figura 20 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Santa Maria, RS, para as seguintes variáveis: a) densidade de perfilhos (TAD), densidade total de raízes (RTLD) e índice de área foliar (IAF); e b) número de folhas emergidas e índice de área foliar em condição potencial (T#SD-P e IAF-P) e sequeiro (T#SD e IAF) considerando-se o acúmulo de graus-dias a partir da emergência ($T_b = 10^\circ\text{C}$)

Como a região não apresenta estação seca, o período médio em que ocorreu algum estresse hídrico na cana-de-açúcar foi somente durante a fase de desenvolvimento do dossel vegetativo, período em que a demanda hídrica da cultura chega a superar as chuvas. Os valores simulados de IAF entre o 100º e o 200º dia do ciclo sofreram influência do estresse hídrico, havendo atenuação na taxa de emergência de folhas, assim como na taxa de expansão foliar e na fotossíntese da planta (Figura 21b). As baixas temperaturas também afetaram o desenvolvimento radicular, que está diretamente relacionado ao acúmulo de biomassa na fase inicial da cana-de-açúcar. Para as condições de Santa Maria, o modelo apresentou um valor médio de densidade total de raízes próximo de 16 cm cm^{-2} no 150º dia após o plantio. Com o desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar, a fração da biomassa particionada para as raízes diminuiu e em seguida voltou a subir próximo dos 300 dias do ciclo, devido ao aumento da temperatura do ar (Figura 20a).

Os valores de fator de estresse hídrico computados pelo modelo foram mínimos durante os primeiros 50 dias do ciclo e aumentaram conforme as necessidades hídricas da cana-de-açúcar foram se elevando por conta do crescimento do dossel vegetativo. Os valores de estresse hídrico no crescimento (WSGD) e na fotossíntese (WSPD) atingiram os valores máximos entre os 100 e 150 dias do ciclo e voltaram a diminuir após 200 dias de ciclo (Figura 21b), quando o período mais frio começou e, consequentemente, houve diminuição da demanda hídrica da atmosfera (EO) (Figura 21a).

Figura 21 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Santa Maria, RS, de: a) evapotranspiração potencial (EO) e real (ET), precipitação média decenal (P); e b) água total extraível do solo (SWXD) e fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD), na fotossíntese (WSPD) e no perfilhamento (WSTD)

Na simulação da matéria fresca de colmos ($t\ ha^{-1}$) para as condições de Santa Maria, RS, o modelo CSM-CANEGRO apresentou início do acúmulo de matéria fresca de colmo por volta do 55º dia do ciclo. Em metade dos anos (TCH - Q2, Figura 22), a produtividade de colmos aumentou a uma taxa maior a partir do 100º dia do ciclo, enquanto que em alguns anos em que houve a ocorrência de condições mais secas associadas a baixas temperaturas prejudicaram a produção de cana-de-açúcar na região (Figura 22).

Figura 22 - Distribuição dos valores máximos e mínimos e dos quartis (Q1, Q2 e Q3) da produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmo por hectare (TCH) da cana-planta de novembro em Santa Maria, RS, considerando-se os dias após o plantio, para a série de 1980 a 2010

Portanto, para as condições de Santa Maria, RS, o modelo apresentou alta variabilidade na produtividade final de colmos, variando entre 22 a 117 t ha⁻¹ sendo que na maioria dos anos (TCH - Q1) apresentou produtividades acima de 90 t ha⁻¹. Esses valores, no entanto, não refletem a realidade já que o modelo não provoca a morte das plantas por geada, mas apenas paralisa o crescimento quando a temperatura do ar fica abaixo da temperatura base da cultura.

4.3.4 Marabá, PA

As regiões norte e nordeste do país correspondem a cerca de 10% da produção nacional de cana-de-açúcar (CONAB, 2013). O município de Marabá, localizado no interior do estado do Pará e próximo às divisas com os estados do Tocantins e Maranhão apresenta período chuvoso entre novembro e março, chegando a um valor de precipitação média anual de 1.892 mm. A região apresenta altos valores de temperatura média do ar e radiação solar, e solos com baixa capacidade de retenção de água (OLIVEIRA JUNIOR et al., 1998). Portanto, o plantio de cana-planta para esta região é mais favorável no início do período chuvoso, entre setembro e novembro.

Nas simulações do crescimento e do desenvolvimento da cana-planta para as condições de Marabá com plantio em 01/Novembro, o modelo CSM-CANEGRO estimou em média que a emergência da cana-planta ocorreu 12 dias após o plantio. O pico de perfilhamento foi atingido, em média, aos 50 dias após o plantio (12 colmos m⁻², Tabela 11), e manteve-se nesse patamar até o 100º dia do ciclo, quando se iniciou a senescência dos perfilhos, havendo uma estabilização em torno de 10 colmos m⁻² aos 150 dias após o plantio (Figura 23a). As altas temperaturas da região fazem com que a simulação do desenvolvimento da cana-de-açúcar ocorra de maneira mais rápida, e assim o tempo térmico requerido para desencadear os processos fisiológicos da cana ocorreram em um tempo mais curto. O processo de perfilhamento durou em média 38 dias, sendo cerca de 10 dias mais prolongado que as demais regiões devido ao estresse hídrico (WSTD) que normalmente ocorre nos primeiros dias após a emergência da cana-de-açúcar, como mostra a Figura 24b.

Figura 23 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Marabá, PA, para as seguintes variáveis: a) densidade de perfilhos (TAD), densidade total de raízes (RTL D) e índice de área foliar (IAF); e b) número de folhas emergidas e índice de área foliar em condição potencial (T#SD-P e IAF-P) e sequeiro (T#SD e IAF) considerando-se o acúmulo de graus-dias a partir da emergência ($T_b = 10^{\circ}\text{C}$)

Por apresentar solo com baixa capacidade de retenção e alta demanda de água pela atmosfera (EO), a região de Marabá apresentou altos índices de estresse hídrico durante o ciclo (Figura 24b). Mesmo com altos índices pluviométricos durante o período entre o 50º ao 200º dia do ciclo, como o solo apresenta baixa capacidade de retenção de água e alta taxa de drenagem ocorreu déficit hídrico para a cultura da cana-de-açúcar. Com os altos índices de déficit hídrico no início do ciclo, o IAF simulado atingiu o valor máximo de 2 que ocorreu em média aos 200 dias após o plantio. Após essa data, com o início do período seco e com a alta demanda atmosférica por água (Figura 24a) a senescência das folhas foi muito acentuada, chegando o IAF a atingir o valor mínimo de 0,3 aos 300 dias após o plantio, quando então voltou a aumentar com o retorno do período chuvoso.

Ao contabilizar o estresse hídrico, o modelo diminuiu a taxa de emergência de folhas (Figura 23b) e também a taxa de expansão e de fotossíntese da cana-de-açúcar. O crescimento das raízes é dependente da biomassa acumulada até o fechamento do dossel e atingiu o valor máximo aos 200 dias de ciclo, coincidindo com o máximo IAF. Após os 150 dias do ciclo, com a paralização do acúmulo de biomassa devido ao elevado déficit hídrico que normalmente ocorre em Marabá, a densidade total de raízes começou a decair em decorrência da diminuição da biomassa particionada para as raízes associada à perda diária de 0,5% da densidade total de raízes (RTL D) (SINGELS et al., 2008).

Figura 24 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Marabá, PA, para as seguintes variáveis: a) evapotranspiração potencial (EO) e real (ET), precipitação média decenal (P); e b) água total extraível do solo (SWXD) e fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD), na fotossíntese (WSPD) e no perfilhamento (WSTD)

O fator de estresse hídrico no perfilhamento (WSTD) foi elevado durante o início do ciclo e fizeram com que o perfilhamento da cana-de-açúcar na região de Marabá durasse em média 10 dias a mais em relação às demais regiões analisadas. Nesse caso, o perfilhamento teve duração de 38 dias e, mesmo assim, a cana-de-açúcar simulada pelo CSM-CANEGRO atingiu pico de perfilhamento antes do esperado (TT_POPGROWTH, Tabela 11). Os fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD) e na fotossíntese (WSPD) começaram a aumentar após o 30º dia do ciclo apresentando valores entre 0,2 e 0,4 para estresse hídrico na fotossíntese e 0,5 e 0,7 para crescimento até 170 dias do ciclo (Figura 24b). Com o início do período seco, esses valores aumentaram para a faixa de 0,8 a 0,9 entre 250 e 280 dias do ciclo. As altas temperaturas e índices de radiação solar global contribuíram para o aumento da demanda hídrica da atmosfera a partir do dia 250 do ciclo, agravando as condições de estresse hídrico para as plantas (Figura 24a).

O CSM-CANEGRO considera que o acúmulo de matéria fresca de colmos (t ha⁻¹) para as condições de Marabá iniciou-se em média no 40º dia após o plantio (Figura 25). Para os anos com melhores condições climáticas (TCH - Q3), o acúmulo de matéria fresca de colmos aumentou com uma taxa próxima de 0,45 t ha⁻¹ dia⁻¹ entre os dias 40 e 200 do ciclo. Nos anos com condições climáticas menos favoráveis (TCH - Q1), o acúmulo de matéria fresca de colmos aumentou nessa mesma taxa de 0,45 t ha⁻¹ dia⁻¹, porém somente entre os 40 e 160 dias do ciclo. Após esses períodos a taxa de acúmulo de matéria fresca de colmos diminuiu em decorrência da intensa estiagem que normalmente ocorre na região. Dessa forma, a produtividade em Marabá, variou de 61 a 112 t ha⁻¹, sendo que na maioria dos anos a produtividade superou as 72 t ha⁻¹.

Figura 25 - Distribuição dos valores máximos e mínimos e dos quartis (Q1, Q2 e Q3) da produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmo por hectare (TCH) da cana-planta de novembro em Marabá,PA, considerando-se os dias após o plantio, para a série de 1980 a 2010

4.3.5 João Pessoa, PB

A região da Zona da Mata nordestina é uma das regiões produtoras de cana-de-açúcar mais antigas do país. A região de João Pessoa no estado da Paraíba assim como as demais regiões do litoral nordestino apresentam solos com baixa capacidade de retenção de água (ANEXO B) e regime pluviométrico bem definido com estação chuvosa entre os meses de maio e setembro. Essa diferença na distribuição das chuvas em relação ao Centro-Sul do Brasil é considerada como um aspecto que confere à região e ao país uma maior competitividade econômica e logística (SCARPARI, 2007; PINTO et al., 2008), já que a safra nordestina se dá na entressafra das demais regiões de produção. Dessa forma, a data de plantio que mais favorece a cultura da cana-planta de 12 meses na região de João Pessoa é entre os meses fevereiro a abril.

A simulação do crescimento e do desenvolvimento da cana-planta para as condições de João Pessoa com plantio em 01/Março pelo modelo CSM-CANEGRO estimou que a emergência da cultura se dá normalmente com 10 dias após o plantio. Sob a influência do estresse hídrico, o pico de perfilhamento foi atingido, em média, aos 50 dias de ciclo (12 colmos m^{-2} , Tabela 11), e manteve-se nesse patamar até o 120º dia do ciclo, quando começou a haver a senescência dos perfilhos, que se estabilizaram por volta de 10 colmos m^{-2} aos 180

dias após o plantio (Figura 26a). Assim como em Marabá, PA, as altas temperaturas da região de João Pessoa fizeram com que a simulação do desenvolvimento da cana-de-açúcar ocorresse de maneira mais rápida, e assim o requerimento térmico para desencadear os processos fisiológicos da cana ocorreram em um tempo mais curto (SINGELS et al., 2008).

Figura 26 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de março em João Pessoa, PB, para as seguintes variáveis: a) densidade de perfilhos (TAD), densidade total de raízes (RTL) e índice de área foliar (IAF); e b) número de folhas emergidas e índice de área foliar em condição potencial (T#SD-P e IAF-P) e sequeiro (T#SD e IAF) considerando-se o acúmulo de graus-dias a partir da emergência ($T_b = 10^\circ\text{C}$)

O processo de perfilhamento durou em média 40 dias, sendo mais prolongado devido ao estresse hídrico (WSTD) ocorrido nos primeiros dias após a emergência da cana-de-açúcar (Figura 27b). Os valores de IAF simulados chegaram ao valor médio máximo de 1,9 que foi atingido aos 150 dias após o plantio. Durante o período de estresse hídrico, a emergência de folhas e a expansão da lâmina foliar foram comprometidas pela falta de água no solo e os valores de IAF decresceram até por volta de 1 aos 320 dias após o plantio (Figura 26a).

A densidade total de raízes chegou ao valor máximo de 17 cm cm^{-2} aos 200 dias de ciclo. Com o fechamento do dossel começou a haver uma diminuição da densidade de raízes devido à diminuição da fração da biomassa particionada para elas (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002). Dessa forma, o valor simulado de densidade total de raízes chegou a 12 cm cm^{-2} na época de corte.

Figura 27 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de março em João Pessoa, PB, para as seguintes variáveis: a) evapotranspiração potencial (EO) e real (ET), precipitação média decenal (P); e b) água total extraível do solo (SWXD) e fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD), na fotossíntese (WSPD) e no perfilhamento (WSTD)

Como o tipo de solo da região é de predominância arenosa, com baixa capacidade de retenção, mesmo no período chuvoso a cana-de-açúcar sofreu com a ocorrência de déficit hídrico (Figura 27b). O fator de estresse hídrico no perfilhamento (WSTD) atingiu em média um valor máximo de 0,6 logo após a emergência da cana-planta e influenciou o perfilhamento da cultura. Já os fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD) e na fotossíntese (WSPD) da cana-de-açúcar se iniciaram aos 40 dias após o plantio e se mantiveram entre 0,2 e 0,5 até o 140º dia do ciclo. Com o início do período seco, os fatores de déficit hídrico de crescimento e fotossíntese computados pelo CSM-CANEGRO aumentam, chegando à faixa de 0,8 e 0,9 entre os 200 e 300 dias do ciclo.

Após atingir o tempo térmico requerido indicado na Tabela 11, o incremento diário de biomassa aérea foi particionado para os colmos, dando início ao seu crescimento (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002; SINGEL et al., 2008). Para as condições de João Pessoa, o acúmulo de matéria fresca de colmo ($t\ ha^{-1}$) iniciou-se, em média, após o 40º dia do ciclo (Figura 31). Como a deficiência hídrica na região é acentuada em quase todo o ciclo, devido ao tipo de solo e ao fato de que o clima na região litorânea do nordeste apresenta verão seco e inverno úmido, a produtividade de matéria fresca de colmos é menor do que a das regiões produtoras da região centro-sul. Nesse caso, a produtividade final de colmos na região de João Pessoa variou entre 60 e 100 $t\ ha^{-1}$, e na maioria dos anos ficou acima de 68 $t\ ha^{-1}$, apresentando média de 80 $t\ ha^{-1}$ (Figura 31).

Figura 28 - Distribuição dos valores máximos e mínimos e dos quartis (Q1, Q2 e Q3) da produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmo por hectare (TCH) da cana-planta de março em João Pessoa, PB, considerando-se os dias após o plantio, para a série de 1980 a 2010

4.3.6 Petrolina, PE

O município de Petrolina, PE está inserido no sertão nordestino do Brasil e apresenta clima semi-árido com precipitação anual média de 485 mm e temperatura média anual acima dos 27°C. O tipo de solo que predomina na região é de baixa capacidade de retenção (ANEXO B) e o período de maiores índices pluviométricos está entre os meses de novembro e março. Assim, a data de plantio que mais favorece a cana-planta de 12 meses está entre setembro a novembro.

Ao simular o crescimento e desenvolvimento da cana-planta para as condições de Petrolina com plantio em 01/Novembro, o modelo CSM-CANEGRO estimou que a emergência da cana-planta ocorreu, em média, em 10 dias após o plantio. Com os altíssimos índices de estresse hídrico devido à escassez hídrica da região, o perfilhamento sofreu prejuízos significativos em que o pico de perfilhamento simulado (12 colmos m⁻²) não chegou a ser atingido para as condições de sequeiro em Petrolina, PE. Neste caso, o perfilhamento ocorreu até atingir o valor de estabilização (10 colmos m⁻²) aos 150 dias após o plantio durando em média 120 dias (Figura 29a). Em condições de déficit hídrico severo, Barbosa (2011) encontrou que após 33 dias com evapotranspiração potencial média de 3 mm dia⁻¹ e sem água disponível no solo a porcentagem de touceiras vivas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar foi zero.

Figura 29 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Petrolina, PE, para as seguintes variáveis: a) densidade de perfilhos (TAD), densidade total de raízes (RTLD) e índice de área foliar (IAF); e b) número de folhas emergidas e índice de área foliar em condição potencial (T#SD-P e IAF-P) e sequeiro (T#SD e IAF) considerando-se o acúmulo de graus-dias a partir da emergência ($T_b = 10^{\circ}\text{C}$)

O modelo CSM-CANEGRO não considera a morte da cana-de-açúcar por estresse hídrico (JONES e SINGELS, 2008), o que seria comum no caso de Petrolina, em que a disponibilidade hídrica no solo é muito baixa por períodos muito longos, o que levaria à morte total ou parcial das touceiras na fase inicial de desenvolvimento da cana (BARBOSA, 2011; MAURI, 2012).

Com os altos índices de déficit hídrico no início do ciclo, o IAF simulado atingiu o valor máximo de 1 que ocorreu em média aos 180 dias após o plantio, e em seguida decresceu, atingindo zero aos 320 dias após o plantio (Figura 29a). A emergência das folhas foi praticamente paralisada durante um período médio de 30 dias e o alto fator de estresse hídrico no crescimento (WSGD) diminuiu a expansão da lâmina foliar, gerando os baixos valores IAF (Figura 29b). Dessa forma, o IAF variou de acordo com a disponibilidade hídrica no solo, que para as condições de simulação de Petrolina não passou dos 35 mm durante o ciclo da cana-planta.

A densidade total de raízes (RTLD) é constante no início do ciclo da cultura e o seu crescimento é regulado conforme o desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar. No caso de Petrolina, como o incremento de biomassa foi prejudicado pelo estresse hídrico durante todo o ciclo, a densidade total de raízes máxima foi de $9,5 \text{ cm cm}^{-2}$, menor valor simulado entre as localidades analisadas. A época em que o valor máximo de densidade de raízes ocorreu, coincidiu com o valor máximo de IAF, indicando que a partir do dia 200 após

o plantio, a fração do incremento diário de biomassa para as raízes diminuiu e assim o valor de densidade total de raízes ficou próximo de 7 cm cm^{-2} na época de colheita (Figura 29a).

Figura 30 - Valores médios, durante o ciclo da cana-planta de novembro em Petrolina, PE, para as seguintes variáveis: a) evapotranspiração potencial (EO) e real (ET), precipitação média decenal (P); e b) água total extraível do solo (SWXD) e fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD), na fotossíntese (WSPD) e no perfilhamento (WSTD)

O fator de estresse hídrico no perfilhamento (WSTD) foi muito elevado durante o todo o ciclo, variando entre 0,6 e 0,9 e prejudicaram o perfilhamento da cana-de-açúcar para as condições de Petrolina. Os fatores de estresse hídrico no crescimento (WSGD) e na fotossíntese (WSPD) também foram elevados durante todo o ciclo variando entre 0,6 e 0,8 na fase inicial de desenvolvimento da cultura, entre os dias 50 e 150, e atingindo os valores máximos de 0,9 e 0,85 respectivamente para o crescimento e a fotossíntese, aos 190 dias após o plantio (Figura 30b). Os valores máximos simulados dos fatores de estresse hídrico no perfilhamento, crescimento e na fotossíntese, considerando todos os anos da série histórica de Petrolina, foram, respectivamente 0,991, 0,996 e 0,95, os quais indicam que mesmo em condições de estresse hídrico severo, o modelo CSM-CANEGRO não paralisou totalmente o acúmulo de biomassa da cana-de-açúcar nessa região.

Com isso, o acúmulo de matéria fresca de colmos (t ha^{-1}) para as condições de Petrolina começaram em média entre o 40º e o 120º dia após o plantio (Figura 31). O acúmulo de matéria fresca de colmos aumentou até o dia 200 do ciclo e estabilizou-se entre 15 e 35 t ha^{-1} até o final do ciclo. Dessa forma, nas simulações para as condições de sequeiro em Petrolina, PE, o modelo apresentou produtividade final de colmos média de 26 t ha^{-1} . Mesmo utilizando um modelo que não considera a morte da cana-de-açúcar por escassez hídrica, esses resultados sugerem o uso imprescindível de irrigação nesta região para a produção de cana-de-açúcar.

Figura 31 - Distribuição dos valores máximos e mínimos e dos quartis (Q1, Q2 e Q3) da produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmo por hectare (TCH) da cana-planta de novembro em Petrolina, PE, considerando-se os dias após o plantio, para a série de 1980 a 2010

4.4 Estimativa da produtividade potencial e atingível para diferentes regiões produtoras do Brasil

4.4.1 Produtividade Potencial

Para a simulação da produtividade potencial da cana-de-açúcar, o modelo CSM-CANEGRO considera apenas as diferentes condições de disponibilidade de energia solar, fotoperíodo, temperatura média e, principalmente, as características fenológicas e fisiológicas da cultivar utilizada nesse estudo. No incremento de biomassa, o modelo considera um parâmetro de respiração de crescimento (RespGcf), a eficiência da conversão da radiação fotossinteticamente ativa (PARCE), a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (IPAR), e a respiração de manutenção (Rm) (SINGELS et al., 2008). Na simulação, os fatores de estresse hídrico são desconsiderados pelo modelo assim como as restrições quanto à profundidade do solo.

Ao simular o crescimento e desenvolvimento da cana-planta para as condições potenciais, as fases fenológicas variaram em função da temperatura do ar de cada local. Em locais com temperaturas mais elevadas, o período requerido para a ocorrência das fases fenológicas e/ou processos fisiológicos é mais curto do que nos locais com temperaturas mais

amenas. Dessa forma, como a taxa de expansão da planta (PER), a eficiência da conversão da radiação fotossinteticamente ativa (PARCE), a respiração de manutenção (Rm), assim como a emergência de folhas e a fração do incremento da biomassa aérea para os colmos (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002) são dependentes do tempo térmico, a temperatura influencia na velocidade do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Sendo assim, as simulações da produtividade potencial da cana-planta de 12 meses pelo CSM-CANEGRO, apresentaram valores médios anuais que variaram entre 137,6 e 171,1 t ha⁻¹ para cada localidade, sendo que a média entre os locais foi de 162 t ha⁻¹ (Tabela 24). As maiores produtividades potenciais ocorreram em Natal (RNNA) que atingiu o valor médio anual de 171,1 t ha⁻¹ e desvio de 4,0 t ha⁻¹ entre as datas de plantio, seguida de Petrolina com valor médio de produtividade potencial igual a 170,2 t ha⁻¹ com desvio de 3,4 t ha⁻¹ entre as datas de plantio. Em contrapartida, em Santa Maria (RSSA) foram observados os menores valores de produtividade potencial média com 137,6 t ha⁻¹ e variação de 12,9 t ha⁻¹ entre as datas de plantio devido à maior variação sazonal da radiação solar, do fotoperíodo e da temperatura nessa região. Os valores de produtividade potencial para cana-planta de 12 meses encontrados nesse estudo foram ligeiramente inferiores aos simulados por Monteiro (2012), que para as condições do estado de São Paulo encontrou valores entre 160 a 190 t ha⁻¹.

