

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**PLANEJAMENTO ÓTIMO DE PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-
AÇÚCAR UTILIZANDO GRAUS-DIAS**

PAULO ROBERTO ISLER

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP
MARÇO DE 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**PLANEJAMENTO ÓTIMO DE PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-
AÇÚCAR UTILIZANDO GRAUS-DIAS**

PAULO ROBERTO ISLER

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Co-orientadora : Prof^ª. Dr^ª. Daniela Renata Cantane

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP
MARÇO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

I82p Isler, Paulo Roberto, 1985-
Planejamento ótimo de plantio e colheita da cana-de-açúcar utilizando graus-dia / Paulo Roberto Isler. - Botucatu : [s.n.], 2016
vii, 76 f. : ils. color.; grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016
Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva
Coorientador: Daniela Renata Cantane
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Plantio. 2. Cana-de-açúcar - Colheita. 3. Algoritmos genéticos. 4. Plantas - Efeito da temperatura. I. Silva, Helenice de Oliveira Florentino. II. Cantane, Daniela Renata. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

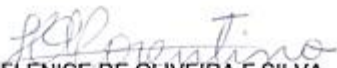
TÍTULO: PLANEJAMENTO ÓTIMO DE PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR
UTILIZANDO GRAUS-DIAS

AUTOR: PAULO ROBERTO ISLER

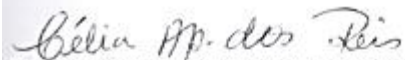
ORIENTADORA: Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA F SILVA

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. DANIELA RENATA CANTANE

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


Prof. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA F SILVA

Departamento de Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu


Prof. Dra. CELIA APARECIDA DOS REIS

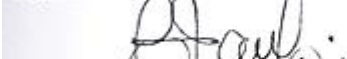
Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru


Prof. Dr. PAULO ANDRE DE OLIVEIRA

Faculdade de Tecnologia de Botucatu


Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Dep de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu


Prof. Dr. FERNANDO LUIZ PIO DOS SANTOS

Departamento de Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu

Data da realização: 01 de dezembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela minha vida, família e todas as oportunidades.

Aos familiares, meu pai Paulo, minha mãe Maria Izabel e meu irmão Marcos e meus avós, por me ensinarem e incentivarem em meus estudos dando todo apoio necessário para minha formação como pessoa e aluno.

Aos meus professores que me ensinaram o prazer da busca por conhecimento, e me auxiliaram nesta jornada, em especial a professora Dra. Helenice de Oliveira Florentino, por acreditar em mim e entender minhas dificuldades, me acompanhando desde o mestrado, a professora Dra. Daniela Renata Cantane minha co-orientadora que muito contribuiu para este trabalho.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Ciências Ambientais FCA UNESP, em especial ao Prof. Dr. Dinival Martins, pelo auxílio e por cederem os dados.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Bioestatística, em especial ao professor Carlão pelo aprendizado constante.

A todos os funcionários da biblioteca Paulo de Carvalho Mattos e da seção de pós-graduação pelo ótimo atendimento.

A Capes pelo apoio financeiro concedido.

Aos meus amigos da UNESP Rio Claro, do Curso de Biometria IB UNESP e da FCA UNESP Botucatu que incentivaram e auxiliaram neste trabalho, em especial aos meus amigos de república José Nilton, Farid e Thiago. Aos amigos que fiz no doutorado Rômulo, Ricardo, Sérgio, Paulo André e Érico. Aos amigos da Fatec e do IFSP.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus agradecimentos.

SUMÁRIO

1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1 Cana-de-açúcar.....	7
4.1.1 Plantio.....	8
4.1.2 Brotação.....	8
4.1.3 Perfilhamento.....	9
4.1.4 Florescimento.....	10
4.1.5 Maturação.....	10
4.1.6 Colheita.....	11
4.1.7 Fibra.....	12
4.1.8 Pol.....	13
4.1.9 Planejamento de plantio e colheita.....	15
4.1.10 Escolha das variedades.....	16
4.1.11 Escolha dos períodos de plantio e corte.....	17
4.2 A influência da temperatura no desenvolvimento vegetal.....	18
4.2.1 Temperatura base.....	19
4.2.2 Graus-dias.....	20
4.2.3 Fatores climáticos e produtividade.....	22
4.3 Modelagem Matemática.....	24
4.4 Modelo de otimização.....	25
4.5 Algoritmo Genético (AG).....	27
4.5.1 Inicialização.....	29
4.5.2 Cálculo da aptidão.....	29
4.5.3 Seleção.....	29
4.5.4 Cruzamento (<i>Crossover</i>).....	30

4.5.5 Mutação.....	32
4.5.6 Elitismo.....	32
4.5.7 Teste de parada.....	33
4.5.8 Escolha dos parâmetros do AG.....	33
4.5.9 Convergência.....	34
4.5.10 Tamanho da População.....	34
4.5.11 Taxa de Cruzamento.....	34
4.5.12 Taxa de Mutação.....	35
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
5.1 Modelo matemático.....	38
5.1.1 Problema: Planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar.....	38
5.1.2 POL em função dos Graus-dias.....	39
5.1.3 Produção de cana em função dos Graus-dias.....	40
5.1.4 Teor de Fibra em função dos Graus-dias.....	41
5.1.5 Modelo.....	41
5.2 Algoritmo Genético (GA_GD).....	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
6.1 Cálculo dos Graus-dias.....	49
6.2 Testes computacionais.....	52
6.3 Planejamento do plantio e colheita em áreas agrícolas na região de Botucatu	53
6.4 Planejamento do plantio e colheita em áreas agrícolas na região de Votuporanga	56
6.5 Comparação entre regiões produtoras de acordo com o clima.....	59
7 Conclusão.....	62
8 REFERÊNCIAS.....	63
Apêndice.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pol%Cana para diferentes variedades em épocas de colheita distintas (adaptado de Takahashi, 2004).	14
Figura 2: Curva de maturação para diferentes cultivares (adaptado de Stupiello 1987).	15
Figura 3: Seleção dos indivíduos para realizar o “crossover”.	30
Figura 4: Processo de crossover de um ponto	31
Figura 5: Processo de crossover com 3-pontos	31
Figura 6: Processo de Mutação.	32
Figura 7: Variação do teor de Pol%Cana em função dos Graus-dias acumulados.....	39
Figura 8: Estrutura do Cromossomo (ou indivíduo)	46
Figura 9: Processo de crossover	47
Figura 10: Processo de mutação.....	48
Figura 11: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano (região de Botucatu).....	50
Figura 12: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano e meio (Região de Botucatu).....	50
Figura 13: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano (região de Votuporanga).....	51
Figura 14: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano e meio (Região de Votuporanga).....	51
Figura 15: Produção total de Pol%Cana para quatro cortes com uma população de 200 indivíduos.....	51
Figura 16: Produção de Pol%Cana - Região de Botucatu.....	56
Figura 17: Produção de Pol%Cana para a região de Votuporanga (200 indivíduos e 500 gerações)	59
Figura 18: Comparação entre regiões por área plantada (%)	59
Figura 19: Produção de Pol%Cana por região	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de janeiro à junho, para a região de Botucatu	71
Tabela 2: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de julho à dezembro, para a região de Botucatu.	71
Tabela 3: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de janeiro à junho, para a região de Votuporanga.....	73
Tabela 4: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de julho à dezembro, para a região de Votuporanga.	74
Tabela 5: Dados médios do primeiro corte das variedades utilizadas para implementação do modelo	37
Tabela 6: Planejamento dos períodos de plantio e colheita da cana-de-açúcar determinados pelo modelo de otimização para os quatro cortes em cada talhão para a região de Botucatu.....	54
Tabela 7: Área plantada por variedade para a região de Botucatu	55
Tabela 8: Planejamento dos períodos de plantio e colheita da cana-de-açúcar determinados pelo modelo de otimização para os quatro cortes em cada talhão para a região de Votuporanga	57
Tabela 9: Área plantada por variedade para a região de Votuporanga.....	58

1 RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o maior exportador mundial de açúcar, o que vem influenciar diretamente a economia brasileira. Constantemente são introduzidas no mercado novas variedades de cana, mais produtivas, resistentes a pragas e com bom desenvolvimento em diversos tipos de clima e solos; surgem novas metodologias de plantio e colheita e máquinas mais eficientes. Devido a extensa área plantada e ao grande número de variedades, surge a necessidade de novas tecnologias para auxílio nas tomadas de decisões da correta variedade a ser plantada, baseado no clima e solo, assim como no correto período de plantio e colheita da cana, o que pode ser alcançado com um bom planejamento. Um planejamento da cultura com este perfil permite aumentar a rentabilidade e tornar o processo mais eficiente, ou seja, conseguir maiores produtividades da cana numa mesma área plantada. Mas esse processo de planejamento torna-se ainda mais complexo quando é levado em consideração as constantes alterações climáticas. O clima é um dos principais fatores que influencia na qualidade da biomassa da cana-de-açúcar utilizada no setor sucroalcooleiro. Neste sentido, este trabalho propõe uma metodologia para o planejamento otimizado de plantio e colheita da cana-de-açúcar, considerando as mudanças climáticas. Para isto, é utilizado o método de Graus-dias, que baseia-se na faixa de temperatura ideal para o desenvolvimento da planta. Propõe-se um modelo matemático para auxiliar a escolha das variedades a serem plantadas, assim como o período de plantio e colheita da cana, considerando que a cana-de-açúcar deve ser colhida no correto período de maturação calculado a partir do número de graus-dias acumulados, explorando assim seu potencial energético e atendendo as demandas da usina. A metodologia proposta foi aplicada em duas regiões produtoras que apresentam

grandes diferenças climáticas. A metodologia proposta mostrou-se robusta, visto que mesmo aplicada em regiões climáticas distintas foi possível atender as necessidades requeridas pela usina. O AG_GD desenvolvido foi eficiente na resolução do modelo. O trabalho discute resultados computacionais para essas duas regiões.

Palavras chaves: *Saccharum* spp., algoritmo genético, planejamento ótimo, soma térmica.

OPTIMAL PLANNING OF PLANTING AND HARVESTING OF SUGARCANE USING DEGREE DAYS. Botucatu, 2015. 71p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: PAULO ROBERTO ISLER

Adviser: Prof^ª. Dr^ª. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

Co-Adviser: Prof^ª. Dra. DANIELA RENATA CANTANE

2 SUMMARY

Brazil is the world's largest sugarcane producer and sugar exporter, what directly influences the Brazilian economy. There is a constant introduction of new kinds of sugarcane in the market, more productive, pest resistant and with a good development in several kinds of climate and lands; new planting and harvesting methodologies arise as well as more efficient machines. However, with the extended cultivated area and this great number of varieties, a necessity of new technologies appears in order to help deciding the proper variety to be planted, based on the climate and land, as well as in the right period of sugarcane planting and harvesting, what can be reached with a well done planning. A crop planning with this profile allows the profitability to increase and make the process more effective, in other words, it gets higher productivity of sugarcane in a same cultivated area. But this planning process becomes even more complex whenever the constant climate changes are considered. The climate is one of the main factors that influence the biomass quality of the sugarcane which is used in this sector. This way, this work comes up with a methodology for the optimized planting and harvest planning of sugarcane, considering the climate changes. For this purpose, the degree days method is used, which is based in the ideal temperature range for the development of the plant. There is a mathematic model proposed to help choosing the variety to be planted, as well as the period of sugarcane planting and harvest, considering that the sugarcane should be harvested in the right maturation period calculated from the number of degree days accumulated, exploring then its energetic potential and meeting the factory's demand. The proposed methodology was applied in two producing regions which present great climate differences. The proposed methodology was robust, since even applied in different climatic regions it was possible to meet the needs required by the plant. The AG_GD

developed was efficient in solving the model. The thesis discusses computational results for these two regions.

Keywords: *Saccharum* spp., genetic algorithm, great planning, thermal sum.

3 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar tem um importante papel na economia brasileira, pois contribui com aproximadamente 2% do Produto Interno Bruto, uma vez que o Brasil é o maior produtor e o maior exportador mundial de cana-de-açúcar e de açúcar. No mercado nacional, a cana adquire espaço, pois além da mistura de álcool na gasolina que aumentou, nos últimos anos, também consegue espaço devido a uma frota nova de veículos *flex* e ainda a utilização do seu bagaço para cogeração de eletricidade. Em decorrência desses fatos, surge a necessidade de aumentar a produção, entretanto, fazê-lo não é uma tarefa simples.

Os centros de tecnologia da cana-de-açúcar anualmente disponibilizam novas variedades, com melhor potencial de produção, adaptadas a diferentes tipos de solo e clima e resistentes a pragas e doenças. Criam-se novos manejos, entre eles alguns com maturadores (responsáveis por acelerar o processo de maturação), novas metodologias de plantio, máquinas mais eficientes e a redução de custos operacionais. O mercado para o setor sucroalcooleiro é muito competitivo, a eficiência nos processos dentro e fora da usina são fundamentais. A busca por maiores ganhos é feita de inúmeras maneiras, como o aumento da produção e a colheita no momento adequado, a qual depende diretamente da data de plantio e da variedade plantada. Para administrar esse setor, é necessária a criação de técnicas para alcançar um planejamento ótimo.

Para obter maior rentabilidade, o agricultor deve tomar decisões de acordo com os fatores de produção disponíveis e a probabilidade de riscos que envolvem a sua atividade. Entre os principais fatores que influenciam a produção agrícola, destacam-se as condições climáticas, praticamente incontroláveis. Portanto,

para que qualquer empreendimento agrícola tenha sucesso, as respostas entre clima-planta precisam ser adequadamente quantificadas e monitoradas. Logo, é de suma importância conhecer os elementos climáticos, como exemplo, a temperatura. Com isso o comportamento da temperatura torna-se um fator para tomada de decisão para o plantio de certas espécies e variedades.

Uma das técnicas mais utilizadas para estimar o desenvolvimento das plantas é o método de Graus-dia, que consiste no uso de modelos matemáticos para estimar a soma das temperaturas diárias, acima da temperatura base inferior e abaixo da temperatura base superior. Essa soma é necessária para o desenvolvimento da planta. Esses modelos necessitam das temperaturas diárias do local de plantio e das temperaturas base inferior e base superior, as quais expressam o intervalo de temperatura em que a planta consegue completar sua fase fenológica ou seu ciclo total de desenvolvimento.

Para auxiliar o gestor agrícola, esse trabalho formula uma metodologia a fim de obter o planejamento ótimo de uma dada área, por meio do método de Graus-dias, determinando as variedades mais indicadas para plantio em cada talhão, as datas de plantio e colheita em um período de quatro cortes com a finalidade de aumentar a produção de Pol (t). A metodologia foi aplicada para a cultura da cana-de-açúcar com o objetivo de determinar o tamanho de seu ciclo, com base no método de Graus-dias.

A seguir é apresentada uma revisão de literatura sobre a cana-de-açúcar, os fatores climáticos que exercem influencia no seu desenvolvimento e a importância de um adequado planejamento de plantio e colheita para obtenção do máximo de Pol (t).

4 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica que auxiliará no entendimento da metodologia proposta nesse trabalho. São abordados as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar, o planejamento de plantio e colheita, os fatores industriais, a influência do clima na produção de cana, o método de Graus-dias, a modelagem matemática e o conceito de algoritmo genético.

4.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta perene, pertencente à família *Poaceae*, porém apresenta comportamento semi-perene, devido ao sistema de cultivo. As cultivares produzidas atualmente são híbridas, resultantes dos cruzamentos de várias espécies do gênero *Saccharum*, as mais utilizadas são *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (GUPTA et al. 2010).

Os fatores climáticos, como a variação térmica, pluviosidade e intensidade luminosa, exercem grande influência sobre a fenologia da cultura da cana-de-açúcar, pois afetam-lhe diretamente a produtividade (LIU et al., 1998; SMIT e SINGELS, 2006; UEHARA et al., 2009). Além desses fatores, o manejo da cultura, as características da variedade e do solo também regulam consideravelmente a produtividade e maturação (CESAR et al., 1987). Para que o modelo de planejamento represente o processo de desenvolvimento da cana-de-açúcar, são descritas, a seguir, as fases de desenvolvimento da cultura e os principais processos que lhe afetam a produtividade.

4.1.1 Plantio

De acordo com Calça et al. (1983), nas usinas do Estado de São Paulo existem três tipos de sistema de produção baseados no ciclo da cana: a cana planta de ano, cana planta de ano e meio, e as soqueiras. A cana-planta de ano é plantada de agosto a novembro e cuja colheita se efetua de 11 a 14 meses após o plantio, conforme as condições da região. A cana planta de ano e meio é plantada de janeiro a março e a colheita realizada após 15 a 20 meses.

Segundo Brieger e Paranhos (1964) e Segato e Pereira (2006) no plantio da cana de ano a planta encontra uma faixa de temperatura alta adequada e regular precipitação, essas condições favoráveis para o estado vegetativo persistem por sete meses. Com a redução da temperatura e a diminuição da precipitação pluvial, no estágio seguinte, durante todo o inverno a cana entra em fase de maturação, sendo então colhida.

Para o plantio da cana de ano e meio feito entre janeiro e março, o calor e o final da época de chuva garantem bom desenvolvimento inicial. Em seguida, no inverno, a cana passa por repouso. A partir de setembro e outubro, devido ao início das precipitações e ao aumento da temperatura, há o retorno da intensificação de seu desenvolvimento vegetativo. Com a nova redução de temperatura e diminuição das chuvas, a planta começa a fase de maturação, momento em que é colhida (Frazão, 1976).

4.1.2 Brotação

O tolete promove a ligação fisiológica entre a brotação e as raízes em desenvolvimento inicial, dessa forma, os novos pontos de crescimento funcionam como drenos fisiológicos (CÂMARA, 1993). A brotação é dependente das reservas dos toletes (SEGATO et al., 2006).

