UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

CARLOS ROBERTO SOUZA CARMO

MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA APLICAÇÃO DE AGENTES MATURADORES E DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Botucatu

2020

CARLOS ROBERTO SOUZA CARMO

MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA APLICAÇÃO DE AGENTES MATURADORES E DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP Campus de Botucatu, como um dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Agronomia do Programa de Pós-Graduação em Agricultura - Energia na Agricultura (PPGA-Energia).

Orientador(a): Helenice de O. Florentino Silva

Botucatu

2020

C287m

Carmo, Carlos Roberto Souza
Modelo matemático para otimização do planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar / Carlos Roberto Souza Carmo. -- Botucatu, 2020
84 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientadora: Helenice de Oliveira Florentino Silva

1. Modelagem matemática. 2. Maturadores. 3. Otimização. 4. Programação por metas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA APLICAÇÃO DE AGENTES MATURADORES E DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: CARLOS ROBERTO SOUZA CARMO
ORIENTADORA: HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof.ª Dr.ª HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA
Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. FERNANDO DE LIMA CANEPPELE
Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP

Prof.ª Dr.ª CAMILA DE LIMA ALMEIDA DA SILVA
Pós-Doutoranda - Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. ANGELO ALIANO FILHO
Matemática / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Botucatu, 22 de maio de 2020

Digitalizado com CamScanner

À minha esposa, Renata, e aos meus filhos,

Pedro e João,

dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço à minha esposa pelo apoio e dedicação incondicionais e, ainda, por acreditar e estimular a minha capacidade, principalmente nos momentos de cansaço e fraqueza espiritual.

Aos meus filhos, que se constituem nos pilares sobre os quais e para os quais busco construir minha existência.

Agradeço à Professora Dra. Helenice de Oliveira Florentino Silva por toda a atenção, prontidão, paciência e esmero dedicados aos trabalhos de orientação.

Ao Professor Dr. Chandra Ade Irawan pelo apoio durante o processo de implementação dos cálculos do modelo proposto nesta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Energia na Agricultura (PPGA-Energia).

À Faculdade de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Uberlândia por me possibilitar participar do curso de Pós-Graduação em Agronomia-Energia na Agricultura (PPGA-Energia), junto à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus Botucatu-SP, e me qualificar profissionalmente.

Agradeço ao amigo e grande incentivador Professor Dr. Adriano Dawinson de Lima.

RESUMO

Esta pesquisa teve por objetivo propor um modelo matemático para auxílio no planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar, visando obter uma matéria-prima para o setor sucroenergético com máxima qualidade tecnológica relacionada ao teor de sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar. Para tanto, inicialmente, foi realizada a revisão teórica acerca da temática relacionada ao ciclo produtivo da cana-de-açúcar, e, ainda, foram pesquisados os resultados de investigações científicas voltadas para essa atividade e que contemplam o uso de agentes químicos de maturação. Na sequência, buscou-se identificar o conjunto de variáveis e processos que ocorrem na fase de maturação da cana, e, também, foi analisada a temática relacionada à utilização de modelos matemáticos aplicados à otimização de processos envolvidos na cultura em questão. Foi formulado um modelo matemático de programação linear inteira a partir de técnicas de Programação por Metas Ponderadas. A avaliação do modelo proposto foi realizada mediante testes computacionais, utilizando quatro cenários baseados em instâncias compostas por 18, 50, 100 e 500 talhões, nos quais foi simulado o cultivo de 18 variedades de cana-de-açúcar adaptáveis à região centro-sul do Brasil. O modelo proposto neste trabalho foi validado e sua utilidade pôde ser evidenciada pela sua aplicabilidade na identificação do momento ideal para realizar a aplicação do maturador, pela identificação do momento ótimo para realização da colheita da cana e também pela possibilidade de maximização da produtividade de sacarose.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Maturadores. Otimização. Programação por metas.

ABSTRACT

This research aimed to propose a mathematical model to support the planning of the application of ripening agents and sugarcane harvesting, aiming to obtain raw material for the sugarcane industry with maximum technological quality related to the sucrose content present in the sugarcane juice. Initially, the theoretical review was carried out on the theme related to the sugarcane production stages. Then, a research was conducted in order to identify the results of scientific investigations focused on that activity approaching the use of chemical maturation agents. Next, it was sought to identify the set of variables and processes that occurred during the sugarcane maturation phase, and it was also analyzed the theme related to the use of optimization mathematical modeling applied to the crop in question. Finally, an integer linear programming mathematical modeling based on Weighted Goal Programming techniques was formulated. The evaluation of the proposed model was performed through computational tests using four scenarios based on 18, 50, 100 and 500 fields, in which the cultivation of 18 sugarcane varieties adaptable to the south-central region of Brazil was simulated. The model proposed in this research was validated and its usefulness could be evidenced not only by its applicability in the identification of the ideal moment for the application of the ripener, as well as in the identification of the optimum moment for the sugarcane harvest, but, also for the possibility of maximizing sucrose productivity.

Keywords: Mathematical modeling. Ripener. Optimization. Goal programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar..... 27
Figura 2 – Curvas de maturação da cana-de-açúcar..... 29
Figura 3 – Esquema de planejamento proposto pelo modelo desta pesquisa a partir do exemplo hipotético da colheita dos talhões Y, Z e W..... 59
Figura 4 – Representação esquemática do ano de planejamento para aplicação dos testes computacionais..... 62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Maturadores indicados para a cultura da cana-de-açúcar..... 35

Quadro 2 – Resumo dos dados quantitativos de pesquisas envolvendo dosagens variadas de agentes maturadores..... 40

Quadro 3 – Pesquisas que utilizaram modelagens matemáticas voltadas para a otimização da colheita de cana-de-açúcar, de 1977 e 2017..... 42

Quadro 4 – Principais métodos de modelagem matemática de otimização baseada em PM..... 51

Quadro 5 – Descrição das variáveis, índices, parâmetros, funções e conjuntos do modelo proposto..... 57

Quadro 6 – Descrição dos valores assumidos para os índices, parâmetros e conjuntos utilizados nos testes computacionais do modelo proposto em todas as instâncias 63

Quadro 7 – Descrição da variedade plantada em cada talhão j e dos valores de F_j, $H_j TCH_j Pol_j$, u_j e v_j para todo j da instância I-18..... 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de 18 variedades de cana-de-açúcar adaptáveis à região centro-sul do Brasil..... 61

Tabela 2 – Parâmetros relacionados ao período recomendado para colheita [*tmin*, *tmax*] das variedades de cana-de-açúcar utilizadas para implementação dos testes computacionais..... 61

Tabela 3 – Dados para simulação das funções de produtividade de Pol a partir da ação do maturador..... 66

Tabela 4 – Funções de produtividade da cana-de-açúcar $P_j(x)$ e parâmetros relacionados aos respectivos períodos de ação de agentes maturadores (a_j)..... 67

Tabela 5 – Área plantada por variedade em cada instância..... 69

Tabela 6 – Quantidade de talhões por variedade em cada instância..... 70

Tabela 7 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-18*..... 70

Tabela 8 – Planejamento ótimo da safra na instância *I-18*..... 71

Tabela 9 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-50*..... 72

Tabela 10 – Produção mensal de sacarose por variedade de cana-de-açúcar plantada na instância *I-50*..... 72

Tabela 11 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-100*..... 73

Tabela 12 – Produção mensal de sacarose por variedade de cana-de-açúcar plantada na instância *I-100*..... 73

Tabela 13 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-500*..... 73

Tabela 14 – Produção mensal de sacarose por variedade de cana-de-açúcar plantada na instância *I-500*..... 74

Tabela 15 – Comparação entre as taxas médias percentuais de sacarose aparente (Pol_j) estimada pelo modelo para as variedades de cana-de-açúcar plantadas em todas as instâncias e taxas médias estimadas na literatura..... 75
Tabela 16 – Resultados da aplicação do modelo proposto na instância *I-18* com atribuição de diferentes pesos (u_j e v_j)..... 76
Tabela 17 – Planejamento da safra na instância *I-18* com atribuição de diferentes valores para os pesos (u_j e v_j)..... 76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Açúcares redutores
ATR	Açúcares totais recuperáveis
Brix	Teor de sólidos solúveis presentes no caldo da cana-de-açúcar
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DAA	Dias após a aplicação
EUA	Estados Unidos da América
g ha^{-1}	Gramas por hectares
GP	*Goal Programming*
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
L ha^{-1}	Litros por hectares
PLI	Programação linear inteira
PM	Programação por Metas
PM_E	Programação por Metas Estocástica
PMAED	Programação por Metas e Análise Envoltória de Dados
PMB	Programação por Metas Binária
PME	Programação por Metas Estendida
PMI	Programação por Metas Inteira
PML	Programação por Metas Lexicográficas
PMM	Programação por Metas Estendida
PMNL	Programação por Metas Não Linear
PMP	Programação por Metas Ponderada
Pol	Teor de sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar
PUI	Período útil de industrial
R^2	*R* quadrado ou coeficiente de determinação
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação de dados
TCH	Toneladas de cana por hectare

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 23
2 REVISÃO DA LITERATURA..... 26
2.1 Estádios Fenológicos da Cana-de-açúcar..... 26
2.2 Maturação da Cana-de-açúcar..... 31
2.3 Reguladores Vegetais de Maturação..... 34
2.4 Modelagem Matemática de Otimização Aplicada à Cultura da Cana-de-açúcar..... 41
2.5 Modelagem Matemática Baseada em Programação por Metas..... 48
3 MATERIAL E MÉTODOS..... 54
3.1 Modelo Matemático para Otimização do Planejamento da Aplicação de Agentes Maturadores e da Colheita da Cana-de-açúcar..... 54
3.2 Base de Dados para Realização dos Testes Computacionais..... 60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 69
5 CONCLUSÕES..... 78
REFERÊNCIAS..... 79

1 INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético possui a terceira maior área cultivada no Brasil, perfazendo cerca de nove milhões de hectares de área plantada, predominantemente na região centro-sul, além da região Nordeste (LORIZOLA; CAPITANI, 2018).

Em função da relevância atribuída à questão dos biocombustíveis, como é o caso do etanol, tem-se observado um volume crescente de investimentos internacionais no setor e o aumento das operações de fusões e incorporações por parte de grandes grupos usineiros, o que faz este setor ainda mais amplo (LORIZOLA; CAPITANI, 2018). Devido a este acentuado crescimento, a complexidade dos problemas desse segmento econômico tem aumentado consideravelmente, e isso, por sua vez, fez com que as pesquisas relacionadas à otimização de planejamentos de produção, colheita e processamento da cana-de-açúcar se intensificassem e diversificassem (NERVIS *et al*., 2017). O planejamento otimizado no setor sucroenergético promove uma série de benefícios operacionais, econômicos e ambientais, tanto ao longo do ciclo produtivo da cultura quanto na sua utilização industrial (RAMOS *et al*., 2016).

No planejamento da cultura da cana, devem ser consideradas as demandas técnico-operacionais do setor sucroenergético, no qual a matéria-prima a ser entregue nas usinas deve receber especial atenção, buscando identificar maiores níveis de produtividade e qualidade tecnológica. Essa matéria-prima deve apresentar apropriados parâmetros de qualidade de tal forma que torne processo produtivo economicamente viável (SILVA *et al*., 2018). Sendo que, entre outros parâmetros de qualidade a serem monitorados, a quantidade aparente de sacarose contida no caldo da cana-de-açúcar, ou Pol, assume grande relevância no processo de planejamento do plantio até a industrialização, passando pelos processos de cultivo e colheita. Esta qualidade pode ser alcançada naturalmente ou, dependendo da demanda, ser obtida com o uso de maturadores da cana.

Visando controlar o atendimento da demanda em todos os períodos, os gestores lançam mão do uso dos maturadores químicos, facilitando assim o manejo do processo de colheita e possibilitando que esta seja realizada muito próximo do apropriado ponto de maturação da cana. Mas, ainda assim, é provável que não se consiga identificar o melhor momento para realizar a colheita, de tal forma que se possa atender a demanda e maximizar a Pol da cana-de-açúcar plantada em todos

os talhões de uma unidade sucroenergética. Por outro lado, muitos destes gestores têm buscado técnicas matemáticas e computacionais para auxiliar nos planejamentos e tomadas de decisões de plantio, colheita e aplicações de agentes químicos.

Levando-se em conta os elevados custos e o tempo demandado para a realização de experimentos de campo, os modelos matemáticos aplicados à agricultura permitem quantificar previamente possíveis consumos e efeitos relacionados à determinada cultura, e, assim, prever resultados a partir do planejamento de certas ações consideradas críticas para o sucesso de um empreendimento agrícola. A partir da representação de uma situação problema, modelos podem fornecer uma descrição abrangente acerca de determinado objeto de estudo, tornando-se valiosas ferramentas de apoio à tomada de decisões na agricultura, além de serem ferramentas de apoio à tomada decisões com custos muito menores que os custos dos experimentos convencionais (DEJENIE, 2019).

Adicionalmente, resultados de experimentos de campo já realizados anteriormente podem ser utilizados para confirmar e testar os modelos matemáticos propostos. Desta forma, tais modelos podem ser usados como ferramenta de auxílio ao tomador de decisões, visando melhorar os resultados já obtidos no passado, agregando novos conhecimentos ao atual estágio de desenvolvimento técnico e até mesmo científico.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo propor um modelo matemático para auxílio no planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar, visando obter uma matéria-prima para o setor sucroenergético com máxima qualidade tecnológica relacionada ao teor de sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar (Pol). Com base no exposto anteriormente, esta pesquisa se justifica por produzir uma contribuição científica em uma área de conhecimento interdisciplinar de grande interesse e importância, uma vez que ela propõe de uma ferramenta de apoio à tomada de decisões envolvendo a resolução, de forma ótima, de problemas acerca da utilização de agentes químicos indutores de maturação e do processo de colheita, proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos ao setor sucroenergético.

Para alcançar tais objetivos, foi necessário que os seguintes passos essenciais, fossem cumpridos:

a)foi realizada a revisão da teoria acerca da temática relacionada ao ciclo produtivo da cana-de-açúcar enquanto matéria-prima básica utilizada no

setor sucroenergético, e, ainda, foram analisados os resultados de outras pesquisas de natureza empírica voltadas para essa atividade econômica e que contemplem o uso de maturadores;

b)foi identificado e analisado o conjunto de variáveis e processos ocorridos na fase da maturação da cana-de-açúcar;

c)buscou-se conhecer e analisar a temática relacionada à utilização de modelagens matemáticas de otimização aplicadas à cultura da cana-de-açúcar;

d)foi formulado e aplicado um modelo matemático visando a otimização dos processos de aplicação de maturadores químicos e de colheita da cana, no intuito de produzir uma matéria com níveis máximos de Pol.

e)foram realizados testes computacionais para a validação do modelo matemático de otimização proposto nesta investigação.

Nesse sentido, esta tese foi dividida em quatro seções (de 2 a 5), as quais são relatadas a seguir.

A seção 2 destina-se a uma revisão teórica sobre a qual esta pesquisa foi conduzida e, para tanto, abordou as temáticas relacionadas aos estádios fenológicos da cana-de-açúcar, aos reguladores vegetais de maturação, às modelagens matemáticas de otimização aplicadas à cultura da cana e, finalmente, o processo de modelagem matemática de otimização baseada em programação por metas.

Na seção 3 são descritos os materiais e métodos utilizados nesta investigação, apresentando a formulação do modelo matemático de otimização e o processo de obtenção da base de dados utilizada na realização dos testes computacionais.

A seção 4 é destinada à apresentação e discussão dos resultados gerados a partir dos testes computacionais realizados, visando a validação do modelo matemático de otimização proposto nesta pesquisa.

Finalmente, na seção 5 apresenta-se a conclusão acerca da metodologia proposta nesta investigação científica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo destina-se a apresentar a base teórica para o desenvolvimento deste trabalho, abordando tópicos considerados essenciais para a proposição do modelo de auxílio ao planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana, com vistas à obtenção da matéria-prima utilizada pelo setor sucroenergético com máxima qualidade tecnológica referente ao teor de sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar ou, simplesmente Pol.

Nesse sentido, as cinco seções a seguir descrevem os estádios fenológicos da cana-de-açúcar; o processo de maturação da cana; a utilização de reguladores vegetais de maturação nessa cultura; a utilização de modelagens matemáticas de otimização aplicadas à cultura da cana-de-açúcar; e, por fim, o processo de modelagem matemática de otimização baseada em programação por metas.

2.1 Estádios Fenológicos da Cana-de-açúcar

A fenologia pode ser entendida como o estudo dos estágios pelos quais uma planta passa ao longo de sua vida e, ainda, a relação de tais estágios com as condições do ambiente em que ela se encontra (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

Nesse sentido, podem ser identificados quatro estádios fenológicos da cultura de cana-de-açúcar, ou seja: brotação e emergência; perfilhamento e estabelecimento; desenvolvimento; e, maturação, conforme esquematicamente resumido na Figura 1 (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006; MARIN *et al.*, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2018).

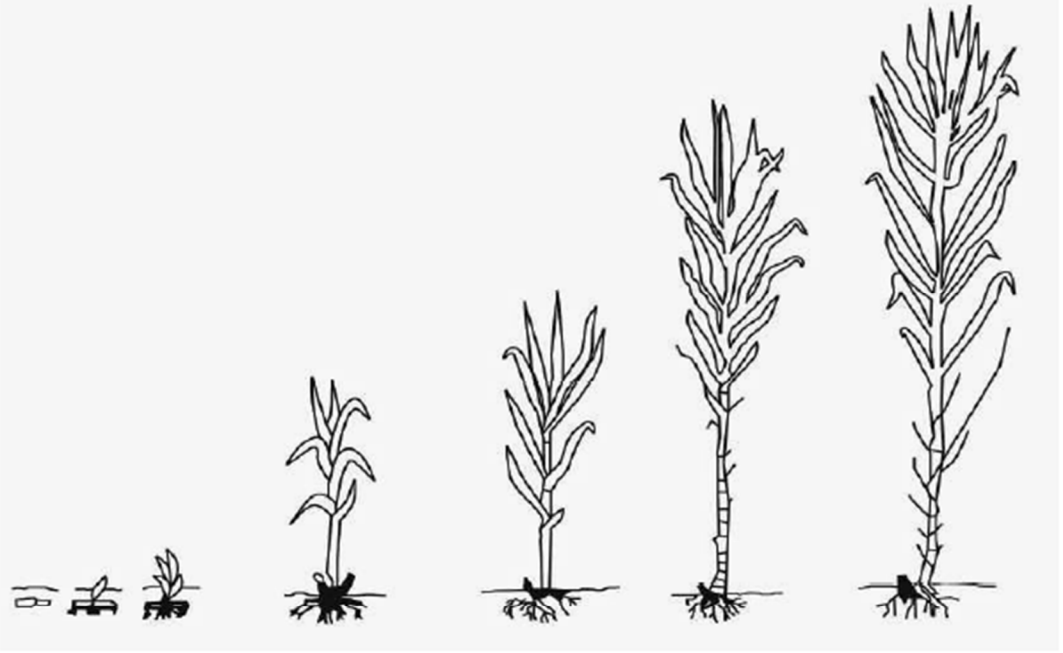
A emergência ocorre a partir do surgimento dos primeiros brotos no campo, o que acontece entre sete e dez dias do plantio, podendo durar entre trinta e cinquenta dias, dependendo das condições do solo (umidade, temperatura e aeração), e, ainda, das condições dos toletes utilizados no plantio (sanidade e reservas energéticas) (MARIN *et al.*, 2009).

No caso da cana planta[1], a partir emergência dos brotos percebe-se a ocorrência de um colmo primário formado por um conjunto de nós e entrenós muito

[1] “O termo cana planta refere-se à cana de primeiro corte após o plantio [...]” (LOPES, 2011, p. 39).

próximos que iniciarão o seu crescimento, e, também neste estádio, inicia-se o desenvolvimento de um conjunto de raízes novas (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

Figura 1 - Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar



Eventos	Germinação e Emergência	Perfilhamento e Estabelecimento	Elongação do colmo; Crescimento Intenso; Início do Acúmulo de Sacarose	Intenso acúmulo de sacarose
Fase	1) Emergência	2) Estabelecimento	3) Desenvolvimento da Cultura	4) Maturação
Duração	30 a 60 dias	60 a 90 dias	180 a 210 dias	60 a 90 dias

Fonte: Marin *et al.* (2009, p.115).

No caso da cana soca[2], a rebrota ocorrerá entre vinte e trinta dias a partir do corte, sendo que, a umidade pode ser considerada um fator crítico para o processo de rebrota (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006; MARIN *et al.*, 2009). Outro fator que faz com que o processo de rebrota na cana soca seja mais lento é a cobertura de palha residual da colheita mecanizada, pois além de constituir uma barreira mecânica para a rebrota, a palha também reduz a luminosidade incidente sobre os perfilhos brotados (RODRIGUES *et al.*, 2018).

À medida que o colmo primário se desenvolve, novos brotos surgem a partir deste, e inicia o desenvolvimento de suas bases, formando um sistema radicular

[2] "[...] cana soca refere-se à cana de rebrotamento após o primeiro corte" (LOPES, 2011, p. 39).

próprio (um conjunto próprio de raízes), dando origem ao processo de perfilhamento (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

Em torno de quarenta dias após a emergência inicia-se a fase do estabelecimento da cultura, em que ocorre a formação de novas raízes e a emissão das folhas, o que irá garantir a sobrevivência da planta mediante autoprodução energética; sendo que, o principal evento ocorrido nesta fase é o perfilhamento, caracterizado como o processo de produção e formação de colmos (MARIN *et al.*, 2009).

A produção dos perfilhos se intensifica até que comece a competição por luz, água e nutrientes, momento que o processo de perfilhamento se paralisa, ocorrendo inclusive a morte daqueles primeiros perfilhos gerados no início desse processo (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006; RODRIGUES *et al.*, 2018).