Tabela 24 - Produtividade potencial média da cana-planta de 12 meses, simulada pelo modelo CSM-CANEGRO, para as diferentes localidades brasileiras, considerando-se um plantio por mês data de plantio, com seus respectivos valores anuais médios ($\bar{x}$) e desvios padrões (σ)

Local													(continua)	
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	$\bar{x}$	σ
ALMA	167,4	169,1	169,7	168,7	167,2	165,1	162,9	160,6	159,1	158,9	161,9	165,0	164,6	3,9
BABA	161,3	162,1	162,1	161,7	160,6	159,3	158,1	157,6	158,4	159,5	160,2	160,6	160,1	1,6
GOPI	160,9	160,7	160,8	160,1	159,3	158,0	157,0	157,1	159,1	160,3	161,7	161,7	159,7	1,6
GOFO	161,6	161,6	162,1	161,3	160,0	158,4	157,3	157,4	160,0	162,1	163,3	162,9	160,7	2,0
GOJA	160,3	160,1	160,0	158,9	157,8	156,4	155,1	154,7	156,5	157,7	159,5	160,7	158,1	2,1
MABA	165,6	165,1	164,8	163,8	162,6	161,3	160,6	161,1	163,2	165,1	165,8	166,2	163,8	2,0
MGCA	165,0	165,4	165,8	164,7	163,2	161,6	160,2	159,3	159,5	160,4	162,6	164,3	162,7	2,4
MGUB	163,3	163,0	163,1	162,2	160,7	159,2	157,6	156,6	157,9	159,6	161,7	163,1	160,7	2,4
MGMO	168,7	170,3	171,3	170,7	169,1	166,5	163,9	162,2	162,6	164,0	166,5	167,7	167,0	3,2
MGPO	159,2	160,6	161,3	160,3	158,6	156,7	154,7	153,3	154,4	156,2	158,3	158,9	157,7	2,6
MGJO	166,4	166,9	167,6	166,9	165,2	162,8	160,7	159,1	159,5	162,0	164,6	166,2	164,0	3,1
MSIV	162,7	163,7	163,8	163,2	161,7	160,1	158,2	156,0	154,7	154,7	156,9	160,6	159,7	3,5
MTDI	162,1	162,4	162,6	162,2	161,3	160,1	158,8	158,5	159,6	160,6	161,5	162,2	161,0	1,4
PAMA	168,8	168,5	168,5	168,1	166,7	165,0	163,4	163,2	165,4	167,5	168,9	169,2	166,9	2,2
PBJO	169,8	170,7	171,2	170,7	169,3	167,3	165,1	162,7	161,8	162,8	166,1	169,0	167,2	3,4
PEPE	172,5	173,8	174,5	174,1	172,7	170,4	168,0	165,8	165,2	166,0	168,7	171,2	170,2	3,4
PERE	167,2	168,1	168,8	168,9	167,7	165,7	163,4	161,2	160,0	160,9	163,7	165,8	165,1	3,2

Tabela 24- Produtividade potencial média da cana-planta de 12 meses, simulada pelo modelo CSM-CANEGRO, para as diferentes localidades brasileiras, considerando-se um plantio por mês data de plantio, com seus respectivos valores anuais médios ($\bar{X}$) e desvios padrões (σ)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	(conclusão)	
													$\bar{X}$	σ
PIBO	169,0	169,1	168,9	167,6	166,4	164,5	162,7	162,0	163,5	165,5	167,3	168,7	166,3	2,6
PIFL	167,0	168,5	169,3	169,1	167,8	165,6	163,3	161,8	161,9	162,9	164,3	165,9	165,6	2,8
PRMA	162,1	163,4	163,8	162,6	160,4	158,2	155,8	153,4	152,1	152,9	155,9	160,2	158,4	4,3
RNNA	174,8	175,2	175,4	174,8	173,3	171,0	168,2	165,8	164,8	166,0	170,0	173,5	171,1	4,0
RSSA	147,6	155,3	156,4	151,5	142,9	136,4	131,1	126,4	122,5	121,0	124,9	134,9	137,6	12,9
SEAR	173,1	175,0	176,2	175,8	174,2	171,6	168,5	164,9	162,1	162,3	166,1	170,7	170,0	5,2
SPPI	158,4	158,9	158,9	157,4	155,0	151,8	149,2	147,5	149,5	151,5	154,2	157,4	154,1	4,1
SPPR	163,5	164,4	164,5	163,9	161,9	159,9	157,9	155,7	155,0	155,9	159,0	161,9	160,3	3,6
SPCA	161,2	161,2	161,6	161,2	159,9	158,2	156,3	154,7	155,1	156,1	158,4	160,8	158,7	2,6
SPVO	164,1	164,4	164,6	163,8	162,4	160,7	159,2	157,7	157,4	158,2	160,7	162,9	161,3	2,7
TOPE	165,0	166,0	166,0	165,0	163,7	162,1	161,1	161,2	162,5	163,1	163,6	164,5	163,6	1,7
TOAR	166,0	164,5	163,5	162,6	161,6	160,5	160,2	161,6	165,3	168,4	168,8	167,9	164,2	3,1
TOPA	163,4	163,5	163,6	162,8	162,0	160,9	160,3	160,9	162,3	162,6	162,8	163,3	162,4	1,1
Média	164,6	165,4	165,7	164,8	163,2	161,2	159,3	158,0	158,4	159,5	161,6	163,6	162,1	3,2

A Figura 32 mostra a relação entre as produtividades potenciais médias e a radiação solar e temperatura média para cada região. Com isso é possível verificar a influência da radiação e da temperatura na produtividade potencial para os diferentes locais. No caso de Santa Maria (RSSA), devido às baixas temperaturas e radiação solar, o desenvolvimento e o crescimento da cana-de-açúcar ocorrem em uma taxa menor do que nas demais regiões. Por meio da Figura 32 ainda é possível se verificar que a radiação solar possui maior peso na simulação da produtividade potencial, já que em Floriano (PIFL), mesmo com temperatura média anual de 29 °C e radiação média anual de 22 MJ m⁻² dia⁻¹, a produtividade potencial média, igual a 165,6 t ha⁻¹, foi cerca de 6 t ha⁻¹ menor do que em Natal (RNNA), onde a temperatura e radiação solar médias anuais são respectivamente da ordem de 26 °C e 23 MJ m⁻² dia⁻¹.

Figura 32 - Relação entre a produtividade potencial média anual da cana-planta de 12 meses e a radiação solar (○) e temperatura do ar (△) média anual para cada uma das localidades analisadas

4.4.2 Produtividade Atingível

Para a simulação das produtividades atingíveis o modelo considerou o estresse hídrico como fator de penalização do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. Dessa forma, as simulações apresentaram diferentes níveis de produtividade de acordo com a radiação solar, temperatura do ar, e da disponibilidade hídrica para cada tipo de solo, local e data de plantio. De maneira geral, as produtividades atingíveis da cana-planta de 12 meses para a condição de sequeiro foram maiores para as simulações que consideram um solo com maior capacidade de retenção de água (Figura 33).

Os diferentes níveis de produtividade entre os tipos de solo ocorreram em decorrência da quantidade de água disponível para a planta. Para a região Nordeste, os solos de maior predominância são os de baixa e média capacidade de retenção de água, enquanto que para a região centro-sul, a predominância é de solos de média a alta capacidade retenção de água (ANEXO B). Entretanto, algumas práticas de manejo como a manutenção da palhada na área podem contribuir para minimizar o déficit hídrico, já que isso reduz as taxas de evaporação do solo (COSTA, 2012), enquanto que o uso intensivo de máquinas nos canaviais promove a compactação do solo, e consequentemente afeta negativamente suas características físico-hídricas (RODRÍGUEZ et al., 2012).

Figura 33 - Produtividades potencial e atingível médias para cada localidade, de acordo com o tipo de solo considerado: NQd = Neossolo Quartzarênico distrófico; LVEd = Latossolo Vermelho-Escuro distrófico; LRd = Latossolo Roxo distrófico

Comparando-se as produtividades atingíveis médias em cada data de plantio é possível determinar qual a época de plantio que apresenta os maiores níveis de produtividade. No caso das localidades do litoral nordestino, em que a época chuvosa ocorre entre os meses de abril e setembro, as épocas de plantio que apresentaram maiores produtividades foram entre os meses setembro a abril (Figura 34a). Enquanto que para as regiões com período chuvoso entre outubro e março, as épocas de plantio que mais se destacaram pela produtividade foram entre abril e setembro (Figura 34b). Como o modelo não penaliza significativamente a cana-de-açúcar nas fases de emergência e perfilhamento, a cultura, quando simulada para as condições de sequeiro nos meses de inverno, sobrevive ao período de baixas temperaturas e seca enquanto ainda está em fase de estabelecimento, e chega ao período de chuvas com sistema radicular e dossel, mais desenvolvidos. Esses resultados explicam, em parte, a obtenção de bons resultados de algumas unidades sucroalcooleiras no plantio de inverno, em que há a obrigatoriedade de irrigação ou fertirrigação, ao menos na fase inicial de desenvolvimento da cultura (SEGATO et al., 2006).

Figura 34 - Produtividade potencial e atingível média da cana-planta de 12 meses para cada data de plantio e tipo de solo (NQd = Neossolo Quartzarênico distrófico; LVEd = Latossolo Vermelho-Escuro distrófico; LRd = Latossolo Roxo distrófico), para a região da Zona da Mata nordestina (a), e demais regiões brasileiras (b)

As produtividades atingíveis médias para as simulações que consideraram os solos de baixa (NQd), média (LVEd) e alta (LRd) capacidade de retenção de água foram, respectivamente, 69,6, 107,1 e 117,3 t ha⁻¹. A partir da Tabela 25 é possível observar que a produtividade atingível para o solo de baixa capacidade retenção (NQd) variou, entre todas as localidades, de 27,5 a 100,5 t ha⁻¹ e que os picos de variação ocorreram em Recife (PERE) e Petrolina (PEPE), localizados no estado de Pernambuco. Essa grande variação da produtividade em Pernambuco é reflexo das condições climáticas distintas que ocorrem no litoral e no interior nordestino. No entanto, vale ressaltar que os dados de produtividade obtidos para Recife (PERE) devem ser avaliados com certa cautela já que o modelo CSM-CANEGRO não considera a penalização da produtividade pelo excesso de água no solo.

Algumas localidades se destacaram com produtividades médias de sequeiro acima de 90 t ha⁻¹, como observado Araguaína (TOAR), Marabá (PAMA), Maceió (ALMA) e Diamantino (MTDI) (Tabela 25). Essas regiões apresentaram precipitação média anual acima de 1.800 mm e boa disponibilidade de radiação, entretanto também apresentaram período de seca intenso e valores médios de déficit hídricos anuais maiores que 380 mm (Tabela 21), para uma CAD de 100 mm. Em contrapartida, algumas localidades apresentaram valores de produtividade de cana-planta inferiores a 55 t ha⁻¹, como em Mocambinho (MGMO), Barreiras (BABA), Santa Maria (RSSA), e Bom Jesus (PIBO), regiões onde os déficits hídricos anuais médios superaram os 740 mm, com exceção para Santa Maria (RSSA), que apresentou baixos valores de produtividade devido às baixas temperaturas e disponibilidade de radiação solar durante o ciclo da cana-de-açúcar.

Tabela 25 - Produtividade atingível média da cana-planta de 12 meses, simulada pelo CSM-CANEGRO, para as diferentes localidades brasileiras, considerando-se um plantio por mês e o solo Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd), com seus respectivos valores anuais médios ($\bar{x}$) e desvios padrões (σ)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	$\bar{x}$	σ
ALMA	105,0	102,6	100,9	93,0	80,4	75,7	79,1	88,5	98,4	102,3	103,7	106,6	94,7	11,1
BABA	44,8	50,9	59,1	65,3	55,6	48,6	47,9	49,9	52,4	49,6	41,6	40,3	50,5	7,1
GOPI	68,3	74,7	83,5	91,1	81,6	77,6	80,8	84,1	83,2	75,3	67,0	65,4	77,7	7,9
GOFO	51,4	55,8	61,9	65,3	61,1	59,0	60,8	61,1	60,8	54,8	48,7	48,9	57,5	5,5
GOJA	68,9	71,9	79,8	87,2	85,3	83,1	85,5	87,2	85,4	79,0	72,1	69,2	79,5	7,2
MABA	57,4	62,5	68,5	77,8	74,4	62,2	61,7	63,4	70,0	65,8	57,3	53,7	64,6	7,1
MGCA	59,7	67,8	75,6	80,0	73,5	68,8	71,1	74,1	73,5	66,1	58,7	56,2	68,8	7,4
MGUB	63,8	69,4	77,7	82,5	79,4	77,4	80,2	81,1	79,2	73,9	66,4	63,0	74,5	7,0
MGMO	38,3	44,3	49,2	48,9	43,5	40,4	40,5	40,8	41,6	39,0	33,4	33,0	41,1	5,1
MGPO	49,9	55,1	59,8	60,8	58,7	58,8	59,4	59,1	57,3	52,0	45,6	45,1	55,1	5,6
MGJO	54,2	60,8	66,5	67,8	60,0	58,6	60,2	60,3	59,1	53,5	47,1	47,1	57,9	6,5
MSIV	71,2	75,0	77,6	76,7	76,5	74,5	73,4	72,0	70,5	68,8	68,4	68,7	72,8	3,3
MTDI	80,6	88,7	99,8	110,4	102,8	86,4	88,2	93,8	95,9	89,6	80,1	78,3	91,2	9,8
PAMA	83,7	84,2	90,4	103,9	111,1	104,1	91,1	93,5	102,8	98,6	91,1	86,8	95,1	8,8
PBJO	98,3	94,5	90,7	81,4	71,4	69,3	75,6	86,0	92,8	91,4	91,8	98,9	86,8	10,2
PEPE	23,4	24,5	27,7	31,4	31,8	30,5	28,2	27,5	26,9	28,5	26,1	23,7	27,5	2,8
PERE	112,1	109,9	108,1	99,5	89,0	82,7	83,9	93,1	101,6	107,5	108,4	110,9	100,5	10,8
PIBO	46,0	50,9	57,8	65,5	61,7	51,9	49,7	51,1	54,7	51,9	45,7	43,7	52,6	6,5
PIFL	46,9	51,4	59,1	70,5	78,4	60,7	54,9	53,4	55,1	57,7	54,2	49,3	57,6	8,9
PRMA	69,2	72,2	74,4	74,2	74,0	74,2	72,8	73,4	72,4	70,4	69,3	69,0	72,1	2,1
RNNA	88,9	83,7	75,9	67,8	63,6	64,8	72,8	82,8	86,2	83,5	84,6	87,1	78,5	9,1
RSSA	57,8	55,1	50,9	47,1	46,5	45,9	46,6	48,3	50,1	52,4	54,4	56,5	51,0	4,2
SEAR	84,3	81,6	77,1	66,3	58,4	58,3	65,7	75,7	82,8	82,5	80,0	82,7	74,6	9,8
SPPI	53,2	56,9	60,0	60,7	60,7	61,9	62,5	63,3	62,8	59,7	56,4	53,8	59,3	3,4
SPPR	61,3	65,3	68,8	69,6	69,0	68,6	69,0	68,4	68,2	65,7	62,5	61,5	66,5	3,1
SPCA	55,0	60,4	67,4	70,7	70,9	68,8	68,2	69,2	69,5	65,5	57,5	53,7	64,7	6,3
SPVO	59,6	65,8	71,7	75,1	75,0	72,1	72,7	72,8	72,7	68,6	61,4	58,2	68,8	6,1
TOPE	65,0	71,9	80,6	91,9	77,1	66,7	64,3	71,4	78,0	74,4	62,9	60,7	72,1	9,0
TOAR	86,5	90,5	97,3	107,6	110,0	87,0	92,9	102,3	102,3	94,0	87,3	86,0	95,3	8,5
TOPA	72,2	79,0	87,7	97,5	85,6	74,1	72,2	81,6	87,0	80,7	70,6	69,0	79,8	8,6
Média	65,9	69,2	73,5	76,3	72,2	67,1	67,7	71,0	73,1	70,1	65,1	64,2	69,6	7,0

Os valores médios de produtividade atingível simulados para o solo de textura média (LVEd) variaram, entre todas as localidades, de 44,3 a 141,5 t ha⁻¹ (Tabela 26), com destaque para Marabá (PAMA), Recife (PERE), Araguaína (TOAR) e Diamantino (MTDI) que apresentaram produtividades médias anuais acima de 130 t ha⁻¹. Entretanto, como mencionado anteriormente, essas regiões apresentam períodos de déficit hídrico intenso e, portanto, deverão requerer o uso de irrigação de salvamento para assegurar a rebrota dos canaviais ou mesmo a irrigação complementar, mais intensiva, como em Marabá (PAMA), onde a deficiência hídrica anual média supera os 780 mm (Tabela 21) (DALRI, 2006; PINTO et al., 2008). Vale ressaltar que a predominância de solos com textura média ocorre em maior parte na região centro-sul (ANEXO B).

Por outro lado, algumas localidades apresentaram valores médios de produtividade atingível inferiores a 70 t ha^{-1} , como no caso de Petrolina (PEPE) e Mocambinho (MGMO) devido aos altíssimos níveis de déficit hídrico. Para estes casos, o uso de irrigação complementar deve ser considerado para que níveis satisfatórios de produtividade de cana-de-açúcar sejam alcançados.

Tabela 26 - Produtividade atingível média da cana-planta de 12 meses, simulada pelo CSM-CANEGRO, para as diferentes localidades brasileiras, considerando-se um plantio por mês e o solo Latossolo Vermelho Escuro distrófico (LVEd), com seus respectivos valores anuais médios ($\bar{X}$) e desvios padrões (σ)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	$\bar{X}$	σ
ALMA	135,4	133,4	129,8	123,9	117,3	108,9	107,4	113,1	123,5	131,9	135,0	136,5	124,7	10,7
BABA	68,3	77,7	88,0	97,4	100,2	97,5	94,6	93,6	89,4	83,0	68,2	62,5	85,0	13,0
GOPI	98,4	103,3	112,1	123,2	129,9	130,2	130,7	127,4	122,0	111,1	100,2	97,9	115,5	13,2
GOFO	75,9	82,0	91,6	104,5	110,8	111,6	109,9	107,0	100,1	87,9	75,0	72,9	94,1	15,0
GOJA	104,3	107,1	114,9	125,2	131,6	132,2	131,9	129,4	124,2	114,5	105,4	103,5	118,7	11,7
MABA	85,9	90,9	97,4	110,2	118,3	118,4	116,1	113,6	110,6	105,0	92,7	84,9	103,7	12,7
MGCA	90,2	99,7	109,8	118,6	120,6	120,1	120,8	118,2	113,8	105,5	91,0	85,3	107,8	13,2
MGUB	97,7	103,7	113,6	126,0	132,6	132,7	132,0	128,9	123,3	112,4	101,1	96,9	116,8	14,2
MGMO	58,1	69,2	75,7	81,4	81,8	77,9	75,9	72,6	69,2	62,9	52,5	49,7	68,9	10,9
MGPO	75,8	84,0	92,1	102,2	105,5	107,3	105,9	102,8	96,6	85,0	70,2	67,9	91,3	14,4
MGJO	81,5	91,0	98,9	107,7	111,1	111,2	110,6	107,3	101,7	89,9	74,4	72,4	96,5	14,4
MSIV	112,0	118,5	123,5	124,3	123,8	121,8	118,5	114,1	109,1	105,6	105,5	107,6	115,4	7,3
MTDI	121,3	127,2	137,1	144,7	147,0	145,4	144,6	143,3	139,5	131,2	122,2	120,9	135,4	10,3
PAMA	126,0	125,7	132,5	144,1	151,4	151,9	151,0	150,4	148,9	145,8	138,4	131,5	141,5	10,2
PBJO	130,6	125,6	121,5	115,3	107,7	103,8	106,6	115,9	126,4	131,5	132,7	132,6	120,8	10,7
PEPE	34,6	35,4	40,2	48,8	53,8	54,8	53,0	49,1	45,0	42,1	38,7	36,1	44,3	7,5
PERE	137,3	135,4	133,5	130,5	126,0	117,9	113,6	119,3	129,5	136,4	138,4	138,9	129,7	8,7
PIBO	70,4	76,5	85,3	97,5	104,4	104,0	99,8	96,7	92,9	88,3	76,8	69,7	88,5	12,7
PIFL	72,3	76,6	88,4	105,1	116,0	117,8	115,8	109,3	104,1	100,9	93,9	83,1	98,6	15,7
PRMA	113,3	117,4	122,2	123,2	123,4	122,1	119,5	116,8	113,2	109,8	109,6	109,6	116,7	5,4
RNNA	129,1	121,8	112,5	105,2	100,8	101,0	106,9	118,5	128,7	131,7	132,2	131,7	118,3	12,5
RSSA	95,9	95,6	89,6	79,7	74,3	72,5	72,0	73,0	75,7	79,6	86,2	91,2	82,1	9,1
SEAR	119,8	117,3	112,2	101,9	90,5	88,8	95,7	104,6	113,7	118,1	120,2	121,3	108,7	12,0
SPPI	86,5	91,8	98,8	105,7	108,2	109,1	107,6	105,8	101,6	95,7	89,3	85,9	98,8	8,8
SPPR	98,8	103,8	110,2	112,5	113,9	113,3	111,5	109,5	105,3	101,1	97,7	96,7	106,2	6,4
SPCA	87,4	94,8	103,7	110,7	113,7	114,0	113,9	113,4	109,8	103,3	92,5	84,8	103,5	10,9
SPVO	92,8	100,7	109,2	116,0	120,4	120,2	120,1	118,4	114,1	108,2	97,5	91,5	109,1	10,9
TOPE	96,6	103,4	112,9	126,0	130,8	129,1	126,1	125,1	123,2	116,6	100,7	95,2	115,5	13,3
TOAR	126,0	128,4	133,1	140,8	145,7	146,4	147,2	145,9	142,2	134,3	126,9	126,0	136,9	8,7
TOPA	106,0	111,4	119,3	129,9	134,4	133,7	131,7	131,0	127,9	119,9	107,3	105,1	121,5	11,4
Média	97,6	101,6	107,0	112,7	114,9	113,9	113,0	112,5	110,8	106,3	99,1	96,3	107,1	11,2

As simulações de produtividade atingível da cana-planta para as condições de solo com textura argilosa (LRd) apresentaram médias anuais, entre os locais, variando entre $40,8$ a $147,1 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabela 27), com destaque novamente para a região de Marabá (PAMA), Araguaína (TOAR) e Diamantino (MTDI) que apresentaram produtividades médias anuais acima das 140 t ha^{-1} . Esses resultados mostram que o modelo simula uma alta resposta na

produtividade da cana-de-açúcar quando em condições favoráveis de radiação solar e, principalmente, de disponibilidade hídrica elevada. Entretanto, o modelo parece falhar ao penalizar a produtividade da cana-de-açúcar quando as plantas passam por períodos de 2 a 3 meses de estresse hídrico intenso, durante as fases iniciais do ciclo.