A brotação dos toletes pode ser prejudicada pela falta ou pelo excesso de umidade no solo (CASAGRANDE, 1991). Além da umidade do solo, a temperatura ambiente também afeta a brotação das gemas: a temperatura ótima é de 32 a 38°C e, quando ela estiver inferior a 20°C, a brotação é paralisada (BARBIERI,

1981). Por outro lado, Liu et al. (1998) citam como temperatura base 11,6°C e temperatura ótima entre 28 e 30°C.

4.1.3 Perfilhamento

As variações de temperatura também exercem muita influência no perfilhamento (LIU et al. 1998). A formação e crescimento de perfilho, o diâmetro e número de entrenós são favorecidos pelo aumento da temperatura até o máximo de 30°C. Câmara (1993) cita que temperaturas abaixo de 20°C podem parar o crescimento do perfilho.

A eficiência do crescimento da cultura é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada e sua conversão em matéria seca (SINCLAIR et al., 2004; HEERDEN et al., 2010). A radiação solar e a temperatura são os principais fatores responsáveis pela regulação do dossel, o qual ainda pode ter interferência da cultivar, da densidade de plantio (espaçamento), do estado hídrico e nutricional da planta (SINGELS et al., 2005).

A temperatura mínima para o início do desenvolvimento foliar da cana-de-açúcar é de 10,8°C (INMAN-BAMBER, 1994; SINCLAIR et al., 2004). Em temperaturas inferiores, a taxa de desenvolvimento da área foliar é muito reduzida. De acordo com Fauconier e Bassereau (1975), a faixa de temperatura de 30 a 34°C é a responsável por seu crescimento máximo e valores inferiores à 25°C ou acima de 38°C tornam-lhe o crescimento muito lento. No entanto, Planalsucar (1986) e Casagrande (1991) afirmam que a temperatura ideal para o desenvolvimento está entre 20 e 35°C. Liu et al. (1998) e Almeida et al. (2008) apresentam valores discordantes dos autores anteriores, eles expõem o intervalo de 25°C a 33°C como o mais favorável ao desenvolvimento vegetativo. Conforme Doorembos e Kassam (1979), a cana-de-açúcar necessita de temperaturas entre 22 e 30°C para seu ótimo crescimento. Temperaturas abaixo de 20°C diminuem sua taxa de crescimento.

4.1.4 Florescimento

Vários pesquisadores analisaram os efeitos da temperatura para a fase de florescimento da cana-de-açúcar. De acordo com Segato e Pereira (2006), a

indução do florescimento ocorre com maior frequência em noites com temperaturas mínimas iguais ou superiores a 18°C, e temperaturas máximas diurnas iguais ou inferiores a 31°C no período foto-indutivo, ressalta-se que essas temperaturas devem ocorrer em pelo menos dez ciclos indutivos (não necessariamente sucessivos), exigindo-se tais condições por volta de 10 dias.

O florescimento da cana é induzido por um ambiente propício quanto ao fotoperíodo (de 11,5 a 12 horas de luz) e a temperatura ideal, principalmente noturna (Segato e Pereira, 2006). Berding e Moore (2001) citam que dias com temperaturas máximas de 32°C durante a iniciação floral são prejudiciais para o processo de florescimento.

Com o florescimento ocorrem alterações morfofisiológicas da planta. A principal consequência dessas mudanças é a redução de volume do caldo (Salata e Ferreira, 2007; Carolo, 2008). A florada acarreta uma série de prejuízos e perdas devido a inversão de sacarose nos colmos. Ao emitir o pendão, a cana-de-açúcar envia açúcar para o local, o que reduz a qualidade e a produtividade da matéria-prima para a indústria. Há ainda o risco da isoporização da planta, conhecida como “chochamento”, responsável pela desidratação do tecido, o qual passa a adquirir a coloração branca e perda de peso final (SORDI e BRAGA JUNIOR, 1994; CAPUTO et al., 2007; CAROLO, 2008; SEGATO et al., 2006).

4.1.5 Maturação

Conforme Humbret (1968), a cana-de-açúcar precisa completar seu ciclo de maturação para que tenha um bom rendimento em açúcar. Para que isso seja possível, a planta necessita de condições ambientais que induzam uma redução do crescimento. Os agentes mais efetivos para alcançar essa finalidade são as baixas temperaturas e a seca moderada. A temperatura é um dos fatores mais relevantes para o acúmulo de sacarose na cultura, o tempo frio retarda o desenvolvimento e aumenta o teor de sacarose (Yamori et al., 2005). A maturação fisiológica da cana depende da redução da temperatura do ar, o que ocasiona a diminuição da taxa de desenvolvimento vegetativo, sem afetar o processo de fotossíntese, resultando em maior quantidade de fotoassimilados convertidos em açúcares (Alexander, 1973). Caso haja o aumento da temperatura, o crescimento recomeça e o acúmulo de sacarose cessa.

Além da queda de temperatura, a maturação da cana é garantida pelo estresse vegetativo provocado por déficits hídricos (SCARPARI, 2002). Consoante Doorembos e Kassam (1979), a maturação da cana-de-açúcar depende da temperatura ideal situada na faixa de 10 a 20°C, esse intervalo diminui a taxa de crescimento, e por isso promove um maior acúmulo de sacarose.

Humbret (1968) cita que o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar varia desde 10 meses na Louisiana até dois anos no Havaí, Peru e África do Sul. Nos demais países produtores, o período é de 14 a 18 meses para cana planta e de 12 meses para soca. Segundo o autor, em cada ciclo, durante seu desenvolvimento, a cultura é submetida a diferentes condições ambientais (clima e solo) e essas condições influenciam o rendimento agrícola. Além disso, outros fatores induzem o rendimento agrícola, como: o manejo empregado em relação à época de plantio, a variedade, o tipo de muda, a época de corte e o estágio de desenvolvimento da cultura.

Segundo Santos(2007), as datas de plantio influenciam na produção de colmos e no florescimento. As maiores percentagens de florescimento são com o plantio de julho e agosto.

4.1.6 Colheita

A época de colheita é determinada considerando-se alguns fatores, como os teores de sacarose e de açúcares redutores contidos no caldo da cana (BONNET, 1962; BRIEGER e PARANHOS, 1964; ALEXANDER, 1973). Por isso, não é recomendado iniciar a colheita enquanto os colmos não atingirem os padrões tecnológicos mínimos para a sua industrialização, uma vez que o objetivo é a produção de açúcar (Copersucar, 1983).

A cana-de-açúcar é colhida de abril a novembro (em algumas regiões esse período estende-se até dezembro), nos diferentes ambientes de produção da região Centro-Sul do Brasil. O planejamento da colheita busca otimizar o seu retorno econômico (Silva et al., 2008).

Maule et al. (2001) compararam a produtividade de diferentes cultivares em relação à época de colheita e verificaram que a produtividade média diminui conforme se atrasa essa época. Logo, é necessário que o ambiente de produção

garanta o melhor manejo de colheita da cultura da cana-de-açúcar para alcançar a máxima exploração econômica.

A cana-de-açúcar plantada no período colonial da espécie *Saccharum officinarum* - como a caiana, a manteiga e outras variedades com alto teor de sacarose e pouca fibra - são mais suscetíveis ao mosaico, razão pela qual foram substituídas ao longo do tempo. As variedades atuais são resultados de cruzamentos interespecíficos ou intervarietais e têm características bem distintas daquelas utilizadas no início do cultivo no Brasil. As atuais apresentam teores de açúcar elevados, teores de fibra baixos ou médios e resistência elevada ou moderada a maior parte das doenças existentes no Brasil e no mundo (MIRANDA et al. 2010). Os teores de fibra e Pol encontrados nas variedades atuais visam atender as demandas das usinas. A seguir é feito um detalhamento em relação a esses teores.

4.1.7 Fibra%Cana

A forma de avaliar a qualidade da matéria-prima deve considerar as necessidades requeridas pelo produtor. Isso permite um cultivo economicamente viável e atende as necessidades da indústria, ou seja, a escolha das novas variedades desenvolvidas por meio de melhoramento genético deve obedecer a todos esses pré-requisitos.

O teor de fibra, matéria-prima utilizada para a cogeração de energia, está entre os fatores que merecem destaque nesses requisitos. Essa energia deve ser suficiente para movimentar a própria unidade industrial, como também deve ser vendida para as companhias energéticas que suprem as cidades e as indústrias durante os períodos de safra e de carência de energia em decorrência de secas (MIRANDA et al. 2010).

Conforme Fernandes (2000), a fibra é a matéria insolúvel em água contida na cana. Ela constitui matéria de grande importância na agroindústria canavieira. Sob o aspecto agrícola, as variedades com maiores teores de fibra têm maior resistência ao tombamento, mesmo quando submetidas à despalha e fogo, e geralmente são mais resistentes à penetração de pragas no colmo, como é o caso da broca *Diatraea saccharalis*.

Do ponto de vista industrial, o teor de fibra é importante para o balanço energético, pois as fibras são utilizadas para a queima nas caldeiras, o que gera o vapor que será transformado em energia elétrica para o abastecimento da própria usina. No início da safra, é de fundamental importância que as variedades tenham maiores teores de fibra a fim de garantir o suprimento de combustível para as caldeiras. Em meio e final de safra, a importância diminui em função dos estoques acumulados ao longo dos dias de moagem.

4.1.8 Pol%Cana

De acordo com Fernandes (2000), Pol representa a porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares (por exemplo, o caldo da cana) sendo determinado por métodos sacarimétricos (polarímetros ou sacarímetros). A cana-de-açúcar contém, principalmente, três tipos de açúcares: sacarose, glicose e frutose. Desses açúcares, o maior teor é de sacarose, que está diretamente relacionado com o ponto de maturação da cana.

O rendimento industrial de açúcar e álcool é decorrente do teor de açúcares da cana, como a sacarose (para a produção de açúcar) e sacarose, glicose e frutose (para produção de álcool). Nesse aspecto, a maturação é de fundamental importância, uma vez que os teores de sacarose são mais elevados quando a cana se encontra em plena maturação. O ponto de maturação é determinado principalmente pelos teores de sacarose, açúcares redutores (glicose e frutose) e umidade do colmo durante o ciclo da cultura (MIRANDA et al. 2010).

Conforme as normas do Consecana (1998), a cana-padrão, em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, deve apresentar o teor de sacarose (Pol% cana) de 12,257%. As variedades apresentam teores de sacarose variáveis ao longo da safra. Variedades precoces são aquelas que apresentam Pol% cana superior a 12,257% no início da safra, enquanto as médias e tardias apresentam esses valores a partir do meio da safra, como ilustrado na Figura 1 a seguir:

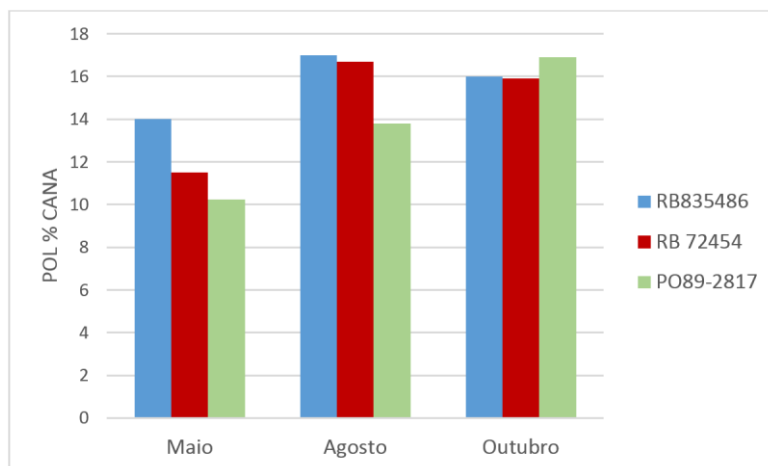


Figura 1: Pol%Cana para diferentes variedades em épocas de colheita distintas (adaptado de Takahashi, 2004).

Na Figura 1, a RB 835436 é uma variedade precoce, uma vez que atinge valores de Pol% Cana (PC) superiores a 12,257% já em maio e os mantém acima dos 16% até outubro. A variedade RB 72454 é média, pois atinge valores superiores ao padrão de PC em agosto e os mantém até outubro. A variedade PO 89-2817 é média tardia, pois atinge valor de PC superior ao mínimo somente em agosto e o mantém até outubro, além disso, trata-se de um valor menor do que o apresentado pela variedade anterior em agosto.

A época em que a variedade apresenta condições tecnológicas adequadas para ser colhida é chamada de período útil de industrialização ou período de utilização industrial, PUI. Ele se inicia quando a cana-de-açúcar atinge o teor de sacarose acima do considerado padrão (acima de 12,257%), também apresenta valores crescentes a partir de então e, após atingido o pico, os teores decrescem. O PUI encerra-se quando o teor de sacarose na cana decresce e atinge 16%.

As variedades apresentam PUIs diferentes, alguns mais curtos e outros mais longos. A Figura 2 apresenta os valores de PUI de variedades com diferentes curvas de maturação, de acordo com Stupiello (1987).

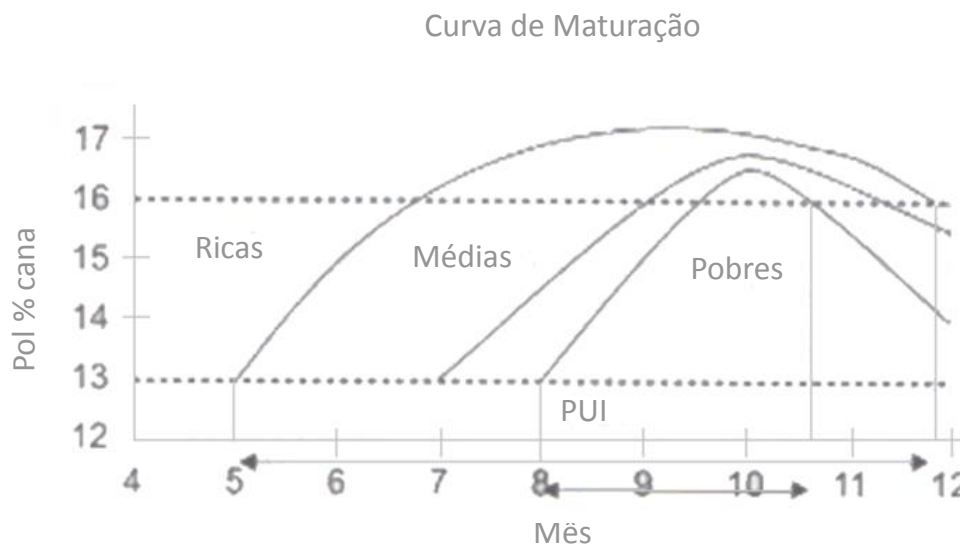


Figura 2: Curva de maturação para diferentes cultivares (adaptado de Stupiello 1987).

As variedades com baixo teor de sacarose apresentam um período adequado para corte avaliado como curto de aproximadamente três meses, as variedades consideradas médias possuem um período destinado ao corte maior em um intervalo de até quatro meses e as variedades ricas podem ser colhidas em uma ampla faixa no decorrer da safra, chegam até seis ou sete meses, dependendo da cultivar.

4.1.9 Planejamento de plantio e colheita

A cana-de-açúcar é remunerada atualmente pela qualidade em açúcar teórico recuperável (ATR), que utiliza como base o Pol e a pureza do caldo. Seu resultado é expresso em quilogramas de açúcar por tonelada de cana. Essa forma de remuneração é diferente da utilizada há anos, quando se pagava pela produção agrícola (toneladas de cana por hectare), o que não necessariamente correspondia à máxima produção industrial. Portanto, é de interesse da usina colher maiores quantidades de açúcar por unidade de área. O planejamento da época de corte da cana-de-açúcar é uma ferramenta utilizada para obter a maior riqueza de açúcar, o que resulta em maior retorno econômico (BUENO, 2011).

A cada ciclo da cultura da cana-de-açúcar, as plantas são submetidas a diferentes condições ambientais, como alterações de temperaturas e

excesso ou deficiência hídrica, além de diferentes práticas de manejo da cultura, como a escolha de diferentes épocas de corte, entre outras. Essas diferentes condições ambientais e de manejo proporcionarão às plantas diferentes respostas e afetarão diretamente sua produtividade agroindustrial. Também cabe ressaltar que cada variedade responde de maneira diferenciada aos estímulos ambientais, além disso, suas produtividades poderão ser diferentes em cada época de colheita, ou seja, cada época de corte altera a produtividade da cultura, uma vez que expõe a planta a diferentes condições ambientais (BUENO, 2011).

Por considerar que muitas variedades de cana-de-açúcar são cultivadas nas usinas canavieiras, é de extrema importância saber qual é o período em que cada uma possui maior riqueza em açúcares, o que auxiliará na tomada de decisões da época em que serão colhidas (BUENO, 2011).

4.1.10 Escolha das variedades

O surgimento de uma praga conhecida como mosaico, na década de vinte, foi fundamental para a criação do Sistema de Produção e Inovação Sucroalcooleiro (SPIS). A maior consequência do SPIS foi a parceria entre a instituição pública e privada para criação de uma rede de pesquisa e desenvolvimento de novas variedades e técnicas de manejo adequadas. Com o passar do tempo, o objetivo principal não era mais vencer o mosaico e sim aumentar a produtividade agroindustrial por meio da maximização do rendimento agrícola, o que seria obtido com o desenvolvimento de variedades de maior conteúdo de sacarose e de maior resistência a pragas e doenças (DUNHAM, BOMTEMPO e FLECK, 2011).

A seleção de variedades e a difusão tecnológica, por meio de redes com agentes produtivos, foram replicadas por importantes instituições de melhoramento genético da cana, como por exemplo o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Além disso, é interessante notar que a relação entre instituições de pesquisa e agentes produtivos de São Paulo provocou a capacitação das usinas paulistas e a mobilização de recursos para incrementar a produtividade de seus negócios.

Além do IAC, foi criado o Planalsucar com o objetivo de reunir as condições técnicas e administrativas destinadas à implementação de projetos de

pesquisa em genética, fitossanidade e agronomia para a criação de novas variedades de cana, com alto índice de produtividade e adaptadas às condições de solo e clima (Dunham 2009). Com a criação do Proálcool, essa capacidade ampliou-se ainda mais, o que permitiu lançar entre 1977 e 1988 dezenove novas variedades pelo Planalsucar.