O processo de perfilhamento pode ocorrer até o quarto mês após o plantio, uma vez que ele tende a variar de acordo com os diferentes cultivares (RODRIGUES *et al.*, 2018).

Cessado o processo de perfilhamento, os colmos continuam a crescer tanto em comprimento quanto em largura (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006) e, com duração entre cento e oitenta e duzentos e dez dias, ocorre a fase de desenvolvimento da cultura que é caracterizada pelo crescimento vegetativo da planta. Nessa etapa, toda a sacarose produzida é destinada ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, de tal forma que se viabilize o alongamento dos entrenós. Próximo dos meses finais do ciclo da cultura, o crescimento vegetativo da planta diminui e ela passa a acumular sacarose de forma mais intensa, dando início à fase da maturação (MARIN *et al.*, 2009).

Normalmente, o processo de maturação é desencadeado por algum tipo de estresse ambiental, por exemplo, deficiência hídrica, redução do fotoperíodo ou o frio (MARIN *et al.*, 2009).

Lopes (2011) afirma que a cana-de-açúcar atravessa dois períodos bem característicos em relação à produção de sacarose ao longo dos seus estádios fenológicos, ou seja, inicialmente ocorre o desenvolvimento vegetativo em que se processa a produção e o consumo de sacarose de forma muito intensa, e, a seguir, com a diminuição da fase vegetativa, a planta reduz o consumo de sacarose e passa a acumulá-la em seus internódios de forma gradativa. Conforme já dito, esse segundo estágio pode ser ocasionado naturalmente pela escassez de umidade e calor ou,

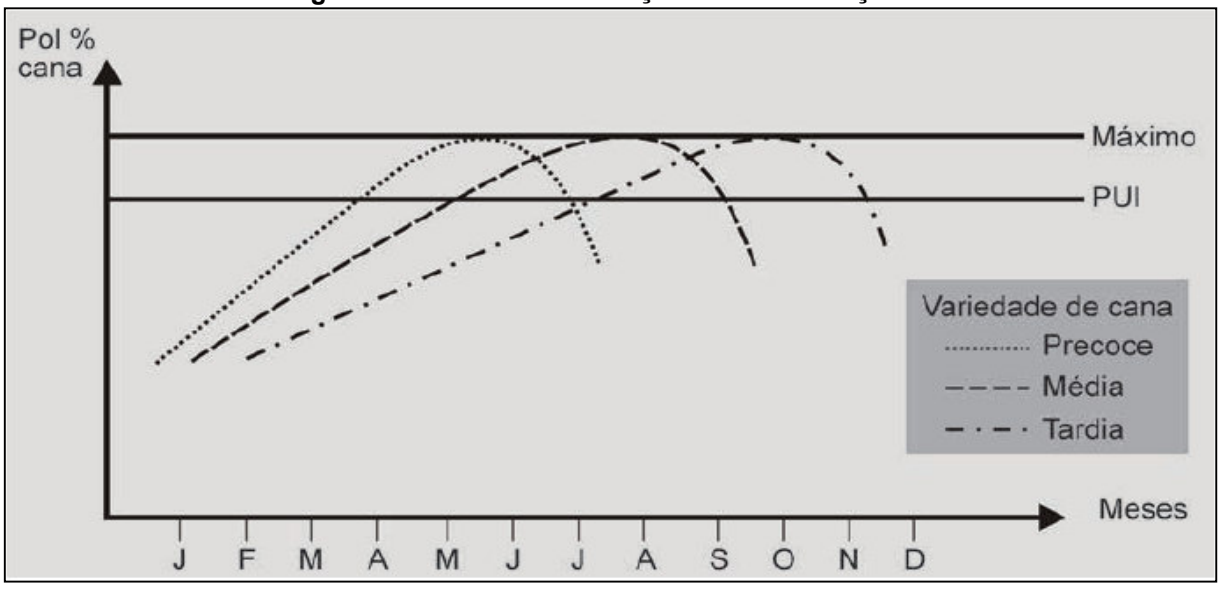
ainda, pode ser induzido quimicamente com o auxílio de agentes vegetais (MARIN *et al.*, 2009; LOPES, 2011; ROBERTO *et al*., 2015; RODRIGUES *et al.*, 2018). É nesse segundo período que ocorre o processo de maturação.

Além da influência dos fatores climáticos sobre o processo de maturação, destaca-se ainda a influência de fatores relacionados à variedade da cana, a tipologia de solo utilizado para cultivo, a cultura, entre outros (LOPES, 2011). Sendo que, é possível que um mesmo cultivar de cana atinja níveis diferentes de sacarose ainda que cultivado em condições semelhantes, bastando para isso, que exista a ocorrência de épocas diferentes de maturação, o que pode ser uma característica de cada cultivar (LOPES, 2011).

Em relação à época de maturação e de acordo com teores de sacarose considerados satisfatórios para o processo de industrialização, na região Centro-sul do Brasil, as variedades de cana-de-açúcar podem ser classificadas em: precoces, quando a maturação ocorre no início da safra (de maio a junho); médias, quando a maturação ocorre no meio da safra (entre julho e setembro); e, tardias, quando a maturação se dá no final da safra, portanto, a partir do mês de outubro (LOPES, 2011).

Contudo, teores satisfatórios de sacarose não indicam o teor máximo que determinada variedade pode atingir, ou seja, ele representa o teor mínimo recomendado para o processo de industrialização da cana-de-açúcar dentro do chamado período útil de industrialização (PUI), conforme mostra a Figura 2 (LOPES, 2011).

Figura 2 - Curvas de maturação da cana-de-açúcar



Fonte: Lopes (2011, p.41).

Ao definir o PUI como o intervalo de tempo ao longo do qual a cana-de-açúcar apresenta teores de sacarose superiores ao teor mínimo recomendado para o processo de industrialização, Lopes (2011) pondera que tal período (PUI) é uma característica própria de cada variedade de cana-de-açúcar e, ainda, afirma que ele é um fator determinante acerca do período em que uma variedade está disponível para industrialização, o que, por consequência, o torna um dos direcionadores das atividades relacionadas ao processo de colheita da cana.

Além de afirmarem que o PUI é uma característica própria de cada variedade, Nervis *et al*. (2017) consideram que ele pode ser influenciado pela época do plantio da cana, pelo momento de realização da última colheita, pela região de plantio e, ainda, por outros aspectos relacionados à qualidade da matéria-prima desejada.

Tanto o PUI quanto outros aspectos relacionados à qualidade da matéria-prima devem ser considerados no processo de planejamento da colheita da cana. Neste contexto, para avaliação da produtividade agrícola desta cultura, bem como, avaliação da qualidade da cana utilizada nas indústrias, o setor sucroenergético adotou alguns indicadores qualitativos da matéria-prima, também conhecidos como o conjunto de variáveis tecnológicas da cana, os quais são: o Brix; a Pol; a pureza; a fibra; e os açúcares redutores (AR).

Expresso em graus, mas, podendo ser traduzido também em percentual, o Brix indica a quantidade de sólidos solúveis existentes no caldo da cana-de-açúcar, que em sua maioria são açúcares (FONSECA; MARTINS, 2015).

Dentre os açúcares presentes no caldo da cana, observa-se a presença de frutose, glicose e a sacarose. Em relação específica a essa última categoria de açúcar, o setor sucroenergético utiliza a Pol como medida do teor de sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar (INOUE *et al*., 2015; SILVA, *et al*., 2018).

A pureza da cana-de-açúcar pode ser expressa de forma percentual a partir da relação entre a Pol e o Brix (PRADO, *et al*., 2017; SILVA, *et al*., 2018).

Em relação à parte sólida da cana-de-açúcar, o percentual de fibra é determinado a partir da matéria insolúvel em água presente na cana-de-açúcar após passar pela prensa ou moenda (BARBOSA; SANTOS; OLIVEIRA, 2018).

Conforme discutido anteriormente, os açúcares presentes no caldo da cana-de-açúcar são a sacarose, glicose e frutose, sendo que para a indústria sucroenergética interessa a sacarose enquanto matéria-prima básica dos seus

produtos. Assim, a glicose e a frutose formam os açúcares redutores, pois, quanto maior a sua presença, menor será a presença de sacarose (SILVA, *et al*., 2018).

O teor de sacarose varia de acordo com o estádio fenológico em que a cana se encontra, contudo, é na maturação que este passa a assumir maior relevância, pois está diretamente ligado à qualidade da cana-de-açúcar destinada ao processo de industrialização.

2.2 Maturação da Cana-de-açúcar

O crescimento vegetativo começa a diminuir devido a condições restritivas, inicia-se o processo de maturação da cana-de-açúcar que é caracterizado pelo acúmulo progressivo de sacarose nos colmos, estimulado por fatores climáticos como deficiência hídrica, redução do fotoperíodo e/ou queda de temperatura (MARIN *et al.*, 2009; LOPES, 2011; ROBERTO *et al*., 2015; RODRIGUES *et al.*, 2018).

Os fatores climáticos exercem influência tanto sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar, quanto na produção e armazenamento da sacarose ocorrida com maior intensidade no processo de maturação. O clima considerado ideal para a cultura da cana é aquele composto por estações bem definidas e caracterizadas pela presença de calor e umidade em uma delas, e, clima seco com baixas temperaturas em outra estação. Pois, o calor e a umidade são necessários aos processos de germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo, e a maturação demanda temperaturas baixas e clima seco para que a planta inicie o processo de acúmulo da sacarose nos colmos (ROBERTO *et al*., 2015).

Rodrigues *et al.* (2018) explicam que o armazenamento da sacarose nos entrenós da cana-de-açúcar ocorre desde as fases de estabelecimento e desenvolvimento, de forma contínua e gradativa a partir da base do colmo. Contudo, apesar de cada entrenó acumular seu próprio nível de sacarose, aqueles situados na base do colmo podem apresentar níveis menores por serem mais antigos e, ainda, por possuírem maiores níveis de fibra. Da mesma forma, os entrenós próximos da ponta do colmo também podem apresentar níveis baixos de sacarose devido a sua imaturidade. Nesse sentido, os níveis mais elevados de sacarose tendem a se concentrar nos entrenós centrais do colmo.

Fisiologicamente a planta executa dois processos, e a maturação é o último desses. No primeiro processo, a atividade respiratória da planta é elevada, fazendo

com que ocorra uma rápida absorção e transpiração de água com intensa circulação de nutrientes, e a sacarose é rapidamente sintetizada, estocada e metabolizada de forma a permitir a formação de novos tecidos, de tal modo que cada entrenó da planta complete sucessivamente o seu ciclo vegetativo. Em seguida, na ocorrência do segundo processo, à medida que os entrenós vão terminando os respectivos ciclos de desenvolvimento, eles se alongam e engrossam, e, ainda, ocorre a queda das folhas e o aumento da matéria seca mediante desidratação gradativa, e, por fim, ocorre a síntese e a translocação dos açúcares para os entrenós dos colmos elevando os níveis de sacarose na planta. Essa segunda etapa, denominada maturação, é determinada pela variedade dos cultivares de cana, pelo solo e por aspectos ecofisiológicos, sendo que, quando os produtores podem manipular o nitrogênio e controlar o processo de irrigação, é possível melhorar a qualidade do processo maturação (RODRIGUES *et al.*, 2018).

Contudo, o manejo relacionado ao controle/indução do processo de maturação mediante a irrigação só pode ser empregado em regiões em que ocorrem longos períodos de seca, o que não é o caso da maior parte das regiões produtivas no Brasil. Em regiões úmidas, como é o caso da região centro-sul do Brasil, não é possível exercer qualquer tipo de controle sobre o processo de maturação a partir da indução por estresse hídrico. Nesse caso, o produtor deve lançar mão do emprego de agentes reguladores vegetais (maturadores) e fertilizantes, de forma a conseguir melhorar a qualidade do processo de maturação da cana-de-açúcar (MARIN *et al.*, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2018).

De uma maneira geral, Rodrigues *et al.* (2018) descrevem um conjunto de fatores que podem interferir na maturação da cana-de-açúcar, além dos fatores relacionados à variedade, ao fotoperíodo e à temperatura, os quais são: água; nitrogênio; potássio; micronutrientes; e reguladores vegetais de maturação.

Vieira *et al.* (2012) observam que a deficiência hídrica tem influência direta sobre o metabolismo da cana-de-açúcar, com especial atenção à fotossíntese, uma vez que esse processo é afetado pela ocorrência do fechamento parcial dos estômatos em condições restritivas da água, o que reduz a captação do CO_2 e, consequentemente, reduz produção da sacarose que seria acumulada nos entrenós dos colmos da planta.

Rodrigues *et al.* (2018) concluíram em sua pesquisa que, fisiologicamente, não existe razão para deixar de adotar o estresse hídrico como fator indutor do processo

de maturação, desde que ele não seja tão intenso a ponto de prejudicar a fotossíntese na planta.

Em relação ao nitrogênio, Simões *et al.* (2018) afirmam que este é um dos elementos mais utilizados na adubação da cana-de-açúcar, uma vez que é absorvido em grandes proporções pela cultura.

Os estudos realizados por Rodrigues *et al.* (2018) indicaram que o nitrogênio deve ser aplicado o mais precocemente possível e em doses elevadas no caso da cana-planta, devido ao pouco desenvolvimento do seu sistema radicular, e, devem ser utilizadas doses mais robustas ainda, o mais cedo possível, após a colheita, no caso da cana-soca.

Segundo Bastos *et al.* (2017), além de estar relacionado ao perfilhamento e ao crescimento e vegetativo da cana, o potássio auxilia no processo de fixação do nitrogênio e no acúmulo de carboidratos e proteínas, tornado-se relevante também na fase de maturação da cultura.

Rodrigues *et al.* (2018) ponderam que ação do potássio na cana-de-açúcar é de difícil compreensão e, por isso, ainda é objeto de conjecturas. Mas por outro lado, estes autores concluíram que a sua deficiência afeta o transporte da sacarose, uma vez que ele é fundamental para a captação de CO_2, cuja menor entrada provoca restrição da fotossíntese e menor acúmulo de matéria seca e sacarose.

Em relação ao grupo dos micronutrientes, Cruz, Pereira e Figueiredo (2017) afirmam que, apesar de fornecerem um ou mais nutrientes necessários ao desenvolvimento da planta, sua principal característica reside no fato deles terem que ser administrados em menores quantidades, uma vez que o excesso pode intoxicar a planta.

No caso da cana-de-açúcar, Rodrigues *et al.* (2018) consideram que micronutrientes como boro, zinco, manganês e cobre participam de diversos processos metabólicos da cultura e, por isso, desempenham funções relevantes nas reações metabólicas próprias do processo de maturação (síntese, translocação e acúmulo de sacarose nos colmos).

Definidos por Leite, Crusciol e Silva (2011) como agentes reguladores vegetais formados por compostos químicos destinados a alterar a morfologia e fisiologia vegetal, os maturadores podem ser aplicados a qualquer tempo durante a safra da cana-de-açúcar e têm por finalidade retardar o seu desenvolvimento vegetativo e induzir a translocação e o armazenamento da sacarose, caracterizando-se como um

meio auxiliar do processo de planejamento da colheita da cana, bem como do seu manejo varietal. Ou seja, quando o processo de maturação não se inicia naturalmente em função dos fatores ambientais, o produtor pode fazer uso de reguladores vegetais para induzir esse processo.

Contudo, o planejamento operacional da colheita deve estar alinhado ao planejamento, aplicação e à ação desses agentes reguladores de maturação, visto que, após atingir a acumulação máxima de sacarose, a planta passa a consumi-la, o que tende a prejudicar consideravelmente o rendimento industrial da cana-de-açúcar (MARIN *et al.*, 2009).

2.3 Reguladores Vegetais de Maturação

Viana *et al.* (2017a) afirmam que além de melhorar a qualidade da matéria-prima demandada pela indústria sucroenergética, a utilização dos maturadores proporciona um melhor planejamento da safra mediante a flexibilização do processo de colheita da cana-de-açúcar.

Devido às alterações geradas no ambiente produtivo, a utilização de agentes químicos maturadores pode provocar desarranjos de natureza morfofisiológicas nas plantas (VIANA *et al*., 2015), o que torna relevante a realização de estudos acerca da sua utilização, bem como, a investigação acerca dos efeitos da sua combinação com outros componentes químicos.

Rodrigues *et al.* (2018) ponderam que a utilização de maturadores na cultura da cana-de-açúcar é uma prática usual, e, por isso, ocorreu uma evolução natural em relação aos produtos utilizados, e ainda, no que se refere ao conhecimento relacionado à sua ação fisiológica na cana. Sendo que, os principais agentes vegetais utilizados como maturadores indicados para a cana-de-açúcar encontram-se resumidos no Quadro 1.

Conforme pode ser observado no Quadro 1, os diferentes agentes maturadores descritos apresentam ações e características distintas entre si, quer seja pela evolução acerca da sua utilização, quer seja pela resposta econômica esperada mediante o investimento feito nesse tipo de substância adotada no manejo da cultura da cana.

Viana *et al.* (2017a) afirmam que o uso de maturadores químicos aumenta a produtividade da cana-de-açúcar e viabilizam o planejamento da colheita. Estes

autores observam que os produtores brasileiros utilizam preferencialmente agentes indutores de maturação como o ethephon, o etil-trinexapac, o glifosato e o sulfometuron metil.

Quadro 1 – Maturadores indicados para a cultura da cana-de-açúcar

Maturador	Ação	Principais características observadas
2,4-D	Inibidor de crescimento	Foram observados aumentos da concentração de sacarose em termos absolutos, contudo, sem significância estatística; seus resultados variam em função dos cultivares, época e quantidade aplicada e da região, entre outros fatores.
Ácido 2,3,5-triiodobenzóico	Inibidor de crescimento	Seus efeitos tendem a variar em função da concentração e do estádio fenológico em que é aplicado, agindo como acelerador do processo de maturação.
Bispiribaque sódico	Estressante	Com uma concentração recomendada que pode variar de 50 a 75 mL ha^{-1}, promove o aumento da sacarose após quinze dias da sua aplicação, antecipando a maturação, sendo que, sua maior atividade ocorre em temperaturas entre 20ºC e 30ºC,
Chiormequat	Inibidor da síntese de giberelinas	Em aplicações via foliar com 0,3% de concentração, causa o aumento progressivo de sacarose, agindo vinte e dois dias após o tratamento, e, em menor concentração eleva o teor de sacarose e partir de onze dias.
Cletodim	Estressante	Pertencente ao mesmo grupo de ação do Fluazifop-butil, o Cletodim é um inibidor da biossíntese de lipídios específico de gramíneas; inibe o crescimento da cana e promove o acúmulo de sacarose em 30 dias e acelera a maturação, causando a precocidade na colheita.
Ethephon	Inibidor de crescimento	Promove o aumento do teor de sacarose, podendo antecipar em pelo menos trinta dias a colheita em cultivares da região centro-sul do Brasil, promovendo a maturação da cana-de-açúcar.
Etil-trinexapac	Inibidor da síntese de giberelinas	Possibilita o enriquecimento precoce da cana, elevação do teor de fibra e diminuição da taxa de açúcares redutores, sendo que, os acréscimos promovidos no Brix sempre são acompanhados de aumentos proporcionais na pureza do caldo, e, apesar de causar a formação de entrenós mais curtos, não tem influência sobre os resultados finais de produtividade da cana e do açúcar obtido.
Fluazifop-butil	Estressante	Tem como funções e modo de ação a inibição do crescimento, restrição de parênquima sem caldo, acumulo de sacarose em trinta dias, o que leva a precocidade na colheita,
Glifosato	Inibidor de crescimento	Dependendo da dosagem utilizada, ele pode elevar consideravelmente o conteúdo de sacarose do colmo; contudo, em certos cultivares, o glifosato pode restringir o crescimento do colmo e a formação foliar.
Hidrazida maleica	Inibidor de crescimento	Aumenta o teor de sólidos solúveis (Brix) na região apical e reduz na base do colmo, bem como, provoca o aumento na Pol; contudo, em certos cultivares não foram observados efeitos no Brix, Pol ou pureza.
Imazapir	Estressante	Inibe a síntese de certos carboidratos e promove sua acumulação nos colmos, elevando sua concentração.
Mefluidide	Inibidor de crescimento	Eleva a concentração de sacarose a partir de oito semanas após o tratamento, antecipando a maturação.
Ortossulfamurom	Estressante	Com uma dosagem recomendada entre de 100 a 150 g ha^{-1}, inibe a florescência, promove o aumento da sacarose e antecipa a maturação.
Paraquat	Inibidor de crescimento	É um herbicida que, quando utilizado como maturador, possui ação dessecante ou desfolhante da cana-de-açúcar, sendo inativo quando em contato com o solo.
Sulfometuron-metil	Estressante	Dependendo da dosagem e do cultivar tem efeitos variados, mas, em geral, inibe a florescência, aumenta a concentração de sacarose e antecipa a maturação, caracterizando-se também por apresentar absorção foliar e potente ação inibidora do crescimento vegetal, e, ainda, por não afetar as soqueiras subsequentes à sua aplicação, entre outras características.

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Rodrigues *et al.* (2018, p. 125-146).

Diante da consideração de Viana *et al*. (2017a) e, ainda, levando em conta que existem outros fatores que podem influenciar a ação dos agentes maturadores, torna-

se necessário discutir alguns dos resultados de estudos realizados no planejamento da colheita e da produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

Ao realizarem uma pesquisa com o objetivo de avaliar a eficiência do bispiribaque sódico utilizado como maturador químico na cultura da cana-de-açúcar, comparativamente à ação do sulfometuron-metil e do etil-trinexapac, Inoue *et al*. (2015) observaram que, em relação ao tratamento controle, todos os tratamentos com maturadores apresentaram incrementos significativos nos índices de Brix e Pol, sem a ocorrência de decréscimos na produtividade agrícola; contudo, não houve diferença significativa entre os diferentes tratamentos com maturadores, entre si, em relação à produtividade de colmos, Brix e açúcares totais recuperáveis (ATR).