Novamente, Petrolina (PEPE) e Mocambinho (MGMO) foram os locais que apresentaram os dois menores valores de produtividade média entre os locais do estudo. Contudo, foi observada uma diferença acentuada de 40 t ha⁻¹ entre os dois locais. Em Petrolina (PEPE), o valor de produtividade atingível média para o solo de textura argilosa foi menor do que o valor para textura média. Esses resultados parecem indicar que o modelo simula um menor potencial de absorção de água pelas raízes em solos com baixa condutividade hidráulica, no caso do Latossolo Escuro distrófico (SINGELS et al., 2010).

Tabela 27 - Produtividade atingível média da cana-planta de 12 meses, simulada pelo CSM-CANEGRO, para as diferentes localidades, considerando-se um plantio por mês e o solo Latossolo Roxo distrófico (LRd), com seus respectivos valores anuais médios ($\bar{X}$) e desvios padrões (σ)

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	$\bar{X}$	σ
ALMA	142,8	142,5	140,1	135,0	130,5	119,1	113,3	117,0	127,5	136,2	140,2	142,4	132,2	10,7
BABA	76,6	86,9	98,6	109,1	111,5	107,7	104,9	103,3	101,1	94,0	81,7	72,9	95,7	13,2
GOPI	107,0	110,7	119,2	130,2	137,8	138,8	140,0	138,9	134,3	124,0	112,7	109,7	125,3	12,9
GOFO	84,6	92,5	104,1	118,1	125,3	126,6	126,9	124,6	118,6	107,7	91,9	85,1	108,8	16,7
GOJA	114,0	114,8	121,8	131,8	137,8	138,7	138,7	137,3	134,1	126,9	118,1	115,9	127,5	10,1
MABA	95,9	99,0	106,8	120,6	129,1	128,6	125,9	124,5	122,0	118,0	107,2	98,1	114,6	12,5
MGCA	99,5	109,7	121,2	130,8	132,0	130,9	131,8	131,2	127,9	121,7	107,8	97,9	120,2	13,1
MGUB	107,3	111,3	122,3	135,4	140,4	140,9	141,0	139,8	136,0	128,0	116,6	110,6	127,5	13,2
MGMO	66,4	79,9	88,5	95,9	95,2	89,4	87,8	84,5	81,0	74,2	63,1	57,6	80,3	12,5
MGPO	84,2	94,0	104,5	115,6	117,9	119,1	119,4	117,7	112,6	101,8	86,8	79,7	104,4	14,9
MGJO	90,7	102,2	112,4	123,5	125,0	126,2	126,4	125,4	118,8	108,4	91,4	84,3	111,2	15,6
MSIV	130,0	135,1	138,6	139,8	139,3	136,7	133,1	128,9	124,7	122,2	122,6	125,6	131,4	6,6
MTDI	129,5	133,8	143,2	149,7	150,5	149,1	148,7	148,3	146,7	141,4	132,3	130,1	141,9	8,3
PAMA	133,3	132,7	139,1	149,8	155,4	155,0	153,9	153,4	152,8	151,5	147,7	140,4	147,1	8,4
PBJO	139,1	136,0	133,1	128,8	122,9	115,2	114,7	122,1	132,5	138,0	139,5	139,9	130,2	9,3
PEPE	30,7	32,5	37,4	46,3	52,4	53,1	50,3	46,3	40,6	36,3	33,1	30,8	40,8	8,5
PERE	146,7	146,3	145,3	143,4	140,5	131,2	122,8	126,1	135,7	142,8	145,3	146,8	139,4	8,5
PIBO	78,2	83,9	94,5	107,2	114,3	112,3	107,6	103,8	101,7	96,8	87,0	79,1	97,2	12,7
PIFL	76,2	76,8	89,1	106,9	118,3	119,8	115,7	107,7	98,9	97,2	91,9	85,1	98,6	15,3
PRMA	132,5	135,9	139,0	139,8	138,6	137,0	134,8	131,6	129,0	127,6	128,4	129,1	133,6	4,5
RNNA	139,4	135,8	128,0	120,8	113,2	110,2	115,0	125,4	135,5	138,2	139,2	139,8	128,4	11,2
RSSA	111,8	114,3	108,5	95,6	87,4	84,6	83,1	83,1	85,5	90,6	98,9	105,6	95,8	11,7
SEAR	128,3	127,9	124,5	116,0	104,0	96,7	101,4	109,9	119,3	123,7	126,1	128,4	117,2	11,5
SPPI	100,7	103,9	110,7	119,3	123,3	123,1	121,0	119,4	117,0	112,5	106,8	102,5	113,4	8,3
SPPR	112,5	117,4	123,2	125,7	125,8	124,8	123,1	121,1	119,6	117,6	115,3	112,0	119,8	4,9
SPCA	96,6	102,7	112,9	121,3	123,5	123,7	123,5	123,3	122,0	118,5	110,5	99,5	114,8	10,2
SPVO	102,7	109,9	120,6	128,6	130,6	129,8	129,3	129,2	127,1	122,5	115,0	106,0	120,9	10,1
TOPE	106,4	113,2	123,1	136,7	141,7	139,9	137,4	138,1	136,1	130,9	117,3	107,4	127,3	13,2
TOAR	134,3	135,3	139,9	146,2	149,9	150,3	150,4	150,1	148,2	143,8	135,7	133,2	143,1	7,0
TOPA	113,6	118,9	127,0	137,5	141,6	140,8	139,5	139,7	137,4	131,3	119,1	113,6	130,0	11,0
Média	107,1	111,2	117,2	123,5	125,2	123,3	122,0	121,7	120,8	117,5	111,0	107,0	117,3	10,9

A região de Floriano (PIFL) apresentou valor médio de déficit hídrico anual igual a 1.354 mm (Tabela 21), esse valor foi próximo ao encontrado para Petrolina (PEPE), e mesmo assim a região de Floriano (PIFL) apresentou valores de produtividade muito superiores aos simulados para a região de Petrolina (PEPE). Porém, enquanto que a precipitação anual média de Floriano (PIFL) foi de 975 mm, a região de Petrolina (PEPE) apresentou o valor médio de 485 mm (Tabela 17). Neste caso, como o modelo simula uma alta resposta de recuperação da cana-de-açúcar ao déficit hídrico, mesmo após período intenso de estresse hídrico, a produtividade tende a ser elevada em regiões que apresentam curtos períodos de boa disponibilidade hídrica e elevada radiação solar e temperatura do ar, durante todo o ciclo.

Como o método de quantificação dos fatores de estresse hídrico considerados pelo modelo, assim como o método de balanço de água no solo, diferem-se do método utilizado para o cálculo do déficit hídrico climatológico, de Thornthwaite e Mather (1955), utilizado na caracterização climática das regiões analisadas, não houve correlação entre a produtividade final simulada e o déficit hídrico médio anual. Por outro lado, a relação entre a produtividade atingível e a evapotranspiração real ao longo do ciclo, simuladas pelo CSM-CANEGRO, foi bem evidente (Figura 35).

Figura 35 - Relação entre os valores médios anuais de produtividade atingível e a evapotranspiração real total ao longo do ciclo da cana-planta de 12 meses, simulados para todos os locais, tipos de solo e época de plantio, pelo modelo CSM-CANEGRO

A partir da Figura 35 é possível verificar um incremento de 12,45 t ha⁻¹ para cada 100 mm de água evapotranspirada durante o ciclo da cana-de-açúcar. Esse resultado pode ser

associado ao encontrado por Monteiro (2012), que verificou quebra de produtividade na cana-de-açúcar de 11,2 t ha⁻¹ para cada 100 mm de déficit hídrico. Entretanto, este autor menciona que algumas diferenças entre os valores de quebra de produtividade em função da deficiência hídrica basicamente ocorrem devido a aspectos como manejo da cultura, textura e estrutura do solo, variedade e adubação. Nesse sentido, as relações entre a evapotranspiração real da cana-de-açúcar e a precipitação total no ciclo para cada tipo de solo e localidade simulados pelo CSM-CANEGRO foram determinadas. A Figura 36 mostra que em solos com textura mais argilosa e capacidade de retenção de água maior, a cana-de-açúcar apresenta maiores taxas de evapotranspiração real em relação aos solos com menor capacidade de retenção de água. Dessa forma é possível verificar o efeito positivo do manejo do solo, voltado para o aumento da capacidade de água disponível, na evapotranspiração real que está intimamente relacionada à produtividade final dos canaviais (COSTA, 2012; MONTEIRO e SENTELHAS, 2013).

Figura 36 - Relação entre a evapotranspiração real simulada e a precipitação total para o ciclo da cana-planta de 12 meses, considerando-se os diferentes tipos de solo, com baixa (NQd), média (LVEd) e alta (LRd) capacidade de retenção de água, em diferentes regiões brasileiras

Por apresentar precipitação total, no ciclo da cana-planta abaixo de 500 mm, a região de Petrolina (PEPE) foi a que apresentou os menores níveis de produtividade atingível. Enquanto que nas regiões de Mocimbinho (MGMO), Floriano (PIFL), Balsas (BABA) e Bom Jesus (PIBO), onde foram observadas precipitações totais no ciclo entre 750 a 1.000 mm ciclo⁻¹, a evapotranspiração real da cultura variou entre 300 a 800 mm para os três tipos de solo, mostrando a importância do manejo do solo para essas regiões (Figura 36). A região de Recife (PERE) apresentou os maiores índices pluviométricos, mas não necessariamente

atingiu os maiores valores de evapotranspiração real devido ao fato de que a região, também, não apresentou temperaturas muito elevadas.

4.5 Risco climático para a cana-de-açúcar em diferentes regiões produtoras

Com base na relação entre a produtividade atingível e potencial (eq. (20)) simuladas para cada condição de solo, data de plantio e local, foram definidos os riscos climáticos para o cultivo de cana-planta, estabelecendo-se os níveis probabilísticos de ocorrência da eficiência climática (η), expressos na Tabela 15.

Dois cenários foram empregados de acordo com os limiares de eficiência climática (η), sendo $\eta = 0,65$ para o cenário de menor risco e $\eta = 0,45$ para o cenário de maior risco. Em termos de produtividade, considerando-se que o nível de produtividade potencial médio entre as localidades foi de 162 t ha^{-1} (Figura 33), o cenário de menor risco climático apresentou, em média, as probabilidades de ocorrência de produtividades de cana-planta de sequeiro acima de 105 t ha^{-1} . Enquanto que o cenário de maior risco apresentou, em média, as probabilidades de ocorrência de produtividades de cana-planta de sequeiro acima de 73 t ha^{-1} .

4.5.1 Cenário de menor risco climático

Considerando-se um cenário otimista, em que a produtividade atingível chegue pelo menos a 65% da produtividade potencial, o risco foi classificado como muito alto para a maioria das regiões com cultivo de cana-de-açúcar em solo de baixa capacidade de retenção de água (NQd) (Figura 37). Nessas condições, as únicas localidades que apresentaram valores de risco climático classificado como moderado e alto foram Maceió (ALMA), Diamantino (MTDI), Marabá (PAMA), Recife (PERE) e Araguaína (TOAR). Para essas regiões, a chance de ocorrer produtividades de sequeiro acima de 65% da produtividade potencial está entre 40 e 80% de probabilidade, apenas em algumas épocas de plantio. Nas demais regiões, a probabilidade de ocorrência de produtividade de sequeiro maior ou igual a 65% da potencial, foi igual a zero.

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	50	43	30	13	0	0	0	7	43	53	50	60
BABA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GOPI	0	0	0	3	7	0	0	3	0	0	0	0
GOFO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GOJA	0	0	3	7	7	3	7	10	3	0	0	0
MABA	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0
MGCA	0	0	0	7	0	0	0	0	3	0	0	0
MGUB	0	0	0	3	3	0	3	7	7	3	3	3
MGMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MGPO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MGJO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MSIV	0	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0
MTDI	0	10	20	77	53	20	10	13	10	7	0	0
PAMA	3	0	10	40	60	43	27	23	43	33	10	10
PBJO	27	17	7	7	0	0	0	3	17	23	20	27
PEPE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PERE	67	50	50	20	7	3	3	10	53	73	60	73
PIBO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PIFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PRMA	0	0	0	0	0	7	3	3	0	0	0	0
RNNA	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	10	7
RSSA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEAR	3	0	3	0	0	0	0	0	3	3	3	0
SPPI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SPPR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SPCA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SPVO	0	0	0	3	0	0	3	3	3	3	3	0
TOPE	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0
TOAR	3	7	23	57	67	20	20	50	43	10	7	3
TOPA	0	0	3	30	33	3	0	0	3	0	0	0
Legenda	> 80% Baixo Risco			80% - 60% Moderado			60% - 40% Alto			< 40% Muito Alto		

Figura 37 - Risco climático para cultura da cana-de-açúcar associado à probabilidade de ocorrência de eficiência climática (η) maior ou igual a 0,65, considerando-se um solo com baixa capacidade de retenção de água (Neossolo Quartzarênico distrófico), em diferentes localidades brasileiras e épocas de plantio

Conforme a capacidade de água disponível no solo aumenta, o risco climático diminui para grande parte das regiões do estudo. Considerando-se o solo com capacidade média de retenção de água (LVEd) (Figura 38), apenas as regiões de Petrolina (PEPE), Barreiras (BABA) e Mocambinho (MGMO) apresentaram risco climático muito alto durante todas as épocas de plantio. Enquanto que para as demais regiões há uma diminuição do risco climático, especialmente nas melhores épocas de plantio (Figura 38). As regiões de

Diamantino (MTDI) e Araguaína (TOAR) se destacaram, apresentando baixo risco climático em todas as épocas de plantio nas simulações considerando solo de textura média (LVed).

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	100	97	77	73	67	57	53	70	90	97	100	100
BABA	0	0	10	27	33	37	30	33	23	7	0	0
GOPI	23	53	77	100	100	100	100	100	97	87	30	30
GOFO	0	3	10	43	63	73	73	70	43	0	0	0
GOJA	50	50	90	97	100	100	100	100	100	90	53	50
MABA	0	10	17	63	90	83	83	77	60	47	23	7
MGCA	7	30	53	77	90	90	100	93	83	57	10	7
MGUB	20	37	77	100	100	100	100	100	100	83	37	23
MGMO	0	0	0	0	3	3	0	3	0	0	0	0
MGPO	3	7	23	40	57	77	70	67	37	7	3	3
MGJO	3	3	20	57	60	53	63	57	47	17	3	0
MSIV	70	77	87	83	87	83	73	77	70	70	60	60
MTDI	90	93	100	100	100	100	100	100	100	100	90	90
PAMA	77	87	90	100	100	100	100	100	97	97	100	87
PBJO	93	87	73	60	53	40	50	83	97	97	97	97
PEPE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PERE	100	100	100	90	87	77	80	87	100	100	100	100
PIBO	0	0	3	23	53	47	30	30	23	17	0	0
PIFL	10	3	0	50	63	70	67	60	53	40	33	13
PRMA	73	73	90	87	97	97	93	93	90	77	73	60
RNNA	87	73	47	33	27	30	50	77	90	90	90	90
RSSA	57	43	23	13	10	13	20	23	40	63	77	67
SEAR	67	60	50	30	23	17	23	33	77	83	83	77
SPPI	13	23	40	53	73	77	77	77	67	40	20	7
SPPR	33	40	50	60	70	70	73	77	70	60	33	33
SPCA	17	23	43	60	73	83	87	90	87	57	17	13
SPVO	23	33	50	70	83	83	87	90	83	73	17	20
TOPE	20	37	73	100	100	100	100	100	100	87	37	13
TOAR	87	97	97	100	100	100	100	100	100	100	93	90
TOPA	57	60	87	93	93	93	90	93	87	83	63	53
Legenda		> 80% Baixo Risco			80% - 60% Moderado			60% - 40% Alto			< 40% Muito Alto	

Figura 38 - Risco climático para cultura da cana-de-açúcar associado à probabilidade de ocorrência de eficiência climática (η) maior ou igual a 0,65, considerando-se um solo com média capacidade de retenção de água (Latossolo Vermelho Escuro distrófico), em diferentes localidades brasileiras e épocas de plantio

Para as condições de sequeiro da cana-planta, simuladas considerando-se o solo de alta capacidade de retenção de água (LRd), o risco climático foi ainda menor (Figura 39). A maioria dos locais apresentou pelo menos uma época de plantio classificada como de baixo

risco climático, com destaque novamente para as regiões de Diamantino (MTDI) e Araguaína (TOAR), como também de Ivinhema (MSIV) e Marabá (PAMA), que apresentaram baixo risco climático em todas as épocas de plantio. Em contrapartida, em Petrolina (PEPE) e Mocambinho (MGMO) a classificação de alto risco climático se manteve em todas as épocas de plantio ao longo do ano.

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	100	100	100	87	80	70	63	73	97	100	100	100
BABA	3	13	37	60	80	70	60	57	53	33	3	3
GOPI	53	70	90	100	100	100	100	100	100	100	80	57
GOFO	7	13	50	83	100	100	100	100	93	60	10	7
GOJA	80	73	93	100	100	100	100	100	100	100	87	73
MABA	30	30	53	90	93	97	97	97	87	83	50	30
MGCA	30	50	90	100	100	100	100	100	100	93	63	30
MGUB	43	63	97	100	100	100	100	100	100	100	80	60
MGMO	0	3	13	27	23	13	20	20	10	7	3	0
MGPO	10	13	57	83	90	93	93	93	90	60	13	10
MGJO	10	30	60	90	83	90	90	87	80	60	23	10
MSIV	87	87	97	97	97	97	97	97	90	90	90	90
MTDI	93	93	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97
PAMA	90	90	97	100	100	100	100	100	100	100	100	97
PBJO	97	100	97	83	70	67	73	87	100	100	100	100
PEPE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PERE	100	100	100	100	90	87	90	93	100	100	100	100
PIBO	7	10	10	60	63	60	50	43	47	33	20	7
PIFL	13	10	10	50	67	77	63	57	43	40	30	23
PRMA	97	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100
RNNA	93	90	83	70	50	47	63	87	93	93	93	93
RSSA	87	83	73	43	37	40	47	60	77	80	87	90
SEAR	87	80	70	57	37	30	30	43	87	93	93	93
SPPI	47	53	67	83	93	93	97	97	97	93	80	50
SPPR	57	73	90	90	90	87	87	87	80	87	77	63
SPCA	33	43	67	90	90	93	100	100	100	97	77	37
SPVO	40	57	77	97	97	93	97	97	97	93	87	40
TOPE	57	67	90	100	100	100	100	100	100	100	93	57
TOAR	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TOPA	70	80	93	97	97	97	97	97	97	97	80	77
Legenda	> 80% Baixo Risco			80% - 60% Moderado			60% - 40% Alto			< 40% Muito Alto		

Figura 39 - Risco climático para cultura da cana-de-açúcar associado à probabilidade de ocorrência de eficiência climática (η) maior ou igual a 0,65, considerando-se um solo com alta capacidade de retenção de água (Latossolo Roxo distrófico), em diferentes localidades brasileiras e épocas de plantio

Vale ressaltar que para a prática do plantio de inverno na região centro-sul é extremamente necessário o uso de irrigação e/ou fertirrigação para se garantir a emergência dos toletes de cana-de-açúcar (SEGATO et al., 2006), uma vez que o modelo CSM-CANEGRO não considera a morte da planta ou da gema por estresse hídrico severo (JONES e SINGELS, 2008). Para o plantio nas localidades da região Sul, como em Santa Maria (RSSA), o risco das geadas prejudicarem severamente os canaviais é grande (MARIN et al., 2009), e isto também não é quantificado pelo CSM-CANEGRO.

Em condições extremas de seca, como em Petrolina (PEPE) e Mocambinho (MGMO), o risco climático para o cenário otimista foi classificado como baixo em todos os plantios e em todos os tipos de solo. Para esses locais, o manejo do solo não é o bastante para garantir incrementos significativos de produtividade e, portanto, é extremamente necessário o uso de irrigação complementar ou plena para o plantio de cana-de-açúcar nessas regiões. Por outro lado, em regiões como a de Marabá (PAMA), com períodos de altos índices pluviométricos seguido de seca severa, é preciso considerar a qualidade da cana em termos dos teores de açúcar no colmo, já que a seca severa pode dificultar a extração do caldo dos colmos, devido à sua intensa desidratação (CARDOZO e SENTELHAS, 2013). Esse ponto é ainda mais importante se considerarmos que o modelo CSM-CANEGRO não considera a maturação fisiológica da cana-de-açúcar, mas somente simula o acúmulo de sacarose em decorrência do crescimento do colmo (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002).

4.5.2 Cenário de maior risco climático

O cenário de maior risco climático considera que a produtividade atingível chegue pelo menos a 45% da produtividade potencial, o que fez com que os riscos climáticos para a cana-planta diminuíssem especialmente para as condições de solo de baixa capacidade de retenção de água (NQd). Para este tipo de solo, foram observadas as quatro classes de risco climático que variaram entre os locais e as datas de plantio. Como as produtividades potenciais se mantiveram praticamente constantes, com exceção de Santa Maria (RSSA) devido às condições climáticas, as variações de risco climático entre as datas de plantio seguiu a ordem das épocas de plantio que apresentaram os maiores níveis de produtividade atingível (Figura 34).

Assim, para a condição de solo de baixa capacidade de retenção (Tabela 31), algumas regiões como Uberlândia (MGUB), João Pessoa (PBJO), Natal (RNNA), Aracaju (SEAR), Peixe (TOPE) e Palmas (TOPA) apresentaram alta variabilidade no risco climático,

apresentando todas as classes de risco entre as datas de plantio simuladas (Figura 40). Por outro lado, Ivinhema (MSIV) apresentou a mesma classe de risco durante todas as datas de plantio, evidenciando maior estabilidade climática. Dentre as localidades que se destacaram com menor risco climático estão Maceió (ALMA), Diamantino (MTDI), Marabá (PAMA), Recife (PERE) e Araguaína (TOAR), que apresentaram classes de risco climático moderado e baixo na maioria das datas de plantio. Já as demais localidades apresentaram classes de risco entre alta e muito alta na maioria das datas de plantio.