Posteriormente, foi criada a Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA), a qual obtem resultados positivos do trabalho herdado do Planalsucar. Em vinte anos de existência (1991-2011), a instituição liberou 65 novas variedades desenvolvidas nas 31 estações experimentais que lhe pertencem.

Além da RIDESA, outro importante órgão de pesquisa agrícola no SPIS é o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) que inicialmente era chamado Centro de Tecnologia Copersucar. Em 2004 com a criação do CTC, as usinas de São Paulo almejavam variedades de cana e tecnologias industriais cada vez melhores, de modo a permitir incrementos constantes de produtividade.

Essa reestruturação do CTC buscou transformá-lo no "principal centro de desenvolvimento e integração de tecnologias da indústria sucroenergética", o que expandiu suas atividades para todas as regiões canavieiras do Brasil.

4.1.11 Escolha dos períodos de plantio e corte

Existem duas épocas de plantio bem definidas, entretanto a mais utilizada é a denominada plantio de “18 meses” (cana-de-ano-e-meio), realizado de janeiro a março.

O plantio de verão apresenta um maior risco, desta época de plantio, perdas imediatas pelo excesso de chuvas no período, o que pode configurar cenários de assoreamento. Por esse motivo, durante esse período seria melhor recomendado o chamado plantio direto.

Atualmente, com a fertirrigação e mesmo com a irrigação suplementar, uma nova modalidade de plantio consolida-se: o plantio de inverno, o qual abrange junho, julho, agosto e a primeira quinzena de setembro. Os resultados de ganho

de massa nessa última modalidade são muito convincentes e sugerem uma revisão de toda uma tradição de plantio (SEGATO et al. 2006).

O plantio de “12 meses” (cana-de-ano) ocorre entre os meses de setembro a outubro, por causa disso é uma modalidade menos utilizada. Trata-se de uma época de plantio que oferece maior risco devido a condições climáticas adversas que podem ocorrer durante o desenvolvimento da cultura. Coleti (1987) ressalta que o efeito da estiagem de abril a setembro afeta sensivelmente o manejo de plantio. Toda a massa obtida do plantio até o final do verão sofre o efeito do estresse hídrico e apresenta uma colheita útil de aproximadamente 73% do total, além da duvidosa qualidade da matéria-prima, com baixíssima umidade e reduzida extração.

4.2 A influência da temperatura no desenvolvimento vegetal

Os incrementos nos rendimentos e a redução de custos e riscos de insucesso na agricultura dependem do uso criterioso dos recursos financeiros. Para obter maior rentabilidade, o agricultor deve tomar decisões de acordo com os fatores de produção disponíveis e a probabilidade de riscos que envolvem a sua atividade. Entre os principais fatores que influenciam a produção agrícola, destacam-se as condições climáticas, que são praticamente incontroláveis. Portanto, para que qualquer empreendimento agrícola tenha sucesso, as respostas entre clima-planta precisam ser adequadamente quantificadas e monitoradas. Para isso, é de suma importância conhecer os elementos climáticos, definidos como grandezas que quantificam o clima, como exemplo, a temperatura, a radiação, a precipitação, o brilho solar, entre outros.

Neste trabalho, será utilizada a temperatura para determinar o desenvolvimento biológico, pois é uma consequência imediata da radiação solar e do foto período. Além disso, é possível irrigar a planta a fim de evitar o déficit hídrico e corrigir o solo.

Os estresses climáticos promovidos pelo aquecimento global devem ser favoráveis para a cultura da cana-de-açúcar e conseqüentemente para o etanol, mas ameaçam as culturas alimentares, que provavelmente enfrentarão nos próximos anos uma situação desvantajosa de perda de área favorável e prejuízo (ASSAD e PINTO, 2011).

Em plantas, o aumento da concentração de CO₂ atmosférico causa aumento da taxa de crescimento, porque o CO₂ é o substrato primário para fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 1991). Plantas com metabolismo C3 são mais beneficiadas pela ampliação de CO₂ atmosférico do que plantas com metabolismo C4 (TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, se a adição da concentração de CO₂ for acompanhada de aumento da temperatura do ar, poderá não haver ascensão do crescimento e do rendimento das culturas, principalmente em razão do encurtamento do seu ciclo de desenvolvimento (BUTTERFIELD e MORISON, 1992; SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (TAIZ e ZEIGER, 1991; STRECK, 2005).

A elevação da temperatura provocada pela alta concentração de gases de efeito estufa, como o CO₂, deve causar um impacto negativo na agricultura de quase todo o planeta. O aquecimento trará alguma vantagem somente para o cultivo nas regiões de alta latitude. Essas áreas poderão no futuro abrigar plantas que hoje não resistem ao frio.

4.2.1 Temperatura base

A temperatura base delimita a temperatura mínima e a máxima propícia para a planta, ou seja, é a faixa ideal para o desenvolvimento vegetal. O desenvolvimento das plantas é muito reduzido ou até nulo fora desses extremos. Mesmo em condições favoráveis de radiação solar, entre os limites, existe uma temperatura ótima em que o desenvolvimento das plantas é máximo, todavia as faixas de temperaturas assim como a temperatura ótima variam de espécie para espécie.

Segundo Ometto (1981), cada espécie vegetal ou variedade possui uma temperatura base superior (TB) e uma temperatura base inferior (Tb), que pode variar em função da idade ou da fase fenológica da planta. Com base nesse princípio, ficam explicadas as diferentes variações durante o ciclo da cultura em localidades com regimes de temperatura diferentes. Nesse sentido, a temperatura pode ser considerada o fator principal de controle do desenvolvimento das plantas e de grande influência na sua distribuição geográfica. Essas duas temperaturas basais (TB, Tb) condicionam o intervalo energético do meio ambiente mais propício ao crescimento

e desenvolvimento da planta em estudo. Para a cultura da cana-de-açúcar é utilizada como temperatura base inferior (T_b) 20 °C e para temperatura base superior (TB) 34 °C.

O conhecimento da temperatura base possibilita ao agricultor prever a viabilidade do cultivo de uma cultura em uma determinada região por meio da elaboração de um calendário térmico. Isso se aproxima muito mais daquilo que realmente ocorre no campo do que a simples contagem dos dias, como é usualmente feito. As plantas têm um desenvolvimento maior em dias mais quentes, por isso conhecer o clima da região é de extrema importância para se ter sucesso com a cultura.

Todos os Processos fisiológicos dos seres vivos ocorrem entre certos limites térmicos no ambiente em que eles se desenvolvem. O desenvolvimento fisiológico é um processo muito complexo e impede que essa temperatura seja determinada com exatidão. Além disso, pode existir diferenças entre as temperaturas bases fisiológicas e as determinadas por esses métodos estatísticos (LOZADA; ANGELOCCI, 1999).

4.2.2 Graus-dias

Graus-dia ou soma térmica é definido como o acúmulo diário de energia que se situa acima da condição mínima e abaixo da máxima exigida pela planta para completar determinada fase fenológica ou mesmo o seu ciclo total de desenvolvimento (OMETTO, 1981). A disponibilidade térmica tem influência direta sobre o desenvolvimento fenológico das plantas, de tal forma que locais ou períodos mais quentes determinam desenvolvimento mais rápido. O conceito de Graus-dias (GDA) foi desenvolvido para superar inadequações do calendário diário, prever eventos fenológicos (WARINGTON e KANEMASU, 1983), identificar as melhores épocas de semeadura, escalonar a produção de culturas e aprimorar programas de melhoramento.

O método dos Graus-dia é uma contagem, não de dias, como no calendário comum, mas de unidades térmicas entre as temperaturas base mínima (T_b) e máxima (TB) ocorridas em um dia. Por exemplo, a cana-de-açúcar apresenta temperatura base mínima (T_b) de 20 °C e a máxima (TB) de 34°C. Em um dia de sol,

com temperatura média de 28 °C, essa cana-de-açúcar acumula 8 Graus-dia. Em um dia mais frio, com temperatura média de 22 °C, a planta acumula apenas 2 Graus-dia. Diante disso, é evidente a diferença de crescimento da planta conforme os dias com maior ou menor temperatura.

Cada espécie vegetal ou cultivar possui uma temperatura base, que varia em função dos diferentes subperíodos de desenvolvimento da planta, por isso é comum a adoção de um valor único para todo o ciclo da cultura (CAMARGO, 1984). Essa teoria assume que tanto as temperaturas diurnas como as noturnas afetam o desenvolvimento e o crescimento vegetativo, e que os dados somente perdem sua confiabilidade sobre condições de extremo ou prolongado estresse hídrico.

Infeld e Silva (1987) afirmam que o aumento da temperatura acelera o desenvolvimento da planta e reduz o seu ciclo e vice-versa. Com base nesse princípio, ficam explicadas as diferentes durações do ciclo de uma cultura, em dias, para cultivos em localidades com regimes de temperaturas diferentes. Vários trabalhos têm demonstrado a grande utilidade do uso de Graus-dias acumulados para previsão de fases fenológicas, como também para zoneamento das culturas (SLACK et al., 1994; BARBANO et al. 2001; WUTKE et al. 2000, LIMA 2006; ALMEIDA E GONÇALVES 2007).

De acordo com Ometto (1981), após se realizar a contabilização para uma cultura em dois ou mais anos, a previsão da marcha de valores de Graus-dias, nos anos subsequentes, possibilita o planejamento adequado dos momentos em que deverão ser efetuados os tratos culturais, aplicação de nutrientes e programação da colheita.

Para estimar os períodos de plantio e o tempo do ciclo de desenvolvimento das plantas utiliza-se o método de Graus-dias, sendo que os principais modelos são de: Arnold (1959), Ometto (1981), Snyder (1985) e Dufault (1997). Esses modelos necessitam das temperaturas diárias do local de plantio, mas, por facilidade, utilizam basicamente as temperaturas máximas e mínimas registradas no dia e as temperaturas base inferior e base superior que expressam a faixa de temperatura na qual a planta consegue completar sua fase fenológica ou mesmo seu ciclo total de desenvolvimento. Porém esses métodos apresentam erros grotescos, em razão de utilizarem poucas informações para o cálculo dos Graus-dias. Com a finalidade de

diminuir esses erros, Isler et al. (2012) propõem um modelo que utiliza o método de interpolação por “*SPLINES*”, com quatro pontos de interpolação para o cálculo dos Graus-dias. Dessa forma, obtêm-se melhores resultados aplicados à cultura da cana-de-açúcar.

Um dos métodos utilizados para relacionar a temperatura do ar e o desenvolvimento vegetal é o total de Graus-dias acumulados (GDA), definido como a soma de temperaturas acima da condição mínima e abaixo da máxima necessárias para a planta finalizar os diferentes subperíodos de desenvolvimento (SOUZA, 1990). Segundo Prela e Ribeiro (2002), o conhecimento dos valores diários de precipitação, evapotranspiração e GDA são necessários para a avaliação dos diferentes subperíodos de desenvolvimento em relação às respostas das culturas.

Apesar do método de Graus-dias ser bastante utilizado, deve-se mencionar que recebe algumas críticas (XUE et al., 2004). Entre elas, está o fato de que existem vários métodos de cálculo (SANGOI e SILVA, 1986; STRECK et al., 2005), o que pode ser uma limitação para comparar os Graus-dia das fases de desenvolvimento das cultivares em diferentes trabalhos. Em alguns casos, não se descreve detalhadamente qual o Método de Graus-dias utilizado (McMASTER e WILHELM, 1997).

O método de Graus-dias é utilizado para caracterizar o ciclo de vida da cana-de-açúcar. Vários estudos são realizados para determinar o melhor período de plantio, o momento das adubações, das irrigações e dos tratamentos contra as pragas (LIMA 2006; WUTKE ET AL. 2000, BARBANO ET AL. 2001; ALMEIDA E GONÇALVES 2007). Nesse trabalho, utilizar-se-á o método de Graus-dias para determinar os momentos de plantio e colheita de forma que a cana-de-açúcar complete todo seu ciclo de desenvolvimento e seja colhida no momento adequado para obter o máximo de Pol (t)

4.2.3 Fatores climáticos e produtividade

A diversidade de climas determina períodos de plantio e colheita da cana-de-açúcar distintos para as diversas regiões. Em São Paulo, de modo geral, planta-se de setembro a outubro e de janeiro a março e colhe-se de abril a dezembro;

enquanto, no nordeste, o plantio se faz de maio a janeiro e a colheita, de outubro a abril. A cana-de-açúcar exige calor e umidade na fase de crescimento. Sem essas condições não produzirá bem. A melhor temperatura para a cana é de 30 a 34°C. Abaixo de 20°C e acima de 35°C, o crescimento é muito lento e, além de 38°C, é nulo.

A produtividade da cana-de-açúcar obtida na atual safra 2014/2015 apresentou queda considerável em relação à safra passada, com um decréscimo de 1,6% na média geral, passando de 74,769 t . ha⁻¹ para 73,569 t . ha⁻¹. Essa queda concentra-se na Região Centro-Sul. As condições climáticas de falta de chuvas no final do ano de 2014 e início de 2015 proporcionaram esse decréscimo na produtividade de cana-de-açúcar colhida para a safra atual (CONAB 2014).

Apesar dessa queda, a produção total de cana-de-açúcar moída na safra 2014/2015 é estimada em 671,69 milhões de toneladas, com aumento de 2,0% em relação à safra 2013/14, de 658,82 milhões de toneladas, o que significa aumento de 12,87 milhões de toneladas. A produção de cana-de-açúcar da Região Centro-Sul é estimada em 612,91 milhões de toneladas, 1,8% maior que a produção da safra anterior (CONAB 2014).

O crescimento de áreas de plantio nos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais onde se concentra o maior número de unidades novas e fase de consolidação, sustentou esse aumento de 12,87 milhões de toneladas de cana para processamento. Por outro lado, as adversidades climáticas ocorridas nas lavouras de cana-de-açúcar em algumas regiões durante o período de desenvolvimento levou-se às estimativas de produtividades menores do que as obtidas na safra passada em São Paulo e Minas Gerais. A Região Norte/Nordeste prevê um aumento de 3,7%, passando de 56,71 milhões de toneladas da safra 2013/2014, para 58,78 milhões na safra 2014/2015 (CONAB 2014).

O plantio na época adequada, embora não tenha nenhum efeito no custo de produção, seguramente afeta o rendimento e consequentemente o lucro do agricultor. Para a tomada de decisão quanto à época de plantio, é importante conhecer os fatores de riscos, que tendem a ser minimizados. Quanto mais eficiente for o planejamento das atividades relacionadas à produção, maiores são as possibilidades de lucro. O agricultor precisa estar consciente de que a chance de seu sucesso deve-se a seu planejamento e que este depende de vários elementos, como os riscos climáticos a que

está sujeito. Portanto, o método de Graus-dias pode ser utilizado no planejamento ótimo do plantio e da colheita da cana-de-açúcar.

4.3 Modelagem Matemática

A modelagem matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los interpretando suas soluções com a linguagem do mundo real (BASSANEZI, 2002). A modelagem matemática utiliza a interdisciplinaridade e quebra várias barreiras em diversas áreas de pesquisas, como Física, Química, Biologia, Agronomia, Astrofísica, Economia, entre outras..

Segundo Bassanezi (2002), a ciência é uma atividade essencialmente desenvolvida pelo ser humano que procura entender a natureza por meio de teorias adequadas. O homem utiliza-as para avançar seus conhecimentos o que lhe possibilita tomar decisões em um futuro e agir corretamente. A consistência de uma teoria ou sua própria validação muitas vezes depende da linguagem matemática que a envolve. Toda teoria específica é, na verdade, um modelo matemático de um pedaço da realidade (BUNGE, 1974).

As vantagens de se empregar modelos matemáticos são várias, como a utilização de uma linguagem concisa que expressa ideias de maneira clara, sem ambiguidades, e que possibilita a utilização de recursos computacionais para calcular soluções e formular novas teorias, comparações, etc.

Conforme Bassanezi (2002), os modelos matemáticos podem ser: linear ou não-linear, estático ou dinâmico e educacional. A classificação linear ou não-linear dependerá das equações envolvidas. Um modelo é estático, quando, por exemplo, representa a forma de um objeto e dinâmico, quando simula variações de estágios de um determinado fenômeno. É educacional, quando baseado em um número pequeno ou simples de restrições, com, quase sempre, solução analítica. Esses modelos são utilizados com a finalidade de adquirir experiência ou auxílio na formação de novos modelos.

É importante ressaltar que a modelagem matemática é uma aproximação da realidade, um processo de representação de parte dela. Portanto, é preciso tomar ciência de que não é possível descrever toda situação por meio de modelos matemáticos. A interpretação também deve ser adequada, em vários casos, ela é decisiva para auxiliar na criação e alterações do modelo e pode influenciar inclusive em sua validação.

Após conhecer o problema real a ser resolvido, identificam-se os objetivos e formula-se o modelo matemático com o cuidado de transcrever todos os aspectos do problema real. As hipóteses conduzem a pesquisa, elas podem ser feitas de inúmeras maneiras: observações de fatos, comparações, experiências pessoais, dedução lógica, entre outras. Simplifica-se o problema real o qual em geral é muito complexo, mas deve-se ter muito cuidado para não realizar simplificações grosseiras que acarretam erros graves. O modelo deve representar o problema.

O próximo passo é resolver o modelo. Depois de resolvido e discutidos os resultados, o modelo necessita ser validado. Nesse estágio, ele é testado e analisado para ver se é satisfatório, ou seja, se condiz com a realidade ou não. De acordo com o comportamento, durante a validação, podem ser feitas modificações a fim de aprimorá-lo ou aumentar sua robustez.

4.4 Modelo de otimização

Otimização é um processo em que se deseja obter a melhor combinação de uma série de fatores (variáveis de decisão) que atendam a certas limitações (conjunto de restrições), de acordo com um determinado objetivo (função objetivo).