Em relação ao tempo de reação dos maturadores para a indução do processo de maturação, Inoue *et al*. (2015) relatam que houve um incremento gradativo do teor de sacarose da cana (Pol%), sendo que, em média, o percentual mínimo considerado em seu estudo (14,40%) foi atingido aos 34 dias após a aplicação.

Inoue *et al*. (2015) concluíram que, segundo seu experimento, tanto o bispiribaque sódico quanto o sulfometuron-metil e o etil-trinexapac propiciaram a melhoria da qualidade tecnológica da cana, caracterizando-se como potenciais agentes de maturação a serem utilizados na cultura.

Roberto *et al*. (2015) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar a partir de tratamentos com indutor de maturação (ethephon a 480 g ha^{-1}) em duas variedades de cana-de-açúcar (IACSP95-5000e a IACSP94-2094), e, ainda, sua associação ao déficit hídrico. A resposta à aplicação de ethephon foi dependente da variedade estudada, sendo que, a IACSP95-5000 foi a mais responsiva, ao passo que a IACSP94-2094 não apresentou reação aos tratamentos. Por isso, de acordo com seu experimento, os autores concluíram que o efeito do ethephon em cana-de-açúcar é genótipo-dependente, sendo capaz de estimular o acúmulo de sacarose no colmo somente na variedade responsiva (IACSP95-5000). Estes autores também observaram que a associação entre a aplicação do ethephon e déficit hídrico não aumentou o teor de sacarose no colmo, quando comparadas às parcelas que receberam apenas a aplicação de ethephon.

Leonezi *et al*. (2016) avaliaram a influência do ethephon na isoporização ocorrida em colmos de cana-de-açúcar e observaram que, além da paralisação crescimento vegetativo da cana e a inibição ao seu florescimento, quando aplicado

antes da ocorrência do processo de indução, esse agente maturador possui efeitos positivos sobre as características tecnológicas da cana-de-açúcar (Brix, Pol, fibra, pureza e ATR). Além disso, os autores ponderam que a utilização de agentes maturadores químicos na cultura da cana-de-açúcar é de interesse econômico em certas regiões brasileiras em que os riscos de florescimento podem ser considerados elevados.

Com o objetivo de avaliar comparativamente os efeitos de seis maturadores químicos (glifosato, paraquat, fluazifop-butil, ethephon, etil-trinexapac, sulfometuron metil) e o nitrato de potássio (KNO_3) sobre as variáveis relacionadas à produtividade agrícola (quantidade de colmos por hectare, diâmetro médio e tonelada produzida por hectare) e variáveis tecnológico-qualitativas da cana (Brix, Pol e açúcar recuperável), Oliveira Filho *et al*. (2016) conduziram um experimento no estado do Paraná em que foi possível observar que o KNO_3 contribuiu para melhoria da qualidade tecnológica da cana, pois, promoveu o aumento da produtividade agrícola dos colmos em um período de colheita ideal entre sessenta e cento e vinte dias após a aplicação.

Em relação às variáveis tecnológico-qualitativas da cana, Oliveira Filho *et al*. (2016) afirmam que o etil-trinexapac, o sulfometuron metil e o KNO3 promoveram incrementos de Brix, Pol e açúcar recuperável, sendo que, o período de colheita ideal foi de cento e vinte dias após a aplicação.

Orgeron *et al*. (2016) afirmam que melhorar a concentração de sacarose na cana de início de safra mediante o uso do glifosato já era uma prática comum para muitos produtores de cana-de-açúcar da Louisiana, nos Estados Unidos (EUA), em 2012, quando o etil-trinexapac foi liberado para o uso como agente maturador da cana-de-açúcar pela agência de proteção ambiental dos EUA.

A fim de comparar os resultados do glifosato e do etil-trinexapac em relação à produtividade agrícola da cana e ao rendimento tecnológico-qualitativo (incremento de sacarose) e, ainda, considerando que esses dois compostos atuam em diferentes processos bioquímicos, Orgeron *et al*. (2016) realizaram um estudo de campo, em larga escala, durante 2013 e 2014, e mostraram que a concentração de sacarose (g de sacarose kg^{-1} de cana-de-açúcar) foi 8,7% maior para as parcelas tratadas com o etil-trinexapac e 13% maior para aquelas parcelas tratadas com o glifosato, ambas em comparação com o controle não tratado. Contudo, o etil-trinexapac reduziu o rendimento agrícola de cana-de-açúcar (produtividade de cana) quando comparado

ao controle não tratado, e, por sua vez, o glifosato não reduziu a produtividade/rendimento agrícola (ORGERON *et al*., 2016).

Com o objetivo de avaliar os efeitos do amadurecimento induzido com fluazifop-butil na produção de cana-de-açúcar e no seu teor de açúcar, Muhwiridzwa *et al*. (2016) realizaram um experimento em uma área localizada no sudeste de Lowveld, no Zimbábue, ao longo do período de março de 2012 a maio de 2012, concluindo que o fluazifop-butil pode aumentar o rendimento de açúcar por hectare de cana-de-açúcar, embora ele possa provocar reduções no produtividade agrícola (TCH) da cana-de-açúcar.

Viana *et al*. (2017a) avaliaram os parâmetros de qualidade tecnológica (Brix, Pol, açúcares redutores, açúcares redutores totais, fibra, pureza, umidade e açúcar teórico recuperável) e produtivos (toneladas de colmos por hectare e toneladas de açúcar por hectare) da cana-de-açúcar submetida à aplicação dos maturadores químicos glifosato e ethephon, bem como, de compostos de radicais carboxílicos orgânicos, no início de safra. Como principal resultado, eles relatam que a aplicação de glifosato em conjunto com os compostos de radicais carboxílicos orgânicos propiciou um maior incremento nos parâmetros tecnológico-qualitativo da cana-de-açúcar a partir de quinze dias após a aplicação, e, a aplicação do glifosato causou incrementos após trinta dias da aplicação.

Viana *et al*. (2017b) avaliaram o impacto de misturas de maturadores na produtividade agrícola e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Além de uma parcela controle, que não recebeu nenhum tipo de aplicação, nesse experimento foram testadas as misturas de sulfometurom metil com glifosato, ethephon com glifosato, e, ainda, uma mistura de glifosato e compostos de radicais carboxílicos orgânicos.

Viana *et al*. (2017b) constataram que, em relação à qualidade tecnológica, a mistura sulfometurom metil e glifosato (0,15 L ha^{-1}) apresentou melhores resultados a partir dos 15 dias contados da sua aplicação. Em relação à produtividade agrícola, Viana *et al*. (2017b) informaram que, de uma maneira geral, as misturas de maturadores não proporcionaram aumentos na produtividade de colmos e de açúcar por hectare.

Ao ponderarem que o planejamento técnico e agrícola das lavouras de cana é fundamental para garantir uma matéria-prima de qualidade para a indústria sucroenergética, e, ainda, a importância dos maturadores nesse processo, Crusciol *et*

al. (2017) propuseram uma investigação em que foi avaliada a influência dos reguladores vegetais da classe dos inibidores de crescimento sulfometuron metil, glifosato e compostos de radicais carboxílicos orgânicos misturados ao glifosato, no desenvolvimento da cana-de-açúcar, no acúmulo de sacarose (Pol), na produtividade de colmos e na rebrota da cana soca, entre outros fatores, no meio da safra no Brasil.

Crusciol *et al*. (2017) observaram que o uso dos reguladores vegetais influenciou positivamente a qualidade tecnológica da cana, com especial atenção ao aumento do teor de polpa. Adicionalmente, foi constatado que, sob condições climáticas desfavoráveis ao amadurecimento, o sulfometuron metil e glifosato foram mais eficientes em relação ao aumento do teor de sacarose, comparativamente ao tratamento com a mistura de compostos carboxílicos orgânicos e glifosato, e, ainda, em relação à parcela de controle.

A fim de determinar a melhor resposta das variedades de cana-de-açúcar NCo376 e SP711406, cultivadas na região norte da Costa do Marfim, em relação ao efeito de maturação do glifosato e ao atraso na colheita após sua aplicação, Didier *et al*. (2017) analisaram as variáveis tecnológico-qualitativas da cana no início da safra após dez, quinze e vinte dias da aplicação daquele agente químico maturador. Como principais resultados, os autores observaram que o glifosato melhorou o teor de sacarose e o açúcar recuperável das variedades tratadas, sendo que, a variedade SP71-1406 foi mais responsiva que a variedade NCo376, após vinte dias. Foram constatados incrementos de sacarose na ordem de 1,6% e de açúcar recuperável em torno de 1,5% de açúcar (DIDIER *et al*., 2017).

Segundo Suárez *et al.* (2018) o uso comercial dos maturadores químicos teve início na década de 60, ganhando maior força a partir dos anos 80, quando passaram a ser utilizados com objetivo de obter a maior quantidade de açúcar possível por tonelada de cana processada, sendo que, isso só é possível quando a planta atinge seu potencial produtivo máximo e, ainda, quando a colheita consegue ser realizada no ponto ótimo de maturação. Utilizando dois tipos de maturadores químicos (glifosato e etil-trinexapac), um composto a base de nitrogênio, fosfato, fosfito e potássio, e, ainda, um segundo composto orgânico a base de fertilizante mineral formulado com nutrientes quelatados em aminoácidos de assimilação rápida, estes autores realizaram uma investigação objetivando avaliar a influência desses maturadores e compostos sobre a porcentagem de Pol em cultivares de cana-de-açúcar plantados na República do Panamá. Eles constataram que os tratamentos a

base do composto formado por nitrogênio, fosfato, fosfito e potássio e, ainda, a mistura de glifosato com o composto orgânico a base de fertilizante mineral proporcionaram a elevação da porcentagem de Pol a partir da primeira semana de avaliação. O glifosato apresentou elevação da Pol a partir da terceira semana aos a aplicação. Já o etil-trinexapac não proporcionou elevações significativas de Pol ao longo das cinco semanas avaliadas no experimento.

Quadro 2 – Resumo dos dados quantitativos de pesquisas envolvendo dosagens variadas de agentes maturadores

Fonte	Variedade	Agente maturador / dosagem	Incremento médio de Pol
Viana *et al.* (2007, p. 103)	RB72454	Glifosato / 0,4 L ha^{-1}	3,55%
		Glifosato / 3,0 L ha^{-1}	1,35%
		Glifosato / 6,0 L ha^{-1}	-2,82%
		Sulfometuron-metil / 0,02 kg ha^{-1}	-3,41%
Caputo *et al.* (2007, p. 837)	IAC87-3396	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	82,71%
		Etephon 480 g ha^{-1}	86,27%
	IAC87-3410	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	148,32%
		Etephon 480 g ha^{-1}	159,58%
	IAC91-5155	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	95,70%
		Etephon 480 g ha^{-1}	114,19%
	IAC89-3124	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	125,59%
		Etephon 480 g ha^{-1}	133,96%
	IAC91-2195	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	88,34%
		Etephon 480 g ha^{-1}	96,61%
	PO88-62	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	67,96%
		Etephon 480 g ha-1	72,54%
	SP80-1842	Sulfometuron-metil / 15 g ha^{-1}	83,08%
		Etephon 480 g ha^{-1}	78,51%
Viana *et al.* (2008, p. 69)	SP81-3250	Aminolon / 0,7 L ha^{-1}	63,75%
		Aminolon / 1,0 L ha^{-1}	67,71%
		Aminolon / 1,3 L ha^{-1}	69,08%
		Etil-trinexapac / 0,8 L ha^{-1}	58,06%
Inoue *et al.* (2015, p. 86)	RB86-7515	Bispiribaque sódico / 20 g ha^{-1}	36,97%
		Bispiribaque sódico / 22 g ha^{-1}	42,68%
		Bispiribaque sódico / 24 g ha^{-1}	43,21%
		Bispiribaque sódico / 26 g ha^{-1}	42,23%
		Bispiribaque sódico / 28 g ha^{-1}	52,18%
		Sulfometuron-metil / 15 g ha-1	36,73%
		Etil-trinexapac / 200 g ha^{-1}	38,02%
Oliveira Filho *et al*. (2016, p. 3908)	RB86-7515	Glifosato / 0,4 L ha^{-1}1	25,27%
		Paraquat / 20 L ha^{-1}	28,74%
		Fluazifop-butil / 0,4 L ha^{-1}	20,77%
		Ethephon / 0,67 L ha^{-1}	30,36%
		Etil-trinexapac / 1,0 L ha^{-1}	31,82%
		Sulfometuron-metil / 0,02 kg ha^{-1}	28,45%
Viana *et al.* (2017a, p. 71)	RB855453	Etephon 0,34 L ha-1+ Glifosato / 0,15 L ha^{-1}	-4,61%
		Sulfometuron-metil / 0,02 kg ha-1 + Glifosato / 0,15 L ha^{-1}	-5,69%
		Glifosato / 0,35 L ha-1	5,18%
		Compostos de radicais carboxílicos orgânicos 1,0 L ha^{-1}	-10,02%

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Além da possibilidade de utilização de diferentes agentes de maturação aplicados em diferentes tipos de cultivares, também pode se destacar como possível fator determinante da variabilidade dos resultados relacionados aos estudos com maturadores químicos, a utilização de diferentes dosagens de maturadores nos cultivares em que foram aplicados experimentalmente, conforme descrito no Quadro 2.

Conforme pode ser observado nas informações resumidas no Quadro 2, ainda que na sua maioria os experimentos descritos demonstrem que o uso de maturadores pode acelerar a produtividade de sacarose e/ou elevar os níveis de Pol presente no caldo da cana, é perceptível que os resultados destes estudos indicam certo grau de variabilidade que não permite formar um consenso acerca do tema.

Assim, independentemente da flexibilidade proporcionada pelo uso dos agentes químicos de maturação ao planejamento da colheita da cana-de-açúcar e à sua produtividade, torna-se necessária a realização de estudos que permitam compreender melhor sua ação de forma mais ampla, pois, a sua interação com vários fatores pode alterar significativamente os resultados esperados a partir da sua utilização.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o planejamento da colheita da cana-de-açúcar é uma tarefa muito complexa, visto o número de decisões com relação à seleção do maturador a ser usado, assim como, o período correto de aplicação e, ainda, a data da colheita da cana plantada em cada talhão, atendendo o pico de maturação da cana e a demanda da usina. Assim, a recorrência a ferramentas matemáticas e computacionais tem sido bastante usual, principalmente as técnicas de modelagem e otimização de processos agrícolas.

2.4 Modelagem Matemática de Otimização Aplicada à Cultura da Cana-de-açúcar

A intensa mobilização de recursos de elevado custo e a incerteza em relação às diversas variáveis próprias do setor agrícola tornam a agricultura uma atividade econômica propícia à aplicação de tecnologias voltadas para o planejamento estratégico e o controle operacional. O planejamento estratégico refere-se às ações de avaliação que antecedem a tomada de decisões relacionada a determinado ano agrícola ou ciclo produtivo; e, por sua vez, o controle operacional diz respeito à tomada

de decisões diárias diante de determinada situação que ocorre no campo (DEJENIE, 2019).

Tanto no planejamento estratégico quanto na tomada de decisões diárias, o processo de experimentação convencional consome tempo e recursos que podem torná-lo economicamente inviável (DEJENIE, 2019). Por outro lado, o emprego de modelagens matemáticas pode contribuir significativamente para agilizar o processo de planejamento na agricultura e, ainda, para a redução dos respectivos custos. O planejamento otimizado da safra, obtido a partir de técnicas matemáticas, tende a melhorar as práticas agrícolas e propiciar maiores benefícios a todos os envolvidos na cadeia produtiva (FLORENTINO *et al*., 2018). O avanço da tecnologia computacional foi um dos grandes fatores para obtenção de planejamentos otimizados, pois este, aliado à utilização de modelagens matemáticas, puderam contribuir consideravelmente para a redução no consumo de tempo e de recursos demandados pelos processos de experimentação convencional (DEJENIE, 2019). Estas afirmações podem ser confirmadas em Doriguel, Crusciol e Florentino (2017), os quais realizaram uma ampla revisão na literatura que buscou identificar estudos relevantes que utilizaram modelagens matemáticas e ferramentas computacionais voltadas para a obtenção de planejamentos otimizados do processo de colheita da cana-de-açúcar, ao longo do período compreendido entre 1977 e 2017, conforme descrito no Quadro 3.

Quadro 3 – Pesquisas que utilizaram modelagens matemáticas voltadas para a otimização da colheita de cana-de-açúcar, de 1977 e 2017

Fonte	Objetivo de estudo	Principal resultado
Gentil e Ripoli (1977, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Foi proposto um sistema mecanizado de colheita, transporte da cana bem como sua recepção nas usinas.	Mediante análises e simulações foi possível reduzir o tempo de colheita e o número de colhedoras e caminhões envolvidos nesse processo.
Singh e Abeygoonawardana (1982, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Buscou-se reduzir a quantidade de caminhões utilizados no transporte da cana colhida, do campo até as usinas da Tailândia.	Os resultados do estudo permitiram identificar a quantidade ideal de caminhões e, ainda, permitiu que as usinas alocassem melhor as cotas diárias de colheita de acordo a distância entre o campo e a usina.
Singh e Pathak (1994, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Teve por objetivo minimizar os custos de colheita e proporcionar informações voltadas para o suporte à tomada de decisões relacionadas à mecanização do processo de colheita da cana-de-açúcar.	Apresentaram um sistema de apoio à decisão baseado em um modelo de otimização e simulação das operações de colheita e transporte, identificando a quantidade ideal de caminhões para certas condições especificadas.
Semenzato (1995, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Mediante a utilização de modelagem baseada em heurística, foram realizadas simulações destinadas a otimizar o tempo de corte,	O algoritmo de simulação pesquisado permitia programar as operações e planejar os recursos, minimizando o tempo de processamento de certa área plantada de cana e, ainda, era capaz de

	carregamento, transporte e descarga da cana.	indicar aquelas áreas que não poderiam ser processadas em tempo hábil.
Askita *et al*. (1999, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Desenvolveram um algoritmo para agendamento de trabalho agrícola que poderia auxiliar a indústria de cana do Japão a identificar a quantidade diária ideal de cana a ser colhida, bem como, direcionar as áreas de colheita para tal finalidade.	O modelo foi usado no agendamento da colheita de cana-de-açúcar de uma área produtiva da Ilha de Ishigaki, Okinawa. Japão, e mostrou-se muito promissor.
Díaz e Perez (2000, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Propuseram uma modelagem baseada em simulações para otimização do sistema de colheita envolvendo homens e máquinas.	Os resultados encontrados contribuíram para o desenvolvimento do planejamento ótimo dos processos de colheita da cana-de-açúcar em Cuba.
Arjona, Bueno e Salazar (2001, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	A partir da constatação da subutilização de máquinas pelo segmento sucroenergético mexicano, foi desenvolvida uma modelagem baseada em simulações computacionais, voltada para os produtores mexicanos, a ser aplicada no planejamento e avaliação do processo de colheita e transporte da cana-de-açúcar.	Os resultados desta pesquisa permitiram solucionar os problemas de subutilização de máquinas, o que, por sua vez, levou à minimização de custos.
Higgins (2002, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Propôs um modelo de programação linear inteira destinado a promover a otimização da quantidade de colhedoras utilizadas em cinco usinas australianas.	Foi desenvolvida, validada e implementada uma modelagem matemática baseada em programação inteira que permitiu otimizar o uso de colhedoras de cana naquelas unidades.
Higgins e Muchow (2003, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Ao considerarem a variabilidade oriunda de diferenças geográficas, temporais e das próprias culturas na produção de cana-de-açúcar, foram avaliados os possíveis benefícios oriundos de arranjos aplicáveis ao fornecimento de cana na indústria australiana de açúcar.	A partir do uso de técnicas de pesquisa operacional, foi desenvolvida uma metodologia que permitiu a avaliação da possível rentabilidade a ser obtida mediante a seleção de datas alternativas de colheita de cana em áreas localizadas em toda a região em torno de usinas.
Higgins e Davies (2005, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	A partir de um conjunto de modelos integrados, foi desenvolvida modelagem baseada em capacidade de transporte, quantidade de unidades de transporte e possíveis atrasos na colheita resultantes da espera de colhedoras para descarga.	A aplicação do modelo pesquisado proporcionou melhoras no processo de colheita e transporte da cana-de-açúcar.
Jiao, Higgins e Prestwidge (2005 *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Levando-se em conta que a cana plantada em diferentes empreendimentos atinge seu pico produtivo em momentos distintos, foi proposto um modelo de programação linear para facilitar planejamento da colheita, de forma a aumentar a produção de sacarose.	O modelo proposto foi aplicada em regiões produtivas australianas melhorando seus resultados. Adicionalmente, foi desenvolvida uma aplicação computacional denominada SugarMax a fim de auxiliar no planejamento da colheita do setor.
Higgins (2006, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Propôs um modelo de programação linear inteira mista para otimização do processo de colheita a partir da redução do tempo de espera dos caminhões nas usinas.	Testes computacionais foram realizados e duas técnicas heurísticas permitiram reduzir o tempo ocioso dos caminhões nas filas de espera, otimizando o processo de colheita.
Milan, Fernandez e Aragones (2006, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Estudaram o transporte da cana-de-açúcar, envolvendo diversas variáveis e propuseram um modelo de programação linear inteira mista aplicado ao processo de colheita e transporte da cana.	O modelo pesquisado permitiu minimizar o custo de transporte e organizar o processo de colheita.
Grunow, Günther e Westinner (2007, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Investigaram variáveis relacionadas ao fornecimento constante de cana, para formação de um estoque de segurança da cana-de-açúcar na produção de açúcar.	A partir de variáveis relacionadas ao cultivo, colheita e despacho de mão de obra e equipamentos para colheita, foi proposto um modelo de programação linear inteira mista que permitiu otimizar o processo de moagem semanal, mediante a programação detalhada do cronograma de colheita.