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	97	97	97	80	67	63	73	87	97	97	97	97
BABA	0	0	10	17	13	0	0	0	0	0	0	0
GOPI	30	63	87	100	67	67	73	83	93	67	23	23
GOFO	0	3	7	20	7	7	7	10	7	0	0	0
GOJA	43	47	80	93	83	90	97	97	93	73	53	40
MABA	3	10	27	73	50	13	10	23	40	23	3	3
MGCA	7	17	47	77	50	30	47	50	47	17	10	10
MGUB	17	33	63	73	73	70	87	87	73	53	27	20
MGMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MGPO	3	7	10	10	7	7	10	10	3	3	3	3
MGJO	3	7	17	20	10	7	17	13	10	0	0	0
MSIV	43	50	53	50	57	57	53	57	50	47	43	50
MTDI	73	93	100	100	100	90	90	97	100	100	73	63
PAMA	60	70	83	97	97	87	80	87	97	90	80	67
PBJO	90	83	80	63	37	33	53	90	93	80	80	97
PEPE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PERE	100	100	100	93	77	73	87	90	100	100	97	100
PIBO	0	0	3	23	30	3	0	3	7	0	0	0
PIFL	3	3	7	40	57	17	3	3	3	10	7	10
PRMA	30	33	53	53	43	47	57	63	60	57	40	40
RNNA	77	67	40	13	10	23	47	77	83	73	60	70
RSSA	23	7	3	3	7	3	7	10	27	50	43	37
SEAR	70	60	40	23	13	13	17	63	80	70	70	60
SPPI	3	7	13	17	17	20	37	37	37	10	7	7
SPPR	13	13	20	30	37	37	40	40	43	37	17	20
SPCA	13	17	30	47	43	40	40	50	50	33	13	13
SPVO	17	27	33	47	53	57	53	60	53	23	13	13
TOPE	10	40	80	100	43	13	7	40	67	50	10	3
TOAR	83	90	97	100	100	83	90	100	100	97	83	77
TOPA	50	67	87	90	60	53	57	77	80	70	47	37
Legenda	> 80% Baixo Risco			80% - 60% Moderado			60% - 40% Alto			< 40% Muito Alto		

Figura 40 - Risco climático para cultura da cana-de-açúcar associado à probabilidade de ocorrência de eficiência climática (η) maior ou igual a 0,45, considerando-se um solo com baixa capacidade de retenção de água (Neossolo Quartzarênico distrófico), em diferentes localidades brasileiras e épocas de plantio

Assim como no cenário de menor risco, ao passo que a capacidade de retenção de água no solo aumentou, o risco climático diminuiu para grande parte das regiões do estudo. No caso das simulações que consideraram o solo de média capacidade de retenção de água (LVEd) (Figura 41), a classe de baixo risco climático ocorreu em todas as localidades, com exceção de Petrolina (PEPE) e Mocambinho (MGMO), devido principalmente aos baixos níveis de precipitação que ocorrem nessas regiões.

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	100	100	100	100	93	90	97	100	100	100	100	100
BABA	30	67	90	100	97	97	93	93	83	73	50	20
GOPI	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97
GOFO	63	80	100	100	100	100	100	100	100	90	60	47
GOJA	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MABA	83	93	93	100	100	100	100	100	97	97	80	73
MGCA	90	97	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80
MGUB	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MGMO	10	23	47	67	63	57	53	50	37	17	10	3
MGPO	67	90	100	100	100	100	100	100	97	87	47	40
MGJO	70	97	97	100	97	100	100	100	100	83	43	43
MSIV	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MTDI	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PAMA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PBJO	100	100	100	100	93	97	100	100	100	100	100	100
PEPE	0	0	3	3	7	10	10	7	7	0	0	0
PERE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PIBO	33	53	77	93	97	97	97	90	80	77	47	33
PIFL	37	47	70	100	100	100	100	100	97	93	83	60
PRMA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RNNA	100	100	97	93	83	90	93	100	100	100	100	100
RSSA	93	93	93	83	80	80	87	93	93	93	93	93
SEAR	100	97	90	87	70	73	87	97	100	100	100	100
SPPI	87	93	100	100	100	100	100	97	97	97	93	87
SPPR	97	97	100	100	100	100	100	100	100	97	93	93
SPCA	83	97	100	100	100	100	100	100	100	100	93	77
SPVO	87	93	97	100	100	100	100	100	100	100	97	90
TOPE	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	93
TOAR	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TOPA	100	100	100	100	100	100	100	97	97	97	93	90
Legenda	> 80% Baixo Risco			80% - 60% Moderado			60% - 40% Alto			< 40% Muito Alto		

Figura 41 - Risco climático para cultura da cana-de-açúcar associado à probabilidade de ocorrência de eficiência climática (η) maior ou igual a 0,45, considerando-se um solo com média capacidade de retenção de água (Latosolo Vermelho Escuro distrófico), em diferentes localidades brasileiras e épocas de plantio

Assim como no solo de textura média, as simulações que consideraram o solo com alta capacidade de retenção de água (LRe) apresentaram baixo risco climático em todas as localidades (Figura 42), com exceção apenas para a região de Petrolina (PEPE), onde novamente a condição foi de alto risco climático em todas as épocas de plantio. Esses resultados mostram que para as condições de Petrolina (PEPE), somente a textura do solo não foi suficiente para que a cana-planta atingisse ao menos 45% da produtividade potencial em mais de 20% dos anos, o que indica que o uso da irrigação intensiva é imprescindível para a produção de cana-de-açúcar nessa região.

Estação	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	100	100	100	100	97	97	97	100	100	100	100	100
BABA	63	87	97	100	100	100	100	97	97	90	73	57
GOPI	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
GOFO	87	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93	87
GOJA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MABA	83	97	100	100	100	100	97	97	97	97	97	90
MGCA	93	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87
MGUB	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MGMO	27	60	73	87	83	77	73	63	63	50	23	20
MGPO	80	97	100	100	100	100	100	100	100	93	80	73
MGJO	90	97	97	100	100	100	100	100	97	97	83	73
MSIV	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MTDI	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PAMA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PBJO	100	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	100
PEPE	0	0	3	7	10	20	17	17	10	3	0	0
PERE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PIBO	60	70	83	97	100	100	100	100	97	87	73	57
PIFL	47	50	77	100	100	100	100	100	87	87	77	60
PRMA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RNNA	100	100	100	93	93	90	100	100	100	100	100	100
RSSA	93	93	93	90	87	90	90	90	93	93	93	93
SEAR	100	100	100	90	83	80	90	100	100	100	100	100
SPPI	97	100	100	100	100	100	100	100	100	97	93	93
SPPR	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93
SPCA	87	93	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90
SPVO	90	97	97	100	100	100	100	100	100	100	100	97
TOPE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TOAR	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TOPA	100	100	100	100	100	100	100	97	97	97	97	93
Legenda	> 80% Baixo Risco			80% - 60% Moderado			60% - 40% Alto			< 40% Muito Alto		

Figura 42 - Risco climático para cultura da cana-de-açúcar associado à probabilidade de ocorrência de eficiência climática (η) maior ou igual a 0,45, considerando-se um solo com alta capacidade de retenção de água (Latossolo Roxo distrófico), em diferentes localidades brasileiras e épocas de plantio

4.6 Benefícios da irrigação complementar para o incremento de produtividade da cana-de-açúcar

Os valores simulados de produtividade da cana-planta, considerando-se as estratégias de irrigação (Tabela 13) apresentaram incremento na produtividade para todos os locais avaliados. A partir da Tabela 28 é possível observar o efeito dos diferentes tratamentos de irrigação nas produtividades médias da cana-de-açúcar. Cada tratamento refere-se ao número de aplicações da lâmina líquida igual a 30 mm, sendo assim, o incremento no volume de água irrigada no ciclo da cana-planta variou de 30 a 150 mm (IR01 a IR05).

Em termos absolutos, a eficiência do uso da água aplicada via irrigação pela cana-planta simulada foi, em média, igual a 6,7 t ML⁻¹ (ou 6,7 t por 100 mm). As regiões de Petrolina (PEPE), Natal (RNNA) e Aracaju (SEAR) obtiveram valores médios de eficiência do uso da água irrigada acima de 8 t ML⁻¹, enquanto que em Diamantino (MTDI), Marabá (PAMA) e Santa Maria (RSSA) ocorreram os menores valores médios de eficiência do uso água, que foram, respectivamente, 5,0, 4,8 e 1,7 t ML⁻¹. Esses resultados refletem diretamente as intensidades dos déficits hídricos em cada região, pois nas regiões de maior déficit hídrico, a resposta à irrigação será mais acentuada do que nas regiões de menores deficiências hídricas. Além disso, a disponibilidade de energia solar de cada local também afeta essa relação, já que o acúmulo de biomassa da cana-de-açúcar simulado pelo CSM-CANEGRO será maior nas regiões de menor nebulosidade, ou seja, onde ocorre menos chuva.

Tabela 28 - Produtividades médias (t ha⁻¹) da cana-planta de 12 meses, simuladas pelo CSM-CANEGRO, considerando-se a condição potencial (PP), de sequeiro (Seq.) e irrigada, de acordo com cinco estratégias de irrigação complementar (IR), para diferentes localidades brasileiras

Locais	Seq.	IR01	IR02	IR03	IR04	IR05	PP	Locais	Seq.	IR01	IR02	IR03	IR04	IR05	PP
ALMA	117	119	121	124	126	128	165	PEPE	38	40	44	46	48	50	171
BABA	77	79	83	84	86	88	160	PERE	123	125	127	130	132	134	166
GOPI	106	108	111	113	115	117	160	PIBO	79	81	85	87	88	89	169
GOFO	87	89	92	94	96	98	161	PIFL	85	87	91	92	94	95	166
GOJA	109	111	113	115	117	119	158	PRMA	107	109	110	111	113	115	160
MABA	94	96	99	101	102	104	164	RNNA	108	111	114	117	119	121	173
MGCA	99	101	104	106	108	110	163	RSSA	76	77	77	77	78	79	135
MGUB	106	108	111	113	115	117	161	SEAR	100	103	105	108	111	113	171
MGMO	63	66	69	71	72	74	167	SPPI	91	92	94	96	99	101	157
MGPO	84	86	89	91	93	96	158	SPPR	98	99	101	103	106	108	162
MGJO	89	91	94	96	98	100	164	SPCA	94	97	99	101	104	106	161
MSIV	107	108	109	111	113	115	160	SPVO	100	102	104	107	109	111	163
MTDI	123	124	127	128	129	130	161	TOPE	105	107	110	112	113	114	164
PAMA	128	129	131	133	134	135	167	TOAR	125	126	128	130	131	133	168
PBJO	113	115	118	120	123	125	167	TOPA	110	112	115	117	118	119	163

Considerando-se a eficiência do uso da água em cana-de-açúcar, Maschio (2011) encontrou valores de eficiência do uso da água para cultivar RB867515 variando entre 24,8 e 27,3 t ML⁻¹. Já Mauri (2012) encontrou eficiências do uso da água para a fase inicial da cana variando entre 0,16 e 3,21 t ML⁻¹. Inmam-Bamber e Smith (2005) encontraram valores na literatura variando de 4,8 a 20,9 t ML⁻¹. Segundo esses autores, essas variações ocorrem em decorrência das diferentes condições de déficit de pressão de vapor d'água que a cultura enfrenta durante o ciclo e que, portanto, aplica-se o conceito de eficiência da transpiração (ϵ), que expressa a quantidade de biomassa produzida considerando o déficit de pressão de vapor e o volume de água transpirado pela planta (g kPa kg⁻¹).

Em termos relativos, o incremento médio de produtividade na maioria das regiões não foi superior a 20%, corroborando com os valores de ganho de produtividade mencionados por Coelho et al. (2009). A única exceção é de Petrolina (PEPE), onde o incremento relativo médio de produtividade foi próximo de 35% para o tratamento IR05 (Figura 43). Nesse sentido, o incremento relativo foi maior para as regiões onde a escassez hídrica foi mais acentuada com demanda evaporativa maior, e menor nas regiões com boa disponibilidade hídrica e demanda hídrica atmosférica menor, como no caso de Santa Maria (RSSA).

Figura 43 - Incremento médio relativo da produtividade da cana-planta de 12 meses de acordo com o número de aplicações das lâminas de irrigação complementar para diferentes localidades brasileiras (IR01 = 30 mm, IR02 = 60 mm, IR03 = 90 mm, IR04 = 120 mm e IR05 = 150 mm)

Por meio da Tabela 29 é possível se observar que houve um aumento do incremento relativo médio em função do número de aplicações das lâminas de irrigação. Além disso, os incrementos relativos da produtividade foram maiores para o solo de textura arenosa (NQd), diminuindo gradativamente para os solos de textura médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd).

Tabela 29 - Incremento relativo médio e absoluto da produtividade de cana-planta de 12 meses, para um solo de textura arenosa (NQd), médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd) para diferentes lâminas de irrigação (IR01 = 30 mm, IR02 = 60 mm, IR03 = 90 mm, IR04 = 120 mm e IR05 = 150 mm)

Tratamento	NQd	LVEd	LRd	Média	NQd	LVEd	LRd	Média
	----- Incremento relativo (%) -----				----- Incremento absoluto (t ha ⁻¹) -----			
IR01	2,6	2,2	2,3	2,4	1,0	1,0	1,2	1,1
IR02	7,8	4,4	4,1	5,4	2,4	2,1	2,3	2,3
IR03	11,5	6,2	5,6	7,8	4,3	3,4	3,4	3,7
IR04	14,7	8,1	7,1	10,0	6,3	4,9	4,4	5,2
IR05	17,4	10,1	8,7	12,0	8,2	6,6	5,8	6,9

Considerando-se o primeiro tratamento (IR01), os valores de incremento relativo na produtividade entre os três tipos de solo foi praticamente igual, sendo em média igual a 2,4%. Ao comparar o segundo tratamento (IR02), o incremento foi maior para o solo arenoso (NQd) e praticamente igual para os solos de textura médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd), que apresentaram valor médio igual a 4,2%. A partir do terceiro tratamento (IR03), a diferença entre os incrementos de produtividade relativa dos três solos diferenciaram-se mais significativamente (Tabela 29). Carvalho et al. (2009) encontraram incremento menor na produtividade de cana-planta e soca decorrente à irrigação em solo de textura argilosa, enquanto que Oliveira et al. (2011) encontraram maiores incrementos em solo de textura arenosa, mostrando-se semelhantes aos resultados obtidos neste trabalho.

Dessa forma, os incrementos relativos para cada localidade aumentaram gradativamente conforme o volume de água aplicado e tipo de solo (Tabela 30). A região de Petrolina foi a que mais se destacou, com médias de incrementos máximos (IR05) de 51,5%, 29,6% e 25,3% respectivamente, para os solos de textura arenosa (NQd), médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd). A região de Mocimbo do Bom (MGMO) também se destacou entre as outras com maior incremento de produtividade, porém somente nos solos de textura arenosa (NQd) e médio-argilosa (LVEd) apresentando incremento de, respectivamente, 29,8% e 16,4%.

Em contrapartida, a região de Santa Maria (RSSA) foi a que apresentou o menor incremento relativo de produtividade de cana-de-açúcar (Tabela 30), atingindo o valor máximo de apenas 4,4% em condições de solo arenoso (NQd). As demais regiões apresentaram incrementos relativos máximos (IR05) entre 4,4% e 24,7% (Figura 44) para o solo de textura arenosa (NQd), entre 3,2% e 12,3% (Figura 45) em solo de textura médio-argilosa (LVEd), e entre 2,5% e 12,2% (Figura 46) para solo de textura argilosa (LRd).

Tabela 30 - Incremento relativo médio (%) de produtividade de cana-planta de 12 meses, para um solo de textura arenosa (NQd), médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd), em diferentes localidades brasileiras, considerando cinco estratégias de manejo de irrigação complementar: IR01 = 30 mm, IR02 = 60 mm, IR03 = 90 mm, IR04 = 120 mm e IR05 = 150 mm

Local	IR01	IR02	IR03	IR04	IR05	Local	IR01	IR02	IR03	IR04	IR05
Neossolo Quartzarênico distrófico (NQd)											
ALMA	2	4,4	6,9	9,5	11,6	PEPE	9	25,6	35,7	44,7	51,5
BABA	3,6	12,4	17,6	21,6	24,7	PERE	2,4	4,7	7,2	9,5	11,1
GOPI	1,9	7	10,2	13,2	15,4	PIBO	3	13,9	18,2	20,5	22,7
GOFO	2,4	8	12,4	16,8	20,7	PIFL	2,1	11,4	14,6	17,5	20,1
GOJA	2,2	4,9	7,7	10,4	13	PRMA	1,2	2,9	4,6	6,8	8,9
MABA	1,8	10	13,5	15,6	17,7	RNNA	4,8	9,6	14,2	17,9	20,5
MGCA	2,7	7,2	10,9	15	18,2	RSSA	0,9	1,5	2,1	3	4,4
MGUB	2,4	5,7	9,2	12,4	15,3	SEAR	3,5	7,7	11,9	16,1	18,9
MGMO	4,8	15	21,5	26	29,8	SPPI	1,8	4,2	7,5	10,5	13,4
MGPO	3,8	8,5	12,8	17,4	21,8	SPPR	2,1	4,5	7,5	10,7	13,4
MGJO	2,8	8,8	13,3	17,6	21,5	SPCA	2,8	6,3	10,2	14,1	17,7
MSIV	1,4	3,1	5,2	7,7	9,7	SPVO	2,5	6,1	9,9	13,6	16,8
MTDI	1,3	5,6	7,9	9,7	11,2	TOPE	1,8	10,4	14,5	16	17,6
PAMA	1,4	5,2	7,8	9,6	11,5	TOAR	0,8	4,4	7,4	9,5	11,5
PBJO	3,6	7,2	10,7	13,7	15,8	TOPA	1,4	8,8	11,7	13,2	14,6
Latossolo Vermelho-Escuro distrófico (LVEd)											
ALMA	1,6	3,2	5,2	7,3	9,2	PEPE	6,5	13,7	19,8	25	29,6
BABA	3,5	6,7	8,8	10,6	12,6	PERE	1,6	3,3	5,1	7,1	8,7
GOPI	2,5	4,4	5,8	7,3	9	PIBO	2,7	5,5	7,5	9	10,7
GOFO	3,7	6,3	8,4	10,7	13,1	PIFL	2,4	5,1	7,1	8,7	10,3
GOJA	1,8	3,3	4,8	6,5	8,3	PRMA	0,9	1,8	3,1	4,8	6,6
MABA	2,1	4,5	6,1	7,5	8,8	RNNA	2	4	6,2	8,5	10,5
MGCA	2,4	4,6	6,4	8,4	10,6	RSSA	0,6	0,9	1,1	1,7	3,3
MGUB	1,8	3,5	5,2	7,1	9	SEAR	2,1	4,4	6,8	9,3	11,8
MGMO	4,3	8,7	11,6	13,9	16,4	SPPI	1,7	3,4	5,8	8,1	10,7
MGPO	3,3	6	8,3	11	14	SPPR	1,5	3,1	5,2	7,6	9,6
MGJO	3,5	6,3	8,3	10,6	13	SPCA	2	4,1	6,5	9	11,3
MSIV	1,1	2,3	3,8	5,6	7,2	SPVO	2	4,1	6,3	8,5	10,7
MTDI	1,3	2,5	3,3	4	4,9	TOPE	2,2	4,1	5,2	6,2	7,4
PAMA	0,8	2	2,9	3,6	4,5	TOAR	0,7	1,9	2,8	3,7	4,8
PBJO	1,9	3,9	5,9	8,1	10	TOPA	1,6	3,2	4,2	5	6
Latossolo Roxo distrófico (LRd)											
ALMA	1,8	3,4	5,1	6,8	8,4	PEPE	7,4	12,8	17,4	21,5	25,3
BABA	3	4,8	6,1	7,3	8,9	PERE	1,5	2,9	4,3	5,8	7
GOPI	2,2	3,8	5,1	6,1	7,6	PIBO	2,7	4,4	5,6	6,6	8,2
GOFO	3	4,9	6,6	7,9	9,8	PIFL	3,4	6,1	7,8	8,9	10,6
GOJA	2	3,7	5,2	6,7	8,3	PRMA	1,1	1,9	3	4,5	5,9
MABA	2,3	4	5,1	6	7,2	RNNA	1,9	3,4	5	6,8	8,6
MGCA	2,4	4,1	5,8	7,2	9	RSSA	0,6	0,9	1,2	1,5	2,5
MGUB	2,2	4	5,6	7,2	8,8	SEAR	2,7	4,6	6,6	8,8	11,2
MGMO	3	4,9	6,4	7,7	9,5	SPPI	2,6	4,5	7	9,4	11,7
MGPO	3,2	5,5	7,5	9,5	11,9	SPPR	2,1	4	6,2	8,6	10,6
MGJO	3,1	5	6,3	7,7	9,5	SPCA	2,8	5,2	7,5	9,9	12,2
MSIV	1,5	2,7	4	5,6	7	SPVO	2,7	4,8	6,9	8,8	10,6
MTDI	1,3	2,3	3	3,5	4,2	TOPE	2	3,2	3,9	4,4	5,3
PAMA	0,8	1,7	2,4	2,9	3,4	TOAR	0,7	1,9	2,6	3,2	4,1
PBJO	2	3,5	5	6,8	8,6	TOPA	1,6	2,7	3,4	4,1	4,9

Figura 44 - Incrementos relativos médios de produtividade de cana-planta de 12 meses, em um solo de textura arenosa (NQd), para diferentes localidades brasileiras

Figura 45 - Incrementos relativos médios de produtividade de cana-planta de 12 meses, em um solo de textura médio-argilosa (LVEd), para diferentes localidades brasileiras

Figura 46 - Incrementos relativos médios de produtividade de cana-planta de 12 meses, em um solo de textura argilosa (LRd), para diferentes localidades brasileiras

O efeito gradativo de aumento na produtividade relativa em função do tipo de solo e número de aplicações também foi observado nas diferentes datas de plantio da cana-planta de 12 meses. Para as regiões continentais, os maiores incrementos relativos na produtividade em função das datas de plantio (Figura 48b) ocorreram para o plantio em junho, com valor máximo igual a 27% para o solo arenoso (NQd). Enquanto que a aplicação de uma lâmina de irrigação (IR01) para este tipo de solo não surtiu efeito no incremento da produtividade (Figura 47b). Para essas regiões também foram observados incrementos significativamente maiores para o plantio antes do período de seca, entre janeiro a março. Porém, para as condições de solos de textura médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd) os maiores incrementos na produtividade ocorreram durante no plantio dos meses de novembro a fevereiro, variando entre 1 a 13% (Figura 48a e Figura 49a).