Segundo Tavares e Correia (1986), pode-se definir um problema de otimização como uma escolha que pode ser expressa matematicamente nos seguintes termos:

Determinar as incógnitas x_i com $i = 1, \dots, n$ que maximizem ou minimizem uma função $f(x)$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x \in R^n$, satisfazendo um conjunto de

restrições que seja possível exprimir por um sistema indeterminado de equações $g(x) \leq 0$, $g(x) = 0$ ou $g(x) \geq 0$. Na programação matemática esse problema é expresso da seguinte forma:

$$\begin{aligned} &\text{minimizar } f(x) \text{ (ou maximizar)} \\ &\text{sujeito à: } g(x) \leq 0 \text{ (ou } g(x) = 0 \text{ ou } g(x) \geq 0), x \in R^n \end{aligned} \quad (1)$$

em que: a função $f : R^n \rightarrow R$ é chamada de função objetivo; as restrições $g : R^n \rightarrow R^p$ limitam o espaço de soluções do problema, chamadas de soluções factíveis ou soluções viáveis e x é o vetor variável de decisão.

Em consonância com a natureza do problema de otimização (1), a função objetivo e as restrições assumem diferentes características, necessitando de diferentes técnicas para a sua resolução. Os problemas de otimização são classificados de acordo com as características da função objetivo, das equações que descrevem as restrições e das variáveis de decisão.

- Se $f(x)$ e $g(x)$ forem lineares, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_i \in R$, $i = 1, 2, \dots, n$, tem-se um *Problema de Programação Linear* (PPL).
- Se $f(x)$ e/ou $g(x)$ forem não lineares, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_i \in R$, $i = 1, 2, \dots, n$, tem-se um *Problema de Programação Não Linear* (PPNL).
- Se $f(x)$ e $g(x)$ forem lineares, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_i \in Z$ para todo $i \in 1, 2, \dots, n$, tem-se um *Problema de Programação Linear Inteira* (PPLI).
- Se $f(x)$ e $g(x)$ forem lineares, $x = (x_1, \dots, x_n)$, x_i inteiro para algum $i = 1, 2, \dots, n$, tem-se um *Problema de Programação Linear Inteira Mista* (PPLIM).
- Se $f(x)$ e (ou) $g(x)$ forem não lineares, $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x_i \in Z$ para todo $i = 1, 2, \dots, n$, tem-se um *Problema de Programação Não Linear Inteira* (PPNLI).
- Se $f(x)$ e (ou) $g(x)$ forem não lineares, $x = (x_1, \dots, x_n)$, x_i inteiro para algum $i = 1, 2, \dots, n$, tem-se um *Problema de Programação Não Linear Inteira* (PPNLIM).

Existem muitas outras classificações de problemas de otimização explorando as características das funções e variáveis envolvidas. Para cada uma dessas classes de problemas, existe um ou mais métodos específicos de resolução. Neste

trabalho, abordar-se-á um problema de programação não linear inteira (PPNLI), esse tipo de problema é de difícil resolução e necessita de métodos mais elaborados, exatos ou aproximativos.

O uso de métodos de resolução exatos para problemas PPNLI de grande dimensão apresenta grande complexidade, tornando-se muitas vezes impossíveis de serem resolvidos. Por isso, o uso de técnicas metaheurísticas surge como uma valiosa ferramenta, pois os métodos heurísticos em geral possuem fácil implementação e apresentam flexibilidade de aplicação a qualquer um dos problemas de otimização abordados anteriormente. Esses métodos têm fornecido excelentes aproximações da solução ótima para diversas aplicações em problemas de casos reais. Entre as metaheurísticas, destaca-se o Algoritmo Genético (AG), apresentado a seguir.

4.5 Algoritmo Genético (AG)

Algoritmos genéticos são modelos computacionais que imitam os mecanismos da “evolução natural” para resolver problemas de otimização (JOHN HOLLAND, 1970). Segundo Goldberg (1989), os algoritmos genéticos diferem dos algoritmos tradicionais de otimização em basicamente quatro aspectos:

- Baseiam-se em uma codificação do conjunto das soluções possíveis, e não nos parâmetros da otimização em si;
- Os resultados são apresentados como uma população de soluções e não como uma solução única;
- Necessitam apenas de uma forma de avaliação do resultado;
- Usam transições probabilísticas e não regras determinísticas.

O AG é indicado para a solução de problemas de otimização complexos, NP - Completos, problemas com muitas variáveis e espaços de soluções de dimensões elevadas, como no planejamento ótimo de produção de POL para uma usina. Além disso, em muitos casos em que outras estratégias de otimização falham na busca de uma solução, os AG's convergem. Os AG's são numericamente robustos, isto é, não são sensíveis a erros de arredondamento em seus resultados finais (MIRANDA, 2007).

Uma das vantagens de um algoritmo genético é a simplificação permitida na formulação e solução de problemas de otimização. Os AG's simples normalmente trabalham com descrições de entrada formadas por cadeias de bits de tamanho fixo.

O termo usado para representar uma possível solução em um algoritmo genético é cromossomo (embora também seja muito usada a palavra indivíduo). Cada cromossomo é composto de genes que representam cada uma das propriedades do indivíduo. O cromossomo pode ser visto como um conjunto de parâmetros para uma possível solução, cada parâmetro é um gene (ÁVILA, 2002).

Cada cromossomo corresponde a um ponto no espaço de possíveis soluções do problema de otimização. O processo de solução adotado nos algoritmos genéticos consiste em gerar, por meio de regras específicas, um grande número de indivíduos, *população*, de forma a promover uma varredura tão extensa quanto necessária do espaço de soluções.

Um algoritmo genético inicia-se com a criação de uma população de cromossomos, que pode ser obtida por processo aleatório ou não. Essas estruturas são avaliadas e associadas a uma probabilidade de reprodução de tal forma que as maiores probabilidades são associadas aos cromossomos que representam uma melhor solução para o problema de otimização, os chamados “indivíduos mais aptos”. A *aptidão* (ou *fitness*) da solução é tipicamente definida em relação à população corrente. Geralmente a aptidão é calculada a partir da função objetivo. As condições de reprodução são relacionadas com a *aptidão* de cada indivíduo. Os mais aptos terão maior probabilidade de serem selecionados para reprodução e construção da nova geração de indivíduos (soluções). O algoritmo genético originalmente proposto tem os seguintes passos:

1. Obtenção da população inicial (aleatória ou construtiva);
2. Cálculo da aptidão de cada indivíduo e criação da elite;
3. Seleção dos indivíduos para a reprodução;
4. Aplicação dos operadores genéticos: “crossover”, mutação e elitismo;
5. Obtenção da nova população.

6. Teste de parada: Se satisfeito, a solução é a elite, senão passo 7.

7. Atualização da elite, volte ao passo 2.

A seguir são discutidos os passos do algoritmo genético:

4.5.1 Inicialização

Nessa etapa, define-se a estrutura do cromossomo, o número de gerações a serem utilizadas e o número de indivíduos da população. Cria-se também a população inicial, em que uma população de n indivíduos é gerada aleatoriamente ou de forma construtiva. Cada um dos indivíduos da população representa uma possível solução para o problema, ou seja, um ponto no espaço de soluções.

4.5.2 Cálculo da aptidão

Geralmente a aptidão do indivíduo é determinada por meio do cálculo da função objetivo, que depende das especificações de projeto. Nessa fase, os indivíduos são ordenados conforme a sua aptidão. Considera-se também no cálculo da aptidão se o indivíduo gerado pertence ou não ao conjunto de soluções. Caso não pertença, o indivíduo sofre uma penalização no valor da função objetivo.

4.5.3 Seleção

Os indivíduos mais aptos da geração atual são selecionados. Eles são utilizados para gerar uma nova população por cruzamento (“*crossover*”). Cada indivíduo tem uma probabilidade de ser selecionado proporcional a sua aptidão. Existem vários procedimentos para selecioná-los, um bastante utilizado é o Método da Roleta (utilizado neste trabalho). Esse método consiste em sortear um indivíduo a partir de uma roleta, onde cada partição do círculo representa a aptidão de um indivíduo da seguinte forma: considere um círculo dividido em n regiões (tamanho da população), onde a área é proporcional à aptidão do indivíduo (Figura 3); coloca-se sobre esse

círculo uma "roleta" com j cursores, igualmente espaçados; após um giro da roleta, a posição dos cursores indica os indivíduos selecionados. Esse método é denominado amostragem universal estocástica. Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem maior área terão maior probabilidade de serem selecionados.

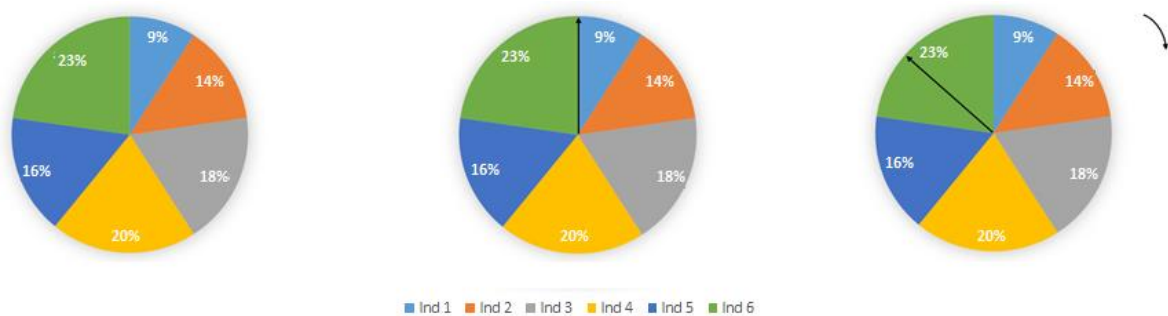


Figura 3: Seleção dos indivíduos para realizar o “crossover”.

Ind1, Ind 2, Ind 3, Ind 4, Ind 5 e Ind 6 representam os indivíduos 1, 2, 3, 4, 5, e 6 respectivamente.

4.5.4 Cruzamento (Crossover)

Os indivíduos selecionados na etapa anterior são cruzados entre si. Uma forma bastante comum de fazer esses cruzamentos é: cria-se duas listas aleatórias com os indivíduos selecionados, a segunda delas é chamada lista de parceiros. Cada indivíduo da primeira lista é cruzado com o indivíduo que ocupa a mesma posição na lista de parceiros. A forma como se realiza esse cruzamento é ilustrada na Figura 4. Os cromossomos de cada par de indivíduos são particionados em um ponto, chamado ponto de corte, sorteado aleatoriamente. Um novo cromossomo é gerado permutando-se a metade inicial de um cromossomo com a metade final do outro.

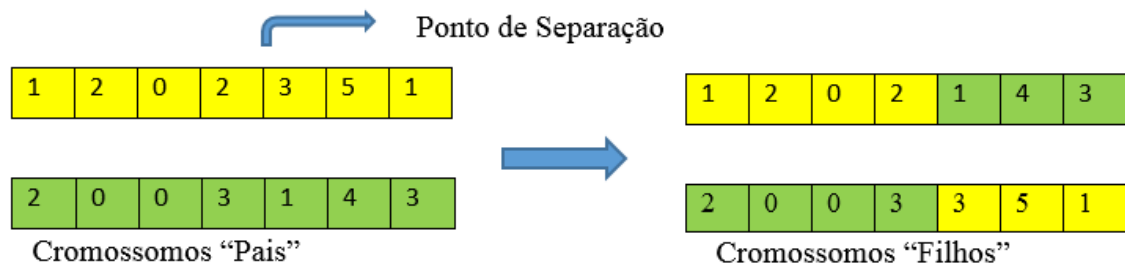


Figura 4: Processo de crossover de um ponto

Há vários tipos de *crossover*, no entanto, os quatro mais conhecidos são: *crossover* de um-ponto, *crossover* de dois-pontos, *crossover* de n -pontos e *crossover* uniforme (LIVRAMENTO 2004). Neste trabalho, utilizar-se-á o *crossover* de um ponto.

- *Crossover* de um ponto: seja m o tamanho do cromossomo pai, um ponto de corte k é escolhido aleatoriamente e cada filho será composto pelo prefixo de tamanho k de um pai e do sufixo de tamanho $m-k$ do outro pai. Como na Figura 4.
- *Crossover* de dois pontos: semelhante ao *crossover* de um ponto, no entanto, duas posições são selecionadas e apenas os genes entre essas posições são trocados.
- *Crossover* de n pontos: A diferença entre esse método e os anteriores é que n posições são selecionadas e apenas os genes localizados entre as posições ímpares e pares são trocados. Os genes entre as posições pares e ímpares permanecem inalterados conforme a Figura 5.

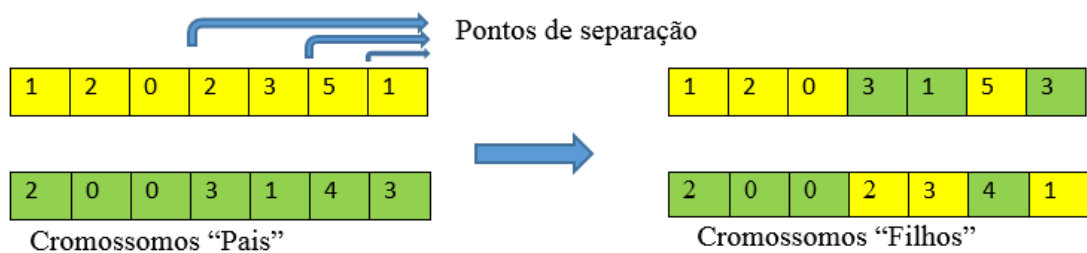


Figura 5: Processo de crossover com 3-pontos

4.5.5 Mutação

A operação de mutação é utilizada para garantir uma maior varredura do espaço de estados e evitar que o algoritmo genético convirja muito cedo para mínimos (ou máximos) locais. A mutação é efetuada alterando-se o valor de um gene de um indivíduo sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação. Com esse mecanismo, vários indivíduos da nova população podem ter um ou mais de seus genes alterados aleatoriamente. A Figura 6 ilustra o processo de mutação:

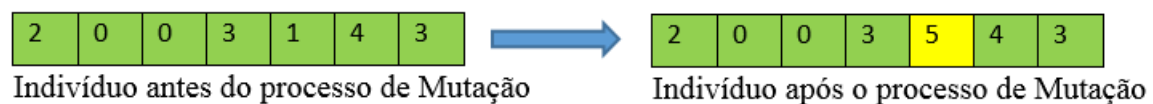


Figura 6: Processo de Mutação.

4.5.6 Elitismo

O método de Elitismo foi primeiramente introduzido por Jong (1975) e é uma adição aos vários métodos de seleção que forçam os AG's a reterem um certo número de "melhores" indivíduos em cada geração. Esses indivíduos podem ser perdidos se forem selecionados para reprodução ou se forem destruídos por cruzamento ou mutação. O Elitismo consiste basicamente em realizar a etapa de seleção em duas partes:

1. Seleciona uma elite de membros entre os melhores da população inicial os quais poderão ser incorporados diretamente na população final, sem passar pela população auxiliar.
2. A população auxiliar é selecionada entre os membros restantes da população inicial, junto com os membros da elite.

Esse processo força a cópia do melhor cromossomo de cada geração a permanecer na geração seguinte, uma vez que reduz o efeito aleatório do processo seletivo. Isso garante a presença do melhor membro de uma população na próxima geração e repassa bons genes aos novos indivíduos.

4.5.7 Teste de parada

Em todo problema de otimização, o ideal seria que o algoritmo genético terminasse assim que a solução ótima fosse encontrada. Todavia, na maioria dos casos de interesse, não é possível afirmar com certeza se uma determinada solução corresponde a um ótimo global. Por esse motivo, o critério de parada mais utilizado é o número de gerações previamente estabelecido. Outras metodologias baseiam-se no próprio acompanhamento do processo evolutivo, isto é, enquanto não houver melhoria na média da população depois de um número pré-definido de gerações, o processo evolutivo finaliza (Koza, 1992).

4.5.8 Escolha dos parâmetros do AG

Além da forma como o cromossomo é codificado, existem vários parâmetros do algoritmo genético que podem ser escolhidos para melhorar o seu desempenho, que os adaptam às características particulares de determinadas classes de problemas. Entre eles, os mais importantes são: o tamanho da população, o número de gerações, a porcentagem de indivíduos para “crossover” e a probabilidade de mutação. A influência de cada parâmetro no desempenho do algoritmo depende da classe de problemas tratada. A determinação de um conjunto de valores otimizado para esses parâmetros dependerá da realização de um grande número de experimentos e testes. Na literatura como exemplo (Holland, 1992), os valores encontram-se geralmente entre 60 a 80% para a porcentagem de indivíduos para “crossover” e entre 0,1 e 5% para a probabilidade de mutação. O tamanho da população e o número de gerações dependem da complexidade do problema de otimização e devem ser determinados experimentalmente. No entanto, deve-se observar que o tamanho da população e o número de gerações definem diretamente o tamanho do espaço de busca a ser coberto. Existem estudos que utilizam um AG como método de otimização para a escolha dos parâmetros de outro AG devido à importância da escolha correta desses parâmetros.

O controle sobre os parâmetros do algoritmo é de fundamental importância para uma convergência rápida e segura. Para alguns problemas específicos, aconselha-se a utilização de algoritmos híbridos, que misturam as técnicas dos AG's com os métodos de otimização tradicionais.

4.5.9 Convergência

Existem alguns problemas em relação à convergência do algoritmo:

- Convergência prematura: como a população é finita, às vezes indivíduos de alta aptidão (mas não de aptidão ótima) levam AG a convergir para um ponto ótimo local e não global.
- Convergência lenta: quando a aptidão dos melhores indivíduos é próxima da média da população (costuma ocorrer perto do fim do algoritmo), a convergência pode tornar-se lenta. Esse problema, muitas vezes, pode ser melhorado com o uso de migração, em que novos indivíduos são criados e introduzidos na população.

Para amenizar esses problemas, é preciso modificar o modo de seleção de indivíduos para reprodução.