Salassi e Barker (2008, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Desenvolveram um estudo com o objetivo de reduzir custos a partir da minimização do intervalo de espera de caminhões ao retornarem da fábrica para o campo.	Foi desenvolvido um modelo de programação matemática que possibilitou coordenar os cronogramas de colheita e com os cronogramas de transporte, e assim, foram reduzidos os respectivos custos.
Jena e Aragão (2009, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Utilizando métodos exatos, foi proposto um modelo matemático para identificar o melhor momento para se realizar a colheita da cana-de-açúcar em diversos talhões e, assim, maximizar tanto o respectivo resultado econômico quanto o total de açúcar.	Obtiveram uma melhoria nos resultados em torno de 25% na produtividade da cana colhida.
Scarpari e Beauclair (2010, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Utilizar programação linear para desenvolver uma modelagem matemática voltada para o planejamento otimizado aplicado à cultura da cana-de-açúcar..	A partir do modelo pesquisado foi possível otimizar o cronograma de colheita da usina estudada e, por consequência, maximizar seus lucros.
Stray, Van-Vuuren e Bezuidenhout (2012, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Desenvolver uma modelagem matemática que permitisse identificar o planejamento ótimo de um cronograma de colheita aplicado a grandes áreas de cultivo da cana-de-açúcar.	A despeito da necessidade de novos estudos e avanços, pesquisadores e produtores concluíram que o modelo desenvolvido era capaz de fornecer suporte prático à tomada de decisões relacionadas à colheita da cana, tanto para grandes produtores quanto para produtores menores.
Silva, Marins e Montevechi (2013, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Desenvolveram e aplicaram um Modelo de *Goal Programming* Integral de Múltiplas Opções, ou, ainda, *Multi-Choice Mixed Integer Goal Programming Model* (MCMIGP) voltado para a solução de problemas relacionados ao planejamento da produção em uma usina de cana-de-açúcar.	A aplicação do modelo proposto em situações envolvendo problemas reais, em uma usina brasileira, demonstrou que o MCMIGP proporciona informações que permitem a tomada de decisão em múltiplos níveis de problemas.
Sethanan *et al*. (2013, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	A partir de técnicas heurísticas, foi pesquisado um modelo de otimização aplicado à colheita de cana-de-açúcar que permitisse maximizar a produção de açúcar no período de safra. Os autores apresentaram uma heurística para agendar a colheita de cana e um algoritmo de Busca Tabu para otimizar a produção.	Os resultados mostraram que metodologia heurística utilizada proporcionou uma melhoria média de 16,38% na produção de açúcar.
Jena e Poggi (2013, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Foi pesquisado um modelo de otimização, baseado em programação inteira mista, destinado a maximizar o açúcar total da cana a partir do planejamento estratégico e operacional da colheita.	O modelo foi resolvido utilizando técnicas heurísticas e proporcionou benefícios tanto em nível estratégico quanto operacional.
Florentino e Pato (2014, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Apresentaram um modelo genético bi-objetivo voltado para a seleção de variedades de cana-de-açúcar a fim de minimizar os custos relacionados à utilização da biomassa residual oriunda do processo de colheita, e, ainda, maximizar o respectivo balanço energético.	A aplicação do modelo pesquisado obteve um desempenho satisfatório e um baixo custo computacional, demonstrando que a aplicação de técnicas matemáticas pode auxiliar no processo de gestão das atividades produtivas da cana-de-açúcar.
Silva e Marins (2014, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Propuseram um modelo *Fuzzy Goal Programming* (FGP) aplicado ao suporte à tomada de decisões envolvendo a fase agrícola da cultura da cana, e, ainda, os processos logísticos gerados a partir da sua colheita, com especial atenção ao planejamento, semana a semana, do processo de	Os resultados indicaram que a metodologia proposta poderia auxiliar os gestores na tomada de decisão relacionada à logística da colheita, e, ainda, nas decisões relacionadas ao processamento industrial da cana na usina.

	colheita, bem como, os intervalos compreendidos entre os períodos de colheita em si.	
Silva, Marins e Dias (2015, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Propuseram um modelo revisado de Múltiplas Opções de Programação de Metas (RMCGP-LHS) para abordar a incerteza no planejamento envolvendo varáveis relacionadas ao solo, condição da cana e suas variedades, de forma a maximizar a sacarose e minimizar custos.	O modelo foi aplicado em uma usina de açúcar e etanol, em um problema de larga escala, e produziu resultados satisfatórios em tempo real. Adicionalmente, por permitir simulações de diferentes cenários, mostrou-se muito útil por viabilizar análises de sensibilidade acerca das diferentes soluções pesquisadas.
Neungmatcha e Sethanan (2015, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Foi desenvolvida uma pesquisa junto a uma usina de açúcar e álcool que resultou na produção de um modelo de programação inteira mista para otimizar rotas de colheita de cana-de-açúcar.	A partir da sua implementação, o modelo pesquisado se mostrou mais eficiente que planejamento manual realizado pelos funcionários da usina e possibilitou avaliar opções acerca de um possível planejamento de colheita integrado regionalmente.
Kittilertpaisan e Pathumnakul (2015, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Considerando que, em certas regiões da Tailândia, as colhedoras de cana só podem operar dentro de intervalos de tempo específicos (janelas), foi implementada uma modelagem voltada para obtenção de um plano de colheita para esse tipo de serviço.	Considerando percursos, períodos, sequências de colheita e momento de início de cada intervalo de tempo (janela), o modelo proposto mostrou-se satisfatório para aplicação tanto em regiões da Tailândia quanto em outras regiões com características semelhantes.
Ramos *et al*. (2016, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	A partir de modelagem matemática e técnicas computacionais, foi proposta uma metodologia capaz de identificar o momento ótimo para o plantio e a colheita de variedades de cana, ao longo de cinco anos de cultivo, de forma a maximizar a produção global de sacarose.	Mediante a aplicação de um modelo de otimização binária não linear, foi identificado um planejamento ótimo em que a produtividade da cana poderia ser até 17,8% superior à produtividade obtida pelo processo convencional de planejamento.
Junqueira e Morabito (2017, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Pesquisar uma modelagem matemática de otimização baseada na programação aplicada à tomada de decisões voltadas para o dimensionamento e escalonamento em lotes de colhedoras atuando de forma sequencial.	Depois de avaliado, o modelo pesquisado se mostrou adequado tanto conceitualmente quanto do ponto de vista de aplicações reais, com potencial para a redução de custos relacionados ao processo de colheita.
Santoro , Soler e Cherri (2017, *apud* DORIGUEL; CRUSCIOL; FLORENTINO, 2017)	Foi proposto um modelo matemático aplicado ao planejamento de rotas de colheita mecanizada com o objetivo de minimizar o tempo de manobra da colhedora.	A partir da aplicação do modelo aos dados fornecidos por uma empresa do setor, os testes computacionais indicaram a possibilidade de se reduzir cerca de 31% do tempo de manobra.

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Doriguel, Crusciol e Florentino (2017).

A maioria dos estudos pesquisados por Doriguel, Crusciol e Florentino (2017) buscou minimizar os custos no processo de colheita e/ou elevar a quantidade de sacarose da cultura da cana, em decorrência do planejamento do momento ideal da colheita. Nervis *et al*. (2017) afirmaram que o acentuado crescimento do setor sucroenergético elevou a complexidade dos problemas desse segmento econômico, o que fez com que as pesquisas relacionadas à otimização da produção, colheita e processamento da cana-de-açúcar se intensificassem e diversificassem.

Desde 2014, com os estudos de Silva e Marins (2014), Silva, Marins e Dias (2015) e Ramos *et al*. (2016), citados por Doriguel, Crusciol e Florentino (2017),

começaram a ser observadas investigações que contemplavam variáveis agronômicas inerentes ao processo de cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar, com foco voltado para a aplicação de modelagens matemáticas destinadas à solução otimizada de problemas nesta área.

Caixeta-Filho e Miyashita (2018) desenvolveram um modelo matemático baseado em programação linear inteira mista com o objetivo de maximizar a receita de venda do açúcar mediante a otimização da colheita da safra, tomando como restrições parâmetros relacionados à capacidade de processamento e à parcela mínima da área cultivada ser colhida. O principal resultado alcançado a partir da aplicação do modelo foi a obtenção de um padrão horário para o processo de colheita à medida que a proporção da área colhida aumentava, sendo que, tal padrão só foi quebrado quando a área mínima considerada para a colheita atingiu um terço da área cultivável. Também foi possível observar que o teor de açúcar, avaliado a partir do acúmulo de sacarose nos colmos de cana-de-açúcar, caracterizou-se como a principal variável direcionadora da otimização da função objetivo do respectivo modelo.

Ao ponderarem que os gastos envolvendo o transporte caracterizam-se como o componente que tem mais influência sobre o custo de processamento da cana-de-açúcar na indústria sucroenergética, Patcharamethanon e Sudtachat (2018) propuseram um modelo matemático de otimização voltada para a minimização do custo total com transporte (movimentação/transbordo, depreciação, mão de obra, combustível, pneus, etc.) por meio da setorização da área de colheita e com uso de dois tipos de caminhões (um com seis rodas e outro com dez rodas). Concluiu-se que o fator que mais impactava o custo do transporte era o gasto com a chamada instalação, ou seja, manobras de corte, carga e descarga da cana nos caminhões. Estes autores observaram que para transportar maiores quantidades de cana até a fábrica, seria necessário direcionar os carregamentos para os caminhões com maior capacidade, portanto, aqueles com dez rodas.

As pesquisas como aquelas realizadas por Sungnul *et al*. (2018), Caixeta-Filho e Miyashita (2018), Patcharamethanon e Sudtachat (2018) e Florentino *et al*. (2018) mantiveram seu enfoque nos problemas relacionados ao processo de colheita e seus custos, bem como, na maximização da sacarose. Contudo, pôde-se observar a diversificação das metodologias utilizadas no processo de modelagem matemática de otimização, passando a empregar mais técnicas aproximativas; também pôde se observar certa preocupação com uma quantidade maior de variáveis relacionadas ao

processo de cultivo propriamente dito e, ainda, a utilização de variáveis inerentes ao processo comercial, ou seja, vendas e suas receitas. Esta diversificação de metodologia foi necessária para tornar os modelos matemáticos e os experimentos computacionais mais próximos dos problemas reais, com a criação de instâncias computacionais simulando problemas de grande porte, em que os métodos exatos de otimização não são viáveis e necessitam do emprego de técnicas aproximativas.

Mediante o uso de um algoritmo genético, Florentino *et al*. (2018) propuseram uma metodologia de otimização bi-objetivo para auxílio no planejamento da colheita, de tal forma que se pudesse colher a cana-de-açúcar com a maior quantidade possível de sacarose aparente (Pol), elevando sua qualidade, e, ainda, fossem atendidas as restrições operacionais de usinas sucroenergéticas. Além de testar computacionalmente um algoritmo genético, Florentino *et al*. (2018) compararam com um método otimização exato, sendo que, os resultados demonstraram que esse último é aplicável a problemas de fazendas menores, e, para a solução de problemas de fazendas médias e grandes seriam recomendados métodos heurísticos. Os resultados desta pesquisa permitiram ainda avaliar e evidenciar as trocas oriundas das escolhas entre poder satisfazer objetivos relacionados ao processo de colheita de forma ideal, ou, fazer o uso de máquinas de maneira ideal com um mínimo de trânsito entre as áreas de colheita.

Outra característica importante dos modelos matemáticos mais recentes é a utilização de mais de um objetivo, ou seja, a utilização de modelos multiobjectivos. Sungnul *et al*. (2018) buscaram desenvolver um modelo matemático de otimização bi-objetivo com a finalidade de minimizar o custo de colheita da cana-de-açúcar e maximizar a sua receita de vendas no mercado tailandês. O modelo matemático bi-objetivo pesquisado por Sungnul *et al*. (2018) permitiu calcular o tempo ótimo para a colheita da cana-de-açúcar na Tailândia usando dados de safra dos anos de 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016.

Com o exposto, pode-se observar que os problemas envolvendo modelagens matemáticas de otimização aplicadas a cultura da cana estão voltados para o processo de colheita e que estes se concentram na questão de determinação do período de realização desta, não levando em consideração que os diferentes cultivares de cana-de-açúcar atingem seu período útil de industrialização em diferentes momentos. São poucos os trabalhos da literatura que abordam as preocupações com a qualidade da cana a ser colhida, ou seja, com a colheita

realizada próxima do pico de maturação desta. Também, observa-se que a utilização de agentes maturadores proporciona maior flexibilidade ao processo da colheita da cana-de-açúcar e à gestão da produtividade de sacarose, mas não foram identificadas pesquisas relacionadas à utilização de modelagens matemáticas de otimização voltadas para o planejamento do uso de agentes indutores de maturação. Neste contexto, o modelo identificado a partir desta investigação científica pode constituir-se em uma ferramenta muito útil à gestão otimizada da produtividade da cana-de-açúcar no setor sucroenergético.

2.5 Modelagem Matemática Baseada em Programação por Metas

Os modelos matemáticos aplicados à agricultura permitem quantificar previamente possíveis consumos e efeitos relacionados à determinada cultura, e, assim, prever resultados a partir do planejamento de ações consideradas críticas para o sucesso de um empreendimento agrícola.

Mediante a representação de uma situação problema, modelos podem fornecer uma descrição abrangente acerca de determinado objeto de estudo, tornando-se valiosas ferramentas de apoio à tomada de decisões na agricultura, além do fato de apresentarem custos muito menores que os custos dos experimentos convencionais (DEJENIE, 2019).

Quando produzida com base em experimentos de campo, a modelagem matemática pode ser utilizada para confirmar, testar e, até mesmo, ampliar os resultados já observados, agregando novos conhecimentos ao atual estágio de desenvolvimento técnico e científico relacionado a uma determinada área de conhecimento e à sociedade em geral.

Enquanto metodologia que busca auxiliar cientificamente a tomada de decisões relacionada à solução de problemas envolvendo a alocação de recursos em cenários restritivos (ARENALES *et al.*, 2015), a pesquisa operacional oferece ferramentas analíticas que podem ser úteis ao setor agrícola, sendo que, dentre tais ferramentas encontram-se as modelagens matemáticas de otimização.

Dessa forma, ao considerar que o uso de agentes químicos de maturação tem por finalidade proporcionar maior flexibilidade ao processo de gestão da colheita da cana, e, ainda, que a proposição e a utilização de modelagens matemáticas de otimização nesse contexto podem viabilizar a gestão otimizada da produtividade da

cana-de-açúcar no setor sucroenergético, observou-se que o uso da metodologia de Programação por Metas ou, simplesmente, PM (*Goal Programming*: *GP*) seria a melhor alternativa a ser utilizada na proposição de um modelo matemático para otimização do planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar.

Após a introdução da Programação por Metas (PM) como uma extensão das modelagens de programação multiobjetivos em 1955, os modelos matemáticos baseados em PM ganharam popularidade a partir da publicação de vários estudos entre 1961 e 1976, caracterizando-se como uma técnica muito utilizada atualmente, de fácil compreensão e aplicabilidade (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017).

Enquanto ferramentas da pesquisa operacional aplicadas à ciência da gestão, as modelagens baseadas em PM são amplas e multidisciplinares, uma vez que consideram as dificuldades de se propor modelagens matemáticas com base em um único objetivo para a solução de problemas reais altamente complexos (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017). A metodologia de PM propõe modelos que permitem otimizar resultados ao direcionar desvios, positivos ou negativos, para zero, o que permite ao tomador de decisão aproximar suas metas da factibilidade de execução (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017).

O processo de otimização baseando em PM permite elaborar modelagens de programação matemática, lineares e/ou não-lineares, com variáveis contínuas e/ou discretas, a partir da flexibilização das metas a serem alcançadas, criando-se desvios acima ou abaixo dos alvos a serem atingidos, buscando-se determinar uma solução que minimize os desvios não desejáveis.

A formulação (1)-(3) descreve de forma geral um modelo matemático de um problema em que deseja-se determinar x tal que as Q metas $f_i(x) = g_i$ sejam alcançadas, $x \in R^n, f_i: R^n \to R,\ g_i \in R,\ i = 1, \dots, Q$. Como, quase sempre é impossível que os alvos $g_i,\ i = 1, \dots, Q,$ sejam atingidos simultaneamente, é necessário criar variáveis de desvios ($p_i \geq 0$ e $n_i \geq 0$), ou seja $f_i(x) - p_i + n_i = g_i,\ i = 1, \dots, Q,$ (JONES; TAMIZ, 2010).

No modelo (1)-(3), as Q metas $f_i(x) = g_i$ foram relaxadas, permitindo-se desvios positivos (p_i) ou negativos (n_i), $i = 1, \dots, Q$, em que $\bar{\bar{p}}$ e $\bar{\bar{n}}$ são conjuntos contendo as variáveis de desvios indesejáveis ($\bar{\bar{p}} \subseteq \{p_1, p_2, \dots, p_Q\}$ e $\bar{\bar{n}} \subseteq$

$\{n_1, n_2, \dots, n_Q\}$), as quais devem ser minimizados. Em ainda, x é o vetor de variáveis já definido e *F* é a região de busca destas variáveis. A função *z* descreve o tratamento e análise desejados para os desvios, dependendo do tipo desta função tem-se uma abordagem diferente da programação por metas PM (JONES; TAMIZ, 2010).

Minimize $z(\bar{\bar{p}}, \bar{\bar{n}})$, (1)

Sujeito a:

$$f_i(x) - p_i + n_i = g_i, \quad i = 1, \dots, Q \tag{2}$$

$$x \in F, \quad p_i \geq 0 \text{ e } n_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, Q \tag{3}$$

$\bar{\bar{p}}\ \bar{\bar{n}}$

Silva e Martins (2015) ponderam que, em pesquisa operacional, as modelagens matemáticas para solução de problemas de grande porte baseadas em PM podem ser separadas em dois grupos: modelos determinísticos e modelos baseados em incerteza.

Modelos determinísticos assumem que os dados utilizados para produzir a informação voltada para o suporte à tomada de decisão sejam confiáveis, e, portanto, o modelo pesquisado produz valores próximos da realidade condicionados à natureza dos dados, dentro de certos intervalos (SILVA; MARTINS, 2015). Ou seja, no processo de modelagem matemática determinística, os parâmetros não apresentam incertezas. Nesse sentido, para avaliar o impacto das alterações desses dados sobre os resultados produzidos a partir da modelagem pesquisada utilizam-se as técnicas de análise de sensibilidade e análise paramétrica (SILVA; MARTINS, 2015).

Os modelos de otimização produzidos sob a ótica da incerteza avaliam o impacto de variáveis aleatórias, das quais se conhece a respectiva distribuição de probabilidades, em relação ao risco atribuído diretamente à modelagem pesquisada para apoio à tomada de decisão (SILVA; MARTINS, 2015). Isto é, a despeito da probabilidade conhecida acerca da distribuição dos dados, esse tipo de modelagem não apresenta uma solução única. Nesse contexto, a incerteza (perturbação) causada pelos dados de entrada da modelagem pesquisada pode ser avaliada a partir da técnica de análise de sensibilidade (SILVA; MARTINS, 2015).

A partir dessas duas definições, Silva e Marins (2015) fizeram uma revisão bibliográfica e descreveram os principais métodos de modelagem baseada em PM, conforme pode ser visto no resumo descrito pelo Quadro 4.

Quadro 4 - Principais métodos de modelagem matemática de otimização baseada em PM

Contexto	Identificação	Descrição
Programação por Metas (PM) determinística	Programação por Metas Ponderada (PMP)	A função *z* no modelo (1)-(3) é dada pela soma ponderada dos desvios indesejáveis. A atribuição de pesos diferenciados a cada desvio cabe ao tomador de decisão.
	Programação por Metas Lexicográficas (PML)	Cada objetivo recebe um nível de prioridade e, em seguida, todos os objetivos são ordenados considerando-se cada grau de prioridade atribuído pelo tomador de decisões; a cada etapa do processo de otimização, o objetivo com prioridade mais elevada é otimizado, utilizando a variável de desvio deste, e tem seu valor ótimo incorporado ao modelo sob a forma de uma nova restrição e assim sucessivamente, até que todos objetivos sejam satisfeitos.
	Programação por Metas Minimax (PMM)	Tem por objetivo minimizar um limitante superior sobre todos os desvios indesejáveis.
	Programação por Metas Estendida (PME)	Trata-se de uma combinação convexa dos modelos PMP, PML e PMM, que produz soluções mais equilibradas; ou seja, mediante o uso de penalidades (pesos) e intervalos de valores para determinadas metas, estabelece-se maior sensibilidade ao cumprimento de determinado objetivo.
	Programação por Metas Inteira (PMI)	Esse modelo é utilizado quando variáveis de decisão só podem assumir valores discretos, ou seja, não se admite um fracionamento para o valor de uma variável.
	Programação por Metas Binária (PMB)	É uma modelagem voltada para a solução de problemas em que a tomada de decisão implica que certos objetivos serão cumpridos e outros não, demandado variáveis do tipo binária.
	Programação por Metas e Análise Envoltória de Dados (PMAED)	A análise envoltória de dados ou *data envelopment analysis* (DEA) está relacionada à avaliação multicritério de desempenho envolvendo unidades tomadoras de decisão ou *decision making units* (DMUs); essa metodologia analítica encontra certas limitações relacionadas a um número mínimo de DMUs; nesse contexto, alguns pesquisadores propuseram a aplicação da PM para superar essas dificuldades dos modelos DEA.
	Programação por Metas Não Linear (PMNL)	Consiste na aplicação da metodologia da PM em problemas de otimização multiobjetivo em que não é possível a linearização das relações matemáticas entre as variáveis do modelo.
Programação por Metas (PM) sob incerteza	Programação por Metas Estocástica (PM_E)	Via de regra, assume-se que os tomadores de decisão são suficientemente capazes de escolher e priorizar as metas relacionadas a certos objetivos, contudo, um problema pode assumir características das mais variadas naturezas, comportando-se de forma aleatória; nesses casos é preciso incorporar esse comportamento aleatório ao respectivo modelo de PM, dando origem ao processo de programação por metas estocásticas (PM_E).
	Programação por Metas *Fuzzy*	A lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos, em que, ao serem considerados certos graus de adesão ou pertinência, os elementos de um universo podem ser identificados a determinados conjuntos; nesse contexto, ao considerar a aplicação da PM aliada à teoria dos conjuntos *Fuzzy*, contempla-se uma variada gama de imprecisões inerentes à complexidade de alguns problemas reais, o que torna a formulação matemática das relações entre variáveis mais simples, uma vez que a quantidade de restrições diminui consideravelmente.
	Programação por Metas Multi-Escolha	É uma modelagem voltada para a solução de problemas em que existem diversos valores associados a uma determinada meta, agrupáveis em níveis de prioridade (multi-escolhas), e que, as incertezas do problema estão associadas a restrições de recursos.