Ao avaliar o incremento relativo na produtividade para as regiões litorâneas do nordeste (Figura 47a), o incremento foi maior para o plantio em junho, com valor máximo igual a 23% em solo de textura arenosa (NQd). Neste tipo solo e para esta região, os plantios durante o início do período seco, entre setembro a novembro, apresentaram um aumento significativo do incremento da produtividade relativa em relação aos plantios antecedentes ao período de chuvas (Figura 47b), enquanto que para os incrementos relativos de produtividade, considerando-se os solos de textura médio-argilosa (LVEd) e argilosa (LRd), os maiores valores ocorreram somente durante os meses de abril a julho, variando entre 3 a 15% de incremento (Figura 48b e Figura 49b).

Vale ressaltar que por mais que o incremento relativo da produtividade na região de Petrolina (PEPE) tenha sido o maior, ele representa um incremento médio de apenas 14 t ha^{-1} , chegando a no máximo 21 t ha^{-1} para o plantio em junho, enquanto que o maior valor de incremento da produtividade ocorreu em Floriano (PIFL) que foi da ordem de $29,7 \text{ t ha}^{-1}$ para o plantio em junho, considerando-se uma lâmina líquida de 150 mm (IR05) em solo arenoso (ANEXO G).

Com essa mesma lâmina líquida (IR05), as regiões produtoras do estado de São Paulo apresentaram os maiores incrementos na produtividade na faixa de 14 a 21 t ha^{-1} para os plantios de novembro a janeiro, considerando-se o solo argiloso (LRd), enquanto que os maiores incrementos de produtividade na Zona da Mata nordestina foram da ordem de 14 a 17 t ha^{-1} para os plantios de abril a junho, em solo médio-argiloso (LVEd).

Figura 47 - Incrementos relativos médios de cana-planta de 12 meses em um solo de textura arenosa (NQd) para diferentes datas de plantio e para a região da Zona da Mata nordestina (a), e demais regiões brasileiras (b)

Figura 48 - Incrementos relativos médios de cana-planta de 12 meses em um solo de textura médio-argilosa (LVEd) para diferentes datas de plantio e para a região da Zona da Mata nordestina (a), e demais regiões brasileiras (b)

Figura 49 - Incrementos relativos médios de cana-planta de 12 meses em um solo de textura argilosa (LRd) para diferentes datas de plantio e em regiões litorâneas do nordeste (a) para a região da Zona da Mata nordestina (a), e demais regiões brasileiras (b)

Com o aumento das lâminas de irrigação e consequente diminuição do estresse hídrico, o incremento da produtividade tendeu a atingir ao valor máximo que corresponde à diferença entre a produtividade potencial e a atingível em cada região (MONTEIRO e SENTELHAS, 2013). Entretanto, mesmo com a aplicação de 150 mm de lâmina líquida no solo de textura arenosa (NQd), a produtividade média em todos locais ficou em média igual a 80 t ha^{-1} , que é menor do que a metade da produtividade potencial para cana-planta de 12 meses (Figura 50). Já para as condições de solo médio-argiloso (LVEd) e argiloso (LRd) as produtividades com o incremento da maior lâmina líquida (150 mm) ficaram, em média, entre 120 e 130 t ha^{-1} , se aproximando mais da condição potencial. Essas diferenças ilustram a importância em se empregar um manejo do solo voltado a aumentar a umidade do solo, corroborando com os resultados observados por Campos et al. (2012) e Costa (2011) no manejo da palhada em canaviais.

Figura 50 - Produtividades potencial e atingível médias para cada localidade com a aplicação da lâmina líquida de 150 mm (IR05), de acordo com o tipo de solo considerado: NQd = Neossolo Quartzarênico distrófico; LVEd = Latossolo Vermelho-Escuro distrófico; LRd = Latossolo Roxo distrófico

Mesmo com a aplicação de 150 mm de uma lâmina líquida, a região de Petrolina (PEPE) apresentou produtividades abaixo de 55 t ha^{-1} para os três tipos de solo. Além disso, observou-se que as produtividades nessa região foram maiores no solo médio-argiloso do que no solo argiloso. Esses resultados foram semelhantes aos observados por Weidenfeld e Enciso (2008), que ao avaliar diferentes regimes de irrigação na região semiárida do Texas, EUA, não verificaram ganhos na produção de colmos com lâminas de irrigação inferiores à capacidade de armazenamento de água disponível do solo.

A região de Marabá (PAMA) foi a que apresentou o maior valor médio de produtividade, chegando a 152 t ha^{-1} em condições de solo argiloso. Em condições de solo arenoso a maior produtividade foi obtida em Recife (PERE), que chegou a $111,4 \text{ t ha}^{-1}$ com aplicação de 150 mm de irrigação complementar.

Além de proporcionar incremento de produtividade, a irrigação complementar oferece condições de menor estresse hídrico para os plantios de inverno fazendo com que a cana chegue ao período de máximo desenvolvimento com dossel vegetativo mais desenvolvido, sobressaindo-se em relação aos plantios no início da época chuvosa (SEGATO et al., 2006). Porém, essa diferença tende a diminuir com o aumento da lâmina líquida irrigada. A partir da Figura 51 é possível se verificar que a variação entre as produtividades atingíveis nas diferentes datas de plantio com a aplicação de 150 mm (IR05) de lâmina líquida foi menor em relação ao plantio de sequeiro. Enquanto os desvios padrão entre as datas de plantio de sequeiro em todas as regiões foram de 9,5 a $10,4 \text{ t ha}^{-1}$, na condição irrigada com aplicação de 150 mm (IR05) esses desvios atingiram entre 8,4 e $9,2 \text{ t ha}^{-1}$.

Figura 51 - Produtividade potencial e atingível média da cana-planta de 12 meses com aplicação de 150 mm (IR05) de lâmina líquida complementar em cada data de plantio e tipo de solo (NQd = Neossolo Quartzarênico distrófico; LVEd = Latossolo Vermelho-Escuro distrófico; LRd = Latossolo Roxo distrófico), para a região da Zona da Mata nordestina (a), e demais regiões brasileiras (b)

5 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo permitiram se concluir que:

- a) Mesmo com banco de dados meteorológicos restrito, foi possível caracterizar o clima das principais regiões produtoras de cana-de-açúcar como também das regiões de expansão;
- b) O modelo CSM-CANEGRO apresentou bom desempenho em estimar a produtividade comercial em diferentes ambientes para a cana-planta, quando parametrizado para as condições brasileiras, apesar de não considerar a disponibilidade hídrica no solo como um fator penalizante na emergência da cana-de-açúcar, não provocando a morte das plantas em condições de estresse hídrico severo;
- c) O modelo foi capaz de simular o efeito dos diferentes tipos de solo e datas de plantio na produtividade potencial e atingível, considerando-se séries históricas de dados meteorológicos, o que possibilitou se caracterizar as diferenças nos riscos climáticos associados à cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil;
- d) Foi possível determinar diferentes níveis de risco climático associado à eficiência climática para a cultura da cana-de-açúcar, sendo que a região de Petrolina, PE, foi a que apresentou o maior risco climático, enquanto que as regiões com chuvas mais intensas, como Recife, PE, e Araguaína, TO, apresentaram o menor risco climático;
- e) Por meio das simulações considerando as diferentes estratégias de irrigação foi possível observar que a resposta da cana-planta de 12 meses à irrigação complementar depende da combinação entre lâmina aplicada, tipo de solo e data de plantio.
- f) O incremento de produtividade foi maior no solo de textura arenosa, já que nessas condições o déficit hídrico é maior.
- g) Na grande maioria das localidades analisadas, o incremento de produtividade médio para as lâminas aplicadas, de 30 a 150 mm, não passaram de 30%, sendo a única exceção para a região de Petrolina, PE, na condição de solo arenoso.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMARAL, L.A.; DOS SANTOS, J.M.; CÂMARA, T.M.M.; BARBOSA, G.V.S. **Metodologia de Conservação de Pólen de Cana-de-açúcar**. Aracaju, SE:EMBRAPA. ISSN 1678-1937.. v 127, p. 11. Dezembro, 2012. (Comunicado Técnico)
- ANDRADE, C. de L. T.; AMARAL, T. A.; JUNIOR J. C. F. B.; HEINEMANN A. B.; GARCIA, A. G.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. F.; HICKMANN, C.; SANTANA C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. **Modelagem do Crescimento de Culturas**: Aplicações à Cultura do Milho., ISSN 1518-4277 n.91 p.63, 2009.(Documentos Embrapa)
- ANFAVEA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da indústria automobilística brasileira. 2013**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 20 Set. 2013.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: L.R. Angelocci, 2002. p. 272.
- APSIM. The Agricultural Production Systems Simulator (**APSIM**). Disponível em: <<http://www.apsim.info/Wiki/APSIM-and-the-APSIM-Initiative.ashx>> Acesso em: Jul. de 2013.
- BAILEY, R.A. Diseases. In: JAMES, G. **Sugarcane**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2004. p. 54-77.
- BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico na cana-de-açúcar (*saccharum spp*)**. 1981. 82p.Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentos) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BARBOSA, F.S. **Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo**. 2010. 81p.Dissertação (Mestrado na área de) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010. .
- BERDING, N.; HOGARTH, M.; COX, M. Plant Improvement of Sugarcane. In: JAMES, G. **Sugarcane**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2004. p. 20-53.
- BLACKBURN, F. **Sugar-cane**. New York: Longman, 1984. 414 p.
- BORGES, U.; FREITAG, H.; HURTIENNE, T.; NITSCH, M. **PROALCOOL**: economia política e avaliação sócio-econômica do programa brasileiro de biocombustível. Aracaju: UFS, 1988.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD.22 - Goiás, SD.23 - Brasília, SE.22 - Goiânia. (Levantamento de Recursos Naturais, 25, 29, 31). Rio de Janeiro. 1981.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanço nacional da cana-de-açúcar e Agroenergia**. Brasília, 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola de Risco**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>>. Acesso em: Jul. 2013.

BRISSEON, N.; WERY, J.; BOOTE, K. Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J.W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 257-276.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S. **Produção da cana-de-açúcar**. ESALQ: Piracicaba, 1993. p. 31-64.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPOS, P.F.; ALVES JR, J.; SOARES, R.A.B.; RIBEIRO, P.H.P.; EVANGELISTA, A.W.P. Resposta da cultura da cana-de-açúcar a irrigação de salvamento e ao uso de palha na cobertura do solo na região do cerrado. **X CLIA/CONBEA**, Londrina, julho, 2012.

CARDOSO, C.O.; FARIA, R.T.; FOLEGATTI, M.V. Simulação do Rendimento e Riscos Climáticos para o Milho Safrinha em Londrina – PR, Utilizando o Modelo CERES-MAIZE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n.2, p.291-300, maio/ago. 2004.

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

CARVALHO, C.M.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C.H.A.; SILVA, C.T.S.; GOMES FILHO, R.R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v 4, p.72-77, 2009.

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

CINTRA, J.E.; FERREIRA, G.H.; BRASIL, R.P.C. Viabilidade da irrigação suplementar na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) em regiões com déficit hídrico. ISSUE DOI: 10.3738/1982.2278.141. **Nucleus**, Ituverava, Edição Especial, p. 111-119, 2008.

COELHO, R.D.; LELIS NETO, J.A.; BARROS, A.C. Cana irrigada produz mais, mas custo de produção aumenta. In: FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 2009: anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, 2009. p. 240-2042.

COLETI, J.T.; WALDER, L.A.M.; RODRIGUES, J.C.S. Estudo de espaçamentos em duas variedades de cana-de-açúcar: SP 70-1143 e NA 56-79. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 4., 1987. Olinda. **Anais...** Olinda, 1987.p. 34-37.

COLETI, J.T.; STUPIELLO, J.J. Plantio da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 139-153.

COMITRE, V. A questão energética e o padrão tecnológico da agricultura brasileira. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 25, n.12, p. 29-35, Dez. 1995.

COMUNELLO, F.J.; SAVIAN, M. **Os Avanços tecnológicos da pesquisa agropecuária e a produção de alimentos**: apontamentos para uma discussão. Oral-Ciência -, Porto Alegre: Pesquisa e transferência de tecnologia, 2009.p. 1-10.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira**: Cana-de-açúcar, Safra 2013/2014, segundo levantamento. Brasília, 2012. 19p.

COSTA, M.C.G. **Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas**. 2005. 104p.Tese (Doutorado na área de) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

COSTA, L.G. **Simulação do efeito de palhada e adubação nitrogenada na produtividade de cana-de-açúcar**. 2012. 92p.Dissertação (Mestrado na área de) - Universidade Federal de São Carlos. 2012.

CTC. **Censo varietal e de produtividade em 2012**. Centro de Tecnologia Canavieira. Piracicaba, SP. 2013. 28p.

DA SILVA, F.C.; BERGAMASCO, A.F.; VENDITE, L.L. Modelos de transferência de metal pesado em cana-de-açúcar adubada com composto de lixo urbano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n.1, p. 119-128, 2007.

DA SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; VIERIA, V.J.S.; JÚNIOR, W.G.F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro1. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64-71, 2012.

DALMAGO, G.A.; PASINATO, A.; CUNHA, G.R.; SANTI, A.; PIRES, J.L.F. Cultivo de Trigo: Zoneamento Agrícola. **Sistemas de Produção**, 4. ISSN 1809-2985 Versão Eletrônica. Set/2009. < <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Trigo/CultivodeTrigo/zoneamento.htm>> Acesso em: Ago. 2012.

DALRI, A.B. Irrigação em 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. 157-173.

DE PAULA, G. M.; STRECK, N. A.; ZANON, A. J.; ELTZ, F. L. F.; HELDWEIN, A. B.; FERRAZ, S. E. T. Influência do Fenômeno El Niño na Erosividade das Chuvas na Região de Santa Maria (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.1315-1323, 2010.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.D. **Guidelines for Predicting Crop Water Requirements**. Rome: FAO, 1977. (Irrigation and drainage paper, 24).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. **Yield responde to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (Irrigation and drainage paper, 33).

EMBRAPA. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático**: Instrumento de Gestão de Risco Utilizado pelo Seguro Agrícola do Brasil. (2010). Acesso em: Jul. 2013. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Zoneameno_agricola_000fl7v6vox02wyiv80ispcrruh04mek.pdf. Acesso em:

EVANGELISTA, B.A. **Projeção de cenários atuais e futuros de produtividade de cana-de-açúcar em ambiente de cerrado**. 2011. 188p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

FAO. **FAOSTAT**. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. Production 2012. <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em :julho, 2013. FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La canne à sucre**. Paris: Ed. Maisonneuve et Larose, 1970. (Collection techniques agricoles et productions tropicales).

FIGUEIREDO, P. Breve historia da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônômico no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDEL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 31-44.

FRENKEN, K.; GILLET, V. Irrigation water requirement and water withdrawal by coutry. **AQUASTAT**. FAO, 2012. 41p.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.. 54 n. 1/2. Piracicaba Jan./Ago. 1997.

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

GENG, S.; PENNING, V. F. W. T.; SUPIT, J. A simple method for generating daily rainfall data. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.36, n. 4, p. 363-376, 1986.

GILLESPIE, T.J.; SENTELHAS, P C. Agrometeorology and plant disease management – a happy marriage. **Scientia Agrícola** Piracicaba, v.65, n.spe, p. 71-75, 2008, ISSN 0103-9016.

GLASZIOU, K.T. citar todos et al. Phisiology os sugarcane. VII Efects of temperature, photoperiod, and diurnal and seasonan temperature changes on growth and ripering. **Australian Journal of Biological Sciences**, Melbourne, v.18, p.53-66, 1965.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy** , Chattanooga, v.36, p. 2086– 2097, 2008.

GOMES A.W.A. **Simulação da produtividade de cana-de-açúcar nas regiões nordeste e sudeste do Brasil, utilizando o modelo DSSAT**. 2012. 83p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2012.

GONÇALVES, N H. Manejo do solo para implantação da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 93-103.

HARGREAVES, G.H. **Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe**. Logan, Utah: Departmental Paper, Department Biology and Irrigation Engineering, Utah State University, 1994.p. 12.

HESKETH J.D.; BAKER D.N.; DUNCAN W.G. Simulation of growth and yield in cotton: Respiration and the carbon balance. **Crop Science**, Madison, v. 11, p. 394-398, 1971.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, n. 1/2, p. 137–157, 2000.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. L.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; ROYCE, F. S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A. J.; TSUJI, G. Y.; KOO, J. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5** University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. 2010. 1 CD-ROM.

IBGE. Banco de Dados Agregados. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 out. 2002.

ICASA. DSSAT Software. Disponível em: <<http://www.icasa.net/dssat/>> Acesso em: Jul. de 2013.

INFORZATO, R; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. Co. 290, em solo tipo terra-roxa-legítima. **Bragantia**, Campinas, v. 16, p. 1-13, 1957.

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

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

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

INMAN-BAMBER N.G. History of the CSM-CANEGRO model. In: INTERNATIONAL CSM-CANEGRO WORKSHOP, 2000. Mount Edgecombe. **Proceedings...** Mount Edgecombe: CSIRO, 2000. p. 4-7.

INMAN-BAMBER, N.G.; MCGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83, n. 2, p. 125-138, 2003.

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

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and responses to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

INPE. Divisão de Sensoriamento Remoto. **CANASAT**: mapeamento da cana via imagens de satélites de observação da terra. São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat>>. Acesso em: Jul. 2013.

IRVINE, J. E. Screening sugarcane populations for cold tolerance by artificial freezing. **Crop Science**, Madison, v. 8, p. 637-638, 1968.

JAMES, G. Introduction to sugarcane. In: JAMES, G. **Sugarcane**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2004. p. 1-19.

JARVIS, P.G.; MCNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances in Ecological Research**, Amsterdam, v. 15, p.1-49, 1986.

JONES, C.A.; RITCHIE, J.T.; KINIRY, J.R.; GODWIN, D.C. Subroutine Structure. chap.. 4. In: CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. JONES C.A.; KINIRY J.R.(Ed.).**Ceres-Maize**: a simulation model of maize growth and development College Station. Texas, A & M University, 1986. 194p.

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSEL, J.S.; MCLEOD, I.M.; WILLIAMS, J.R. AUSCANE, **Simulation of Australian sugarcane with EPIC**. Div. of Tropical Crops and Pastures. Canberra:CSIRO, 1989. (Tech. Paper 29).

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

JONES, J.W.; MAKOWSKI, D.; WALLACH, D. Introduction to Section II. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models**: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 251-256.

JONES, M.; PORTER, C.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; SINGELS, A.; SHINE, J.; NAYAMUTH, R.; KINGSTON, G.; CHINORUMBA, S.; BERG, M. van den. Incorporating the Canegro sugarcane model into the DSSAT V4 crop modelling system. CONGRESS, INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 26., 2007. Durban. **Proceedings...ICC**. Durban, South Africa, Jul. 2007. p. 438-443.

JONES, M.; SINGELS, A. **DSSAT v.4.5 CSM-CANEGRO**: Sugarcane Plant Module; User documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling. South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modeling sugarcane production system I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Researcher**, Amsterdam, v. 61, n.3, p. 253-271, 1999.

KOFFLER, N.F.; DONZELI, P.L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, Sérgio Bicudo (Coord.). **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, cap. 1, p. 19-35.

KOLLURU, R. Risk Assessment and Management: a Unified Approach. In: KOLLURU, R.; BARTELL, S.; PITBLADO, R.; STRICOFF, S. **Risk Assessment and Management Handbook: for Environmental, Health and Safety Professionals**. Boston, Massachusetts: McGraw Hill, 1996. chap. 1, p. 1.3 - 1.41.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water Relations of Plants and Soil**. Local: Academic Press, 1995. 495p.

LANDELL, M.G. de A.; XAVIER, M.A.; ANJOS, I.A.; VASCONCELOS, A.C.M.; PINTO, L.R.; CRESTE, S. Manejo varietal em cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 57-65.

LEITE, R.L. **Cultivares de cana-de-açúcar em solos da região norte do estado do Tocantins**. 2007. 65p. Dissertação (Mestrado em Ciência) Universidade Federal do Tocantins, 2007.

LESLIE, G. Pests of Sugarcane. In: JAMES, G. **Sugarcane**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2004. p. 78-100.

LIU, D.L.; KINGSTON, G. QCANE: A simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation: QCANE. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.) **Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. Workshop Proc., Univ. Of Queensland, St. Lucia, Brisbane. 1994. p. 25-29.

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

LOPES-ASSAD, M.L.; BOSCHI, R.S.; NOMURA, E.; EVANGELISTA, B.A.; SILVA, J. S.V. Uso de informações de solos no zoneamento agrícola de risco climático. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007. Aracaju. **Anais...** - Aracaju – SE, 2007 - 02 - 05 jul. 5p. 1 CD-ROM.

MACHADO, E.C. Fisiologia da produção da cana-de-açúcar: crescimento. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. v. 1.

MARIN, F.R. Clima. Agência de Informação Embrapa. **Árvore Hiperbólica da Cana-de-açúcar**. 2008. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html >. Acesso em: 18 Jul. 2012.

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

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.P.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and Evaluation of Predictions of CSM-CANEGRO for Brazilian Sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, p. 100-110, 2011.

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

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.P.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, Princeton , v. 117, p.227-239. Ed. Springer. 2013b.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87p. Dissertação (Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*) ciclo cana soca: um modelo de análise de decisão para o Estado de São Paulo**. 1998. 98p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

MAURI, R. **Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar submetida a déficit hídrico variável**. 2012. 103p Dissertação (Irrigação e Drenagem). - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

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

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**. DOI 10.1007/s12355-013-0275-0. p. 13. 2013.

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

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo CSM-CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 92p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

NASSIF, D.S. P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parameterization and evaluation of the DSSAT/Canegro model for Brazilian sugarcane varieties . **Pesquisa Agropecuária Brasileira** , Brasília, v.47, p. 311-318, 2012.

NEVES, M.F.; TROMBIN, V.G.; CONSOLI, M. **Mapeamento e quantificação do setor sucroenergético 2008**. Ribeirão Preto: MARKESTRAT/ FUNDACE/ UNICA, 2009.p. 36.

NÓBREGA, J.C.M.; DORNELAS, M.C. Biotecnologia e melhoramento da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 39-56.

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.