4.5.10 Tamanho da População

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Com uma população pequena, o desempenho pode cair, pois desse modo, a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema e previne convergências prematuras para soluções locais em vez de globais. Entretanto, para se trabalhar com grandes populações, são necessários maiores recursos computacionais ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior.

4.5.11 Taxa de Cruzamento

Quanto maior for a taxa de cruzamento, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população, mas se essa taxa for muito alta,

haverá as seguintes consequências: estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente e a maior parte da população será substituída. Entretanto, a ocorrência dessa substituição com valores muito altos pode causar perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor muito baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

4.5.12 Taxa de Mutação

Uma baixa taxa de mutação previne a estagnação de um valor, além de possibilitar a chegada a qualquer ponto do espaço de busca. Com uma taxa muito alta, a busca se torna essencialmente aleatória.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho, foram coletados dados de temperatura medidos por um termógrafo Filotécnico da marca Milano, no período de 1997 a 2006, na Estação Agrometeorológica da Faculdade de Ciências Agronômicas UNESP - Botucatu. Com a finalidade de comparar regiões produtoras, foram coletados dados de temperatura horária, cedidos pelo INMET para a região de Votuporanga, no período de 2004 a 2014.

As implementações computacionais deste trabalho foram desenvolvidas com o uso dos softwares Matlab (versão 7.4.0 R2007a) e Excel 2007, em micro-computadores Core 2 Quad, com 2GB de memória e 250 GB de disco rígido do Laboratório Científico de Informática (LCI) pertencentes ao Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu.

Os dados foram organizados em planilhas do programa Excel 2007 e separados por anos. Essas planilhas foram utilizadas nos programas para entrada de dados. Com os dados de temperaturas horárias desse período, foram calculadas as médias e o desvio-padrão das temperaturas horárias, a fim de se realizar análises estatísticas da distribuição dos dados. Com o software Matlab (versão 7.4.0 R2007a), foram calculados os Graus-dias e os Graus-dias acumulados para o período analisado (1997 – 2006) por meio do método de 3/8 de Simpson. Essas informações foram o alicerce para calcular os Graus-dias médios, base de dados climáticos do modelo matemático desse trabalho. Para o cálculo dos Graus-dias foram considerados os dados da temperatura base inferior (T_b) 18°C e temperatura base superior (T_B) 35°C.

Com essa base de dados de Graus-dias e Graus-dias acumulados, ajustaram-se funções do segundo grau para descrever o comportamento do teor de POL de cada variedade de cana-de-açúcar em função dos Graus-dias acumulados em um período t . Foram utilizados polinômios de segundo grau, devido ao comportamento do teor de POL ao longo do desenvolvimento da planta. O ponto de máximo desse polinômio coincide com o ponto de máximo da curva de maturação da cana. Este pode variar de acordo com o período de plantio e o tipo de variedade (precoce, média e tardia), como observado no capítulo anterior.

A Tabela 5, apresenta os dados médios de 18 variedades adaptáveis ao clima e solo da região de Botucatu, as quais foram utilizadas para validação do modelo de otimização (1)-(14).

Tabela 5: Dados médios do primeiro corte das variedades utilizadas para implementação do modelo.

i	Variedades	Produtividade (t.ha ⁻¹)	POL (%)	Fibra (%)	Período Recomendado para Colheita
1	CTC 15	132,80	14,50	12,36	julho- dezembro
2	CTC 9	100,00	15,84	12,34	abril- julho
3	RB925211	89,29	14,67	12,30	maio - agosto
4	CTC 6	136,00	14,98	11,16	agosto -dezembro
5	RB855156	117,80	14,50	12,41	abril - maio
6	CTC2	129,10	14,31	12,21	junho - outubro
7	RB857515	148,20	14,82	11,47	julho - dezembro
8	SP80-1842	112,80	14,90	12,90	junho - outubro
9	SP83-2847	126,70	13,20	12,74	julho - dezembro
10	SP80-3280	121,70	14,80	11,30	julho - dezembro
11	RB928062	113,00	15,75	12,38	setembro - dezembro
12	RB966928	123,10	13,32	11,97	abril - julho
13	CTC 20	165,00	13,50	11,50	maio - dezembro
14	CTC 17	112,30	14,98	12,38	abril - agosto
15	SP81-3250	140,60	15,02	12,91	junho - outubro
16	CTC 4	130,90	13,54	11,80	junho - novembro
17	RB92579	142,40	15,70	12,93	julho - outubro
18	RB855453	133,35	13,90	12,38	abril - julho

Fonte: Ramos (2014)

Para representar os teores de Fibra e a produção total, funções de segundo grau também foram ajustadas em conformidade com os Graus-dias acumulados. Apesar da planta não diminuir sua produção com o acúmulo de Graus-dias, optou-se por essa função com o objetivo de haver uma penalização, pois caso a cana-de-açúcar seja colhida com um valor elevado de GDA os riscos de florescimento tornar-se-ão maiores, o que ocasiona grandes perdas. Todas essas funções foram utilizadas no modelo matemático a seguir.

5.1 Modelo matemático

5.1.1 Problema: Planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar

O problema consiste em planejar a variedade e o período de plantio em uma determinada área, assim como o período de colheita em um horizonte de quatro cortes, com o intento de maximizar a produção de açúcar fermentescível. Ou seja, com n variedades adaptáveis ao clima e tipo de solo, deseja-se determinar o período e a variedade a ser plantada em cada um dos k talhões, como também o período para o corte da cana plantada em cada talhão, durante quatro anos, de forma a maximizar a produção de POL.

Para o auxílio na resolução desse problema, propõe-se um modelo matemático baseado no cálculo dos Graus-dias necessários com a intenção de que a produção de POL seja máxima. A seguir, há a definição de algumas funções utilizadas no modelo.

Graus-dias

Seja $GDA(t_{c-1}, t_c)$ a função que determina os Graus-dias acumulados no período entre t_{c-1} e t_c , em que t_0 representa o período de plantio e t_c , $c = 1, 2, 3, 4$ é o período em que ocorreu o corte c .

5.1.2 POL%Cana em função dos Graus-dias

Sabe-se que o teor de POL%Cana de cada variedade depende dos Graus-dias acumulados no período de cultivo. A produção de POL%Cana inicia com um valor de Graus-dias acumulado igual a G_I e aumenta até um valor de Graus-dias acumulados G_O em que ocorre a máxima produção de POL%Cana. A partir desse valor, a produção começa a decrescer até atingir G_S Graus-dias acumulados, conforme Figura 7.

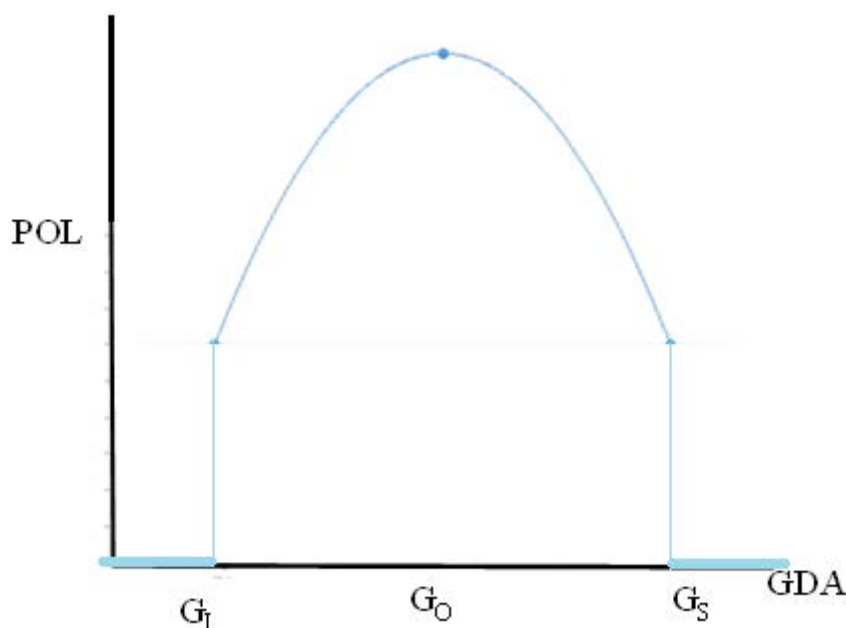


Figura 7: Variação do teor de POL%Cana em função dos Graus-dias acumulados

Denota-se como $f_{pol}(GDA)$ a função auxiliar utilizada para penalizar a produção de POL%Cana. Quando GDA é diferente de G_O , $f_{pol}(GDA)$ assume valores diferentes para as variedades de cana de ano e cana de ano e meio. Essa função foi ajustada por um polinômio de segundo grau que assume valor máximo igual a 1, quando o GDA da variedade é igual a G_O ; e zero nos pontos menores a G_I ou maiores a G_S , conforme definido a seguir:

Para cana de ano:

$$f_{pol}(GDA) = \begin{cases} -2,22 \cdot 10^{-6} \cdot (GDA)^2 + 0,00555 \cdot (GDA) - 2,4722, & \text{se } G_I < GDA < G_S \\ 0, & \text{se } GDA \leq G_I \text{ ou se } GDA \geq G_S \end{cases}$$

Para cana de ano e meio:

$$f_{pol}(GDA) = \begin{cases} -2,22 \cdot 10^{-6} \cdot (GDA)^2 + 0,006722 \cdot (GDA) - 3,355, & \text{se } G_l < GDA < G_s \\ 0, & \text{se } GDA \leq G_l \text{ ou se } GDA \geq G_s \end{cases}$$

Logo, para cada variedade i , a produção de POL, em função dos Graus-dias no c -ésimo corte, pode ser estimada ao se multiplicar a sua produtividade de POL pelo valor da função auxiliar $f_{pol}(GDA)$, conforme descrito a seguir:

$$f_{pi}^P(i, GDA) = Pol_{ic} \cdot f_{pol}(GDA)$$

5.1.3 Produção de cana em função dos Graus-dias

Para a produção de cana, realizou-se um estudo similar ao desenvolvido para o teor de POL. No entanto, a produção da cana é crescente até G_O Graus-dias acumulados, a partir desse valor, a produção permanece constante. Porém com o fim de evitar riscos de florescimento os quais normalmente ocorrem para valores elevados de GDA (a partir de G_O), utilizou-se a função auxiliar $f_{prod}(GDA)$, a qual penalizará cortes realizados após atingir G_O Graus-dias acumulados. Dessa forma, sabendo-se que $Prod_{ic}$ é a produtividade da cana de variedade i no c -ésimo corte, propõe-se o cálculo da produtividade da cana em função dos Graus-dias da seguinte forma:

$$f_{prod}^P(i, GDA) = Prod_{ic} \cdot f_{prod}(GDA)$$

Em que, para cana de ano, temos:

$$f_{Prod}(GDA) = -2,22 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,05555 \cdot (GDA) - 33,72 \quad (I)$$

E para cana de ano e meio temos:

$$f_{Prod}(GDA) = -2,2 \cdot 10^{-4} \cdot (GDA)^2 + 0,0688 \cdot (GDA) - 52,3888 \quad (II)$$

5.1.4 Teor de Fibra em função dos Graus-dias

O teor de fibra da cana é sempre crescente em função dos Graus-dias acumulados. Por isso, ajustou-se a função polinomial de grau três para determinar a função auxiliar $f_{Fib}(GDA)$, com a finalidade de auxiliar o cálculo do teor de FIBRA em função dos Graus-dias acumulados. Essa função está definida a seguir:

Para cana de ano, a função auxiliar $f_{Fib}(GDA)$ é definida como:

$$f_{Fib}(GDA) = 7,55 \cdot 10^{-8} \cdot (GDA)^3 - 4,04 \cdot 10^{-4} (GDA)^2 + 0,7214 \cdot (GDA) - 428,42$$

E para cana de ano e meio:

$$f_{Fib}(GDA) = 6,19 \cdot 10^{-8} \cdot (GDA)^3 - 2,52 \cdot 10^{-4} (GDA)^2 + 0,3425 \cdot (GDA) - 154$$

O teor de fibra em função dos Graus-dias acumulados para cada variedade i no c -ésimo corte é calculado multiplicando-se a produtividade de fibra da variedade pela função auxiliar $f_{Fib}(GDA)$, conforme descrito a seguir:

$$f_{Fi}^P(i, GDA) = Fib_{ic} \cdot f_{Fib}(GDA)$$

5.1.5 Modelo

Sejam $x_{ij\bar{t}}$ e y_{jt_c} as variáveis do modelo, tais que:

$$x_{ij\bar{t}} = \begin{cases} 1, & \text{se a variedade } i \text{ é plantada no talhão } j \text{ no instante } \bar{t} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{jt_c} = \begin{cases} 1, & \text{caso a cana do talhão } j \text{ seja cortada no tempo } t_c \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde $\bar{t}$ pertence ao intervalo adequado de plantio correspondente aos dias dos meses de janeiro, fevereiro, março, setembro e outubro ($I_{plantio}$). Segue o modelo proposto:

$$\begin{aligned}
\text{maximizar } & \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{\bar{t} \in I_{plantio}} \sum_{t_1=\bar{t}}^{\bar{t}+600} (x_{ij\bar{t}} \cdot y_{jt_1} \cdot f_{pi}^P(GDA(\bar{t}, t_1))) \cdot L_j \\
& + \sum_{t_2=t_1}^{t_1+420} (y_{jt_2} \cdot f_{pi}^P(GDA(t_1, t_2))) \cdot L_j \\
& + \sum_{t_3=t_2}^{t_2+420} (y_{jt_3} \cdot f_{pi}^P(GDA(t_2, t_3))) \cdot L_j \\
& + \sum_{t_4=t_3}^{t_3+420} (y_{jt_4} \cdot f_{pi}^P(GDA(t_3, t_4))) \cdot L_j
\end{aligned} \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\bar{t} \in I_{plantio}} x_{ij\bar{t}} = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \tag{2}$$

$$\bar{t}_j = \sum_{i=1}^n \sum_{\bar{t} \in I_{plantio}} x_{ij\bar{t}} \cdot i \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \tag{3}$$

$$t_{0j} = \sum_{\bar{t} \in I_{plantio}} x_{\bar{t}j\bar{t}} \cdot \bar{t} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \tag{4}$$

$$\sum_{t=t_0}^{t_0+600} y_{jt} = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \tag{5}$$

$$t_{1j} = \sum_{t=t_0}^{t_0+600} y_{jt} \cdot t \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \tag{6}$$

$$\sum_{t=t_{c-1}}^{t_{c-1}+420} y_{jt} = 1 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \text{ e } c = 2, 3, 4 \tag{7}$$

$$t_{cj} = \sum_{t=t_{c-1}}^{t_{c-1}+420} y_{jt} \cdot t \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \text{ e } c = 2, 3, 4 \tag{8}$$

$$M_I \leq \sum_{j=1}^k y_{jt_{cj}} f_{prodi_j}^P(GDA(t_{c-1}, t_c)) \cdot Fi_{ijc} \cdot L_j \leq M_S \quad \text{para } c = 1, 2, 3, 4 \tag{9}$$

$$F_l \leq \sum_{j=1}^k y_{jt_{c_j}} f_{Fi_j}^P(GDA(t_{c-1}, t_c)) \cdot L_j \leq F_s \text{ para } c = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{\bar{t} \in I_{plantio}} x_{ij\bar{t}} \cdot L_j \leq 0,15 \cdot \sum_{j=1}^k L_j \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$x_{ijt} = 1 \text{ ou } 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad t = 1, 2, \dots, 1825 \quad (12)$$

$$y_{jt} = 1 \text{ ou } 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad t = 1, 2, \dots, 1825 \quad (13)$$

$$I_{plantio} = \{1, 2, \dots, 120, 244, 245, \dots, 304\} \quad (14)$$

Relembrando as funções definidas anteriormente temos:

$$GDA(t) = GDA(t_{c-1}, t_c) \quad c = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

$$f_{pi}^P(i, GDA) = \begin{cases} 0, & \text{se } GDA < G_l \text{ ou se } GDA > G_s \\ Pol_{ic} \cdot f_{Pol}(GDA), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (16)$$

$$f_{Pol}(GDA) = -2,22 \cdot 10^{-6} \cdot (GDA)^2 + 0,00555 \cdot (GDA) - 2,4722 \quad (17a)$$

$$f_{Pol}(GDA) = -2,22 \cdot 10^{-6} \cdot (GDA)^2 + 0,006722 \cdot (GDA) - 3,355 \quad (17b)$$

$$f_{prod}^P(i, GDA) = \begin{cases} 0, & \text{se } GDA < G_l \text{ ou se } GDA > G_s \\ Prod_{ic} \cdot f_{Prod}(GDA), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (18)$$

$$f_{Prod}(GDA) = -2,22 \cdot 10^{-5} \cdot (GDA)^2 + 0,05555 \cdot (GDA) - 33,72 \quad (19a)$$

$$f_{Prod}(GDA) = -2,2 \cdot 10^{-4} \cdot (GDA)^2 + 0,0688 \cdot (GDA) - 52,3888 \quad (19b)$$

$$f_{Fi}^P(i, GDA) = \begin{cases} 0, & \text{se } GDA < G_l \text{ ou se } GDA > G_s \\ Fib_{ic} \cdot f_{Fib}(GDA), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (20)$$

$$f_{Fib}(GDA) = 7,55 \cdot 10^{-8} \cdot (GDA)^3 - 4,04 \cdot 10^{-4} (GDA)^2 + 0,7214 \cdot (GDA) - 428,42 \quad (21a)$$

$$f_{Fib}(GDA) = 6,19 \cdot 10^{-8} \cdot (GDA)^3 - 2,52 \cdot 10^{-4} (GDA)^2 + 0,3425 \cdot (GDA) - 154 \quad (21b)$$

Temos que: $i = 1, 2, \dots, n$ são índices associados as variedades; $j = 1, 2, \dots, k$ índices associados aos talhões; $t = 1, 2, \dots, 1825$ são os índices associados aos períodos em dias, ou seja, o horizonte de planejamento é de 1825 dias (5 anos); $GDA(t)$ são os Graus-dias acumulados no intervalo $[t_{c-1}, t_c]$; L_j é a área de cada talhão j em ha; Pol_{ic} é a quantidade POL da variedade i no corte c em ton . ha⁻¹; $Prod_{ic}$ representa a variedade i no corte c em ton . ha⁻¹; Fib_{ic} é o teor de fibra da variedade i no corte c ; F_I e F_S são os limitantes inferior e superior, estabelecidos para a fibra da cana em qualquer tempo, em geral para região Centro Sul brasileira usa-se $F_I = 8\%$ e $F_S = 14\%$; M_I e M_S são as capacidades mínima e máxima da indústria para moagem da cana; G_I e G_S representam respectivamente os Graus-dias acumulados mínimo e máximo em que é viável o corte da cana-de-açúcar.