	Programação por Metas Multi-Segmentos	É uma modelagem derivada da Programação por Metas Multi-escolha, porém, em vez de considerar as incertezas do problema associadas diretamente às restrições de recursos em si, a Programação por Metas Multi-Segmentos avalia a incerteza relacionada a coeficientes relacionados àqueles recursos.

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Silva e Marins (2015).

Devido às características do problema estudado neste trabalho, a abordagem de Programação por Metas Ponderada (PMP) é a mais indicada para a modelagem matemática. Segundo Jones e El-Darzi (1995) na modelagem PMP a atribuição de pesos (u e v) às variáveis de desvios (n e p) é feita de acordo com o respectivo grau de importância definido pelo tomador de decisões.

Segundo Jones e Tamiz (2010), os modelos de PMP assumem a forma algébrica descrita pelas Equações (4)-(6).

Minimize $$z = \sum_{i=1}^{k} u_i n_i + v_i p_i \quad (4)$$

Sujeito a:

$$f_i(x) - p_i + n_i = g_i, \quad i = 1, \dots, Q \quad (5)$$

$$x \in F, \quad p_i \geq 0 \text{ e } n_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, Q \quad (6)$$

Sendo que, nas Equações (4)-(6): *x* é o vetor de variáveis de decisão; $f_i(x)$ função associada a *i-ésima* meta a ser atingida ($f_i(x) = g_i$); g_i é o *i-ésimo* valor alvo; n_i e p_i são, respectivamente, as variáveis que descrevem os desvios abaixo e acima do *i-ésimo* valor alvo, *i=1, ..., Q*; u_i e v_i são os pesos associados aos desvios indesejáveis n_i e p_i, *i=1, ..., k*, respectivamente, na função *z*, os quais assumem valores de acordo com a importância de cada meta, caso o tomador de decisão não deseje atribuir nenhuma importância (peso) aos respectivos desvios, u_i e v_i assumem valores iguais, ou ainda podem ser omitidos do modelo (u_i=1 e v_i=1, *i=1, ..., k*). Em geral usa-se $\sum_{i=1}^{k} (u_i + v_i) = 1$, e se for necessário usa-se f_i normalizada ($\frac{f_i(x)}{g_i}, g_i \neq 0,$), $i = 1, \dots, Q$.

Uma vez que esta pesquisa tem por objetivo propor um modelo matemático voltado para a gestão otimizada da produtividade da cana-de-açúcar mediante a identificação do melhor momento para aplicação de agentes maturadores, bem como, o momento ideal para realização da colheita, de forma a maximizar os níveis de

sacarose produzida para atender às quantidades demandadas mensalmente por usinas sucroenergéticas, observa-se que tal modelo pode assumir a forma algébrica da Programação por Metas determinística baseada no método das Metas Ponderadas (PMP), conforme descrito por Jones e Tamiz (2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho teve por objetivo propor uma ferramenta matemática para auxílio no planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana, visando obter uma matéria-prima para o setor sucroenergético com máxima qualidade tecnológica relacionada aos níveis de Pol presentes no caldo da cana, e, nesse sentido, a metodologia utilizada teve por base a proposição de um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) formulado a partir da técnica de Programação por Metas Ponderadas (PMP).

Por se tratar de um PLI, a implementação computacional e a validação do modelo proposto foram realizadas abordando técnicas de Otimização Linear Inteira mediante o uso dos softwares Visual Studio C++ 2015 e do IBM CPLEX versão 12.7 (versão acadêmica) e um computador com processador Intel Core i7 de 8.0 GB de memória RAM, em quatro instâncias geradas aleatoriamente com base em dados refletindo situações reais de empreendimentos agrícolas produtores de cana-de-açúcar da região centro-sul do Brasil.

As seções 3.1 e 3.2, a seguir, descrevem respectivamente, as etapas relacionadas aos procedimentos inerentes à proposição e formulação do modelo matemático e seu funcionamento, e os procedimentos metodológicos referentes à composição da base de dados utilizada para validação do modelo proposto mediante a realização de testes computacionais.

3.1 Modelo Matemático para Otimização do Planejamento da Aplicação de Agentes Maturadores e da Colheita da Cana-de-açúcar

Mesmo diante do planejamento realizado para escolha das variedades de cana-de-açúcar e dos respectivos momentos de plantio, é comum que o processo de maturação natural ocorra de forma simultânea em alguns dos talhões das unidades fornecedoras da matéria-prima para indústria sucroenergética. Ou seja, ocorre certa sobreposição dos intervalos de tempo em que as variedades cultivadas permanecem com seus níveis de Pol dentro do período útil de industrialização (PUI), podendo haver uma maior quantidade de cana pronta para colheita do que é demandado pela usina em certos períodos do ano, e em outros períodos, esta quantidade pode estar abaixo da quantidade demandada, necessitando fazer a colheita de uma cana muito nova

(abaixo dos níveis recomendado de Pol) ou muito velha (passado do ponto apropriado para colheita). Lembrando que, por questões fisiológicas, os níveis de sacarose da cana-de-açúcar aumentam até atingir seu ponto de produtividade máxima, e depois deste iniciam sua redução, e assim continua até que deixe de apresentar os teores de sacarose demandados pela indústria.

Para viabilizar a máxima produtividade de sacarose, considerando que diferentes variedades de cultivares de cana-de-açúcar podem passar pelo PUI de forma simultânea, os gestores lançam mão do uso dos maturadores químicos para facilitar o manejo do processo de colheita, visando evitar que parte destas variedades sejam colhidas após ou muito antes do PUI. Mas, ainda assim, é provável que não se consiga identificar de forma convencional o melhor momento para realizar a colheita com máximo teor de sacarose da cana-de-açúcar plantada em todos os talhões de uma unidade sucroenergética. Nesse contexto, surge a necessidade de um modelo matemático que possa auxiliar no planejamento da aplicação do maturador e na definição do momento da colheita da cana em cada talhão, sendo esta colheita realizada dentro do período de máxima produção de sacarose e atendendo a demanda mensal da usina.

Para formulação do modelo matemático proposto, foram consideradas n variedades de cultivares de cana plantadas nos k talhões de uma unidade sucroenergética, sujeitas à aplicação de agentes reguladores de maturação (maturadores) nos momentos M_j, j=1, ... , k. Consideram-se conhecidos os dias F_j, j=1, ... , k, em que houve o plantio ou a última colheita em cada talhão j. Assumiu-se que a colheita da cana deve ser realizada em todos os k talhões de forma a atender os L períodos de demanda de sacarose da usina e deve ser realizada o mais próximo possível do pico de maturação da cana. Assim, propôs-se um modelo visando obter um planejamento para a aplicação de maturadores e para a colheita, de forma que a cana plantada em cada talhão j fosse colhida no momento t_j com mínimo desvio acima (p_j) ou abaixo (n_j), do pico de maturação, atendendo aos L períodos de demanda D_l (l=1, ... ,L) e levando em conta o efeito temporal e produtivo a_j do agente maturador aplicado sobre cada variedade de cultivar da cana-de-açúcar plantada em cada talhão j, j=1, ... , k.

As variáveis do modelo proposto são definidas como varáveis de decisão e variáveis de desvio. As variáveis de decisão X_{mj}, sendo $m = F_j, \dots, F_j + 365$, e j=1, ... , k, são definidas como:

$$X_{m_j} = \begin{cases} 1 \; se \; o \; maturador \; for \; aplicado \; no \; talhão \; j, no \; momento \; m; \\ 0 \; em \; caso \; contrário. \;\; m = F_j, \dots, F_j + 365 \; e \; j = 1, \dots, k. \end{cases}$$

Sendo que, F_j é o período que ocorreu o plantio ou última colheita da cana no talhão j, j=1, ... , k.

Assim, o agente químico de maturação deve ser aplicado em cada talhão j uma única vez e o momento em que deve ocorrer a aplicação é denotado por M_j.

A colheita em cada talhão j deve ser iniciada a_j dias após a aplicação do maturador, ou seja, deve ser realizada no momento $M_j + a_j, \; j = 1, \dots, k$. Por outro lado, não há como impor uma rigidez nesta data de colheita. Portanto, permite-se um desvio para mais (p_j) ou para menos (n_j), ou seja, o momento de início da colheita no talhão j pode ser flexibilizado como $t_j = M_j + a_j + p_j - n_j \; , \; j = 1, \dots, k$, e espera-se que este desvio seja o menor possível.

Assim t_j define o momento de início de realização da colheita no talhão j, e as variáveis de desvio são:

p_j = variáveis de desvio positivo que descrevem a quantidade que t_j desvia acima do pico de maturação da cana plantada no talhão j, j=1, ... , k;

n_j, = variáveis de desvio negativo que descrevem a quantidade que t_j desvia abaixo do pico de maturação da cana plantada no talhão j, j=1, ... , k.

Dessa forma, o modelo de otimização em questão está apresentado a seguir.

Minimize $$\sum_{j=1}^{k} u_j n_j + v_j p_j \qquad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{m=F_j}^{F_j+365} X_{m_j} = 1, \qquad j = 1, \dots, k \qquad (8)$$

$$M_j = \sum_{m=F_j}^{F_j+365} mX_{m_j} \ , \qquad j = 1, \dots, k \tag{9}$$

$$t_j - p_j + n_j = M_j + a_j, \qquad j = 1, \dots, k \tag{10}$$

$$\sum_{(t_j)\in I_l} TCH_j \ H_j(P_j(t_j - M_j)/100) \geq D_l, \qquad l = 1, \dots, L \tag{11}$$

$$t_j \notin ES \ , \qquad j = 1, \dots, k \tag{12}$$

$$0 \leq n_j \leq m_{jPUI-} \ , \qquad j = 1, \dots, k \tag{13}$$

$$0 \leq p_j \leq m_{jPUI+}, \qquad j = 1, \dots, k \tag{14}$$

$$tmin_j \leq t_j \leq tmax_j \ , \qquad j = 1, \dots, k \tag{15}$$

$$X_{m_j} = 0 \ ou \ 1, \ \ m = F_j, \dots, F_j + 365 \ , \qquad j = 1, \dots, k \tag{16}$$

Sendo que, as variáveis, índices, parâmetros, funções e conjuntos do modelo de otimização proposto encontram-se descritos no Quadro 5.

Quadro 5 – Descrição das variáveis, índices, parâmetros, funções e conjuntos do modelo proposto

Legenda	Categoria	Descrição
j = 1,... , k	índice	Índices que representam os talhões considerados, em que se encontra plantada a cana-de-açúcar.
m	índice	Índices que representam os momentos (em dias) de aplicação do maturador na cana-de-açúcar.
x_{m_j}	variável	Assumirá valor 1 se o maturador for aplicado no momento *m* na cana plantada no talhão *j*, ou assumirá valor 0 em caso contrário.
M_j	variável	Momento em que deve ocorrer a aplicação do agente químico de maturação em cada talhão *j*.
t_j	variável	Momento para iniciar a colheita da cana plantada no talhão *j*.
n_j	variável	Desvio negativo (medido em dias) em relação ao ponto de máxima produtividade da cana plantada no talhão *j* e o momento da sua colheita t_j.
p_j	variável	Desvio (medido em dias) positivo em relação ao ponto de máxima produtividade da cana plantada no talhão *j* e o momento da sua colheita t_j.
l=1, 2, ..., L	índice	Índices associados aos meses da demanda.
a_j	parâmetro	Quantidade de dias entre a aplicação do maturador e o pico de maturação da cana plantada no talhão *j* (tempo ideal de ação do maturador).
u_j , v_j	parâmetro	Pesos associados aos desvios negativos (u_j) e positivos (v_j) do momento da colheita e o ponto de máxima qualidade tecnológica relacionada à Pol da cana plantada no talhão *j*.
F_j	parâmetro	Momento (dia) do plantio ou da última colheita realizada no talhão *j*.
ES	conjunto	Conjunto de dias associados ao período de entressafra da cultura.
m_{jPUI-} e m_{jPUI+}	parâmetro	Limitantes inferior e superior do PUI da cana plantada no talhão *j*.
$tmin_j$ e $tmax_j$	parâmetro	Limitantes inferior e superior do período recomendado para colheita da variedade de cana plantada no talhão *j*.

TCH_j	parâmetro	Indica a produtividade de cana em toneladas por hectare (*t ha*$^{-1}$), das variedades plantadas em cada talhão *j*.
H_j	parâmetro	Indica a dimensão, em hectares (*ha*), de cada talhão *j*.
D_l	parâmetro	Demanda de sacarose (em toneladas) da unidade sucroenergética para o mês *l*.
$P_j(x)$	função	Função que descreve a produtividade percentual de sacarose aparente (Pol) no momento *x*, mediante o uso do agente maturador, para cada variedade plantada no talhão j.
I_l	conjunto	Conjunto de dias associados a demanda de sacarose no mês *l*.

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

A função objetivo do modelo proposto, descrita pela Equação (7), tem por finalidade minimizar a soma de todos os desvios (p_j e n_j) entre o momento de colheita da cana-de-açúcar presente no talhão *j* e o momento que a cana atinge o ponto de máxima produtividade de sacarose, *j*=1, ... , *k*. Os parâmetros v_j e u_j são possíveis pesos que o tomador de decisões pode usar caso queira dar diferentes preferências aos desvios. Usualmente, faz-se $\sum_{j=1}^{k}(v_j + u_j) = 1$, dando valores aos v_j e u_j tão grande quanto a preferência, $j \in \{1, \dots, k\}$, priorizando, por exemplo, variedades de cana com maiores níveis de Pol, ou ainda, penalizando uma variedade plantada em um talhão cujo processo de colheita seja mais oneroso. Caso não queira dar preferências, usa-se v_j=1 e u_j=1 para todo $j \in \{1, \dots, k\}$.

As restrições (8) determinam que a aplicação de um agente químico de maturação para cada talhão *j* só poderá ocorrer em um único momento. E as restrições (9) identificam o momento M_j em que deve ocorrer a aplicação do agente químico de maturação em cada talhão *j*.

As restrições (10) definem o momento t_j em que deve ser iniciada a colheita em cada talhão *j*. O momento de início da colheita leva em conta o momento da aplicação do maturador M_j e o interstício de tempo a_j demandado para que sua ação sobre a variedade de cana plantada no talhão *j* faça com que ela atinja seu ponto máximo de produtividade de sacarose, medido pela Pol. Estas restrições são relaxadas com o uso de desvios acima (p_j) ou abaixo (n_j) do período recomendado, permitindo melhor flexibilidade no atendimento da demanda.

As restrições (11) garantem que a demanda D_i de sacarose requerida pela unidade sucroenergética, para todos os períodos *l*, seja satisfeita.

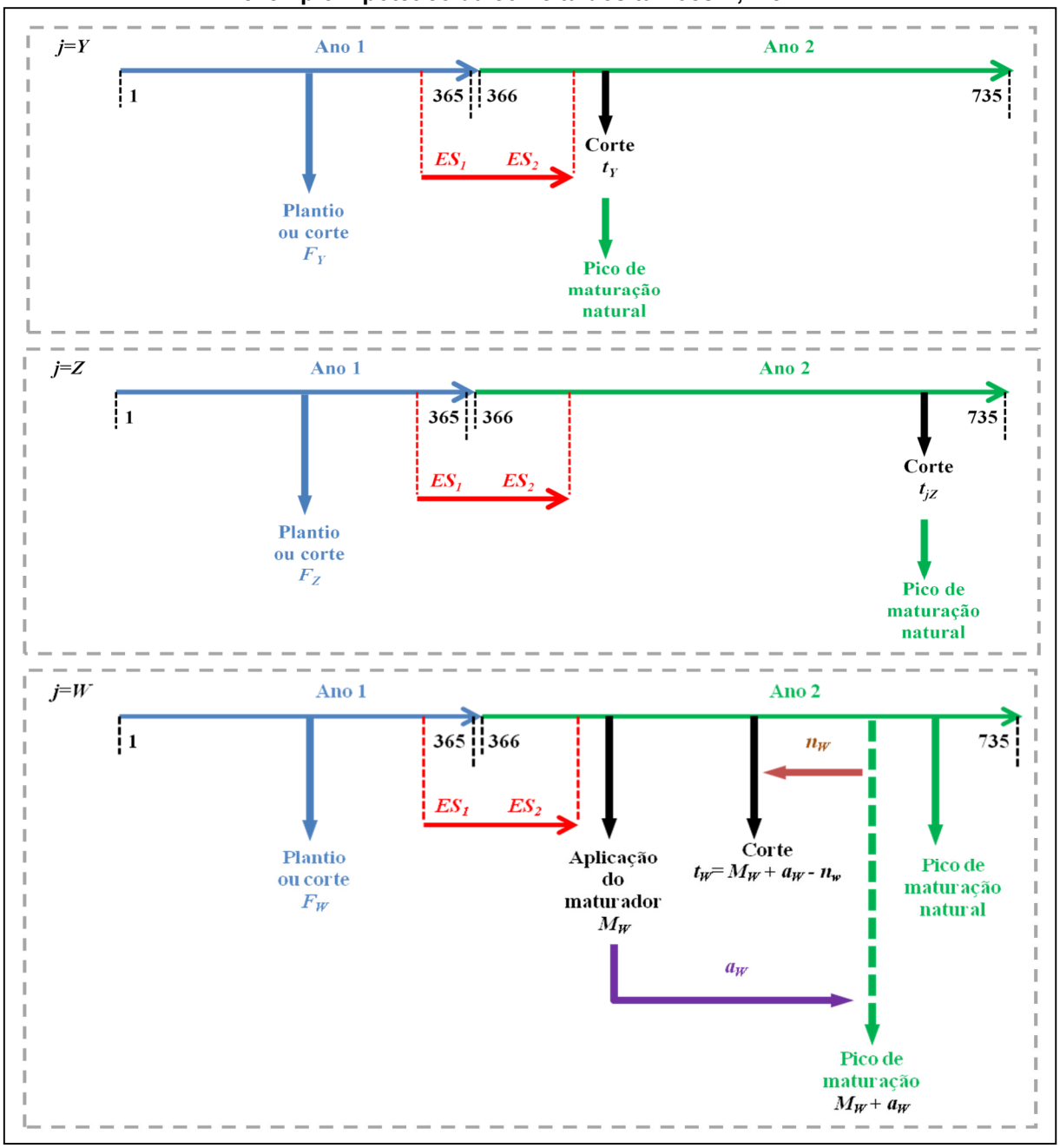
As restrições (12), (13), (14) e (15) garantem que a colheita seja realizada no ano planejado e dentro dos respectivos PUI, isto é: as restrições (12) impedem que os momentos para colheita sejam determinados dentro da entressafra; as restrições (13) e (14) indicam o intervalo de variação dos desvios (p_j e n_j) em cada talhão *j*,

garantindo que a colheita ocorra obrigatoriamente dentro do PUI; e, as restrições (15) delimitam o intervalo de ocorrência da colheita das variedades plantadas em cada talhão *j*.

As restrições (16) definem as variáveis X_{mj} como 0 ou 1, definem p_j e n_j como números inteiros (número de dias) e delimitam os valores de *m*.

A Figura 3 exemplifica de forma simplificada o planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar descrito pelo modelo proposto.

Figura 3 – Esquema de planejamento proposto pelo modelo desta pesquisa a partir do exemplo hipotético da colheita dos talhões Y, Z e W



Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Na Figura 3, supõe-se a existência de três talhões *Y*, *W* e *Z* com diferentes cultivares de cana no *ano 1*, cujo planejamento proposto refere-se ao *ano 2*. Os picos de maturação naturais dos cultivares presentes nos talhões *Y* e *Z* acontecem em dois momentos distintos. Contudo, o pico de maturação natural da cana plantada no talhão *W* ocorre de forma simultânea ao pico de maturação natural do talhão *Z*. Supõe-se também que, por questões relacionadas à capacidade de processamento da colheita, só possa ser colhido um talhão por vez. Dessa forma, o tomador de decisões é obrigado a optar entre a colheita do talhão *W* ou do talhão *Z,* mas quando optar por um deles, o outro terá a colheita muito fora do período correto. Entretanto, diante da possibilidade de usar agentes químicos de maturação, o tomador de decisões precisa identificar o momento de certo M_w para aplicação do maturador de tal forma que, após determinado período a_w de ação, o pico de maturação da cana plantada no talhão *W* ocorra em um momento (M_w+ a_w) diferente do momento de ocorrência do seu pico de maturação natural.

Além do problema envolvendo a decisão relacionada ao melhor momento para aplicação do agente maturador, existe a necessidade de identificar o momento de colheita t_w, que deve ocorrer preferencialmente no período (M_w+a_w), de modo que se consiga maximizar o teor de sacarose da cana presente no talhão *W*.