OLIVEIRA JUNIOR, R.C.; RODRIGUES, T.E.; SILVA, J.M.L.; VALENTE, M.A. Caracterização físico-hídrica dos principais solos da região de marabá-carajás, estado do Pará. ISSN 0100-8102 EMBRAPA. 1998.(Boletim de Pesquisa, 205).

OLIVEIRA, R.A. **Análise de crescimento da cana-de-açúcar, na região noroeste do Paraná**. Curitiba, 2004, 80p.. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C.; SIMÕES NETO, D.E.; ROCHA, A. T.; CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46,p. 617-625, 2011.

PARTON, W.J.; D.S. SCHIMEL; C.V. COLE; D.S. OJIMA. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal** , Madison, v.51, p.1173-1179, 1987.

PAVAN, W. **Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas**.2007. p. 182. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2007.

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

PERES, F.C. **Determinação dos coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar: ciclo de cana soca**. 1988. 68p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PICKERING, N.B.; HANSEN, J.W.; JONES, J.W.; WELLS, C.M.; CHAN, V.K.; GODWIN, D.C. WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 332-337, 1994.

PINCELLI, R.P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 78p. Dissertação (Mestrado em Biologia) - "Faculdade de Ciências Agrônomicas Universidade Estadual Paulista," Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2010.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; JUNIOR, J. Z.; EVANGELISTA, S.R.M.; OTAVIAN, A.F.; ÁVILA, A.M.H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F.R.; JUNIOR, C.M.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P.P.; CORAL, G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa, 2008. p. 84.

PIRES, R.A.P.; FERREIRA, O.M. **Utilização da vinhaça na bio-fertirrigação da cultura da cana-de-açúcar: Estudo de caso em Goiás**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental. 2008. p. 22.

PMGCA (2011). **Censo de cultivares de cana-de-açúcar safra 2010/2011**. Disponível em: <<http://pmgca.dbv.cca.ufscar.br/htm/catal/censovar.php>>. Acesso em Jul. 2013.

PORTER, C.H.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P.W.; RITCHIE, J.T.; PICKERING, N.B.; BOOTE, K.J.; BAER, B. Soil Water Balance Module (WATBAL). In: JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K.J.; PORTER, C.H. **DSSAT v4.5 Cropping System Model Documentation**. ICASA. University of Hawaii, Honolulu. 2004a. v. 4.

_____. Soil-Plant-Atmosphere Module (SPAM). In: JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K.J.; PORTER, C.H. **DSSAT v4.5 Cropping System Model Documentation**. ICASA. University of Hawaii, Honolulu. 2004b. . v. 4.

PORTER, C.H.; PICKERING, N.B.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Weather Module. In: JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K.J.; PORTER, C.H. **DSSAT v4.5 Cropping System Model Documentation**. ICASA. University of Hawaii, Honolulu. 2010. v. 4.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p.81-92, 1972.

REZENDE, R.S.; ANDRADE, A.S. . **Manejo: Irrigação**. Agência de Informação Embrapa. Cana-de-açúcar. 2008. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_56_711200516718.html >. Acesso em: Jul. 2012.

RICHARDSON, C.W.; WRIGHT, D.A. WGEN: A model for generating daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, **Agricultural Research Service**, ARS-8. 1984.

RIDESA. **Censo varietal 2012**. Rede Interuniversitaria para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. Centro de Ciências Agrárias, UFSCar. Araras, SP. 2013. 55p.

RITCHIE, J.T. Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. **Water Resources Research**, New York, v. 8, n.5,. p. 1204-1213, 1972.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUGI, G.Y.; HOOGENBOOM, G. THORNTON P.K. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Kluwer Academic Publishers, 1998. p.41-54.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100p.

RODRIGUÉZ, L.A.; VALENCIA, J.J.; URBANO, J. A. Soil compaction and tires for harvesting and transporting sugarcane. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v.49,. p. 183-189, 2012.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. ; UNGARO, M.R.G. Análise de risco climático para a cultura do girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 91-102, 2001.

SANTOS, M.AL.; FRIZZONE, J.A. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Sacharum ssp*) colhida no mês de janeiro: um modelo de análise de decisão para o litoral sul do estado de Alagoas. **Irriga**, Botucatu, v.11, n. 3, p. 339-335, jul-set, 2006.

SANTOS, M.A.L. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 100p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

SANTOS, D. L. **Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil e da Austrália**. 2013. 100p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL: um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. 2007. 120p. (Doutorando em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCARPARI, M.S.; BEUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 5, p. 486-491, 2004.

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. de (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. cap. 2, p. 19-36.

SELVARAJU, R. Climate risk assessment and management in agriculture. In: **Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector. Proceedings of a Joint FAO/OECD Workshop, Rome, Italy, 23-24 April 2012**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012. p. 71-89.

SENTELHAS, P.C.; FARIA, R.T.; CHAVES, M.O.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the WGEN and SIMMETEO weather generators for the brazilian tropics and subtropics, using crop simulation models. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 357-376, 2001.

SILVA, M.A.; JERONIMO, E.M.; LUCIO, A D. Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n.8, p. 979-986, ago. 2008.

SILVA, V.P.R.; OLIVEIRA, S.D.; SANTOS, C.A.C.; SILVA M. T. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **Agriambi**, Campina Grande, PB, v.17, n.2, p.180-189, 2013.

SIMON, J. ; OLIVEIRA, G.X.S.; SCARPARE, F.V.; PIEDADE, S.M.S.; ANGELOCCI, L.R. Mudanças na precipitação pluvial de Santa Maria/RS associadas ao fenômeno El Niño oscilação sul (ENOS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA,14., 2006, Florianópolis. **Anais Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.p. 6.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method os simulating dry matter partitioning in the CSM-CANEGRO sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON R. A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 249-260, 2005.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. DSSAT v.4.5 CSM-CANEGRO: Sugarcane Plant Module; scientific documentation. Mount Edgecombe: **International Consortium for Sugarcane Modeling**. South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

SINGELS, A.; SMIT, M.A. Sugarcane response to row spacing-induced competition for light. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 113, p. 149-155, 2009.

SINGELS, A.; BERG, M.; SMIT, M.A.; JONES, M.R.; ANTWERPEN, R. Modeling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 117, p. 59-69, 2010.

SINGH, P.; SRINIVAS, K. Crop simulation models as decision-making tools for managing agricultural droughts. In: RAMAKRISHNA, Y.S.; RAO, G.G.S.N.; SASTRY, P.S.N.; RAO,

V.U.M. (Ed.). **Agricultural droughts**: aspects of micrometeorology: a lecture notes of 4th SERC School. Hyderabad: CRIDA, 2007 p. 33.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Cambridge, v. 98, p. 91-97, 2006.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e a produção da cana-de-açúcar**: avaliação do modelo Mosicas. 2006. 62p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SZMRECSÁNYI, T.; MOREIRA, E.P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira no Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 57-79, 1991.

TAIZ, L; ZEIGER, E. Fisiologia do Estresse: **Fisiologia vegetal**. 4. ed, Artmed, 2009. p. 738-773.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling** – A mathematical approach to plant and crop physiology. 1 ed. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669p.

TOMASELLA, J.M.G. HODNETT; L. ROSSATO. Pedotransfer functions for estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 64, n.1, p.327, 2000.

TOWNSEND, C.R. Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia. EMBRAPA-CPAF Rondônia, 2000. p.3-5.

USABORISUT, P.; SUKCHAROENVIPHARAT, W. Soil Compaction in Sugarcane Fields Induced by Mechanization. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, Adelaide, v. 6, n.3, p. 418-422, 2011. ISSN 1557-4989.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p.892-898, 1980.

VITTI, A.C.; PRADO, H. Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e disponibilidade hídrica. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n. 2, p.6, Jul-Dez, 2012.

VILLEGAS, F.D.; DAZA, O.H.; JONES, J.W.; ROYCE, F.W. CASUPRO: An industry-driven sugarcane model. **ASAE** paper no. 053025. ASAE, St. Joseph, MI, 2005.

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

WEIDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane response to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671, 2008.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography** 2, p184-194. 1981.

WMO. What is Climate? In: **Understanding Climate**. World Meteorological Organization. Acesso em Out. 2013. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php#a>.

ANEXOS

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continua).

ALMA - Macció - AL

GOPI - Pirenópolis - GO

BABA - Barreiras - BA

GOFO - Formosa - GO

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continuação).

GOJA - Jataí - GO

MGCA - Capinópolis - MG

MABA - Balsas - MA

MGUB - Uberaba - MG

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continuação).

MGMO - Mocambinho - MG

MGJO - João Pinheiro - MG

MGPO - Pompeu - MG

MSIV - Ivinhema - MS

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continuação).

MTDI - Diamantino - MT

PBJO - João Pessoa - PB

PAMA - Marabá - PA

PEPE - Petrolina - PE

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continuação).

PERE - Recife - PE

PIFL - Floriano - PI

PIBO - Bom Jesus do Piauí - PI

PRMA - Maringá - PR

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continuação).

RNNA - Natal - RN

SEAR - Aracaju - SE

RSSA - Santa Maria - RS

SPPI - Piracicaba - SP

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (continuação).

SPPR - Presidente Prudente - SP

SPVO - Votuporanga - SP

SPCA - Catanduva - SP

TOPE - Peixe - TO

ANEXO A - Extrato do balanço hídrico sequencial médio para cada local do estudo, considerando-se uma CAD de 100 mm e ETo por Thornwaite (1948) (conclusão).

TOAR - Araguaína - TO

TOPA - Palmas - TO

ANEXO B - Classificação dos solos conforme sua textura para o Brasil (RadamBrasil) e as localidades do estudo.

Fonte: RadamBrasil

ANEXO C - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura arenosa e aplicação de uma lâmina líquida de 30 mm (IR01), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	1,9	1,1	1,8	2,2	3,4	3,5	3,2	1,3	0,8	1,8	2,4	1,2
BABA	5,3	5,2	3,5	4,7	2,1	0,0	0,0	5,1	4,0	3,9	4,6	5,3
GOPI	3,4	2,9	1,6	1,0	1,5	1,0	0,0	1,0	1,1	2,5	3,0	3,3
GOFO	4,0	3,0	1,6	4,2	0,5	0,0	0,7	2,0	1,5	3,0	3,8	4,1
GOJA	3,6	3,5	1,7	1,1	1,2	0,9	1,9	2,2	1,1	2,3	2,7	3,6
MABA	3,0	2,9	2,3	1,9	0,2	0,0	0,0	2,2	0,3	2,3	3,1	3,5
MGCA	4,0	3,7	2,7	3,2	0,0	2,1	3,2	2,0	0,7	3,2	3,5	4,1
MGUB	3,7	3,4	1,5	2,8	0,9	2,8	2,4	1,6	1,3	2,3	2,5	3,5
MGMO	6,7	7,3	6,5	14,1	0,0	0,0	0,5	2,4	1,9	5,1	5,9	7,1
MGPO	5,2	5,1	2,5	4,6	0,8	3,3	4,4	3,3	2,7	3,8	4,9	5,2
MGJO	4,7	4,5	2,3	4,2	0,0	0,0	0,6	1,7	1,9	3,8	4,7	5,3
MSIV	2,7	2,5	1,1	1,2	0,0	0,4	0,4	0,3	0,7	2,2	2,4	2,5
MTDI	2,5	2,2	1,7	0,0	0,4	0,0	0,2	1,2	0,4	1,8	2,2	2,5
PAMA	1,7	1,8	1,5	0,2	0,8	1,2	1,2	2,9	1,7	1,1	1,3	1,5
PBJO	2,1	0,8	2,9	3,8	4,9	5,5	5,2	3,8	2,0	5,4	4,6	2,1
PEPE	13,7	14,3	12,2	12,4	4,6	7,5	3,2	1,3	6,1	8,8	10,5	12,8
PERE	0,9	0,3	2,1	2,6	3,6	4,1	3,9	2,2	1,6	2,2	3,5	2,3
PIBO	5,1	5,0	3,6	4,2	2,1	0,0	0,0	0,0	2,0	3,9	4,5	5,1
PIFL	4,3	3,8	3,0	1,1	0,4	0,2	0,0	0,0	1,8	2,9	3,5	3,9
PRMA	2,8	2,5	0,9	0,7	0,5	0,1	0,2	0,4	0,3	1,7	2,2	2,4
RNNA	1,3	0,8	4,1	5,2	6,1	6,5	5,7	4,5	5,0	8,5	5,6	4,1
RSSA	2,1	1,3	0,3	1,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	1,7	2,0	2,2
SEAR	2,2	1,3	3,2	4,5	5,3	5,8	4,9	2,7	2,0	0,0	5,2	5,2
SPPI	4,5	3,6	1,2	2,0	0,1	0,2	0,7	0,3	0,4	2,5	2,8	3,5
SPPR	4,7	4,3	2,0	1,4	0,4	0,3	0,6	1,1	0,7	2,9	3,2	3,7
SPCA	5,0	4,3	2,0	2,9	1,3	1,4	2,5	1,3	0,6	3,1	3,9	4,8
SPVO	4,4	3,8	2,3	1,6	1,9	4,4	0,3	0,7	0,7	2,9	3,2	4,0
TOPE	3,2	3,1	2,4	1,1	1,2	0,0	0,0	0,5	1,2	2,5	3,2	3,6
TOAR	1,1	1,2	0,7	0,1	0,1	0,0	1,8	0,9	0,6	0,9	1,2	1,1
TOPA	2,3	2,1	1,8	1,6	1,1	0,0	0,0	0,2	0,9	2,0	2,5	2,6

ANEXO D - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura arenosa e aplicação de duas lâminas líquidas de 30 mm (IR02), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	4,3	2,8	4,1	4,4	6,6	7,2	6,6	3,9	2,3	3,3	4,5	3,3
BABA	10,2	10,0	8,2	7,7	23,2	22,3	16,5	16,8	7,2	7,7	9,4	10,1
GOPI	6,7	6,2	4,5	2,8	12,3	13,6	10,2	6,6	3,3	5,1	5,9	6,7
GOFO	8,9	8,8	6,6	6,4	11,7	9,7	8,1	8,9	4,0	6,4	8,2	8,8
GOJA	6,6	6,8	4,5	2,4	5,4	5,7	5,0	4,4	3,0	4,4	5,2	6,1
MABA	6,7	6,5	5,7	4,7	16,2	30,1	15,5	13,2	2,3	5,1	6,6	7,4
MGCA	7,8	7,0	6,2	4,9	7,9	12,6	8,4	6,5	3,4	6,3	7,2	8,0
MGUB	7,2	7,1	5,1	3,9	7,1	6,8	5,9	4,9	3,3	4,4	5,8	6,7
MGMO	12,5	13,8	12,7	21,0	21,9	22,6	18,4	15,5	6,2	10,0	12,3	13,5
MGPO	10,1	10,0	7,6	6,8	9,9	7,6	8,2	8,8	6,3	7,3	9,4	10,4
MGJO	8,7	8,4	6,5	5,4	12,3	11,8	11,3	9,2	5,6	7,4	8,8	9,8
MSIV	5,1	4,8	2,8	1,7	1,2	2,6	1,7	2,1	2,5	3,8	4,5	4,8
MTDI	4,7	4,5	3,8	1,6	6,3	14,6	10,3	6,7	2,0	3,3	4,3	4,8
PAMA	4,4	4,5	4,5	2,7	3,4	9,1	11,1	10,2	2,6	2,7	3,3	3,6
PBJO	3,5	3,3	5,6	7,6	9,9	11,0	9,5	7,7	6,3	7,9	10,1	4,2
PEPE	26,2	27,1	25,3	21,1	31,7	36,4	36,1	26,3	14,7	17,6	20,0	24,4
PERE	1,5	2,2	4,0	5,2	6,9	8,3	8,1	5,8	4,0	3,3	4,7	2,8
PIBO	10,0	10,3	8,9	8,7	22,2	37,0	22,0	15,0	5,2	7,9	9,2	9,8
PIFL	9,1	8,8	7,7	4,8	4,5	38,7	27,7	9,9	4,3	6,2	7,3	8,3
PRMA	5,9	4,9	2,7	1,3	1,5	0,9	1,6	2,1	1,7	3,3	4,2	4,6
RNNA	4,7	4,0	8,0	10,2	12,5	12,7	11,1	9,4	11,1	12,1	10,7	9,1
RSSA	3,0	2,0	0,4	1,3	0,5	0,1	0,1	0,5	1,8	2,5	2,8	3,1
SEAR	5,2	4,0	6,5	9,0	10,7	11,1	10,1	7,2	5,8	3,9	10,2	8,9
SPPI	8,1	7,7	3,8	2,9	2,1	2,5	1,7	3,1	2,6	4,5	5,4	6,4
SPPR	7,9	7,3	4,8	2,4	2,4	3,0	2,5	3,2	3,4	5,0	5,4	6,3
SPCA	9,3	8,9	5,9	3,6	4,8	4,9	7,2	5,5	3,7	6,1	7,2	8,9
SPVO	8,2	7,7	6,5	3,8	4,1	9,6	5,5	5,1	3,1	5,7	6,5	7,7
TOPE	6,3	5,8	5,4	3,7	28,3	22,2	18,4	13,3	3,4	5,0	6,4	6,6
TOAR	3,6	3,4	3,1	1,8	2,0	13,4	8,8	5,3	1,3	2,8	3,6	3,4
TOPA	5,2	4,4	4,4	3,6	18,7	25,9	15,8	10,7	2,5	4,1	5,3	5,4

ANEXO E - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura arenosa e aplicação de três lâminas líquidas de 30 mm (IR03), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	5,7	4,7	6,0	7,3	9,9	10,9	10,0	6,9	5,1	5,6	6,6	4,7
BABA	13,8	13,8	12,4	12,3	29,4	33,3	28,0	19,8	10,6	10,0	12,9	14,3
GOPI	10,3	9,4	7,0	5,8	16,1	19,7	14,4	8,7	5,5	7,1	8,6	9,6
GOFO	13,5	12,6	11,0	11,7	15,9	16,2	13,9	11,8	7,3	9,3	12,3	13,2
GOJA	10,1	10,2	8,3	5,7	7,7	9,2	7,3	6,2	4,7	6,6	7,6	9,2
MABA	9,6	9,2	8,2	8,1	19,4	35,1	25,8	15,1	4,6	7,1	9,2	10,4
MGCA	12,3	10,4	9,3	9,6	11,6	17,3	13,3	8,9	6,0	9,2	10,6	12,0
MGUB	11,5	11,3	8,7	7,9	9,8	12,4	9,3	6,8	5,2	7,4	8,8	10,9
MGMO	17,6	18,7	17,7	27,1	36,2	33,9	25,8	19,6	10,7	13,8	17,5	19,2
MGPO	15,3	15,2	12,4	11,0	12,3	12,6	12,2	12,1	9,4	11,0	14,0	16,1
MGJO	12,8	12,7	10,4	10,6	17,4	18,6	17,2	12,6	8,9	10,8	13,2	14,5
MSIV	8,1	7,7	5,6	4,1	2,3	4,0	2,9	3,8	4,0	6,1	7,1	7,4
MTDI	6,9	6,6	5,7	3,6	8,5	18,9	15,3	8,1	3,5	4,6	6,1	7,3
PAMA	7,4	7,7	7,4	5,3	5,5	13,1	16,0	11,1	4,1	4,2	5,2	6,0
PBJO	5,8	5,9	8,1	11,1	14,1	15,8	13,7	10,9	9,9	13,3	14,3	5,8
PEPE	37,2	38,5	36,2	33,0	38,2	49,4	51,3	34,3	22,8	25,2	28,2	34,5
PERE	3,2	4,0	6,0	7,5	10,3	12,3	11,7	8,9	6,7	5,5	6,6	4,0
PIBO	14,0	14,2	13,1	13,1	27,0	42,9	31,3	18,2	8,4	10,1	12,2	13,7
PIFL	13,4	12,9	11,8	8,9	7,9	42,6	27,1	12,3	7,1	8,7	10,3	11,8
PRMA	8,8	7,5	5,4	2,4	2,0	2,2	2,9	3,3	3,0	4,9	5,9	7,0
RNNA	7,5	7,1	11,6	15,3	18,0	18,5	16,1	13,3	15,4	18,8	16,7	12,0
RSSA	3,7	2,4	0,5	1,4	0,9	0,5	1,5	2,1	2,5	3,0	3,4	3,7
SEAR	7,6	6,7	8,9	12,7	15,5	16,7	14,6	11,4	9,4	9,4	16,3	13,5
SPPI	13,3	12,2	8,2	5,3	4,4	4,4	5,1	5,2	4,4	7,2	8,9	11,1
SPPR	11,8	11,3	8,9	5,8	4,3	5,4	5,5	5,8	5,3	7,8	8,5	9,9
SPCA	15,1	14,2	10,8	7,5	5,4	8,9	10,9	8,3	6,1	9,7	11,5	14,1
SPVO	13,7	12,6	10,8	8,7	7,2	11,5	9,3	7,3	5,2	9,0	10,7	12,3
TOPE	8,4	8,0	7,4	6,4	30,7	37,7	30,8	15,4	5,5	6,3	8,4	9,0
TOAR	5,8	5,9	5,2	4,2	4,7	22,5	15,2	5,9	2,9	4,6	6,0	5,7
TOPA	7,2	6,6	6,2	5,8	23,5	31,7	22,8	12,3	4,3	5,1	7,0	7,4