O modelo determina em qual período t e qual a variedade i de cana-de-açúcar deverá ser plantada em cada talhão j , de forma a maximizar a função objetivo (1), isto é, maximizar a produção de açúcar (POL) da cana nos 4 cortes. As restrições (2) garantem que haverá plantio da cana em todo talhão j no primeiro ano, no período propício, que inclui os meses de setembro e outubro ($244 \leq t \leq 304$) (cana de ano) ou os meses de janeiro, fevereiro, março e abril ($t \leq 120$) (cana de ano e meio). As Equações (3) definem $\bar{t}_j$, ou seja, a variedade a ser plantada no talhão j . As Equações (4) definem t_{0j} , isto é, o dia de plantio em cada talhão j no ano 1. As restrições (5) garantem que haverá colheita da cana plantada em cada talhão j no primeiro corte. As Equações (6) definem t_{1j} , ou seja, o período com o primeiro corte no talhão j . As restrições (7) garantem que haverá a colheita da cana em todos os talhões nos cortes 2, 3, 4. As Equações (8) definem t_{cj} , $c = 2, 3, 4$, isto é, o período que haverá colheita da cana em cada talhão j nos segundo, terceiro e quarto cortes. As restrições (9) garantem que seja satisfeita a capacidade da usina para moagem de cana em todos os períodos de colheita, desde que se respeite a capacidade máxima e mínima estabelecidas pela indústria. As restrições (10) garantem que sejam satisfeitos os limitantes inferior e superior de fibra requerida pela usina em todos os anos do planejamento. As restrições (11) garantem que as variedades sejam plantadas no máximo em 15% da área total destinada ao plantio. As restrições (12) e (13) definem as variáveis do problema como variáveis binárias.

O problema (1)-(14) é um PPNLI 0-1 de difícil resolução, principalmente quando se tem números elevados de talhões e variedades. O número de talhões nas usinas atuais lhe inviabilizam a resolução por técnicas de otimização exatas, por isso deve-se investigar métodos heurísticos para determinar boas soluções factíveis. Consequentemente, propomos o uso do algoritmo genético, GA_GD.

5.2 Algoritmo Genético (GA_GD)

Algoritmo GA_GD:

1) Estruturação do cromossomo (ou indivíduo *Ind*):

No algoritmo GA_GD, propõem-se a criação dos indivíduos da população por uma matriz de dimensão $6 \times k$. As colunas dessa matriz representam os talhões. A primeira linha guarda a variedade plantada em cada talhão, a segunda representa o período de plantio em cada talhão e as demais representam os períodos em que foram realizados o primeiro, segundo, terceiro e quarto cortes. Os períodos destinados para o corte em cada ano são determinados aleatoriamente no intervalo de abril à dezembro.

A Figura 8 ilustra um indivíduo que representa um planejamento de uma área com k talhões, em que a variedade 3 foi plantada no talhão 1 (primeira linha), no dia 28 (28/01, segunda linha), ou seja, cana de ano e meio (18 meses). Por isso, ela pode ser colhida no período de abril a agosto (no intervalo de 428 a 580 dias). O primeiro corte dessa variedade foi realizado em maio (475 dias correspondentes a data de 18/05). Após o primeiro corte, a cana começa a ser colhida aproximadamente com 12 meses, ou seja, dentro de um intervalo de 10 a 14 meses após o corte anterior. O segundo corte pode ser realizado entre os meses de abril (11 meses) e julho (14 meses), com 855 dias equivalente ao 02/06. O terceiro corte pode ser realizado entre os meses de abril (10 meses) e agosto (14 meses). O terceiro corte ocorreu no 1255 dia o qual representa a data de 07/06. Houve o quarto corte entre os meses de abril (10 meses) e agosto (14 meses), porém ocorreu no 1610 dia (27/06).

	1	2	...	k	
i	3	8		7	Variedade
t ₀	28	245		240	Plantio
t ₁	475	605		600	1º Corte
t ₂	855	1000		960	2º Corte
t ₃	1255	1395		1320	3º Corte
t ₄	1610	1745		1680	4º Corte

Figura 8: Estrutura do Cromossomo (ou indivíduo)

2) Geração da população inicial:

O segundo passo vincula-se a geração da população inicial composta de NP indivíduos. Para cria-los, escolhe-se aleatoriamente, entre as variedades adaptáveis ao solo local e enumeradas $1, \dots, n$, quais e em que período serão plantadas nos k talhões. Os dias de colheita são escolhidos aleatoriamente, respeitando as restrições de períodos de corte para cada talhão (abril à dezembro). Após a criação da população inicial, todos os indivíduos são avaliados.

3) Avaliação dos indivíduos:

A avaliação de cada indivíduo é feita a partir do valor de sua aptidão (ou *fitness*). O *fitness* de cada indivíduo é medido da seguinte forma:

$$f_{Ind} = \frac{FO_{Ind}}{p_{Ind}},$$

em que f_{Ind} é o *fitness* do indivíduo Ind , FO_{Ind} é o valor da função objetivo (1), calculada com os dados apresentados pelo indivíduo Ind ; p_{Ind} é a penalização no caso do indivíduo Ind ser ineficaz. p_{Ind} é 1, se o indivíduo for eficaz e assume um valor real maior que zero, se for uma solução ineficaz. O valor de p_{Ind} para indivíduos ineficazes é proporcional a ineficácia da solução: quanto maior a ineficácia, maior é o valor de p_{Ind} , ou seja, para cada indivíduo contabiliza-se o número de ineficácias, esse total é somado, resultando em p_{Ind} .

Em todas as iterações, uma cópia do melhor indivíduo, com maior aptidão, é armazenada em um campo chamado elite. A cada iteração, seleciona-se

o indivíduo mais apto, comparando-o com a elite anterior, e a elite é atualizada. Após todos os indivíduos serem avaliados, são aplicados os operadores genéticos.

4) Seleção:

Nesse algoritmo, em todas as iterações, copia-se parte da população ($P_c\%$) em uma população intermediária para realizar *crossover*. A seleção dos indivíduos a serem copiados é realizada pelo método da roleta. Nesse método a probabilidade de um indivíduo ser selecionado para o processo de *crossover* é diretamente proporcional ao valor de seu *fitness*, ou seja, indivíduos com valores elevados para o *fitness* tem maior probabilidade de sofrer *crossover*.

5) Operadores genéticos:

Os indivíduos da população evoluem de acordo com operadores genéticos de cruzamento (*crossover*) e mutação, de forma que promova uma tendência dos indivíduos representarem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua.

Crossover: No algoritmo GA_GD o *crossover* é feito com a escolha aleatória de dois dos indivíduos copiados pela seleção (pai 1 e pai 2). Em seguida, realiza-se um sorteio aleatório de um local de corte entre as colunas das matrizes representantes desses indivíduos. Esse processo auxilia a separação dos genes que formarão dois novos indivíduos (filho 1 e filho 2), conservando características dos pais, como pode ser observado na Figura 9.

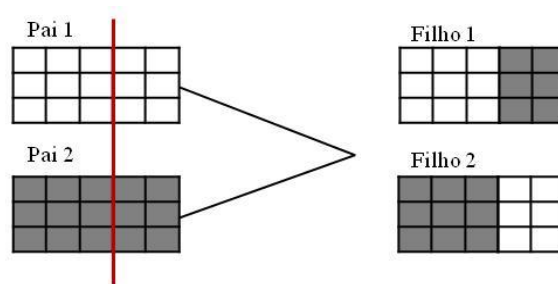


Figura 9: Processo de crossover

Mutação: depois de passar pelo *crossover*, escolhem-se aleatoriamente indivíduos da geração atual para a mutação. Nesse algoritmo, procede-se um sorteio para cada indivíduo da população, utilizando $pm = 0,05$. Caso o valor sorteado seja menor que pm ,

há mudança no valor de algum de seus genes. Se a mudança for favorável, procede-se o sorteio (ou escolha ou troca) de qual gene terá mudança, assim como o novo valor a ser inserido nesse gene. Feito isso, os indivíduos são reavaliados (Calcula-se o *fitness*), como ilustra a Figura 10.

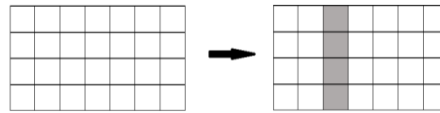


Figura 10: Processo de mutação

6) Nova População:

Entre os indivíduos da população anterior e os filhos gerados a partir dos operadores genéticos, escolhem-se os **NP** melhores indivíduos que formarão a nova população.

Os indivíduos da nova população são avaliados e a elite é atualizada.

7) Parada

A parada é feita pelo número de gerações. O processo é repetido, a partir do Passo 4, um número G vezes e a solução ótima aproximada é a que apresentar a melhor aptidão na elite da geração final.

Essa metodologia foi aplicada a duas regiões produtoras: Botucatu, que apresenta baixas temperaturas ao longo do ano, e Votuporanga com elevadas temperaturas. Os resultados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

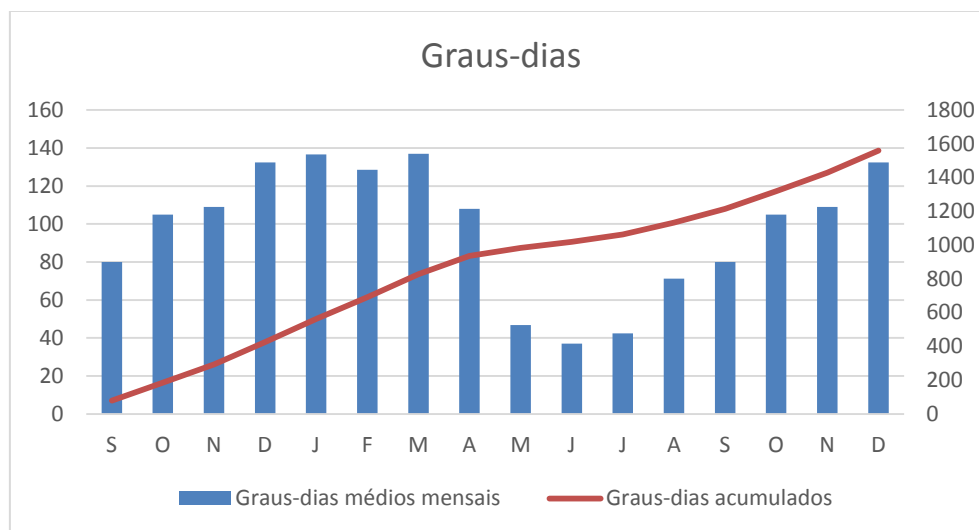
Neste capítulo são apresentados os principais resultados da aplicação da metodologia proposta para o planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar utilizando o método de Graus-dias. A princípio foi feito o cálculo dos Graus-dias e este foi utilizado na implementação do AG_GD para resolução do modelo (1)-(21) proposto, os resultados foram comparados para duas regiões produtoras, Botucatu (que apresenta temperaturas amenas) e Votuporanga (com temperaturas elevadas).

6.1 Cálculo dos Graus-dias

Para resolução do modelo (1)-(21), inicialmente foram calculados os Graus-dias médios para a cultura da cana-de-açúcar, para um período de dez anos (1997 a 2006) para a região de Botucatu –SP e (2004 a 2014) para região de Votuporanga - SP. Foram utilizadas como temperaturas base mínima e máxima os valores de 18°C e 35°C, respectivamente. A seguir foram calculados, conforme descrito no Capítulo 4, os Graus-dias acumulados para serem usados como estimativas dos Graus-dias dos dois períodos de plantio. As Tabelas 1 e 2 do Apêndice apresentam os resultados obtidos para a região de Botucatu e as Tabelas 3 e 4 do Apêndice apresentam os resultados para a região de Votuporanga.

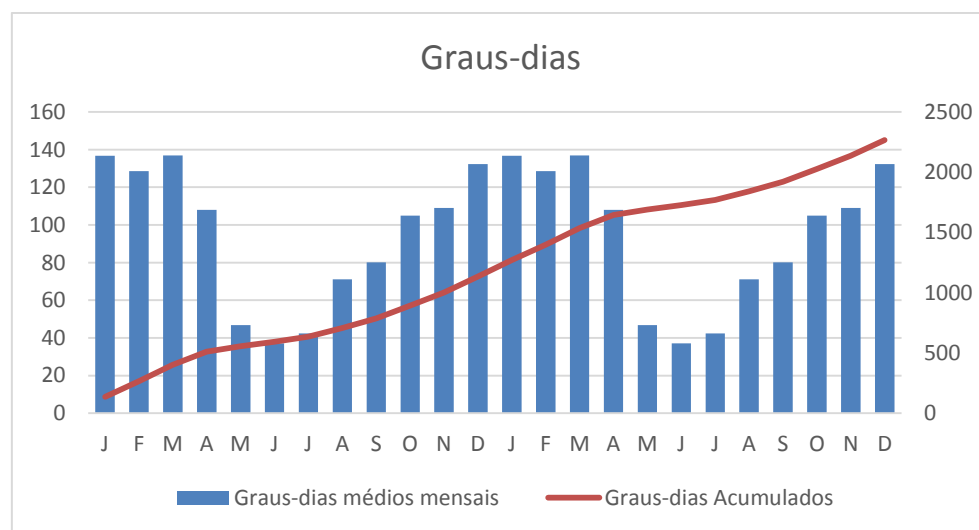
Como pode ser observado nas Figuras 11 e 12, para a região de Botucatu, ao longo do ano temos um acúmulo maior de Graus-dias médios no período

de setembro a março, meses em que ocorre o plantio da cana, e um baixo acúmulo no período de abril a agosto, nesta fase do ano a planta diminui sua taxa de crescimento para acumular sacarose. As Figuras 11 e 12 ilustram o acúmulo dos Graus-dias para dois cenários com diferentes épocas de plantio na região de Botucatu.



A sequência S O N D ... representa a sequência de meses do ano, onde S= setembro, O=outubro, ...

Figura 11: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano (região de Botucatu)

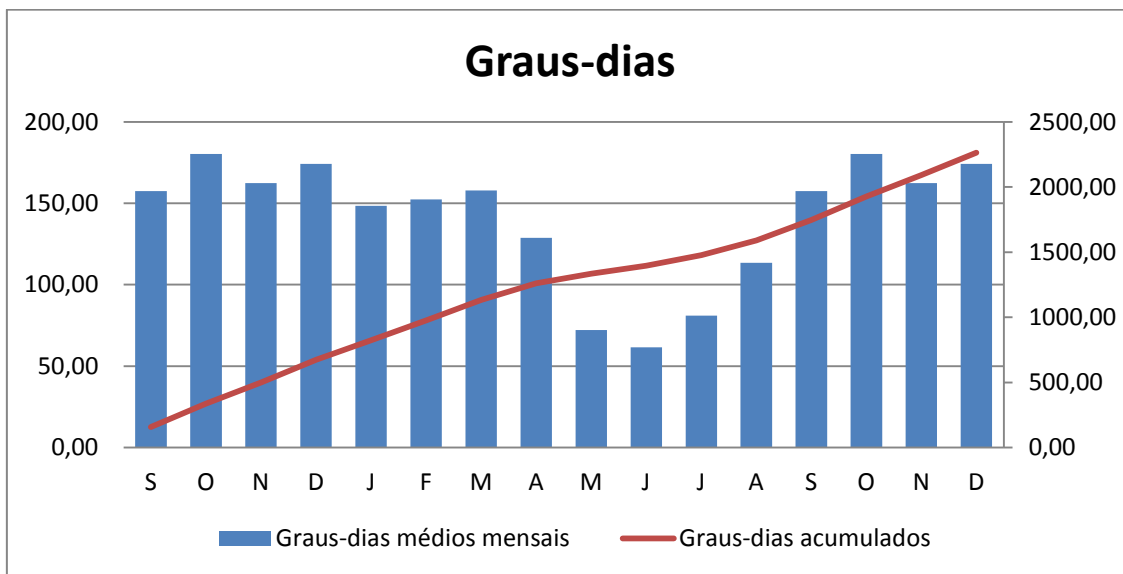


A sequência J F M A ... representa a sequência de meses do ano, onde J= janeiro, F= fevereiro, ...