O modelo proposto identifica o momento M_j para aplicação do maturador e, contemplando o respectivo período de tempo demandado para sua ação a_j, identifica também o melhor momento para realização da colheita, de preferência com um desvio mínimo possível do período M_j+a_j, pois desta forma, maximiza os teor de sacarose presente na cana-de-açúcar e atende a demanda mensal da usina (D_l). Assim, na ilustração da Figura 3, não houve necessidade de aplicação de maturador na cana plantada nos talhões Y e Z, e para o talhão W houve aplicação do maturador no momento M_w e a colheita foi realizada n_w dias antes do período de máxima maturação M_w+a_w.

3.2 Base de Dados para Realização dos Testes Computacionais

Para a composição da base de dados dos testes computacionais realizados para validação do modelo matemático proposto nesta pesquisa, foram utilizadas 18 variedades de cultivares de cana-de-açúcar adaptáveis à região centro-sul do Brasil,

com as respectivas informações de produtividade referentes à quantidade em toneladas de cana produzidas por hectare (TCH) e níveis de Pol, bem como, os períodos recomendados para colheita de cada variedade (recomendados pelos centros de desenvolvimento destas), conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Características de 18 variedades de cana-de-açúcar adaptáveis à região centro-sul do Brasil

Variedade	Produtividade		Período recomendado para colheita	
	TCH ($t\ ha^{-1}$)	Pol (%)	Mês de início	Mês final
CTC15	132,80	14,50	Julho	Dezembro
CTC9	100,00	15,84	Abril	Julho
RB925211	89,29	14,67	Maio	Agosto
CTC6	136,00	14,98	Agosto	Dezembro
RB855156	117,80	14,50	Abril	Maio
CTC2	129,10	14,31	Junho	Outubro
RB867515	148,20	14,82	Julho	Dezembro
SP80-1842	112,80	14,90	Junho	Outubro
SP83-2847	126,70	13,20	Julho	Dezembro
SP80-3280	121,70	14,80	Julho	Dezembro
RB928062	113,00	15,75	Setembro	Dezembro
RB966928	123,10	13,32	Abril	Julho
CTC20	165,00	13,50	Maio	Dezembro
CTC17	112,30	14,98	Abril	Agosto
SP81-3250	140,60	15,02	Junho	Outubro
CTC4	130,90	13,54	Junho	Novembro
RB92579	142,40	15,70	Julho	Outubro
RB855453	133,35	13,90	Abril	Julho

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Ramos *et al.* (2016).

Tabela 2 – Parâmetros relacionados ao período recomendado para colheita [*tmin*, *tmax*] das variedades de cana-de-açúcar utilizadas para implementação dos testes computacionais

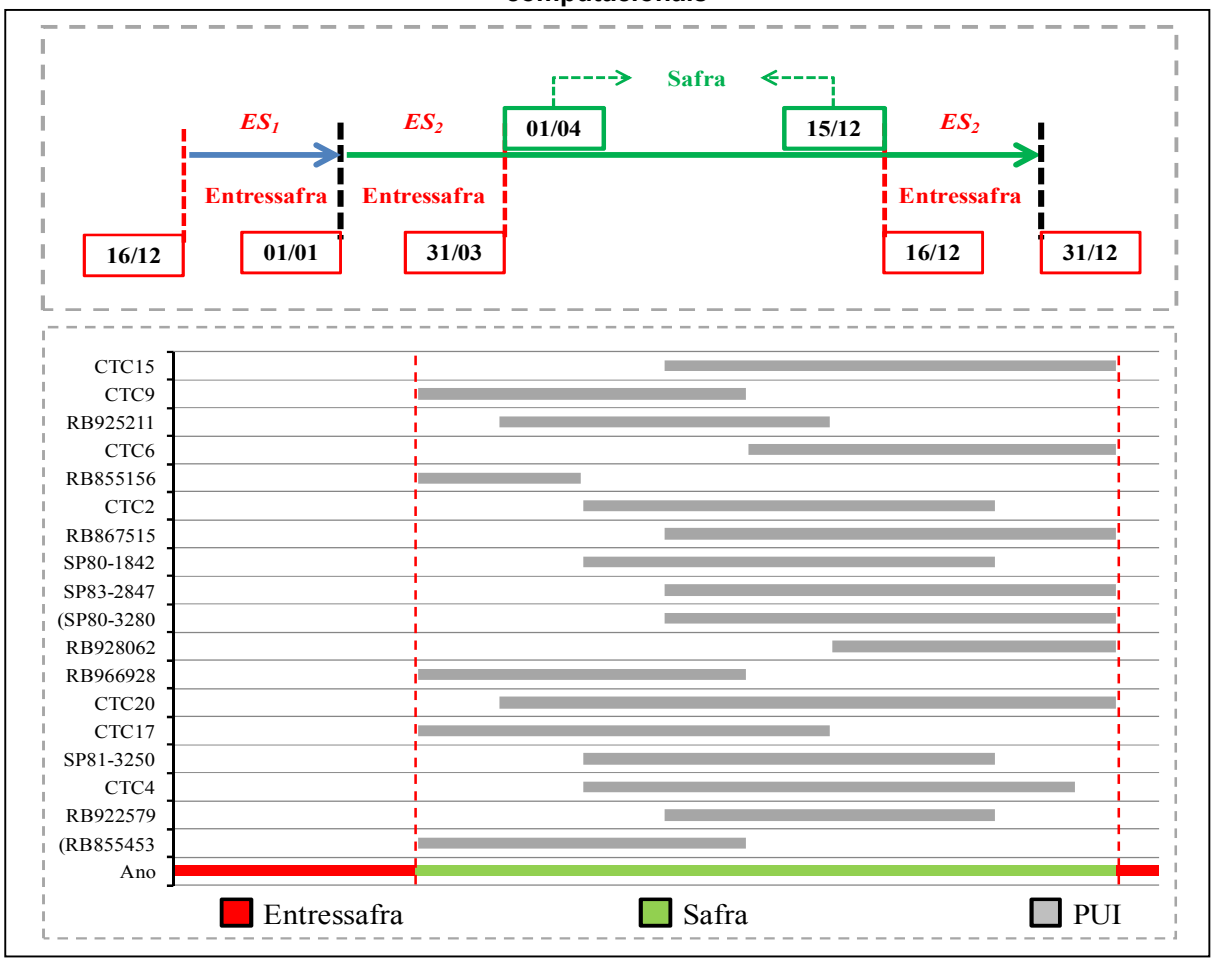
Variedade	Período recomendado para colheita	
	tmin	*tmax*
CTC15	547	714
CTC9	456	577
RB925211	486	608
CTC6	578	714
RB855156	456	516
CTC2	517	669
RB867515	547	714
SP80-1842	517	669
SP83-2847	547	714
SP80-3280	547	714
RB928062	609	714
RB966928	456	577
CTC20	486	714
CTC17	456	608
SP81-3250	517	669
CTC4	517	699
RB92579	547	669
RB855453	456	577

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

A fim de complementar o conjunto de informações necessárias para implementação dos testes computacionais visando a validação do modelo proposto, o dia do plantio ou da última colheita (F_j) para cada talhão *j*, foi gerado aleatoriamente um número inteiro no intervalo [$tmin_j$, $tmax_j$] dependendo da variedade plantada em cada talhão *j*, *j=1, ..., k,* conforme Tabela 2. Foram simuladas quatro instâncias: a instância *I-18 com* 18 talhões (*k*=18), a *I-50* com 50 talhões (*k*=50), a *I-100* com 100 talhões (*k*=100) e a *I-500* com 500 talhões (*k*=500).

Na região centro-sul do Brasil, região considerada para os testes computacionais, a entressafra da cultura da cana-de-açúcar ocorre nos 3 primeiros meses de cada ano. Baseado nesta informação e na Tabela 1, considerou-se que a safra do ano de planejamento, de acordo com a variedade plantada em cada talhão, assumiu o comportamento descrito pela Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática do ano de planejamento para aplicação dos testes computacionais



Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Na implementação do modelo matemático considerou-se 2 anos seguidos, sendo um ano para planejamento (1, ...365) e o ano subsequente para implantação do respectivo planejamento (366, ..., 730), ou seja, os dias de 1 a 365 são referentes ao ano para planejamento e de 366 a 730 são referentes ao ano para implementação do planejamento.

Dessa forma, o momento de plantio/última colheita F_j no talhão *j* é algum valor em um subconjunto de {1, 2, ...,365} e o momento de aplicação do maturador M_j é algum valor no subconjunto de {F_j +1, ..., F_j +365}, de acordo com a variedade plantada em cada talhão *j* , *j=1, ...,k*, conforme apresentado no Quadro 6.

O Quadro 6 mostra os nove meses (*l*) de demanda de Pol, *L*=9, definidos para realização dos experimentos computacionais. Foram identificados também os dias associados a cada mês (*l*), o período de entressafra *(ES*) e a demanda (D_l) para cada mês *l*. O modelo foi implementado utilizando os pesos u_j *=1* e v_j=1 para todas as instâncias, conforme mostrado no Quadro 6.

Quadro 6 – Descrição dos valores assumidos para os índices, parâmetros e conjuntos utilizados nos testes computacionais do modelo proposto em todas as instâncias

Legenda	Descrição	Valores considerados para realização dos testes computacionais			
L	Número de meses de demanda	L=9			
l	Índice associado aos meses da demanda	*l*=1, 2, ..., 9, sendo 1 = abril; 2 = maio; 3 = junho; 4 = julho; 5 = agosto; 6 = setembro; 7 = outubro; 8 = novembro; 9 = dezembro.			
u_j , v_j	Pesos associados as variáveis de desvios n_j e p_j, respectivamente	u_j=*1* e v_j=1			
ES	Dias associados ao período de entressafra	*ES* = de 16/12 a 31/03 = *{366, ... ,455}*			
D_l	Demanda de Pol associada a cada mês l	**Instância *I-18*** $\sum D_l = 11.582t$ D_1 = 1.342t D_2 = 1.387t D_3 = 1.342t D_4 = 1.387t D_5 = 1.387t D_6 = 1.342t	**Instância *I-50*** $\sum D_l = 30.104t$ D_1= 3.488t D_2= 3.605t D_3= 3.488t D_4= 3.605t D_5= 3.605t D_6= 3.488t	**Instância *I-100*** $\sum D_l = 58.154t$ D_1= 6.738t D_2= 6.964t D_3= 6.738t D_4= 6.964t D_5= 6.964t D_6= 6.738t	**Instância *I-500*** $\sum D_l = 290.169t$ D_1= 33.620t D_2= 34.748t D_3= 33.620t D_4=34.748 t D_5= 34.748t D_6= 33.620t

		D_7 = 1.387t D_8 =1.342t D_9 = 666t	D_7= 3.605t D_8= 3.488t D_9 =1.732t	D_7= 6.964t D_8= 6.738t D_9= 3.346t	D_7= 34.748t D_8= 33.620t D_9= 16.697t
I_l	Conjunto de dias associados a demanda do mês *l*	I_1 = de 01/04 a 30/04 = {456, ... ,485}; I_2 = de 01/05 a 31/05 = {486, ... ,516}; I_3 = de 01/06 a 30/06 = {517, ... ,546}; I_4 = de 01/07 a 31/07 = {547, ... ,577}; I_5 = de 01/08 a 31/08 = {578, ... ,608}; I_6 = de 01/09 a 30/09 = {609, ... ,638}; I_7 = de 01/10 a 31/10 = {639, ... ,669}; I_8 = de 01/11 a 30/11 = {670, ... ,699}; I_9 = de 01/12 a 15/12 = {700, ... ,714}.			

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Para a formação das quatro instâncias definidas para testar o modelo proposto, instâncias *I-18*, *I-50*, *I-100* e *I-500* com respectivamente 18, 50, 100 e 500 talhões, foram sorteadas aleatoriamente as variedades de 1 a 18 para comporem a cana plantada em cada talhão integrante das instâncias. Um exemplo desta composição pode ser visto no Quadro 7, para o caso particular da instância *I-18*.

No Quadro 7 estão apresentadas as variedades plantadas nos talhões, os dias F_j de plantio/última colheita da cana do talhão *j,* o cálculo de $(H_j\ TCH_j\ Pol_j)$ e os diferentes pesos (u_j, v_j) associados as variáveis de desvio para o caso particular da instância *I-18*, *j*=1, ...,18.

Quadro 7 – Descrição da variedade plantada em cada talhão *j* e dos valores de F_j, $H_jTCH_j\ Pol_j$, u_j e v_j para todo *j* da instância I-18

Talhão	Variedade plantada	Momento do plantio ou da última colheita realizada F_j	Cálculo de	*Valores dos pesos*	
j			$H_j\ TCH_j\ Pol_j$	u_j	v_j
1	SP83-2847	F_1=211	468	0,0200	0,0200
2	RB867515	F_2=302	724	0,0310	0,0310
3	CTC17	F_3=207	370	0,0158	0,0158
4	CTC2	F_4=277	387	0,0166	0,0166
5	RB928062	F_5=336	605	0,0259	0,0259
6	CTC4	F_6=154	620	0,0265	0,0265
7	CTC4	F_7=154	797	0,0341	0,0341
8	SP80-3280	F_8=237	648	0,0277	0,0277
9	RB855156	F_9=137	666	0,0285	0,0285
10	CTC20	F_{10}=143	1002	0,0429	0,0429
11	RB855453	F_{11}=180	444	0,0190	0,0190
12	CTC20	F_{12}=143	757	0,0324	0,0324
13	CTC15	F_{13}=285	423	0,0181	0,0181
14	CTC4	F_{14}=154	833	0,0357	0,0357
15	RB867515	F_{15}=302	900	0,0385	0,0385
16	CTC9	F_{16}=198	665	0,0285	0,0285
17	RB92579	F_{17}=234	782	0,0335	0,0335
18	CTC9	F_{18}=198	586	0,0251	0,0251

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

As áreas H_j dos talhões integrantes de cada uma das quatro instâncias definidas foram geradas aleatoriamente entre 18 e 48 hectares. Estes limitantes foram

baseados em dados obtidos junto ao Sistema IBGE de Recuperação de Automática de dados (SIDRA, 2019), em que se observou que a área colhida de cana no estado de São Paulo, para o ano de 2017, foi de 4.861.491 hectares (ha) distribuídos por 14.910 unidades produtoras, o que perfaz uma área média 326 ha por unidade produtiva (4.861.491ha / 14.910 unidades produtoras), e considerando que para a aplicação dos testes computacionais do modelo desta pesquisa foram identificadas 18 variedades de cana-de-açúcar, tem-se uma área média ($\overline{H_j}$) de 18,11 ha por variedade (326 ha/18 variedades). Em relação ao limite superior (48 hectares) para sorteio da dimensão de cada talhão nas respectivas instâncias, levou-se em conta que o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) recomenda que cada variedade plantada em uma unidade produtiva deve ocupar, no máximo, 15% da área total plantada (RAIZER; BRAGA JÚNIOR; SELEGATO, 2013), o que permitiria que qualquer uma daquelas 18 variedades pudesse ocupar até 48,91 ha por talhão (326 há x 15% talhão^{-1}).

Com base na capacidade produtiva (TCH e Pol) de cada uma das 18 variedades escolhidas para realização dos testes computacionais, bem como, na área de cada talhão *j* (H_j), foi estimada uma demanda total de sacarose ($\sum_{j=1}^{k} H_j\ TCH_j\ Pol_j$) para toda a safra, de acordo com o dimensionamento (área total) de cada uma daquelas quatro instâncias. E, a partir da quantidade total de dias contidos no período de safra (715 - 456 = 259), foi identificada a demanda de sacarose para cada período mensal de demanda (D_l) com base na quantidade de dias contidos nos respectivos conjuntos mensais de demanda (I_l). Os resultados destes cálculos, para o caso particular da Instância *I-18*, estão mostrados no Quadro 7.

Com relação a atribuição de pesos (u_j e v_j) aos desvios (n_j e p_j) dos momentos ideais para realizar a colheita da cana plantada em cada talhão *j* , utilizou-se nos testes computacionais para todas as instâncias os valores v_j=1 e u_j=1 para todo $j \in \{1, \dots, k\}$. Conforme apresentado no Quadro 7, um teste adicional foi realizado para a instância *I-18* utilizando pesos diferentes para os desvios positivos e negativos (n_j e p_j). Como critério para atribuição dos pesos em questão assumiu-se a participação da produtividade de sacarose estimada para cada talhão ($H_j\ TCH_j\ Pol_j$) em relação a capacidade produtiva total de sacarose ($\sum_{j=1}^{k} H_j\ TCH_j\ Pol_j$) da instância *I-18* ($H_j\ TCH_j\ Pol_j$ / $\sum_{j=1}^{k} H_j\ TCH_j\ Pol_j$, $j \in \{1, \dots, k\}$). Vale lembrar que a atribuição dos pesos, em geral, fica a critério do tomador de decisões e pode variar de acordo com as preferências deste.

Conforme abordado nos fundamentos teóricos deste trabalho, os diversos agentes utilizados para induzir o processo de maturação proporcionam maior flexibilidade ao planejamento da colheita da cana-de-açúcar, contudo, ainda é necessário que se realizem maiores estudos para que se possa compreender melhor o seu processo de ação, bem como, a forma como a sua interação com vários outros fatores pode alterar significativamente os resultados esperados a partir da sua utilização. Por outro lado, na literatura pesquisada, observou-se a existência de um consenso acerca do fato de que os agentes indutores de maturação são capazes de elevar a produtividade de sacarose da cana-de-açúcar. Por isso, na realização dos testes computacionais desta pesquisa, assumiu-se que seriam aplicados agentes indutores de maturação em todos os talhões de todas as instâncias.

Nesse contexto, a fim de identificar as funções matemáticas $P_j(x)$ representativas da ação de agentes maturadores sobre a produtividade de sacarose, em função do tempo de ação desses agentes químicos, foram pesquisados e identificados trabalhos científicos cujos resultados dos experimentos permitiram estimar as funções capazes de traduzir matematicamente a forma de ação de agentes químicos de maturação sobre os níveis de Pol a partir do momento da sua aplicação, conforme o resumo apresentado no Quadro 2 do referencial teórico.

Tabela 3 - Dados para simulação das funções de produtividade de Pol a partir da ação do maturador

Quantidade de dias após a aplicação do maturador (DAA)	Frequência		Níveis de Pol (%)	
	Absoluta[g] (*n*)	Relativa[h] (%)	Mínimo	Máximo
0[a]	25	15,63%	6,25	17,03
15[b]	25	15,63%	11,37	17,20
30[c]	39	24,38%	9,22	18,03
45[d]	29	18,13%	10,11	17,73
60[e]	17	10,63%	13,30	17,11
75[f]	25	15,63%	13,00	17,47

(a) leituras de Pol realizadas de -10 DAA até 0 DAA.

(b) leituras de Pol realizadas de 1 DAA até 15 DAA.

(c) leituras de Pol realizadas de 16 DAA até 30 DAA.

(d) leituras de Pol realizadas de 31 DAA até 45 DAA.

(e) leituras de Pol realizadas de 46 DAA até 60 DAA.

(f) leituras de Pol realizadas de 61 DAA até 75 DAA.

(g) *n* = quantidade de leituras de Pol realizadas em cada momento.

(h) representatividade percentual da quantidade de leituras de Pol realizadas em cada momento (n) sobre o somatório de todas as leituras tabuladas ($\sum n$ = 160 leituras).

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

A partir do estudo detalhado acerca dos resultados das pesquisas descritas no Quadro 2, já apresentado no referencial teórico, foram definidos seis momentos cujas

informações sobre os níveis percentuais de Pol foram avaliados de acordo com 160 leituras identificadas pela quantidade de dias após a aplicação do maturador (DAA), ou seja, 0 DAA, 15 DAA, 30 DAA, 45 DAA, 60 DAA e 75 DAA; e, então, procedeu-se à tabulação dessas leituras de acordo com os níveis percentuais mínimos e máximos de Pol em cada momento (DAA), conforme descrito pela Tabela 3.

Levando-se em conta os níveis percentuais mínimos e máximos de Pol em cada momento (DAA) descritos na Tabela 3, foram gerados números aleatórios entre esses dois valores e simulou-se um percentual de Pol para 0 DAA, 15 DAA, 30 DAA, 45 DAA, 60 DAA e 75 DAA, para cada variedade.