ANEXO F - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura arenosa e aplicação de quatro lâminas líquidas de 30 mm (IR04), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	7,4	6,6	7,8	9,5	13,3	15,2	13,9	10,1	7,6	7,9	8,3	6,3
BABA	17,4	17,1	15,6	15,9	36,0	45,1	31,0	22,4	12,6	11,5	15,7	18,4
GOPI	13,6	12,6	10,4	9,4	20,7	25,2	16,3	10,7	7,1	9,0	11,3	12,4
GOFO	18,4	17,6	17,3	18,6	21,3	21,2	16,6	15,0	10,0	12,2	15,9	17,2
GOJA	13,7	14,1	12,3	8,9	10,3	11,8	9,0	7,7	6,4	8,5	10,3	12,2
MABA	12,3	12,0	10,4	9,9	22,5	37,8	27,7	17,3	6,1	7,9	11,0	12,7
MGCA	16,8	14,5	13,2	13,7	19,1	23,9	15,7	11,4	8,4	12,2	15,1	16,4
MGUB	16,0	15,4	13,0	12,1	13,2	16,0	11,1	8,8	7,6	9,6	11,8	14,2
MGMO	21,6	21,8	21,9	32,4	43,1	43,9	29,7	23,3	13,5	16,0	21,3	23,8
MGPO	20,1	20,5	17,8	18,5	17,2	17,5	15,7	14,8	12,6	14,6	18,6	21,2
MGJO	16,7	16,5	14,7	17,0	23,8	25,4	20,4	15,3	11,6	14,0	17,3	18,5
MSIV	11,5	10,9	8,6	7,1	4,5	5,8	4,4	5,1	5,9	8,6	9,7	10,5
MTDI	9,1	8,7	7,2	5,0	11,0	23,1	16,6	9,2	4,5	5,5	7,7	9,0
PAMA	9,9	10,4	10,3	8,0	8,0	13,3	16,9	12,5	5,3	5,4	6,9	8,2
PBJO	7,8	7,9	10,0	13,9	18,5	20,3	17,9	14,1	12,7	16,5	16,6	8,0
PEPE	47,5	49,1	45,7	43,4	48,9	61,0	59,1	41,3	28,6	31,5	36,1	44,1
PERE	5,0	5,9	7,7	9,6	12,7	15,4	14,8	11,7	9,4	7,6	8,2	5,7
PIBO	17,6	17,3	15,2	16,2	31,0	40,5	34,3	21,0	10,5	11,2	14,0	16,9
PIFL	17,1	17,4	15,1	12,1	11,5	46,5	31,0	14,8	9,1	9,7	11,8	14,0
PRMA	12,1	10,7	8,5	5,0	3,3	3,5	4,3	4,7	4,6	7,0	8,1	9,6
RNNA	10,0	9,9	14,3	18,9	22,7	24,0	21,0	17,5	19,2	23,4	19,6	14,6
RSSA	5,0	3,6	1,3	1,6	1,2	1,4	3,2	2,9	3,0	3,8	4,2	4,7
SEAR	10,0	8,8	11,9	17,4	22,1	23,4	20,4	15,8	13,2	14,0	19,8	15,9
SPPI	17,8	16,8	12,3	8,5	6,4	6,5	7,2	6,9	7,0	9,8	12,1	14,9
SPPR	15,4	15,3	12,8	9,8	7,3	8,8	8,0	7,6	7,7	10,4	12,0	13,5
SPCA	20,1	18,8	15,3	11,8	9,4	13,5	13,4	10,4	9,1	12,5	16,1	18,7
SPVO	18,1	16,8	15,2	13,6	12,4	15,7	11,4	9,1	7,9	11,7	15,0	16,3
TOPE	10,3	9,4	8,7	7,9	33,0	40,1	33,0	17,1	6,5	6,6	9,2	10,4
TOAR	8,6	8,3	7,5	5,7	7,6	27,5	15,8	7,5	4,2	5,6	7,7	8,4
TOPA	8,7	8,1	7,6	7,3	24,4	37,3	24,3	13,7	5,1	5,5	8,1	8,7

ANEXO G - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura arenosa e aplicação de cinco lâminas líquidas de 30 mm (IR05), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	8,9	8,1	9,7	11,7	16,3	18,3	16,7	12,3	9,6	9,9	9,8	7,7
BABA	21,9	22,2	19,1	19,1	41,4	48,2	33,4	23,6	13,9	12,5	18,3	22,5
GOPI	16,4	15,1	12,9	11,9	24,2	27,2	18,0	11,9	8,1	10,2	14,0	15,3
GOFO	22,8	22,7	23,0	23,2	26,7	23,8	19,5	17,8	12,6	14,5	20,0	21,9
GOJA	17,2	18,0	15,7	12,4	13,7	13,5	10,3	9,2	7,6	9,9	12,7	15,4
MABA	15,2	14,6	13,6	12,5	24,6	40,8	29,9	18,4	6,5	8,5	12,5	14,9
MGCA	21,8	18,3	16,2	16,9	24,1	26,1	17,7	13,5	10,0	14,1	18,5	21,2
MGUB	19,9	19,7	17,2	15,7	16,6	17,9	12,9	10,7	9,4	11,5	14,9	17,7
MGMO	26,4	26,1	26,0	37,7	49,7	47,9	33,0	25,5	15,0	17,7	24,8	28,6
MGPO	25,0	25,9	24,3	24,3	22,4	20,5	17,8	17,2	15,3	17,9	23,7	26,9
MGJO	20,7	20,5	18,3	21,7	32,7	28,4	22,8	17,2	13,8	16,4	21,6	23,6
MSIV	13,6	12,9	10,9	9,6	6,7	7,3	5,6	6,9	8,0	10,4	11,9	12,7
MTDI	11,3	11,1	8,9	6,4	13,0	24,2	17,4	9,9	5,0	6,3	9,5	11,0
PAMA	12,7	13,9	13,5	10,9	10,2	14,0	18,1	13,4	6,1	6,2	8,9	10,5
PBJO	9,3	9,3	11,7	15,9	21,0	23,2	20,8	16,6	14,9	18,7	18,7	9,8
PEPE	55,2	57,2	53,4	51,8	58,7	67,9	65,6	46,8	33,8	35,6	41,6	50,4
PERE	6,5	7,2	8,9	11,0	14,5	17,5	17,2	13,7	10,9	9,2	9,9	7,4
PIBO	21,1	20,2	18,7	18,5	33,4	43,3	36,8	22,3	11,3	11,8	15,4	19,3
PIFL	21,8	22,5	19,7	15,1	14,1	48,9	33,6	16,3	9,6	10,9	12,8	16,2
PRMA	14,7	13,7	11,3	8,0	5,5	4,8	5,5	6,1	6,3	8,7	10,0	11,8
RNNA	11,8	12,0	16,4	21,6	26,0	27,6	24,4	20,0	21,7	26,1	22,0	16,7
RSSA	6,9	5,8	4,1	3,0	1,5	2,8	3,8	3,3	3,7	5,3	5,8	6,4
SEAR	11,7	11,2	13,9	20,0	25,5	27,5	24,1	19,0	16,2	17,1	22,3	18,1
SPPI	21,7	20,6	16,1	13,0	9,3	8,6	8,9	9,1	9,2	11,9	14,8	18,2
SPPR	18,8	18,5	15,7	13,1	10,9	11,2	9,6	9,6	10,0	12,4	14,7	16,4
SPCA	24,8	23,7	19,4	16,8	14,7	15,8	15,2	12,9	11,4	14,7	19,3	23,2
SPVO	22,4	21,3	19,1	17,2	16,9	17,7	13,1	11,4	10,3	13,7	17,7	20,6
TOPE	12,8	12,1	11,5	9,5	34,5	42,1	34,4	17,6	6,8	7,1	10,5	12,7
TOAR	11,7	11,6	9,9	8,1	9,8	28,2	17,1	8,5	4,9	6,9	10,4	11,0
TOPA	10,7	10,2	9,9	9,0	26,5	38,7	25,4	14,1	5,4	6,1	9,3	10,4

ANEXO H - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura médio-argilosa e aplicação de uma lâmina líquida de 30 mm (IR01), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	0,7	0,5	2,3	2,6	3,2	3,4	2,8	1,2	0,3	0,3	0,8	0,7
BABA	4,0	3,6	2,7	1,5	0,8	0,7	3,0	5,0	8,0	3,6	4,4	4,9
GOPI	3,2	3,0	1,3	0,3	0,7	2,6	2,7	3,9	2,3	2,8	3,8	3,6
GOFO	3,8	3,2	1,6	1,4	2,4	3,5	5,9	6,4	5,0	3,1	4,0	3,9
GOJA	2,5	2,7	1,5	0,2	0,4	1,5	1,6	1,8	1,4	2,2	2,6	3,1
MABA	3,4	2,7	2,0	0,5	0,4	0,1	0,9	2,7	3,5	2,6	3,3	3,6
MGCA	3,1	2,9	2,1	0,8	0,7	2,1	2,3	3,5	2,8	2,4	3,2	3,0
MGUB	2,6	2,8	1,4	0,0	0,4	1,5	1,7	2,0	1,3	1,9	2,7	3,1
MGMO	4,4	4,0	4,1	3,0	0,2	1,5	3,6	7,3	8,9	5,0	4,4	4,9
MGPO	4,1	3,8	2,1	1,7	1,7	1,8	3,7	4,3	4,0	3,2	4,3	4,4
MGJO	3,4	3,1	2,2	0,8	0,8	3,0	4,4	7,2	5,7	3,1	4,1	4,4
MSIV	2,4	2,0	1,0	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,4	1,9	2,1	2,4
MTDI	2,5	1,9	1,1	0,2	0,3	0,5	0,9	1,4	1,2	1,6	2,2	2,4
PAMA	1,7	1,6	1,2	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	0,7	0,7	1,0	1,3
PBJO	0,8	0,5	2,6	3,0	3,7	3,5	3,0	2,3	0,7	0,9	1,2	0,8
PEPE	9,5	10,0	10,2	5,6	3,5	2,8	2,4	2,9	3,5	8,7	9,6	9,1
PERE	0,6	0,4	2,3	2,3	3,0	3,0	2,9	1,9	0,5	0,8	1,0	0,7
PIBO	3,8	3,5	2,5	1,6	0,7	0,0	1,0	2,9	5,8	3,3	3,7	3,9
PIFL	5,0	4,2	2,8	0,7	0,8	0,3	0,5	1,1	2,4	3,2	3,5	4,2
PRMA	2,2	2,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	1,4	1,7	1,9
RNNA	1,1	0,6	2,9	3,6	3,4	3,1	2,9	2,2	1,3	0,9	0,9	1,2
RSSA	1,5	1,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,3	1,3	1,4
SEAR	0,8	1,0	2,8	3,4	4,3	3,7	3,0	2,4	0,9	0,8	0,7	0,9
SPPI	3,7	3,7	1,0	0,7	0,4	0,5	0,4	0,7	0,6	2,5	3,1	3,7
SPPR	3,0	2,9	1,5	0,4	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	2,3	2,8	2,9
SPCA	4,0	3,2	1,8	0,9	0,7	0,8	1,1	0,9	1,2	2,1	3,1	4,0
SPVO	3,5	3,5	1,9	0,5	0,8	1,4	0,5	1,5	1,4	2,3	3,0	3,4
TOPE	3,1	2,5	1,9	0,4	0,2	0,0	1,1	3,9	3,7	2,4	3,4	3,7
TOAR	1,1	0,9	0,6	0,1	0,1	0,5	0,6	1,1	1,1	0,7	0,9	0,9
TOPA	1,8	1,6	1,3	0,3	0,3	0,4	1,2	3,1	2,6	1,7	2,4	2,3

ANEXO I - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura médio-argilosa e aplicação de duas lâminas líquidas de 30 mm (IR02), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	1,1	2,7	4,6	5,1	5,8	6,4	5,3	3,1	1,7	0,6	1,3	1,2
BABA	7,0	6,0	4,9	3,8	3,6	5,6	7,8	8,6	11,2	6,4	7,5	8,1
GOPI	5,3	4,6	3,1	1,4	2,6	4,8	4,6	4,9	4,5	4,5	5,9	6,1
GOFO	6,7	6,1	4,5	3,1	4,7	7,1	7,8	8,0	7,3	5,6	7,3	7,2
GOJA	4,8	4,5	3,4	1,1	1,5	2,7	2,6	2,5	2,9	3,6	4,8	5,5
MABA	6,4	5,1	4,2	2,4	1,6	2,8	3,9	5,1	5,6	4,6	5,9	6,8
MGCA	5,8	4,7	4,0	2,5	2,7	5,0	4,5	5,1	4,7	4,2	6,0	6,7
MGUB	5,0	5,0	3,8	1,2	1,3	2,7	2,7	2,9	2,7	3,7	5,1	5,9
MGMO	7,9	7,1	7,2	6,2	5,0	9,0	10,1	14,3	12,6	8,5	7,8	8,7
MGPO	7,5	7,1	5,5	3,2	4,2	4,2	5,5	6,3	6,3	5,8	7,9	8,1
MGJO	5,8	4,7	4,2	2,7	4,9	6,6	7,9	9,5	8,2	5,7	7,4	7,6
MSIV	4,5	4,0	2,5	0,6	0,3	0,6	0,7	0,7	2,0	3,3	3,7	4,3
MTDI	4,1	3,2	2,2	1,0	0,6	1,9	2,1	1,9	2,3	2,7	3,6	4,2
PAMA	3,9	3,8	3,0	1,5	0,3	0,7	1,0	0,9	1,2	1,5	2,4	3,2
PBJO	1,2	2,9	5,0	5,9	6,6	6,7	5,3	4,3	2,5	1,9	2,3	1,6
PEPE	16,8	17,3	16,9	12,3	10,9	10,2	8,6	8,2	11,8	16,5	17,6	16,9
PERE	0,8	2,5	4,4	4,6	5,3	5,5	5,5	4,3	2,3	1,3	1,5	1,1
PIBO	6,6	5,9	4,9	3,9	3,3	3,0	4,8	6,2	8,5	6,1	6,3	7,1
PIFL	9,3	7,8	5,6	3,1	1,6	2,7	2,2	3,2	5,4	6,1	6,6	7,9
PRMA	4,0	3,7	2,2	0,2	0,1	0,2	0,4	0,6	1,2	2,5	2,9	3,5
RNNA	1,9	3,1	5,3	6,3	6,4	6,2	5,3	4,1	3,0	2,2	2,2	2,5
RSSA	1,9	1,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	1,3	1,7	1,7	1,8
SEAR	1,8	3,4	5,5	6,6	8,3	7,5	6,0	4,9	2,9	1,8	1,7	2,0
SPPI	7,0	6,6	3,5	0,9	1,0	0,8	0,8	1,5	2,6	4,6	5,6	6,2
SPPR	5,7	5,5	4,1	1,1	0,4	1,2	1,3	1,5	2,4	4,1	5,1	5,3
SPCA	7,3	6,2	4,4	1,5	1,2	2,6	3,1	2,3	2,9	4,2	5,7	7,5
SPVO	6,9	6,2	4,6	1,6	1,2	3,1	3,1	2,9	3,2	4,2	5,7	6,8
TOPE	4,7	4,0	3,3	1,8	2,2	2,3	4,7	5,5	5,7	3,7	5,3	5,7
TOAR	3,1	2,4	2,1	1,1	0,2	1,7	1,4	1,7	1,5	2,1	2,6	2,8
TOPA	3,3	2,8	2,4	1,6	1,7	2,5	4,3	4,3	4,0	3,0	4,0	4,1

ANEXO J - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura médio-argilosa e aplicação de três lâminas líquidas de 30 mm (IR03), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	3,1	4,7	6,6	7,4	8,1	9,0	7,5	5,4	3,3	1,9	2,5	2,2
BABA	8,5	7,7	6,5	5,7	5,8	8,0	11,3	11,4	13,3	8,4	9,2	10,1
GOPI	7,2	6,0	4,5	3,0	3,6	6,2	5,6	6,8	5,7	5,7	7,6	7,8
GOFO	8,8	8,4	8,7	6,4	6,1	8,4	9,4	10,0	9,1	7,2	9,4	9,3
GOJA	7,3	6,6	5,7	2,9	1,5	3,1	3,3	3,9	4,0	4,9	6,5	7,7
MABA	7,8	6,5	5,4	4,0	3,2	4,7	5,9	7,2	7,3	5,7	7,1	8,3
MGCA	8,3	6,5	5,6	4,3	4,0	6,3	5,9	6,8	6,1	5,6	8,4	8,8
MGUB	8,1	7,3	5,8	3,2	1,8	3,2	3,4	4,1	4,0	5,3	7,4	8,7
MGMO	10,3	9,3	9,3	8,9	8,9	12,0	14,2	17,8	14,9	11,2	10,2	11,7
MGPO	10,6	9,7	8,5	5,7	5,3	5,5	7,0	8,2	7,9	8,1	11,4	11,9
MGJO	8,1	7,0	5,8	5,7	6,0	8,4	10,1	11,6	9,9	7,7	9,8	9,8
MSIV	6,9	6,1	4,5	2,4	0,6	0,8	1,0	2,1	3,2	5,4	5,9	6,5
MTDI	5,2	4,2	3,1	1,8	1,3	2,6	2,8	2,7	3,0	3,3	4,5	5,3
PAMA	5,4	5,5	4,4	2,5	1,0	1,3	1,7	1,3	1,8	2,1	3,3	4,3
PBJO	3,3	4,9	6,8	8,0	9,4	9,2	7,7	6,0	4,2	3,7	3,8	3,1
PEPE	23,0	24,2	23,0	18,0	16,8	15,8	14,8	15,9	17,9	22,0	23,3	23,1
PERE	2,8	4,5	6,1	6,4	7,3	7,9	7,9	6,2	4,0	2,7	2,8	2,3
PIBO	8,6	7,7	6,8	5,8	5,3	5,2	7,4	8,6	10,5	7,4	7,6	8,8
PIFL	12,0	10,0	7,4	5,1	3,6	4,6	4,0	5,9	7,8	7,5	7,9	9,7
PRMA	6,1	5,9	4,2	1,4	0,2	0,5	0,6	1,6	2,1	4,1	4,7	5,4
RNNA	4,0	5,2	8,0	9,4	9,4	9,0	7,7	5,8	4,5	3,8	3,7	3,9
RSSA	2,0	1,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	1,4	1,6	1,8	1,8	1,9
SEAR	4,1	5,7	7,4	9,2	11,8	11,1	9,0	7,3	4,8	3,6	3,5	4,0
SPPI	11,7	10,5	7,1	2,2	1,1	1,3	1,5	3,2	4,2	7,4	8,8	10,6
SPPR	9,0	8,8	6,6	3,9	0,8	1,5	2,1	3,2	3,9	6,7	7,9	8,6
SPCA	11,7	9,1	7,6	4,4	1,8	2,9	4,0	3,9	4,6	6,6	9,4	11,5
SPVO	10,4	9,2	6,9	4,3	2,3	3,8	4,1	4,5	4,8	6,3	8,7	10,4
TOPE	5,7	5,0	4,3	3,0	3,3	3,8	6,5	7,3	6,8	4,2	5,9	6,7
TOAR	4,4	3,7	3,0	2,0	1,0	2,4	2,1	2,0	2,4	2,9	3,8	4,2
TOPA	4,3	3,9	3,4	2,6	2,7	3,7	5,6	5,4	5,0	3,5	4,8	5,1

ANEXO K - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura médio-argilosa e aplicação de quatro lâminas líquidas de 30 mm (IR04), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	4,9	6,3	8,5	9,8	11,0	12,2	10,3	7,7	5,2	3,4	3,8	4,2
BABA	10,0	9,1	8,1	7,4	7,6	11,0	14,1	13,4	14,2	10,0	9,9	12,4
GOPI	8,6	7,9	6,4	4,6	5,6	7,8	7,2	7,8	6,5	6,5	9,0	9,4
GOFO	11,6	11,5	11,1	8,7	8,4	10,4	11,3	11,5	10,2	9,1	11,8	12,0
GOJA	9,4	9,2	7,9	4,9	3,5	4,4	4,5	4,8	4,9	6,2	8,5	10,0
MABA	9,7	8,3	6,8	5,3	4,7	6,2	7,8	8,8	8,0	6,3	7,9	9,8
MGCA	10,8	8,7	7,4	5,9	6,7	8,6	7,5	8,0	7,1	7,2	10,9	12,1
MGUB	10,6	10,0	8,9	5,3	3,2	4,4	4,5	5,1	5,1	6,9	9,8	11,2
MGMO	12,3	11,0	11,3	10,9	11,3	15,9	17,6	20,0	16,3	13,1	12,1	14,6
MGPO	13,8	12,8	12,2	8,7	7,9	7,6	8,7	9,6	9,5	10,4	14,9	15,4
MGJO	10,0	9,2	9,0	8,0	9,3	11,6	12,1	13,1	11,1	9,5	12,1	12,5
MSIV	9,2	8,2	6,7	4,3	2,1	2,1	2,2	3,1	4,8	7,5	8,0	8,8
MTDI	6,1	5,3	3,9	2,3	1,9	3,5	3,4	3,1	3,3	3,7	5,4	6,2
PAMA	6,7	6,8	5,7	3,5	1,6	1,9	2,1	1,7	2,1	2,4	3,8	5,2
PBJO	4,9	6,4	9,1	10,6	12,5	12,6	10,7	8,4	6,1	5,5	5,2	5,0
PEPE	29,1	29,6	28,2	22,2	21,1	20,2	21,8	21,9	22,5	26,8	28,3	28,5
PERE	4,6	6,1	8,1	8,6	9,8	10,5	10,5	8,4	5,9	4,3	4,1	4,1
PIBO	10,5	9,7	8,1	7,2	7,1	7,2	9,7	10,6	11,2	8,4	8,2	10,3
PIFL	14,4	12,3	9,5	6,6	5,2	6,1	6,4	8,0	8,8	8,2	8,4	10,6
PRMA	8,5	8,3	6,6	3,5	0,9	1,4	1,5	2,4	3,5	6,1	6,8	7,7
RNNA	5,6	7,1	10,5	12,3	12,9	12,2	10,7	7,9	6,3	5,5	5,5	5,7
RSSA	2,8	2,7	1,2	0,4	0,4	0,3	1,8	1,8	1,8	2,5	2,6	2,7
SEAR	6,3	7,4	9,6	12,4	16,1	15,0	11,9	9,6	6,8	5,4	5,4	6,2
SPPI	15,1	13,1	9,6	5,4	2,1	2,1	3,1	4,6	6,4	9,9	12,1	14,3
SPPR	12,0	11,7	9,6	6,6	2,9	3,1	3,7	4,4	6,0	9,0	10,9	11,9
SPCA	15,3	12,7	10,4	6,3	4,0	5,2	5,6	5,3	6,5	8,8	12,4	15,2
SPVO	13,5	11,8	9,5	6,6	4,6	6,1	5,6	5,9	6,3	7,8	11,1	13,5
TOPE	6,7	6,1	5,2	3,9	4,4	5,7	8,3	8,3	7,1	4,4	6,4	7,5
TOAR	5,8	4,8	4,2	2,8	1,9	3,2	2,3	2,7	2,8	3,3	5,1	5,6
TOPA	5,2	4,9	4,3	3,5	3,6	5,0	6,7	6,2	5,4	3,8	5,3	5,9