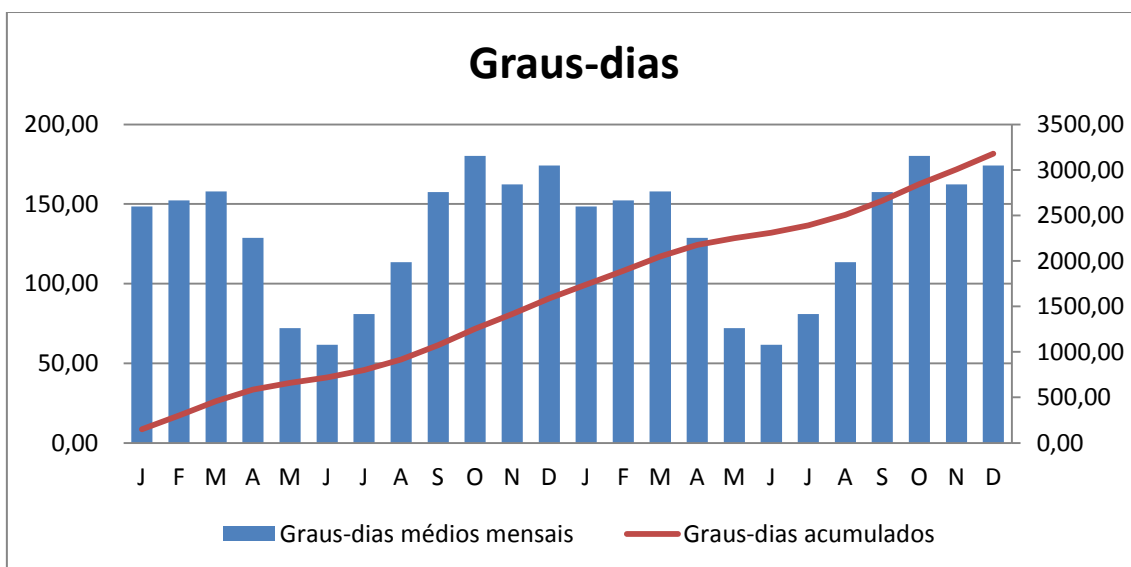
Figura 12: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano e meio (Região de Botucatu)

Nota-se que, para ambos os períodos de plantio, a cultura passa primeiro por um período quente e chuvoso, onde ocorre grande acúmulo de Graus-dias, de forma que a planta consiga se desenvolver completando sua fase de crescimento,

encontrando-se apta para a fase de maturação. Na fase de Maturação, a cana-de-açúcar para o seu crescimento e inicia o processo de acumulação de açúcares nos colmos. Desta forma os teores de POL%Cana aumentam gradativamente até um limite ótimo de acúmulo de Graus-dias, a partir deste valor os teores de POL%Cana decrescem, fase que ocorre o florescimento para determinadas variedades. Este cenário ocorre também para a região de Votuporanga, conforme pode-se observar nas Figuras 13 e 14 a seguir:



A sequência S O N D ... representa a sequência de meses do ano, onde S= setembro, O=outubro, ...
 Figura 13: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano (região de Votuporanga)



A sequência J F M A ... representa a sequência de meses do ano, onde J= janeiro, F= fevereiro, ...
 Figura 14: Graus-dias acumulados para a cana-de-açúcar com plantio de ano e meio (Região de Votuporanga)

O período com maior acúmulo de Graus-dias para a região de Votuporanga estende-se de setembro a dezembro com valores mensais acima de 150 Graus-dias acumulados. No final do ciclo para cana de ano, a região de Votuporanga atinge um total de até 2000 Graus-dias (Figura 13) 20% a mais que a região de Botucatu (Figura 11), já para a cana de ano e meio em Botucatu acumula até 2150 (Figura 12) Graus dias, valor muito inferior a região de Votuporanga que ultrapassa 3000 Graus-dias acumulados (Figura 14).

6.2 Testes computacionais

Para calibrar os parâmetros e testar o AG_GD proposto para resolução do modelo de otimização (1)-(14) foram feitas variações nos parâmetros e elaboradas comparações de convergência e tempo computacional. Os parâmetros calibrados foram: o tamanho da população, o número de gerações, a taxa de *crossover* e a taxa de mutação. Os melhores resultados obtidos foram taxas de *crossover* de 80%, mutação de 5%, número de gerações igual a 500 e número de indivíduos de 200.

De acordo com a Figura 15 é possível observar que o algoritmo AG_GD estabiliza o crescimento no total de POL%Cana em função do número de gerações, em média, a partir da geração 300. Portanto utilizou-se no critério de parada um total de 500 gerações para garantir a convergência do algoritmo em todos os casos trabalhados.

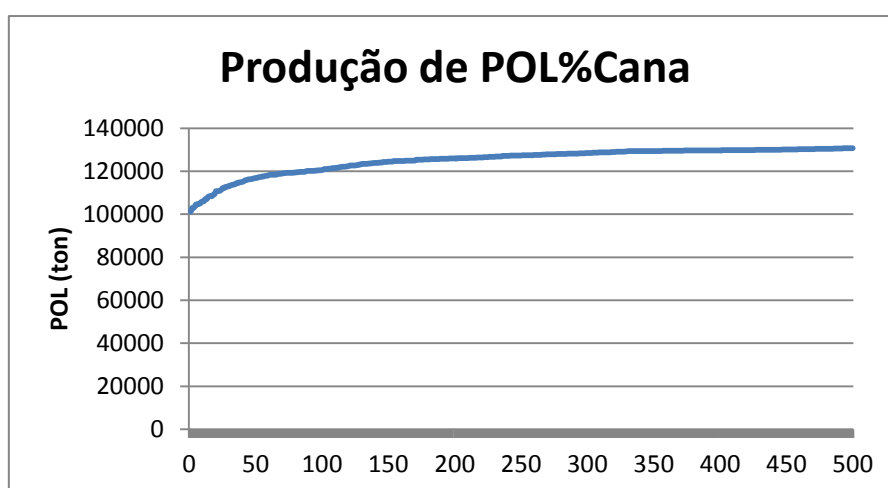


Figura 15: Produção total de POL%Cana para quatro cortes com uma população de 200 indivíduos.

Nas Tabelas 1 e 2, do Apêndice deste trabalho, pode-se observar que na região de Botucatu, no período de um ano, em média são acumulados 1133 Graus-dias, o que acaba atrasando o calendário de cortes visto que a cana-de-açúcar necessita em média de 1250 Graus-dias para ser colhida, quando a variedade é de cana de ano, e 1550 para variedade de cana de ano e meio.

6.3 Planejamento do plantio e colheita em áreas agrícolas na região de Botucatu

O problema abordado neste trabalho e modelado em (1)-(21) consiste em planejar de forma otimizada o plantio e colheita para quatro cortes da cana-de-açúcar, obtendo a máxima quantidade de POL. Esta metodologia foi aplicada para uma área localizada na região de Botucatu, apresentando 2011 hectares e dividida em 100 talhões, com medidas variando de 10 a 34 hectares. O modelo foi resolvido utilizando o AG_GD com os dados da Tabela 5 e utilizando graus-dias da região de Botucatu SP. A Tabela 6 apresenta o planejamento ótimo para esta área.

Tabela 6: Planejamento dos períodos de plantio e colheita da cana-de-açúcar determinados pelo modelo de otimização para os quatro cortes em cada talhão para a região de Botucatu

Tal	Var	DP	C1	C2	C3	C4	Tal	Var	DP	C1	C2	C3	C4	Tal	Var	DP	C1	C2	C3	C4
1	17	42	579	989	1336	1663	35	13	266	710	1074	1406	1798	68	7	244	691	994	1384	1723
2	7	266	694	1007	1308	1667	36	6	94	596	970	1271	1646	69	13	114	582	1033	1390	1810
3	15	59	615	1001	1336	1688	37	13	82	489	956	1426	1820	70	17	78	565	942	1302	1696
4	15	59	546	948	1250	1679	38	11	284	682	1028	1411	1811	71	5	58	463	832	1239	1554
5	13	287	705	1078	1404	1752	39	13	90	557	942	1331	1725	72	15	20	548	947	1277	1677
6	7	257	671	1003	1421	1765	40	8	30	517	939	1272	1698	73	4	283	691	1028	1390	1810
7	10	249	557	927	1291	1670	41	6	259	610	984	1353	1735	74	4	65	604	1004	1322	1716
8	18	25	479	850	1255	1609	42	8	87	537	946	1345	1741	75	6	73	580	950	1351	1734
9	17	297	612	916	1293	1683	43	6	33	543	906	1262	1662	76	14	54	494	853	1226	1675
10	13	35	528	979	1450	1798	44	7	75	631	1027	1416	1736	77	6	63	554	950	1296	1635
11	4	289	699	1044	1370	1707	45	13	67	530	938	1312	1622	78	15	263	621	982	1301	1652
12	15	275	587	914	1281	1660	46	13	285	655	1006	1383	1798	79	12	61	544	922	1258	1602
13	15	76	582	946	1332	1642	47	15	258	603	1003	1357	1712	80	18	106	481	905	1231	1593
14	14	67	516	833	1241	1578	48	4	280	663	1082	1410	1773	81	15	13	560	901	1304	1684
15	13	288	691	1022	1365	1766	49	4	299	657	1006	1400	1801	82	15	85	536	948	1367	1690
16	4	289	696	1080	1440	1806	50	4	246	612	976	1314	1721	83	15	23	578	967	1377	1723
17	18	26	493	844	1199	1582	51	16	60	597	952	1356	1758	84	6	278	638	1020	1368	1733
18	12	118	481	890	1221	1578	52	15	41	576	978	1299	1675	85	13	56	652	964	1408	1802
19	7	286	638	1025	1328	1652	53	4	254	656	1004	1385	1777	86	4	21	656	1046	1441	1786
20	12	21	456	896	1221	1560	54	18	113	530	909	1247	1568	87	1	45	601	922	1283	1744
21	13	271	683	1054	1415	1750	55	13	272	685	1002	1330	1699	88	15	92	585	946	1262	1651
22	13	58	509	957	1315	1672	56	17	253	648	963	1320	1692	89	10	260	622	1000	1405	1819
23	7	266	609	959	1345	1719	57	17	244	565	943	1317	1691	90	17	274	647	1006	1352	1705
24	7	257	668	1060	1415	1749	58	10	244	663	1072	1459	1777	91	17	79	601	1013	1391	1729
25	17	297	639	1008	1383	1689	59	6	53	565	985	1323	1708	92	7	267	674	1041	1408	1747
26	7	18	557	946	1351	1705	60	13	71	565	1029	1448	1789	93	7	62	618	1023	1386	1710
27	1	261	649	1043	1371	1735	61	17	45	570	974	1389	1739	94	15	262	624	979	1343	1753
28	4	23	586	993	1388	1791	62	17	74	627	968	1312	1704	95	18	33	494	872	1191	1616
29	6	42	578	921	1333	1709	63	7	250	717	1062	1421	1733	96	17	270	603	989	1356	1721
30	17	282	654	1021	1358	1744	64	17	64	597	916	1310	1681	97	15	281	589	927	1341	1641
31	17	283	616	1010	1325	1717	65	13	255	618	988	1322	1708	98	18	39	490	877	1189	1604
32	16	94	534	958	1279	1660	66	15	280	603	943	1284	1688	99	18	54	475	846	1212	1627
33	6	79	572	931	1334	1734	67	7	258	671	1055	1431	1748	100	7	69	567	980	1349	1698
34	1	80	644	1054	1398	1770														

Tal representa o talhão, Var a variedade plantada, DP o dia do plantio, C1, C2, C3 e C4 representam os dias do primeiro ao quarto corte respectivamente

O planejamento otimizado encontrado contempla todas as restrições impostas no modelo e determina a variedade indicada para plantio em cada um dos cem talhões. Para cada talhão é determinado o momento de plantio respeitando as características da variedade também para o momento dos quatro cortes.

Exemplificando, neste planejamento temos que no talhão 1 deve ser plantada a variedade 17 (RB92579), no dia 42 (11/fev), portanto deve ser realizado um plantio para cana de ano e meio, sendo que o primeiro corte foi realizado no dia 579 do planejamento que corresponde (02/08) do segundo ano de planejamento, o segundo, terceiro e quarto cortes devem ser realizados nos dias 989, 1336 e 1663 do planejamento. A Tabela 7 apresenta as variedades escolhidas pelo modelo matemático para plantio e a área plantada por variedade (em hectare) para a região de Botucatu.

Tabela 7: Área plantada por variedade para a região de Botucatu

Variedades	Área Plantada (ha)
CTC 15	54
CTC 6	190
RB855156	10
CTC2	173
RB857515	299
SP80-1842	38
SP80-3280	68
RB928062	22
RB966928	44
CTC 20	290
CTC 17	64
SP81-3250	289
CTC 4	33
RB92579	295
RB855453	142

A produção total (em 4 cortes) obtida com o planejamento otimizado foi de 807000 toneladas de cana-de-açúcar, com uma produtividade média de 100 t.ha^{-1} , e o POL médio obtido foi de aproximadamente 16%. A Figura 16 mostra a variação dos valores produzidos do POL ao longo da safra para os quatro cortes para a região de Botucatu.

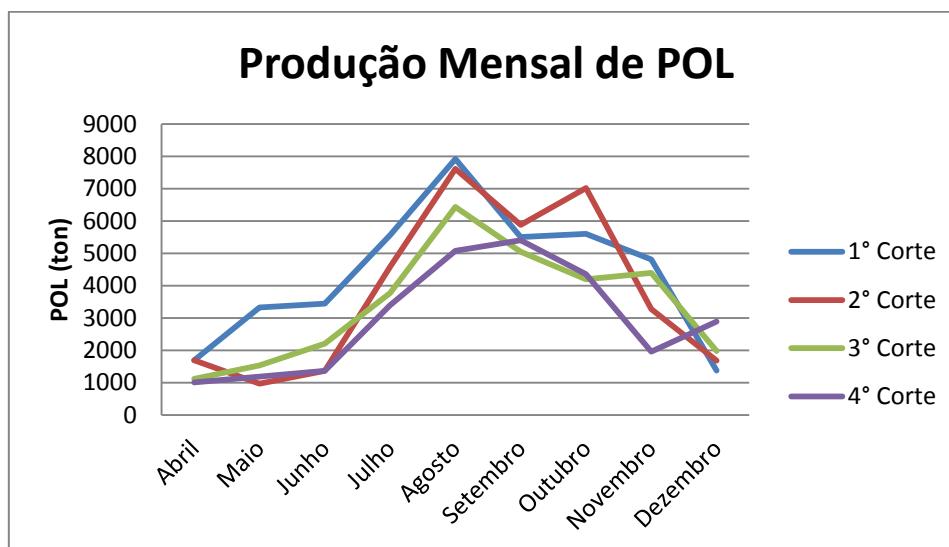


Figura 16: Produção de POL%Caná - Região de Botucatu (200 indivíduos e 500 gerações)

Observa-se na Figura 16 que o pico de colheita ocorre no mês de agosto para os primeiro, segundo e terceiro cortes e no mês setembro para o quarto corte. Observa-se também que ao longo dos anos a produtividade da cana-de-açúcar diminui.

No mês de abril planeja-se colher apenas 5 talhões, que representam 4,48% da área total colhida. Neste período, para o quarto corte, há um acúmulo médio de 1060 Graus-dias, acarretando um desvio de 190 Graus-dias que, para o período de abril, equivale a um período de 85 dias no calendário comum. Uma alternativa indicada para este caso é a utilização de maturadores, que podem contribuir acelerando o processo de maturação e consequentemente reduzindo as perdas pela colheita com menor acúmulo de Graus-dias.

6.4 Planejamento do plantio e colheita em áreas agrícolas na região de Votuporanga

O modelo (1)-(14) foi aplicado para o planejamento de plantio e colheita da cana em uma área localizada na região de Votuporanga SP. Tal região apresenta uma temperatura mais elevada quando comparada com a região de Botucatu, desta forma apresenta maior acúmulo de Graus-dias como apresentado nas Figuras 13 e 14. O modelo foi resolvido usando uma área de 2011 hectares dividida em 100 talhões. A Tabela 8 apresenta a solução do modelo de otimização proposto para a região de

Votuporanga, determinando em dias qual o momento de plantio e colheita para os quatro cortes, de forma a maximizar a produção de Pol.

Tabela 8: Planejamento dos períodos de plantio e colheita da cana-de-açúcar determinados pelo modelo de otimização para os quatro cortes em cada talhão para a região de Votuporanga

Tal	Var	DP	C1	C2	C3	C4	Tal	Var	DP	C1	C2	C3	C4	Tal	Var	DP	C1	C2	C3	C4
1	7	287	644	1039	1351	1743	35	13	119	524	866	1186	1635	68	13	255	602	947	1305	1705
2	17	286	623	983	1296	1675	36	14	263	568	927	1284	1587	69	15	288	645	1023	1356	1708
3	15	113	540	944	1263	1622	37	11	294	727	1057	1439	1739	70	7	293	729	1073	1449	1792
4	9	254	599	940	1358	1764	38	14	51	477	829	1199	1599	71	12	99	543	886	1192	1608
5	16	298	608	966	1320	1630	39	17	298	627	965	1332	1710	72	13	263	601	970	1385	1747
6	13	37	568	996	1316	1617	40	7	287	625	969	1337	1748	73	15	269	673	1024	1360	1686
7	7	254	680	1006	1358	1693	41	8	65	629	980	1294	1617	74	6	262	567	945	1312	1647
8	12	89	476	859	1194	1591	42	1	280	659	990	1431	1810	75	13	281	617	959	1324	1790
9	7	32	588	1059	1407	1768	43	14	46	498	858	1232	1686	76	7	279	716	1072	1398	1672
10	13	262	640	1027	1399	1749	44	14	102	481	824	1239	1564	77	6	272	610	960	1271	1629
11	13	60	672	1025	1379	1783	45	13	66	601	911	1231	1616	78	4	257	707	1038	1377	1760
12	15	282	660	976	1343	1693	46	7	287	661	1025	1419	1754	79	16	292	662	1030	1392	1677
13	10	69	678	1072	1449	1807	47	12	107	461	880	1240	1608	80	7	298	723	1087	1409	1780
14	6	280	611	934	1327	1677	48	15	55	573	956	1310	1634	81	10	272	580	933	1319	1645
15	13	107	522	989	1448	1808	49	13	286	646	1074	1444	1806	82	18	106	534	890	1198	1623
16	15	62	522	940	1322	1681	50	17	255	561	963	1360	1709	83	6	270	604	966	1287	1641
17	4	286	660	1042	1427	1749	51	13	263	612	937	1313	1665	84	9	254	613	1069	1421	1754
18	7	274	622	951	1333	1743	52	14	92	481	871	1253	1578	85	15	246	656	956	1298	1649
19	8	245	577	960	1308	1690	53	15	266	617	953	1323	1781	86	10	292	622	1003	1318	1701
20	6	271	597	1003	1315	1642	54	4	285	620	967	1380	1705	87	1	294	620	998	1316	1687
21	8	301	649	959	1274	1639	55	17	72	553	954	1278	1644	88	8	274	588	1000	1334	1648
22	15	275	597	981	1312	1640	56	18	263	573	913	1267	1613	89	7	247	634	1024	1318	1711
23	14	106	500	905	1272	1571	57	13	281	606	973	1341	1696	90	6	276	604	992	1298	1691
24	12	117	504	850	1256	1606	58	4	272	599	1000	1380	1691	91	8	282	589	913	1247	1578
25	7	302	679	1001	1420	1723	59	15	80	546	891	1255	1580	92	4	283	620	1012	1331	1684
26	15	46	618	985	1307	1688	60	17	300	617	940	1292	1664	93	8	265	627	964	1339	1642
27	4	248	642	1045	1373	1725	61	13	15	604	904	1245	1591	94	5	68	573	880	1230	1581
28	17	266	649	957	1328	1694	62	6	254	623	1034	1370	1695	95	8	302	632	1006	1365	1719
29	14	250	565	866	1233	1553	63	7	284	617	1008	1309	1710	96	17	293	641	1016	1348	1734
30	7	6	659	1040	1439	1769	64	16	285	637	965	1307	1634	97	4	277	596	996	1413	1771
31	9	263	668	985	1319	1711	65	17	25	579	965	1336	1643	98	12	93	462	860	1191	1514
32	10	281	658	969	1280	1660	66	13	292	720	1076	1454	1806	99	8	287	594	904	1297	1633
33	13	119	505	940	1255	1599	67	9	299	652	1020	1421	1754	100	7	116	594	979	1277	1662
34	12	60	530	841	1233	1649														

Tal representa o talhão, Var a variedade plantada, DP o dia do plantio, C1, C2, C3 e C4 representam os dias do primeiro ao quarto corte respectivamente.