Tabela 4 - Funções de produtividade da cana-de-açúcar $P_j(x)$ e parâmetros relacionados aos respectivos períodos de ação de agentes maturadores (a_j)

Variedade	Simulação dos níveis de Pol (%)						Função de produtividade $P_j(x)$[a]	$R^{2(b)}$	a_j[c]
	0 DAA	15 DAA	30 DAA	45 DAA	60 DAA	75 DAA			
CTC15	6,936	11,911	15,224	15,432	13,837	14,085	$P_j(x)$= -0,0034x^2 +0,3370x + 7,348	0,9313	50
CTC9	9,366	15,745	16,638	16,698	13,842	16,345	$P_j(x)$= -0,0027x^2 +0,2603x +10,637	0,6458	48
RB925211	12,080	14,332	15,119	17,403	14,509	14,259	$P_j(x)$= -0,0022x^2 +0,*1882*x +12,017	0,7848	43
CTC6	7,813	11,604	12,784	10,306	14,070	13,258	$P_j(x)$= -0,0010x^2 +0,1367x +8,5888	0,6350	68
RB855156	7,242	12,014	12,157	17,277	15,645	15,789	$P_j(x)$= -0,0024x^2 +0,2919x +7,3577	0,8963	61
CTC2	7,953	12,783	11,741	16,694	17,008	15,995	$P_j(x)$= -0,0019x^2 +0,2518x +8,1482	0,8672	66
RB867515	9,991	12,920	15,325	16,551	15,327	13,946	$P_j(x)$= -0,0029x^2 +0,2685x +9,8470	0,9853	46
SP80-1842	8,975	16,211	16,032	17,139	14,422	17,029	$P_j(x)$= -0,0026x^2 +0,2668x +10,414	0,6629	51
SP83-2847	11,124	13,037	15,316	16,393	14,346	13,334	$P_j(x)$= -0,0025x^2 +0,2206x +10,878	0,9204	44
SP80-3280	12,455	12,866	16,807	14,352	16,460	14,142	$P_j(x)$= -0,0017x^2 +0,1568x +12,067	0,5724	46
RB928062	10,673	16,264	17,217	16,907	14,765	13,185	$P_j(x)$= -0,0038x^2 +0,3019x +11,411	0,8907	40
RB966928	11,300	12,808	13,041	17,700	15,483	16,122	$P_j(x)$= -0,0011x^2 +0,1543x +10,939	0,7485	70
CTC20	6,270	13,183	12,127	12,634	15,097	13,017	$P_j(x)$= -0,0025x^2 +0,2600x +7,3604	0,7556	52
CTC17	11,077	14,759	15,336	16,330	14,657	14,680	$P_j(x)$= -0,0022x^2 +0,1981x +11,512	0,8730	45
SP81-3250	8,833	13,739	16,512	15,061	14,097	13,484	$P_j(x)$= -0,0034x^2 +0,2968x +9,4551	0,8634	44
CTC4	8,092	16,551	15,688	16,740	15,080	13,509	$P_j(x)$= -0,0042x^2 +0,3627x +9,4072	0,7949	43
RB92579	10,674	16,860	18,025	17,438	15,947	15,281	$P_j(x)$= -0,0036x^2 +0,3047x +11,624	0,8374	42
RB855453	8,079	14,761	16,465	16,221	14,936	13,849	$P_j(x)$= -0,0040x^2 +0,3579x +8,9471	0,9015	45

(a) $P_j(x)$ é a produtividade Pol da variedade, a ser plantada no talhão j, em função de x dias de ação do maturador

(b) R^2 é coeficiente de determinação de cada a função de produtividade $P_j(x)$ estimada com base nas respectivas leituras de Pol em 0 DAA, 15 DAA, 30 DAA, 45 DAA, 60 DAA e 75, DAA.

(c) a_j é o número de dias necessários para que a ação do maturador faça com o que $P_j(x)$ seja máxima ($Xmáx$ em dias = [$P_j'(x)$ = 0] = -1b/ 2a)

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Com base nos números aleatórios gerados para simulação do percentual de POL em cada um dos seis momentos (0 DAA, 15 DAA, 30 DAA, 45 DAA, 60 DAA e 75 DAA), para cada uma das dezoito variedades consideradas nos testes computacionais, procedeu-se à aproximação polinomial com o auxílio da planilha eletrônica de cálculo Excel e foram identificadas as respectivas funções $P_j(x)$, seus

coeficientes de determinação (R^2) e, ainda, a quantidade de dias necessários para que a ação do maturador (a_j) fizesse com que cada função $P_j(x)$ atingisse seu valor máximo, conforme mostra a Tabela 4. Ou seja, as funções $P_j(x)$ descrevem o comportamento dos níveis percentuais de Pol em função da quantidade de dias (x) de atuação dos agentes maturadores, os respectivos R^2 indicam o poder explicativo de cada função $P_j(x)$ e a_j indica a quantidade de dias necessários para que a ação do maturador faça com o que os níveis percentuais de sacarose presente no caldo da cana de cada variedade atinjam seu ponto de máxima produtividade.

Finalmente, em relação aos limitantes inferior (m_{jPUI-}) e superior (m_{jPUI+}) do PUI das variedades de cana-de-açúcar, foi estabelecido um período equivalente a sessenta dias antes e sessenta dias depois do momento ideal para iniciar a colheita da cana plantada em cada talhão j (M_j+a_j). Tal definição levou em conta o fato de que, em média, o intervalo de tempo necessário para que a ação do maturador (a_j) faça com o que a produtividade de Pol atinja seu ponto máximo é de 50,22 dias ($\bar{a}_j$), e também porque na prática, nas usinas do estado de São Paulo, usa-se fazer a colheita da cana preferencialmente no intervalo de 2 meses antes e dois meses depois do momento de máxima maturação da cana (RAMOS, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático para otimização do planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar foi implementado computacionalmente levando em conta variedades cultiváveis em áreas de plantio da região centro-sul do Brasil, e foram simuladas as quatro instâncias, *I-18*, *I-50*, *I-100* e *I-500*, com 18, 50, 100 e 500 talhões respectivamente, com as composições gerais descritas nas Tabelas 5 e 6 e os dados apresentados na seção anterior.

Tabela 5 – Área plantada por variedade em cada instância

Variedades	*I-18* *Área plantada* (ha)	*I-50* *Área plantada* (ha)	*I-100* *Área plantada* (ha)	*I-500* *Área plantada* (ha)
CTC15	22	126	250	855
CTC9	79	42	248	931
RB925211	0	127	186	684
CTC6	0	38	236	912
RB855156	39	120	241	790
CTC2	21	282	179	1.148
RB867515	74	161	83	805
SP80-1842	0	0	195	783
SP83-2847	28	64	177	943
SP80-3280	36	31	240	918
RB928062	34	32	138	1.083
RB966928	0	90	82	756
CTC20	79	119	211	998
CTC17	22	127	182	775
SP81-3250	0	103	129	1.018
CTC4	127	92	177	666
RB92579	35	26	169	682
RB855453	24	57	75	1.038
Total	620	1.637	3.198	15.785

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

A Tabela 5 apresenta a área plantada com cada variedade em todas as instâncias.

A Tabela 6 apresenta o número de talhões plantados com cada variedade em todas as instâncias.

Conforme pode ser observado nas Tabelas 5 e 6, as variedades RB925211, CTC6, SP80-1842, RB966928 e SP81-3250 não integraram a instância *I-18*, e somente a variedade SP80-1842 não integrou a instância I-50. Sendo que, as instâncias I-100 e I-500 contaram com todas as 18 variedades selecionadas para realização dos testes computacionais.

O modelo de otimização foi aplicado utilizando estas quatro instâncias e os resultados estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 6 – Quantidade de talhões por variedade em cada instância

Variedades	*I-18* Número de talhões (unidades)	*I-50* Número de talhões (unidades)	*I-100* Número de talhões (unidades)	*I-500* Número de talhões (unidades)
CTC15	1	4	8	30
CTC9	2	1	7	29
RB925211	0	4	6	24
CTC6	0	1	7	29
RB855156	1	4	8	25
CTC2	1	8	5	37
RB867515	2	4	3	24
SP80-1842	0	0	6	26
SP83-2847	1	2	6	30
SP80-3280	1	1	8	30
RB928062	1	1	4	33
RB966928	0	3	3	22
CTC20	2	4	6	32
CTC17	1	4	6	21
SP81-3250	0	3	4	29
CTC4	3	3	5	22
RB92579	1	1	6	22
RB855453	1	2	2	35
Total	18	50	100	500

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Conforme pode ser observado na Tabela 7, com o planejamento otimizado, na instância *I-18*, foram produzidas 13.143 toneladas (t) de sacarose para uma demanda de 11.582 toneladas (t).

Tabela 7 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-18*

I	Período de demanda		Sacarose demandada (t)	Sacarose produzida (t)	Produção x demanda (%)	Quantidade de talhões (unidade)
	Início	Fim				
1	01/04	30/04	1.342	1.563	116%	3
2	01/05	31/05	1.387	1.456	105%	2
3	01/06	30/06	1.342	1.582	118%	2
4	01/07	31/07	1.387	2.064	149%	2
5	01/08	31/08	1.387	1.443	104%	2
6	01/09	30/09	1.342	1.344	100%	2
7	01/10	31/10	1.387	1.588	114%	2
8	01/11	30/11	1.342	1.435	107%	2
9	01/12	15/12	666	669	100%	1
Total			11.582	13.143		18

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Pode ser visto na Tabela 8 que, exceto no talhão quatorze (j =14), os desvios ótimos p_j e n_j foram zero para todo $j \neq 14$. Em relação ao talhão quatorze, o modelo determinou o momento para aplicação do maturador no dia 03/06 (M_{14} = 519). Como

o período de ação do agente químico de maturação (a_{14}) é de 43 dias, o pico de maturação da cana plantada neste talhão seria no dia 16/07, ou seja, no dia 562. Contudo, de forma a permitir suprir a demanda por sacarose do mês de agosto (D_5), o modelo matemático determinou que a colheita do talhão quatorze ($j = 14$) fosse realizada no dia 01/08, ou seja, em t_{14} = 578.

Também pode ser observado na Tabela 8 que o modelo proposto permitiu realizar o planejamento ótimo de toda a safra mediante a identificação do momento de aplicação do maturador M_j e a determinação dos momentos ótimos t_j para a realização da colheita de cada variedade de cana-de-açúcar plantada em cada um dos talhões da instância *I-18*.

Tabela 8 – Planejamento ótimo da safra na instância *I-18*

I	Período de demanda		Dia de aplicação do maturador (M_j)	Dia da colheita (t_j)	Desvio (dias)	Talhão (j)	Variedades colhidas	Sacarose produzida (t)
	Início	Fim						
1	01/04	30/04	15/02	01/04	0	3	CTC17	395
			15/02	01/04	0	11	RB855453	543
			12/02	01/04	0	18	CTC9	626
2	01/05	31/05	31/03	31/05	0	9	RB855156	746
			13/04	31/05	0	16	CTC9	710
3	01/06	30/06	19/04	01/06	0	6	CTC4	790
			09/05	30/06	0	12	CTC20	792
4	01/07	31/07	23/05	14/07	0	10	CTC20	1.048
			03/06	16/07	0	7	CTC4	1.015
5	01/08	31/08	27/05	01/08	0	4	CTC2	447
			03/06	01/08	16	14	CTC4	996
6	01/09	30/09	17/07	01/09	0	2	RB867515	786
			30/07	12/09	0	1	SP83-2847	559
7	01/10	31/10	21/08	02/10	0	17	RB92579	901
			25/08	10/10	0	8	SP80-3280	687
8	01/11	30/11	12/09	01/11	0	13	CTC15	459
			15/10	30/11	0	15	RB867515	976
9	01/12	15/12	05/11	15/12	0	5	RB928062	669
Total								13.143

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

É preciso ressaltar que a instância *I-18* contou com apenas 18 talhões plantados com variedades de cana-de-açúcar para atender a demanda mensal de sacarose de toda a safra, não havendo muita flexibilidade em relação aos períodos de maturação. Mas, ainda assim, o modelo conseguiu obter um planejamento ótimo de aplicação de maturador e da colheita, atendendo toda a demanda de sacarose da usina.

Na instância *I-50*, o modelo matemático identificou todos os momentos ideais para a aplicação do maturador (M_j) e identificou o momento ótimo para realização da

colheita de toda cana plantada nos 50 talhões dessa instância. Dessa forma, tanto a demanda total por sacarose, quanto as demandas mensais foram atendidas com sobra, conforme mostram as informações resumidas na Tabela 9.

Tabela 9 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-50*

I	Período de demanda		Sacarose demandada (t)	Sacarose produzida (t)	Produção x demanda (%)	Quantidade de talhões (unidades)
	Início	Fim				
1	01/04	30/04	3.488	3.824	110%	6
2	01/05	31/05	3.605	5.187	144%	9
3	01/06	30/06	3.488	4.445	127%	6
4	01/07	31/07	3.605	3.768	105%	6
5	01/08	31/08	3.605	3.625	101%	6
6	01/09	30/09	3.488	3.524	101%	5
7	01/10	31/10	3.605	3.671	102%	5
8	01/11	30/11	3.488	3.818	109%	5
9	01/12	15/12	1.732	1.810	104%	2
Total			30.104	33.672		50

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

O modelo proposto identificou os momentos ótimos para realização da colheita da cana-de-açúcar plantada nos talhões da instância *I-50* com desvios zero do valor ideal, mas a quantidade de informações geradas para esta instância torna inviável a apresentação destes resultados sob a forma de tabela. Assim, na Tabela 10, é possível mostrar apenas a totalização mensal da produção de sacarose por variedade.

Tabela 10 – Produção mensal de sacarose por variedade de cana-de-açúcar plantada na instância *I-50*

Mês / Varied.	Abr. (t)	Maio (t)	Jun. (t)	Jul. (t)	Ago. (t)	Set. (t)	Out. (t)	Nov. (t)	Dez. (t)	Total (t)
CTC15	-	-	-	-	730	-	417	646	834	2.627
CTC17	771	323	-	735	448	-	-	-	-	2.278
CTC2	-	-	873	788	1.299	2.278	766	-	-	6.004
CTC20	-	1.817	955	-	-	-	-	-	-	2.773
CTC4	-	-	1.625	451	-	-	-	-	-	2.076
CTC6	-	-	-	-	-	-	-	685	-	685
CTC9	710	-	-	-	-	-	-	-	-	710
RB855156	1.759	535	-	-	-	-	-	-	-	2.295
RB855453	-	678	610	-	-	-	-	-	-	1.289
RB867515	-	-	-	-	-	-	1.000	1.857	976	3.832
RB925211	-	988	-	831	-	-	-	-	-	1.819
RB92579	-	-	-	-	669	-	-	-	-	669
RB928062	-	-	-	-	-	-	-	629	-	629
RB966928	584	845	382	-	-	-	-	-	-	1.811
SP80-3280	-	-	-	-	-	-	592	-	-	592
SP81-3250	-	-	-	963	-	448	896	-	-	2.307
SP83-2847	-	-	-	-	479	798	-	-	-	1.277
Total	3.824	5.187	4.445	3.768	3.625	3.524	3.671	3.818	1.810	33.672

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

O modelo matemático identificou todos os momentos ideais para a aplicação do maturador e identificou o momento ótimo para realização da colheita com desvios zero do valor ideal, nas demais instâncias *I-100* e *I-500*, conforme Tabelas 11, 12, 13 e 14.

Tabela 11 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-100*

I	Período de demanda		Sacarose demandada (t)	Sacarose produzida (t)	Produção x demanda (%)	Quantidade de talhões (unidades)
	Início	Início				
1	01/04	30/04	6.738	6.966	103%	11
2	01/05	31/05	6.964	9.246	133%	16
3	01/06	30/06	6.738	7.255	108%	10
4	01/07	31/07	6.964	8.057	116%	14
5	01/08	31/08	6.964	7.297	105%	11
6	01/09	30/09	6.738	7.517	112%	12
7	01/10	31/10	6.964	7.294	105%	10
8	01/11	30/11	6.738	7.015	104%	11
9	01/12	15/12	3.346	3.456	103%	5
Total			58.154	64.101		100

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Tabela 12 – Produção mensal de sacarose por variedade de cana-de-açúcar plantada na instância *I-100*

Mês / Varied.	Abr. (t)	Maio (t)	Jun. (t)	Jul. (t)	Ago. (t)	Set. (t)	Out. (t)	Nov. (t)	Dez. (t)	Total (t)
CTC15	-	-	-	-	-	-	709	3.690	813	5.212
CTC17	753	2.081	430	-	-	-	-	-	-	3.264
CTC2	-	-	-	-	915	1.256	1.639	-	-	3.811
CTC20	-	1.934	1.887	1.095	-	-	-	-	-	4.916
CTC4	-	-	2.843	1.151	-	-	-	-	-	3.994
CTC6	-	-	-	-	541	559	631	1.190	1.335	4.256
CTC9	2.452	643	355	744	-	-	-	-	-	4.194
RB855156	2.811	1.798	-	-	-	-	-	-	-	4.609
RB855453	949	-	-	746	-	-	-	-	-	1.695
RB867515	-	-	-	-	500	-	-	738	738	1.976
RB925211	-	1.705	415	544	-	-	-	-	-	2.664
RB92579	-	-	-	540	-	2.162	1.647	-	-	4.349
RB928062	-	-	-	-	-	747	-	1.397	570	2.714
RB966928	-	1.087	-	564	-	-	-	-	-	1.650
SP80-1842	-	-	1.324	662	1.810	-	-	-	-	3.796
SP80-3280	-	-	-	344	1.641	1.317	1.279	-	-	4.581
SP81-3250	-	-	-	650	851	-	1.389	-	-	2.890
SP83-2847	-	-	-	1.017	1.037	1.476	-	-	-	3.531
Total	6.966	9.246	7.255	8.057	7.297	7.517	7.294	7.015	3.456	64.101

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Tabela 13 – Produção de sacarose demandada e a estimada a partir do planejamento ótimo resultante da aplicação do modelo proposto na instância *I-500*

I	Período de demanda		Sacarose demandada (t)	Sacarose produzida (t)	Produção x demanda (%)	Quantidade de talhões (unidades)
	Início	Fim				
1	01/04	30/04	33.620	62.591	186%	100
2	01/05	31/05	34.748	35.738	103%	60
3	01/06	30/06	33.620	33.883	101%	51
4	01/07	31/07	34.748	34.930	101%	58

5	01/08	31/08	34.748	35.398	102%	54
6	01/09	30/09	33.620	33.638	100%	51
7	01/10	31/10	34.748	35.948	103%	50
8	01/11	30/11	33.620	33.782	100%	52
9	01/12	15/12	16.697	16.705	100%	24
Total			290.169	322.613		500

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Tabela 14 – Produção mensal de sacarose por variedade de cana-de-açúcar plantada na instância *I-500*

Mês / Varied.	Abr. (t)	Maio (t)	Jun. (t)	Jul. (t)	Ago. (t)	Set. (t)	Out. (t)	Nov. (t)	Dez. (t)	Total (t)
CTC15	-	-	-	1.543	-	521	625	9.715	5.420	17.824
CTC17	10.170	735	-	771	2.224	-	-	-	-	13.900
CTC2	-	-	3.066	4.918	1.916	4.109	10.432	-	-	24.440
CTC20	-	17.148	2.656	3.448	-	-	-	-	-	23.252
CTC4	-	-	13.922	1.106	-	-	-	-	-	15.028
CTC6	-	-	-	-	1.785	-	3.300	9.035	2.326	16.447
CTC9	12.463	372	1.099	1.809	-	-	-	-	-	15.744
RB855156	12.602	2.505	-	-	-	-	-	-	-	15.107
RB855453	16.005	4.770	701	1.989	-	-	-	-	-	23.465
RB867515	-	-	-	714	-	547	1.285	9.426	7.189	19.162
RB925211	-	7.792	1.447	559	-	-	-	-	-	9.797
RB92579	-	-	-	3.345	4.117	4.478	5.610	-	-	17.550
RB928062	-	-	-	-	-	13.926	-	5.606	1.770	21.303
RB966928	11.352	2.415	-	1.449	-	-	-	-	-	15.216
SP80-1842	-	-	5.840	2.122	7.281	-	-	-	-	15.243
SP80-3280	-	-	-	5.077	6.623	668	5.153	-	-	17.521
SP81-3250	-	-	5.152	874	3.472	3.763	9.543	-	-	22.803
SP83-2847	-	-	-	5.206	7.979	5.625	-	-	-	18.811
Total	62.591	35.738	33.883	34.930	35.398	33.638	35.948	33.782	16.705	322.613

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Em todas as instâncias, o modelo matemático conseguiu obter um planejamento da aplicação de agentes maturadores e da colheita da cana-de-açúcar que permite produzir a máxima quantidade de sacarose possível e atender toda a demanda de Pol da usina. Isto é devido a imposição do modelo de que a cana deve ser colhida em seu período de máxima maturação.

Em relação às taxas percentuais de sacarose aparente (Pol_j) das variedades de cana-de-açúcar consideradas, pôde-se observar que, em todas as instâncias, as taxas médias estimadas pelo modelo de otimização superaram as taxas médias estimadas na literatura (sem processo de otimização), conforme mostram as informações resumidas na Tabela 15.

Contudo, em relação à instância *I-18* deve-se observar que a taxa média percentual de sacarose aparente (Pol) da variedade CTC4 foi ligeiramente menor que nas demais instâncias. Isso aconteceu devido ao fato desta variedade, naquela instância, ter sido colhida com um atraso de dezesseis dias para que se viabilizasse o cumprimento da demanda de sacarose do mês de agosto.

Tabela 15 – Comparação entre as taxas médias percentuais de sacarose aparente (Pol_j) estimada pelo modelo para as variedades de cana-de-açúcar plantadas em todas as instâncias e taxas médias estimadas na literatura

Variedade	Estimativa da Literatura (Pol% Cana)	Instância *I-18* (Pol% Cana)	Instância *I-50* (Pol% Cana)	Instância *I-100* (Pol% Cana)	Instância *I-500* (Pol% Cana)
CTC15	14,50	15,70	15,70	15,70	15,70
CTC17	14,98	15,97	15,97	15,97	15,97
CTC2	14,31	16,49	16,49	16,49	16,49
CTC20	13,50	14,12	14,12	14,12	14,12
CTC4	13,54	16,89	17,24	17,24	17,24
CTC6	14,98	-	13,26	13,26	13,26
CTC9	15,84	16,91	16,91	16,91	16,91
RB855156	14,50	16,23	16,23	16,23	16,23
RB855453	13,90	16,95	16,95	16,95	16,95
RB867515	14,82	16,06	16,06	16,06	16,06
RB925211	14,67	-	16,04	16,04	16,04
RB92579	15,70	18,07	18,07	18,07	18,07
RB928062	15,75	17,41	17,41	17,41	17,41
RB966928	13,32	-	16,35	16,35	16,35
SP80-3280	14,80	15,68	15,68	15,68	15,68
SP81-3250	15,02	-	15,93	15,93	15,93
SP83-2847	13,20	15,74	15,74	15,74	15,74
SP80-1842	14,90	-	-	17,26	17,26

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Na sequência, a fim de avaliar possíveis impactos dos pesos (u_j e v_j) sobre o funcionamento do modelo, implementou-se a instância *I-18* utilizando os dados referentes aos seus talhões e variedades plantadas, bem como, a respectiva demanda mensal de sacarose (Tabelas 5 e 6), e considerando diferentes pesos cujas grandezas foram descritas anteriormente no Quadro 7.