ANEXO L - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura médio-argilosa e aplicação de cinco lâminas líquidas de 30 mm (IR05), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	6,2	7,9	10,2	11,9	13,0	15,0	13,0	9,8	6,9	4,8	5,6	5,7
BABA	12,8	12,4	10,6	9,1	9,6	13,4	16,2	14,8	14,8	11,5	11,3	15,2
GOPI	11,4	10,2	8,5	7,0	7,4	9,3	8,2	8,4	7,1	7,6	11,4	12,0
GOFO	14,7	15,3	14,4	11,5	10,8	12,1	12,6	12,6	11,2	10,8	15,0	15,8
GOJA	12,1	11,7	10,6	7,3	5,3	5,5	5,2	5,5	5,8	7,6	10,7	12,5
MABA	11,4	10,3	8,8	6,7	5,9	8,1	9,4	9,5	8,4	6,9	9,2	11,4
MGCA	14,4	11,5	10,2	8,4	9,2	10,0	8,6	8,9	8,1	8,8	13,9	15,6
MGUB	13,7	13,0	11,3	8,2	4,8	5,4	5,2	6,0	6,1	8,3	11,9	13,7
MGMO	15,7	14,3	13,8	12,9	15,0	19,4	20,2	21,9	16,9	14,7	13,9	17,9
MGPO	18,2	17,0	16,0	11,7	10,9	9,1	9,8	10,9	11,0	13,0	19,1	21,5
MGJO	13,0	11,7	11,9	11,0	11,9	13,5	13,6	14,2	12,1	11,5	15,2	16,2
MSIV	11,1	10,2	8,4	6,2	3,9	3,1	3,0	4,4	6,5	9,2	10,0	11,0
MTDI	7,8	6,7	4,9	2,9	2,6	4,0	3,8	3,4	3,6	4,3	6,7	7,7
PAMA	8,3	8,5	7,2	4,7	2,2	2,2	2,4	2,0	2,2	2,7	4,7	6,5
PBJO	6,0	8,1	11,1	12,9	14,9	15,0	13,2	10,5	7,7	6,9	7,0	6,3
PEPE	34,2	35,2	32,5	26,6	25,3	26,5	27,5	26,6	26,6	30,2	31,9	32,6
PERE	5,9	7,7	9,6	10,5	11,7	12,6	12,5	10,2	7,3	5,5	5,6	5,5
PIBO	13,1	11,9	10,6	8,9	8,5	9,4	11,6	11,2	11,7	9,2	9,3	12,4
PIFL	16,9	15,8	11,9	8,5	6,6	8,3	8,4	8,8	9,0	9,3	9,1	11,6
PRMA	11,0	10,7	8,9	5,7	2,8	2,2	2,3	3,4	5,1	8,0	8,8	10,2
RNNA	6,7	8,9	12,9	15,1	15,9	15,1	13,2	9,9	7,7	6,8	7,0	7,1
RSSA	5,2	5,3	4,0	1,7	0,4	1,5	2,0	1,9	2,4	4,7	4,8	5,0
SEAR	7,8	9,0	12,0	15,4	19,7	18,8	15,0	11,9	9,0	7,2	7,6	8,3
SPPI	18,9	16,2	13,1	8,4	4,5	3,5	4,3	6,3	8,3	12,3	15,1	17,7
SPPR	14,4	13,8	12,1	9,0	5,3	4,5	4,7	6,0	7,9	10,7	13,0	14,1
SPCA	18,6	16,0	13,4	9,4	6,5	6,5	6,8	6,9	8,0	10,3	14,9	18,6
SPVO	16,7	14,7	12,1	9,2	6,9	7,4	6,8	7,2	7,6	9,5	13,4	16,4
TOPE	8,9	7,9	7,2	5,0	5,4	7,4	9,3	8,6	7,4	4,9	7,4	9,3
TOAR	7,8	6,7	5,8	3,8	2,7	3,4	2,9	2,9	3,1	4,1	6,7	7,3
TOPA	6,9	6,8	5,9	4,6	4,5	6,0	7,4	6,5	5,6	4,2	6,4	7,3

ANEXO M - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura argilosa e aplicação de uma lâmina líquida de 30 mm (IR01), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	1,0	0,8	2,0	2,6	2,2	3,9	3,3	1,6	0,5	1,1	1,5	1,3
BABA	3,8	3,2	2,6	1,8	3,0	3,3	1,6	1,2	2,4	4,0	4,2	4,4
GOPI	3,9	2,6	1,2	0,3	2,1	2,4	1,5	1,2	1,6	2,5	3,2	3,6
GOFO	4,0	3,0	2,5	0,9	2,5	2,6	2,9	2,7	3,2	3,2	4,1	4,3
GOJA	3,5	2,8	1,5	0,3	1,4	2,2	1,7	1,6	1,4	2,0	2,6	3,1
MABA	3,9	3,0	1,9	0,6	1,7	2,2	1,6	1,0	1,8	2,5	3,1	3,8
MGCA	3,0	2,3	1,6	0,8	1,9	2,7	2,2	1,5	2,4	2,5	3,3	4,1
MGUB	3,7	3,5	1,6	0,4	1,6	2,2	1,6	1,5	1,6	1,9	2,9	3,6
MGMO	3,1	2,9	2,3	2,0	3,1	3,3	1,4	2,1	4,4	4,1	3,6	3,9
MGPO	4,3	3,1	2,3	1,1	3,4	3,2	3,1	2,9	3,6	2,9	3,9	5,0
MGJO	3,6	2,8	1,9	1,0	4,0	3,2	2,3	2,1	4,5	3,2	4,4	4,7
MSIV	2,3	2,1	1,1	0,3	0,8	1,3	1,4	1,5	0,9	1,8	2,1	2,3
MTDI	2,6	2,3	1,1	0,2	0,7	1,0	1,0	0,7	0,7	1,4	2,0	2,3
PAMA	1,7	2,0	1,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,4
PBJO	1,2	1,0	2,3	2,8	3,0	3,1	2,9	2,0	1,0	1,6	1,7	1,7
PEPE	7,8	7,8	8,6	6,7	10,9	8,8	4,9	2,7	2,1	9,8	10,2	8,9
PERE	0,8	0,4	1,8	1,9	2,1	2,7	2,9	1,8	0,7	1,2	1,3	1,0
PIBO	3,8	2,9	1,9	1,3	2,7	2,6	1,3	0,9	1,6	3,9	4,4	4,6
PIFL	5,4	5,5	3,3	2,0	2,7	3,4	3,2	1,1	1,3	4,0	4,2	4,8
PRMA	2,2	1,8	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8	1,3	0,7	1,1	1,4	1,7
RNNA	1,5	1,1	2,6	2,5	2,9	2,5	2,3	1,8	0,9	2,0	1,6	1,4
RSSA	1,5	0,8	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,6	1,0	1,1	1,2
SEAR	1,4	1,6	3,0	3,8	4,8	4,1	3,7	2,5	1,4	2,1	2,2	2,0
SPPI	4,9	3,9	2,1	0,6	1,9	2,1	2,7	2,2	1,7	2,5	2,9	3,4
SPPR	2,4	3,1	1,7	1,1	1,6	1,9	2,1	2,3	1,7	2,1	2,3	2,8
SPCA	5,0	3,9	2,0	1,1	2,2	2,7	2,4	2,5	2,2	2,4	3,3	4,4
SPVO	4,3	4,1	2,1	0,9	2,2	3,1	2,6	2,3	1,6	2,5	3,0	3,8
TOPE	3,5	2,4	1,7	0,5	1,7	1,7	1,2	0,7	1,6	2,1	2,8	3,6
TOAR	1,1	1,0	0,7	0,1	0,2	1,1	0,9	0,6	0,8	0,5	0,8	1,0
TOPA	2,5	1,9	1,4	0,3	1,2	1,5	0,8	0,7	1,4	1,8	2,5	2,9

ANEXO N - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura argilosa e aplicação de duas lâminas líquidas de 30 mm (IR02), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	1,6	2,5	3,8	4,6	4,5	6,3	6,0	3,9	1,8	1,6	2,1	1,9
BABA	5,8	4,8	4,3	2,9	3,9	4,2	3,0	2,7	5,9	6,7	7,0	7,0
GOPI	6,4	4,5	2,7	1,2	2,7	3,2	2,3	2,1	3,5	4,8	6,1	6,7
GOFO	6,0	5,0	4,8	2,2	3,7	3,7	3,8	4,1	5,9	5,5	7,1	7,4
GOJA	6,5	5,5	3,7	1,2	2,3	2,8	2,5	2,4	2,9	3,7	4,9	5,7
MABA	6,6	5,1	3,5	2,0	2,3	2,7	2,2	2,1	4,1	4,6	5,6	6,6
MGCA	5,4	4,1	3,3	1,5	3,0	3,8	3,0	2,9	4,5	4,4	5,9	7,1
MGUB	6,7	6,3	3,8	1,1	2,2	2,7	2,4	2,4	3,2	4,0	6,1	7,2
MGMO	4,8	4,4	3,9	3,3	4,0	4,8	3,2	4,2	7,9	6,7	5,5	6,0
MGPO	7,4	5,8	4,7	2,4	4,7	4,6	4,4	4,4	6,0	5,9	7,1	8,7
MGJO	5,5	4,5	3,4	2,4	5,3	4,5	3,7	3,8	7,1	5,4	6,7	7,5
MSIV	4,3	4,1	2,7	1,0	1,1	1,6	1,7	2,1	2,4	3,3	3,8	4,2
MTDI	4,9	3,7	2,0	0,7	0,9	1,3	1,2	1,2	1,6	2,3	3,5	4,4
PAMA	3,8	4,2	2,6	1,0	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,2	1,8	3,0
PBJO	2,0	3,0	3,8	4,6	5,3	5,3	4,6	3,5	2,3	2,3	2,4	2,5
PEPE	13,4	12,8	13,9	10,4	14,2	11,4	9,4	6,5	11,4	17,3	17,4	15,3
PERE	1,2	2,0	3,2	3,2	3,8	4,8	5,5	4,1	2,1	1,9	1,7	1,5
PIBO	6,3	4,7	3,3	2,5	3,3	3,1	1,9	2,4	5,0	6,2	7,1	7,1
PIFL	9,8	9,4	6,2	3,8	4,0	4,4	3,8	2,4	5,0	7,7	8,1	9,1
PRMA	3,7	3,5	2,0	0,4	0,4	0,8	1,1	1,6	1,6	2,2	2,6	3,2
RNNA	2,4	2,9	4,6	5,1	5,2	4,5	3,9	3,0	2,0	2,4	2,2	2,1
RSSA	1,8	1,1	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,6	1,4	1,5	1,7
SEAR	2,7	4,1	4,8	6,0	7,9	7,1	6,1	4,9	2,9	3,2	3,3	2,9
SPPI	8,8	7,5	4,3	1,5	2,4	3,1	3,7	3,3	3,6	4,5	5,4	6,3
SPPR	5,7	6,3	4,1	2,3	2,7	3,0	3,0	3,2	3,6	4,0	4,5	5,7
SPCA	9,5	7,3	5,0	2,5	3,2	3,8	3,9	3,7	4,1	4,6	6,1	8,2
SPVO	8,1	7,3	4,7	2,2	3,6	4,0	3,8	3,2	3,5	4,3	5,7	7,0
TOPE	5,4	3,5	2,7	1,3	2,2	2,1	1,8	1,6	3,4	3,5	4,5	6,0
TOAR	3,6	3,2	2,2	0,9	0,4	1,1	1,0	1,0	1,1	1,8	2,8	3,4
TOPA	4,5	2,9	2,3	1,1	1,6	1,9	1,3	1,5	2,8	3,4	4,3	5,3

ANEXO O - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura argilosa e aplicação de três lâminas líquidas de 30 mm (IR03), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	3,5	4,2	5,3	6,5	6,6	9,0	8,2	5,8	3,5	2,8	3,2	3,0
BABA	6,6	5,4	4,6	3,4	4,7	5,1	4,8	6,4	7,9	8,1	8,1	8,3
GOPI	7,8	5,3	3,9	2,3	3,6	4,0	3,2	3,6	5,0	5,9	7,7	8,5
GOFO	7,9	6,6	6,1	3,7	4,4	4,8	5,1	6,6	7,9	7,0	9,1	9,6
GOJA	9,0	7,2	5,7	3,0	2,8	3,5	3,3	3,7	4,2	5,2	6,9	8,2
MABA	8,0	5,9	4,2	2,6	2,9	3,5	3,4	4,4	6,0	5,3	6,5	7,9
MGCA	7,7	5,5	4,6	2,8	4,1	5,2	4,3	4,8	6,0	5,9	8,1	10,2
MGUB	9,8	8,2	5,7	2,6	2,9	3,4	3,2	3,6	4,7	5,4	8,0	9,6
MGMO	5,6	5,0	4,8	4,4	5,3	7,0	5,6	7,6	9,7	8,0	6,5	7,1
MGPO	10,1	7,6	6,5	4,0	5,7	5,8	5,6	6,5	7,9	8,0	10,1	11,9
MGJO	6,9	5,3	4,4	3,7	6,3	5,3	5,1	6,1	8,7	6,8	8,2	9,2
MSIV	6,3	5,8	4,3	2,2	1,4	1,9	2,5	3,3	3,7	5,1	5,7	6,2
MTDI	6,2	4,7	2,5	1,1	1,3	1,6	1,9	1,8	2,1	2,8	4,4	5,3
PAMA	5,2	5,6	3,7	1,7	0,6	0,7	1,1	1,1	1,4	1,5	2,3	3,8
PBJO	3,7	4,3	5,4	6,3	7,1	7,2	6,6	5,0	3,6	3,5	3,7	4,0
PEPE	17,8	16,6	17,2	14,1	17,2	14,3	12,4	15,7	17,9	22,8	22,7	20,6
PERE	2,7	3,3	4,2	4,5	5,1	6,8	7,5	5,6	3,6	2,8	2,7	2,4
PIBO	7,8	5,4	3,9	3,2	3,8	3,7	3,3	5,7	6,9	7,1	8,2	8,4
PIFL	12,2	11,2	7,1	4,6	4,6	5,0	5,0	5,9	8,5	9,2	9,9	11,0
PRMA	5,5	5,5	3,8	1,5	0,6	1,0	1,3	2,3	2,5	3,5	4,1	5,0
RNNA	3,9	4,5	6,5	7,1	8,0	6,5	5,8	4,3	3,0	3,6	3,4	3,6
RSSA	2,1	1,4	0,7	0,3	0,3	0,4	0,3	1,3	1,9	1,6	1,8	1,9
SEAR	5,1	5,9	6,6	8,0	10,3	9,9	8,6	6,9	4,6	4,5	4,7	4,7
SPPI	13,2	11,9	7,6	3,4	3,0	3,8	4,7	4,9	5,2	7,1	8,4	10,3
SPPR	9,3	9,5	7,2	4,6	3,6	4,0	4,0	4,9	5,2	6,3	7,2	8,8
SPCA	13,5	11,1	7,8	4,3	4,1	5,0	5,2	5,6	6,0	6,7	8,6	11,8
SPVO	11,5	9,6	6,7	4,0	4,9	5,2	5,1	5,0	5,2	6,4	8,2	10,5
TOPE	6,4	4,0	3,1	1,7	2,6	2,4	3,0	3,3	4,4	4,0	5,0	6,9
TOAR	4,8	4,0	2,8	1,4	0,7	1,4	1,5	1,2	2,0	2,6	3,9	4,9
TOPA	5,6	3,6	2,8	1,6	2,1	2,3	2,0	2,7	3,7	3,8	5,0	6,3

ANEXO P - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura argilosa e aplicação de quatro lâminas líquidas de 30 mm (IR04), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	4,9	5,4	6,5	8,1	8,5	11,5	10,8	8,0	5,2	4,2	4,3	4,8
BABA	7,8	6,3	5,2	4,0	5,4	6,5	8,2	8,6	8,8	8,9	8,5	9,2
GOPI	9,0	6,6	4,7	3,2	4,4	5,1	4,6	4,8	5,7	6,7	9,1	9,7
GOFO	9,3	7,3	6,8	4,7	5,3	6,3	7,2	8,4	9,0	8,5	10,8	11,2
GOJA	11,1	9,2	7,3	4,6	3,8	4,5	4,5	4,8	5,3	6,4	8,8	10,0
MABA	9,0	7,0	5,1	3,2	3,5	4,4	5,5	6,1	6,7	5,7	6,9	8,7
MGCA	10,0	6,8	5,5	3,7	5,2	6,7	6,2	6,3	7,1	6,8	9,7	12,2
MGUB	12,5	10,4	7,3	4,1	3,9	4,4	4,2	4,8	5,8	6,7	9,9	12,1
MGMO	6,3	5,7	5,4	5,3	6,3	9,3	8,9	9,5	10,8	9,5	7,4	8,3
MGPO	12,8	10,0	8,9	5,6	7,6	7,4	7,6	8,2	9,3	10,0	12,2	14,6
MGJO	8,3	6,1	5,6	4,8	7,8	6,9	7,3	7,4	9,7	7,9	9,8	11,5
MSIV	8,5	7,6	5,8	3,8	2,4	2,9	3,4	4,3	5,0	7,1	8,0	8,5
MTDI	7,0	5,5	3,2	1,4	1,6	2,2	2,5	2,2	2,4	3,1	4,9	6,2
PAMA	6,0	6,6	4,5	2,0	0,9	1,0	1,4	1,5	1,6	1,7	2,6	4,5
PBJO	4,8	5,5	7,0	8,1	9,3	10,3	9,2	7,0	5,2	4,8	5,0	5,5
PEPE	21,1	19,8	20,0	16,3	19,3	17,2	20,9	22,4	23,4	26,1	26,5	24,5
PERE	3,8	4,2	5,5	6,0	6,7	8,7	9,9	7,8	5,1	4,1	3,7	3,7
PIBO	8,8	6,2	3,9	3,6	4,4	4,8	6,7	7,6	7,7	7,7	8,7	9,4
PIFL	13,4	12,4	8,0	5,0	5,1	5,5	7,7	8,7	9,8	9,6	10,4	11,5
PRMA	7,6	7,5	5,8	3,1	1,4	1,8	1,9	2,9	3,6	5,2	6,2	7,2
RNNA	5,1	5,6	8,3	9,3	11,1	9,7	8,2	6,0	4,4	4,7	4,6	4,9
RSSA	2,6	2,0	1,3	0,5	0,3	0,4	1,1	1,5	2,1	2,0	2,3	2,4
SEAR	6,9	7,3	8,0	10,0	13,5	13,8	11,4	8,9	6,1	5,9	6,7	7,0
SPPI	17,1	15,6	10,4	5,9	4,0	4,8	6,1	6,2	7,3	9,7	11,5	13,7
SPPR	12,6	12,6	10,0	7,2	5,5	5,8	5,6	6,3	7,1	8,6	9,9	11,9
SPCA	17,2	14,8	10,4	6,4	6,0	6,7	7,0	7,3	7,9	8,6	11,1	15,1
SPVO	14,7	12,4	8,4	5,4	6,2	6,8	6,7	6,4	6,9	7,9	10,2	13,0
TOPE	6,9	4,4	3,3	2,0	2,9	3,2	4,7	4,3	4,7	4,2	5,3	7,5
TOAR	5,8	4,9	3,5	1,7	1,2	2,0	1,8	2,0	2,4	2,7	4,7	5,8
TOPA	6,4	4,2	3,3	2,0	2,5	3,0	3,3	3,5	3,9	4,1	5,4	7,0

ANEXO Q - Incremento relativo médio na produtividade de cana-de-açúcar para diferentes datas de plantio, considerando-se um solo de textura argilosa e aplicação de cinco lâminas líquidas de 30 mm (IR05), em diferentes regiões brasileiras

Local	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ALMA	6,0	6,3	7,6	9,5	10,0	13,8	13,2	10,0	6,9	5,6	6,2	6,1
BABA	10,4	8,4	6,6	4,8	6,3	9,4	10,9	10,3	10,1	9,6	9,3	11,1
GOPI	11,3	8,5	6,4	4,8	5,5	6,3	5,8	5,4	6,2	7,6	10,8	12,0
GOFO	11,5	9,7	8,8	6,5	7,2	8,4	8,8	9,6	10,2	9,9	13,0	13,6
GOJA	13,4	11,7	9,7	6,3	5,3	5,5	5,4	5,6	6,1	7,7	10,7	12,2
MABA	10,7	9,2	6,6	4,0	4,2	6,2	7,4	6,8	7,3	6,3	7,8	10,2
MGCA	13,1	9,7	7,5	5,3	6,8	8,4	7,5	7,3	7,9	8,0	11,7	15,1
MGUB	15,1	12,9	9,5	6,0	5,1	5,4	5,1	5,5	6,6	8,0	12,0	14,7
MGMO	7,9	7,3	6,8	6,0	7,8	12,5	11,3	12,6	13,2	10,8	8,2	10,0
MGPO	15,9	12,7	11,2	7,6	9,8	9,3	9,2	9,6	10,9	12,0	15,1	19,0
MGJO	10,9	7,8	7,5	6,1	9,0	8,8	8,9	8,5	11,0	9,3	11,8	14,1
MSIV	10,0	9,0	7,3	5,4	4,0	3,6	4,0	5,2	6,6	8,6	9,6	10,2
MTDI	8,4	6,9	3,9	1,9	2,0	2,7	2,8	2,5	2,7	3,5	5,9	7,6
PAMA	7,3	8,0	5,8	2,7	1,2	1,3	1,7	1,7	1,7	1,8	3,0	5,1
PBJO	5,7	6,7	8,5	10,1	11,8	13,1	11,9	9,2	6,7	6,1	6,4	6,5
PEPE	24,1	23,3	22,8	18,3	21,1	25,5	27,4	27,7	28,1	29,0	29,5	27,4
PERE	4,5	5,1	6,4	7,0	7,9	10,2	11,8	9,5	6,4	5,1	5,1	4,7
PIBO	10,5	8,4	6,2	4,7	5,2	7,6	9,0	8,9	8,9	8,5	9,4	10,7
PIFL	15,6	14,7	10,5	6,3	6,0	8,0	10,2	10,4	11,0	10,3	11,3	12,8
PRMA	9,5	9,2	7,6	5,0	2,7	2,2	2,2	3,6	4,9	6,9	8,0	9,2
RNNA	5,9	6,9	10,0	11,5	13,7	12,5	10,7	7,8	5,8	5,8	6,0	6,0
RSSA	3,8	3,6	3,5	1,8	0,4	1,1	1,3	1,6	2,5	3,1	3,4	3,5
SEAR	8,4	8,4	9,8	12,7	17,0	17,9	14,5	11,2	8,3	7,9	8,9	8,9
SPPI	20,5	19,1	13,3	8,4	5,8	6,0	7,1	7,8	9,2	11,8	14,4	17,3
SPPR	15,1	14,8	12,1	9,6	7,9	7,0	6,8	7,8	8,9	10,3	12,1	14,5
SPCA	20,6	18,0	13,3	8,5	8,2	8,4	8,6	8,9	9,6	10,0	13,4	18,3
SPVO	17,6	14,5	10,4	7,2	7,9	8,3	8,0	7,8	8,2	9,4	12,1	15,9
TOPE	8,2	5,7	4,6	2,6	3,4	4,6	5,9	4,6	5,1	4,4	5,7	8,5
TOAR	7,4	6,7	4,7	2,5	1,8	2,2	2,4	2,3	2,6	3,1	5,9	7,4
TOPA	7,7	5,7	4,5	2,6	3,0	4,2	4,4	3,9	4,3	4,4	6,0	8,2