Considerando a atribuição de diferentes pesos a todos os talhões da instância *I-18*, o planejamento proposto pelo modelo permitiu a produção de 12.666 toneladas de sacarose para uma demanda de 11.582 toneladas, conforme pode ser visto na Tabela 16. Apesar deste resultado superar a demanda mensal em 9%, a quantidade produzida de sacarose foi 477 toneladas menor (ou ainda, 4% menor) que a produção de sacarose da instância *I-18* com atribuição de pesos iguais, conforme mostra a Tabela 7.

A Tabela 17 mostra que, além da quantidade de sacarose produzida, neste planejamento resultante do modelo utilizando pesos diferentes para as variáveis de desvio, a quantidade de talhões colhidos em cada período de demanda mensal (D_l) também foi diferente quando comparada com o planejamento resultante do modelo na instância *I-18* atribuição com pesos iguais (Tabela 7), havendo uma quantidade maior de desvios em relação aos respectivos momentos ideais de colheita.

Tabela 16 – Resultados da aplicação do modelo proposto na instância *I-18* com atribuição de diferentes pesos (u_j e v_j)

I	Período de demanda		Sacarose demandada (t)	Sacarose produzida (t)	Produção x demanda (%)	Quantidade de talhões (unidades)
	Início	Fim				
1	01/04	30/04	1.342	1.456	108%	2
2	01/05	31/05	1.387	1.418	102%	2
3	01/06	30/06	1.342	1.350	101%	2
4	01/07	31/07	1.387	2.016	145%	2
5	01/08	31/08	1.387	1.612	116%	3
6	01/09	30/09	1.342	1.346	100%	2
7	01/10	31/10	1.387	1.396	101%	2
8	01/11	30/11	1.342	1.403	105%	2
9	01/12	15/12	666	669	100%	1
Total			11.582	12.666		18

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

Tabela 17 – Planejamento da safra na instância *I-18* com atribuição de diferentes valores para os pesos (u_j e v_j)

I	Período de demanda		Dia de aplicação do maturador (M_j)	Dia da colheita (t_j)	Desvio (dias)	Talhão (j)	Variedades colhidas	Sacarose produzida (t)
	Início	Fim						
1	01/04	30/04	04/03	21/04	0	16	CTC9	710
			28/02	30/04	0	9	RB855156	746
2	01/05	31/05	27/03	14/05	0	18	CTC9	626
			09/04	31/05	0	12	CTC20	792
3	01/06	30/06	16/05	01/06	-36	10	CTC20	808
			16/05	30/06	0	11	RB855453	543
4	01/07	31/07	03/06	01/07	-15	14	CTC4	1.001
			02/06	15/07	0	7	CTC4	1.015
5	01/08	31/08	26/07	01/08	-39	3	CTC17	312
			03/06	01/08	16	6	CTC4	742
			18/07	31/08	0	1	SP83-2847	559
6	01/09	30/09	25/07	29/09	0	4	CTC2	447
			22/08	30/09	-3	17	RB92579	899
7	01/10	31/10	25/08	10/10	0	8	SP80-3280	687
			08/10	31/10	-23	2	RB867515	709
8	01/11	30/11	11/10	30/11	0	13	CTC15	459
			28/10	30/11	-13	15	RB867515	945
9	01/12	15/12	05/11	15/12	0	5	RB928062	669
Total								12.666

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados pesquisa.

A Tabela 17 descreve os momentos ótimos para a realização da colheita de cada variedade de cana-de-açúcar plantada nos talhões da instância *I-18* quando utilizados diferentes valores para os pesos. Neste planejamento, se o desvio determinado apresenta valor positivo, a colheita deverá ocorrer após o ponto de máxima maturação e negativo em caso contrário.

Dessa forma, a aplicação do modelo na instância *I-18* com atribuição de diferentes valores para os pesos gerou seis antecipações de colheita (CTC20 no *j=10*, CTC4 no *j=14*, CTC17 no *j=3*, RB92579 no *j=17*, RB867515 no *j=2*, RB867515 no

j=15) e um adiamento de colheita (CTC4 no *j=6*), e uma diferença de 477 toneladas a menos (4% menor) em relação à produção de sacarose da instância *I-18* com atribuição de pesos iguais, conforme mostra a Tabela 7. Observando estes resultados, pode-se concluir que o uso de pesos iguais para as variáveis de desvio, nas condições mostradas, permitiu que o modelo fornecesse um planejamento melhor para aplicação de maturador e colheita da cana, objetivando maximizar a quantidade de Pol.

Finalmente, em relação ao custo computacional, no caso da instância com 500 talhões (*I-500*) o tempo de processamento do modelo pelo IBM CPLEX foi de 1,57 minutos ou 94,09 segundos. No caso da instância com 18 talhões (*I-18*) o tempo de processamento foi de 0,02 minutos ou 1,17 segundos para o caso de atribuição de pesos iguais. Com atribuição de pesos diferentes, este tempo foi de 0,04 minutos ou 2,46 segundos. Para o processamento das instâncias com 50 talhões (*I-50*) e 100 talhões (*I-100*), o tempo consumido foi de 0,05 minutos ou 3,45 segundos, e 0,06 minutos ou 3,94 segundos, respectivamente. Ou seja, em todos os cenários (instâncias) avaliados, o tempo de processamento do modelo pelo CPLEX pode ser considerado pequeno (menos de 2 minutos).

Assim, ao produzir informações relevantes e úteis ao processo decisório do setor sucroenergético, o modelo matemático de otimização proposto foi validado e mostrou-se capaz de auxiliar as práticas agrícolas inerentes ao uso de agentes indutores de maturação e ao manejo do processo de colheita, proporcionando relevantes benefícios, operacionais e econômicos, tanto ao longo do ciclo produtivo da cultura da cana-de-açúcar, quanto em relação à qualidade da matéria-prima utilizada na indústria da cana.

5 CONCLUSÕES

O modelo proposto mostrou-se capaz de determinar planejamentos otimizados para a aplicação do maturador e colheita da cana-de-açúcar, de forma a maximizar a produtividade de sacarose, colhendo a cana no período de máxima maturação em todos os talhões e atendendo toda a demanda da usina. Os experimentos computacionais comprovaram a eficácia do modelo e mostraram que este apresenta grande potencial como ferramenta de suporte à tomada de decisões aplicadas ao planejamento do uso de agentes indutores de maturação e ao manejo da colheita da cana-de-açúcar, com vistas à maximização da qualidade e produtividade da matéria-prima básica do segmento sucroenergético.

REFERÊNCIAS

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H.. **Pesquisa operacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

BARBOSA, B. H.; SANTOS, C. S. dos; OLIVEIRA, S. de. Análise da eficiência energética do bagaço da cana na geração de vapor em uma usina sucroalcooleira. **RMS – Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo-SP, v. 8, n. 3, p.106-121, set.-dez. 2018. Disponível em: <http://www.revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/1460/pdf>. Acesso em: 22 out. 2018.

BASTOS, A.; TEODORO, J.; TEIXEIRA, M.; SILVA, E. da; COSTA, D.; BERNARDINO, M.. Efeitos da adubação nitrogenada e potássica no crescimento da cultura da cana-de-açúcar segunda soca. **Rev. de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 40, n.3, p. 554-566, set. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19084/RCA17052>. Acesso em: 20 ago. 2018.

CAIXETA-FILHO, J. V. ; MIYASHITA, A. E.. Continuous periods for harvesting schedules: a numerical application for the brazilian sugarcane industry. **Pesqui. Oper.**, Rio de Janeiro-RJ, v.38, n.3, p. 535-554, sept./dec. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0101-7438.2018.038.03.0535>. Acesso em: 13 fev. 2019.

CAPUTO, M. M.; SILVA, M. A. de; BEAUCLAIR, E. G. F. de; GAVA, G. J. C. de. Acúmulo de sacarose, produtividade e florescimento de cana-de-açúcar sob reguladores vegetais. **Interciência**, [S. l.], v. 32, n. 12, p. 834-840, Dez. 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/70199/WOS000251975400006.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 abr. 2019.

COLAPINTO, C.; JAYARAMAN, R.; MARSIGLIO, S.. Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of-the art review. **Ann. Oper. Res**. (Springer Science & Business Media, LLC), [S. l.], v. 251, p. 7-40, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10479-015-1829-1.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2019.

CRUSCIOL, C. A. C.; LEITE, G. H. P.; SIQUEIRA, G. F. de; SILVA, M. de A.. Response of application of growth inhibitors on sugarcane productivity and sucrose accumulation in the middle of cropping season in Brazil. **Sugar Tech**, Cham (Switzerland), v 19, n. 2, p. 155–164, April, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0450-1>. Acesso em: 27 ago. 2018.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. dos S.; FIGUEIREDO, V. S. de. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 45, p. 137-187, mar. 2017. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11814>. Acesso em: 20 ago. 2018.

DEJENIE, T. W.. Role of crop modeling in scenario development analysis and developing strategic recommendation: a review. **International Journal of Scientific Research and Managemen**t (IJSRM), [S. l.], v. 7, n. 1, p. 204-212, 2019. Disponível em: <https://www.ijsrm.info/index.php/ijsrm/article/view/1924/1701>. Acesso em: 11 fev. 2019.

DIDIER, K. K.; CRÉPIN, P. B.; CARINE, N. A.; MÉLANIE, B. B.; YAH, O.; MICHEL, Z.. Effect of glyphosate used as a sugarcane chemical ripener in Côte d'Ivoire. **African Journal Plant Scien**ce, Victoria Island, Lagos (Nigeria), v.11, n 8. p. 341-350, August 2017. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJPS/article-full-text/B37BE1665315>. Acesso em: 23 out. 2018.

DORIGUEL, F.; CRUSCIOL, C. A. C.; FLORENTINO, H. de O.. Mathematical optimization models in the sugarcane harvesting proces**s**. *In*: **Sugarcane**: technology and research. [S. l]: IntechOpen, 2017. p. 207-222 . Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.71530>. Acesso em: 12 fev. 2019.

FLORENTINO, H. de O.; IRAWAN, C.; ALIANO, A. F.; JONES, D. F.; CANTANE, D. R.; NERVIS, J. J.. A multiple objective methodology for sugarcane harvest management with varying maturation periods. **Operations Research & Decision Theory** (Springer Science & Business Media, LLC), [S. l.], n. 267 p. 153–177, aug. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2568-2>. Acesso em: 12 fev. 2019.

FONSECA, M. A. P. da; MARTINS, M. de F.. Produção mais limpa no setor de cachaça: estudo em um engenho no estado da Paraíba. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), 17., 2015, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: . Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade – FEA/USP, 2015. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/17/anais/resumo.php?cod_trabalho=381>. Acesso em: 22 out. 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2006**: Brasil, grandes regiões e unidades da federação - segunda apuração. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv61914.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2019.

INOUE, M. H.; CAPPELLESSO, E. J. de S.; MENDES, K. F.; BEN, R.; CONCIANI, P. A.. Eficiência do bispyribac-sodium como maturador na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 80-88, jan.-mar., 2015. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/2276/1066>. Acesso em: 09 out. 2018.

JONES, D.; TAMIZ, M.. **Practical goal programming**. New York: Springer Science & Business Media, 2010.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.; VENTURINI FILHO, W. G.. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em função da aplicação de maturadores em

meio de safra. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.2, p.527-534, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v68n2/28.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2019.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. de A.. Desenvolvimento e produtividade da cana-de- açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 129-138, jan./mar. 2011. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/4334/7123>. Acesso em: 20 ago. 2018.

LEONEZI, R. S.; GARCIA, V.; FRESCHI, J. P. B.; LISBOA, L. A. M.; FIGUEIREDO, P. A. M. de. Aplicação de ethephon visando à inibição do florescimento e isoporização e sua influência nos parâmetros produtivos da cana-de-açúcar. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS, 1., 2016, Dracena. **Anais eletrônicos...** Dracena: UNESP, 2016. Disponível em: <http://www.dracena.unesp.br/Home/Eventos/imast/003.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2018.

LOPES, C. H. (Org.). **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. São Carlos : EdUFSCar, 2011. Disponível em: < http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/handle/123456789/2769 >. Acesso em: 14 ago. 2018.

LORIZOLA, G. M.; CAPITANI, D. H. D.. Análise do modelo estrutura-conduta-desempenho do setor sucroenergértico brasileiro. **Nucleus**, Ituverava, v.15, n.2, p.383-399, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.2920>. Acesso em: 01 set. 2019.

MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. P.; ZULLO JUNIOR, J.. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, José Eduardo B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. - Brasília, DF: INMET, 2009. p. 109-130. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2018.

MUHWIRIDZWA, M.; MANENJI, B. T.; MADANZI, T.; MAHOHOMA, W.. Evaluating the effects of chemical ripening with fluazifop-p-butyl on sugarcane (saccharum officinarum) yield and sugar content. **International Journal of Plant & Soil Science**, West Bengal (India), v. 9, n. 6, p. 1-8, 2016. Disponível em: <http://www.journalrepository.org/media/journals/IJPSS_24/2016/Jan/Manenji962015IJPSS20596.pdf >. Acesso em: 23 out. 2018.

NERVIS, J. J.; FLORENTINO, H. de O.; CANTANE, D. R.; RAMOS, R. P.; ISLER, P. R.. Simulação para a otimização da colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Biometria**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 415-439, jun. 2017. Disponível em: <http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/47>. Acesso em: 24 out. 2018.

OLIVEIRA FILHO, P. B. de; DUARTE JÚNIOR, J. B.; COSTA, A. C. T. da; OLIVEIRA, P. S. R. de; MACEDO JÚNIOR, E. K.; GUIMARÃES, V. F.;

BOSQUETTE, W.. Chemical ripeners and different harvest periods in sugarcane in State of Paraná, southern Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, [S. l.], n. 11, n. 39, p. 3904-3913, sept., 2016. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/DFD026F60880>. Acesso em: 23 out. 2018.

ORGERON, A. J; GRAVOIS, K. A.; LEGENDRE, B. L.; GRIFFIN, J. L.. On-farm evaluation of trinexapac-ethyl for early season sucrose enhancement. **Journal of American Society of Sugar Cane Technologists**, Baton Rouge, LA (EUA), v. 36, p. 1-8, 2016. Disponível em: <http://www.assct.org/journal/JASSCT%20PDF%20Files/Volume%2036/On-Farm%20Evaluation%20of%20Trinexapac-ethyl%20for%20Early%20Season%20Sucrose%20Enhancem....pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.

PATCHARAMETHANON, R.; SUDTACHAT, K.. District model with two types of vehicles for transporting sugarcane. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND APPLICATIONS, 5., 2018, Singapore. **CONFERENCES...** Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers Singapore, 2018, p. 468-474. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8387146>. Acesso em: 14 fev. 2019.

PRADO, E. A. F. do; VITORINO, A. C. T.; MAUAD, M.; ENSINAS, S. C.; PAIM, L. R.. Características tecnológicas da cana-de-açúcar sob aplicação de doses de vinhaça em latossolo fermelho distroférrico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.16, n.4, p. 386-395 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5965/223811711642017386 >. Acesso em: 22 out. 2018.

RAIZER, A. J.; BRAGA JÚNIOR, R. L. do C.; SELEGATO, S. M.. Índices de eficiência no uso de variedades de cana-de-açúcar. **RPA News - cana & indústria**, Ribeirão Preto, ano 12, n. 151/152, p. 25-29, jul./ago. 2013. Disponível em: <http://revistarpanews.com.br/edicoes/151/IDEANews151e152FinalGraficaWeb.pdf> . Acesso em: 26 abr. 2019.

RAMOS, R. P.; ISLER, P. R.; FLORENTINO, H. de O.; JONES, D.; NERVIS, J. J.. An optimization model for the combined planning and harvesting of sugarcane with maturity considerations. **African Journal of Agricultural Research** (Afr. J. Agric. Res.), [S. l.], v. 11, n. 40, p. 3950-3958, 6 Oct., 2016. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/84FBC7A60937>. Acesso em: 13 abr. 2019.

ROBERTO, G. G. ; CUNHA, C.; SALES, C. R. G.; . SILVEIRA, N. M.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A.. Variação da fotossíntese e dos teores de carboidratos induzidos por etefom e déficit hídrico na fase de maturação da cana-de-açúcar. **Bragantia,** Campinas, v.74, n. 4, p.379-386, out./dez. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0062>. Acesso em: 18 set. 2018.

RODRIGUES, J. D.; JADOSKI, C. J.; FAGAN, E. B.; ONO, E. O.; SOARES, L. H.; DOURADO NETO, D.. **Fisiologia da produção de cana-de-açúcar**. São Paulo: Andrei, 2018.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E.. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, Silvelena Vanzolini; PINTO, Alexandre de Sene; JENDIROBA, Eloisa; NÓBREGA, José Carlos Martins de (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. p. 19-36.

SIDRA, Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo agropecuário**: tabela 6615 - número de estabelecimentos agropecuários, quantidade produzida e area colhida, por produtos da lavoura temporária, resultados preliminares 2017. [S. l.]: 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv61914.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2019.>. Acesso em: 26 abr. 2019.

SILVA, A. F. da; MARINS, F. A. S.. Revisão da literatura sobre modelos de programação por metas determinística e sob incerteza. **Production**, São Paulo-SP, v. 25, n. 1, p. 92-112, jan./mar. 2015. Disponível em: <ttp://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132014005000003>. Acesso em: 29 mar. 2019.

SILVA, D. M. da; SILVA, J. A. da ; MORAES, M. da S,; NASCIMENTO, A. L. S.; SANTOS, L. B. dos. Monitoramento dos parâmetros de processamento da cana-de-açúcar crua: um estudo de caso em uma usina do sudoeste goiano. **GTS - Gestão, Tecnologia e Sustentabilidad**e, Rio Verde, v. 1, n. 1, jun. 2018. Disponível em: <http://www.faengrv.com.br/gts/index.php/revistagts/article/view/11>. Acesso em: 22 out. 2018.

SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; REIS, V. M.; PEREIRA, W.; LIMA, J. A.. Aplicação de bactérias diazotróficas via sistema de irrigação para fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 33, n. 1, p. 41-51, jan.-mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2018v33n1p45-51>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SUÁREZ, H. J.; SERRA, A. M.; SÁENZ, R. M.; MORA, I. D.. Evaluación de maduradores en caña de azúcar de la compañía CALESA, República de Panamá. **Revista Centro Agrícola**,
Villa Clara (Cuba), v. 45, n.1, p. 05-13. janeiro-março, 2018. Disponível em <http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/html/v45n2/body/cag10218.html>. Acesso em: 23 out. 2018.

SUNGNUL, S.; PORNPRAKUN, W.; PRASATTONG S.; BAITIANG, C.. A mathematical model for the sugarcane trading system in Thailand. **Engineering Letters**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 84-91, February 2018. Disponível em: <http://www.engineeringletters.com/issues_v26/issue_1/EL_26_1_10.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.

TAMIZ, M.; JONES, D. F. ; EL-DARZI, E. A review of Goal Programming and its applications **Ann. Oper. Res**. (Springer Science & Business Media, LLC), [S. l.], v. 58, p. 39-53, jan. 1995. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02032309>. Acesso em: 29 mar. 2019.

TAMIZ, M.; JONES, D.; ROMERO, C.. Goal programming for decision making: an overview of the current state-of-the-art. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v.111, n. 3, p. 569-581, 16 dec. 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797003172>. Acesso em: 29 mar. 2019.

VIANA, R. da S.; MUTTON, M. A.; BARBOSA, V.; DURIGAN, A. M. P. R.. Maturadores químicos na cana-de-açúcar (Saccharum spp) aplicados em final de safra . **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, [S. l.], v.7, n. 2, p.100-107, 2. sem. 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/500/50007212.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2019.

VIANA, R. da S.; SILVA, P. H.; MUTTON, M. A.; MUTTON, M. J. R.; GUIMARÂES, E. R.; BENTO, M.. Efeito da aplicação de maturadores químicos na cultura da cana de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) variedade SP81-3250 . **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 30, n. 1, p. 65-71, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v30i1.1130>. Acesso em: 09 abr. 2019.

VIANA, R. da S.; FIGUEIREDO, P. A. M.; LISBOA, L. A. M.; PASCOALOTO, I. M. Características morfoanatômicas de folhas de cana-de-açúcar sob efeito residual de maturadores. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Londrina, v.14, n.4, p.306-314, out./dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.7824/rbh.v14i4.438>. Acesso em: 27 out. 2018.

VIANA, R. da S.; LISBOA, L. A. M.; FIGUEIREDO, P. A. M.; RODRIGUES NETO, A. D.. Parâmetros tecnológicos e produtivos da cana-de-açúcar quando submetida à aplicação de maturadores químicos no início de safra. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Londrina v. 16, n.1, p.67-75, jan./mar. 2017(a). Disponível em: <https://doi.org/10.7824/rbh.v16i1.496>. Acesso em: 27 ago. 2018.

VIANA, R. da S.; VELINI; E. D.; LISBOA, L. A. M., ASSUMPÇÃO, A. C. N. D.; FIGUEIREDO, P. A. M.. Application of chemical ripeners mixtures the technological quality and agricultural productivity of sugarcane. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 541–550, jul. –set., 2017(b). Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/4407/pdf>. Acesso em: 27 ago. 2018.

VIEIRA, G. H. . MANTOVANI, E. C.i; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, É. L. da; DELAZARI, F. T.. Produtividade de colmos e rendimento de açúcares da cana-de-açúcar em função de lâminas de água. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 234-244, abr.-jun., 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2012v17n2p234>. Acesso em: 20 ago. 2018.