A Tabela 8 mostra que o AG_GD possibilita a determinação de planos otimizados de plantio e colheita da cana nesta região. A partir deste planejamento é possível determinar a área plantada por variedade, a produção mensal, os períodos de plantio e colheita para cada um dos quatro cortes, em cada talhão. A Tabela 9 a seguir exibe a área plantada por variedade em hectare para a região de Votuporanga.

Tabela 9: Área plantada por variedade - Região de Votuporanga

Variedades	Área Plantada (ha)
CTC 15	17
RB925211	20
CTC 6	138
CTC2	195
RB857515	275
SP80-3280	72
RB928062	15
RB966928	134
CTC 20	294
CTC 17	83
SP81-3250	300
CTC 4	23
RB92579	301
RB855453	144

O pico de colheita para a região de Votuporanga ocorre no meio da safra, no mês de agosto, como na região de Botucatu. A diferença de pico de safra entre o primeiro e quarto corte chega a 1000 t, como mostra a Figura 17.

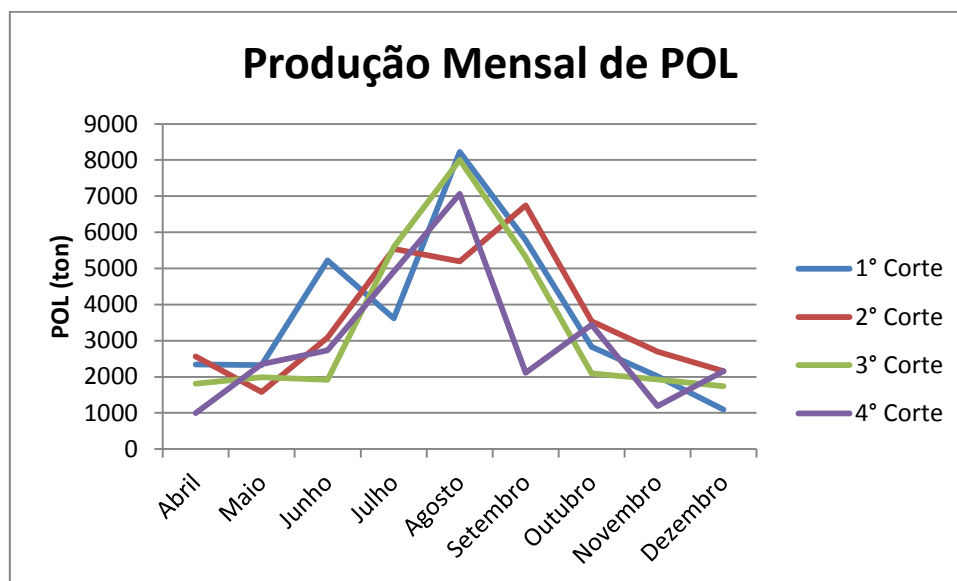


Figura 17: Produção de POL para região de Votuporanga (200 indivíduos e 500 gerações)

6.5 Comparação entre regiões produtoras de acordo com o clima

Nesta seção são apresentadas comparações entre os planejamentos realizados para as duas regiões produtoras, Botucatu com temperaturas amenas e menor acúmulo de Graus-dias e Votuporanga com temperaturas elevadas e, portanto, maior acúmulo de Graus-dias. A Figura 18 apresenta a porcentagem de área plantada por variedade em cada região produtora.

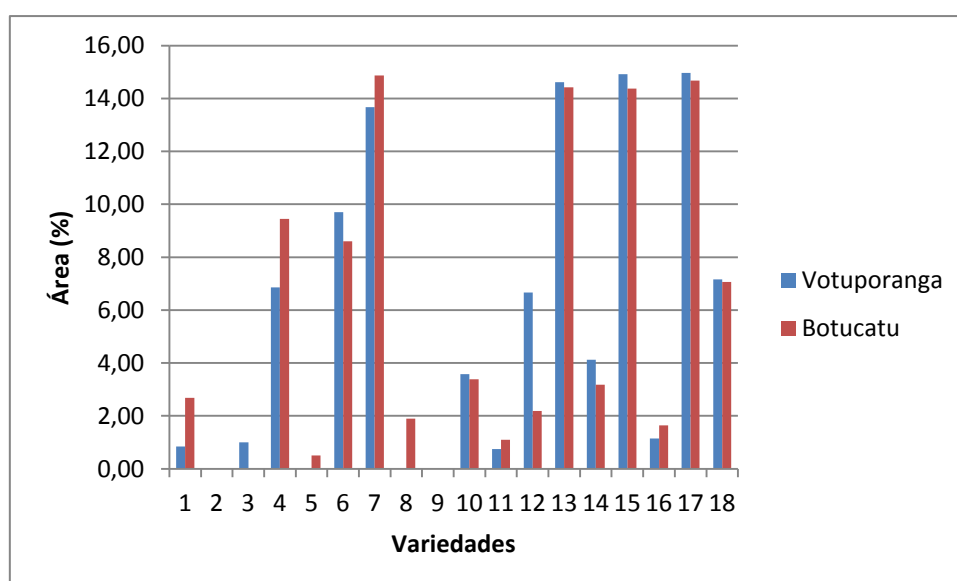


Figura 18: Comparação entre regiões por área plantada (%)

Os conjuntos de variedades escolhidas para plantio nas duas regiões diferem-se por poucos elementos. Os elementos comuns são {RB857515, CTC 20, SP81-3250, RB92579}, porém as áreas destinadas ao plantio das variedades CTC 6 e RB966928 apresentam mudanças consideráveis, visto que a área plantada da variedade CTC 6 para a região de Botucatu atinge aproximadamente 9% da área total, e na região de Votuporanga corresponde a aproximadamente 7% da área total. A variedade RB966928 foi plantada em 2 % da área em Botucatu, para a região de Votuporanga a mesma foi plantada em aproximadamente 7% da área total. Em ambos os casos estudados.

O AG_GD foi rodado 10 vezes para os dados de cada região e apresentou um bom desempenho quando executado em áreas de ambas regiões, apresentando um coeficiente de variação de aproximadamente 1% em relação a solução final de produção de POL%Cana.

Para facilitar o uso das funções auxiliares (15) - (21b) e atender as condições técnicas para maturação dos diferentes tipos de variedades da cana, foram ampliados os intervalos de Graus-dias utilizados. Na região de Botucatu, foram utilizadas duas faixas de Graus-dias adequadas para a cana de ano e meio e cana de ano, sendo estas [1300, 1700] e [1100, 1400] Graus-dias, respectivamente. Na região de Votuporanga, foram utilizados outros valores para que a cana-de-açúcar consiga completar sua fase de maturação, ou seja, para que a cana-de-açúcar passe por um período frio, para acumular sacarose. Em Votuporanga, para a cana de ano e meio foi utilizado o intervalo de [1500, 2150] Graus-dias, já para cana de ano foi adotado o intervalo de [1300, 1850] Graus-dias. Esta diferença ocorre em função da variação de Graus-dias acumulados no ano, onde Botucatu acumula, em média, 1150 Graus-dias e Votuporanga acumula em média 1550 Graus-dias.

A Figura 19 apresenta uma comparação entre a produção total de POL%Cana para quatro cortes nas regiões de Botucatu e Votuporanga. O planejamento apresentado para a área na região de Votuporanga promoveu uma produção de POL%Cana inferior a de Botucatu, isto ocorre devido ao número médio de Graus-dias determinado para a área na região de Votuporanga estar mais distante do ótimo do que o apresentado para a região de Botucatu.

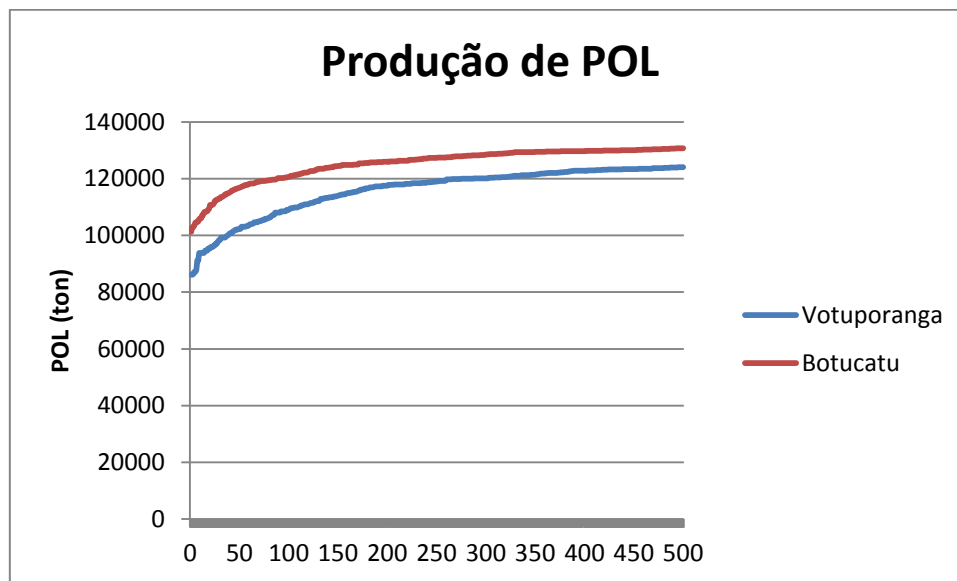


Figura 19: Produção de POL por região

7 Conclusão

Este trabalho propôs uma ferramenta matemática para auxílio no planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar, utilizando informações dos Graus-dias acumulados durante o ano da safra. Para isto foi formulado um modelo de otimização não-linear 0-1 e proposto o algoritmo GA_GD para resolvê-lo.

A metodologia proposta mostrou-se uma excelente ferramenta para auxílio do planejamento otimizado de plantio e colheita da cana-de-açúcar, visto que foi possível determinar para cada talhão a variedade indicada para plantio, os dias de plantio e a colheita para quatro cortes, satisfazendo os padrões e condições técnicas da usina, quanto a capacidade de moagem, teor de fibra, distribuição de área por variedade e ainda maximizar o total de Pol produzido.

O algoritmo GA_GD desenvolvido foi eficiente na resolução do modelo, determinando boas soluções factíveis que atendem as necessidades dos gestores da usina. O modelo mostrou-se robusto podendo ser aplicado à diferentes tipos de clima.

Assim, conclui-se que esta metodologia apresenta grande potencial no auxílio de tomadas de decisões e planejamentos de safras em empresas sucroenergéticas.

8 REFERENCIAS

ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology. A comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system.** Amsterdam: Elsevier, 1973. 725p.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S. B.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação a disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441- 1448, 2008.

ALMEIDA, F. S., GONÇALVES, L. Efeitos da temperatura e do alimento no desenvolvimento de *Dysdercus maurus* Distant (Hemiptera, Pyrrhocoridae). **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, vol.51 n.4 Oct./Dec. 2007.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.74, p.430-445, 1959.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

ÁVILA, L. C. Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras. 2002. 85 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2002.

BARBANO, M. T. et al. Temperatura-base e acúmulo térmico no sub-período semeadura-florescimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 261-268, 2001.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** Piracicaba: ESALQ/USP 1981. 142p. Dissertação (Mestrado).

BASSANEZI, R. C. **Ensino e aprendizagem com modelagem matemática**. 2. ed. São Paulo: Contexto, 2002. 387 p.

BERDING, N.; MOORE, P. H. Advancing from opportunistic sexual recombination in sugarcane: Lessons from tropical photoperiodic research. **Prot. Int. Soc. Sugar Cane Technol.** 2001. 24p. 482-487.

BONNET, J. A. Chemical concept about sucrose formation and maturity status of harvested sugarcane in Puerto Rico. **Sugar Journal**, v.25, n.1, p.45-46, 49-50, 54 e 76, 1962.

BRIEGER, F. O.; PARANHOS, S. B. Cultura e adubação da cana-de-açúcar, Anais do INSTITUTO BRASILEIRO DE POTASSA. 1964.

BUENO, P. M. C. Épocas de corte e a produtividade em variedades de cana-de-açúcar. Curitiba: Universidade Federal do Paraná UFPR 2011. 110p. Dissertação (Mestrado).

BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974. 243 p.

BUTTERFIELD, R.E.; MORISON, J.I.L. Modeling the impact of climatic warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.62, p.241-261, 1992.

CALÇA, S. A.; COLLETTI, L. A.; GLÓRIA, N. A. DA., Ciclo da cana - um dos fatores da maior lucratividade da lavoura canavieira, STAB, v. 6, p. 9-10. 1983.

CÂMARA, G. M. S. **Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar**. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (Eds.). Produção da cana-de-açúcar. Piracicaba: FEALQ, 1993, p.31-64.

CAMARGO, M.B.P. **Exigências bioclimáticas e estimativa para quatro cultivares de soja no estado de São Paulo**. 1984. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-ESALQ/USP, Piracicaba, 1984.

CAPUTO, M.M.; SILVA, M. de A. ; BEAUCLEAIR, E.G.F. de; GAVA, G.J. de C. **Acúmulo de sacarose, produtividade e florescimento de cana-de-açúcar sob reguladores vegetais**. *Interciencia*. dez 2007, vol.32, n.12, p.834-840.

CAROLO, A. Florescimento é um belo sinal de alerta, **Jornal Cana**, p.1-32, 2008.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991. 157p.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P. de; BISSOLI, B. M. A.; SILVA, F. C. da. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processointustrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**. v.6, p.32-38, 1987.

COLETI, J.T. técnica cultural de plantio. In PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. V. 1, Campinas: Cargil, 1987. P. 284-329.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2013/2014 quarto levantamento, abril. Brasília, 2014.

COOPERATIVA CENTRAL DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO, Recomendações e manejo, **Copersucar**, p. 44-56. 1983.

CONSECANA. Regulamento dos negócios de compra e venda de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Manual de instruções. Piracicaba, 1998. 16 p. Apostila.

DOOREMBOS, J; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212p. (FAO. Riego y Drenaje, 33).

DUFAULT, R. J. Determining heat unit requirements for broccoli in coastal South Carolina. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.122, n.2, p.169-174, 1997.

DUNHAM, F. B. Co-evolução da mudança tecnológica e institucional em sistemas de inovação: análise histórica da indústria de álcool combustível no Brasil. Tese (Doutorado) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DUNHAM, F. B.; BOMTEMPO, J. V.; FLECK, D. L. A estruturação do sistema de produção e inovação sucroalcooleiro como base para o Proálcool. *Revista Brasileira de Inovação*. Campinas, 10(1), p. 35-72, jan.-jun. 2011.

FAUCONIER, R. BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Barcelona: Blume, 1975, 433p.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria canavieira**, STAB, Piracicaba, 2000.

FRAZÃO, D. A. C. **Influência do intervalo entre a colheita e o plantio na germinação de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado) - Piracicaba, ESALQ/USP, 1976. 59p.

GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989. 372 p.

GUPTA, V.; RAGHUVANSHI, S.; GUPTA, A.; SAINI, N.; GAUR, A.; KHAN, M. N.; GUPTA, R. S.; SINGH, J.; DUTTA-MAJUMBER, S. K.; SUMAN, A.; KHURANA, J. P.; KAPUR, R.; TYAGI, A. K. The water-deficit stress and red-rot related genes in sugarcane. **Functional Integrative Genomics**, v.10, n.2, p.207-214, 2010.

HEERDEN, P. D. R. Van; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.11, p.2877-2877, 2010.

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems**. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 1992. 211 p.

Humbret, H. P. The Growing of Sugarcane, **Elsevier**, Amsterdam, 1968.

INFELD, J. A.; SILVA, J. B. Somas térmicas da duração da fase vegetativa do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETOROLOGIA, 5., Belém-PA, **Anais...** Belém: SBA, 1987, p. 160-161.

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

ISLER et al. Modelagem matemática de aferições de temperatura com aplicação em graus-dias para cultura da cana-de-açúcar, *Energia na Agricultura*, v. 27 n.3 p. 97-114. 2012

JONG, K. A. D. **An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems**. 1975. Doctoral Dissertation (Computer and Communication Sciences)-University of Michigan, Ann Arbor, 1975.

KOZA, J. R. Genetic Programming: on the programming of the computers by means of the natural selection. Cambridge, 1992.

LIMA, E. P. **Graus-dia, temperatura base e coeficientes de cultura para cafeeiros arábica em fase de implantação**. 2006. 116p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

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

LIVRAMENTO, S. **Algoritmo genético para o problema de localização de recursos em rede telefônica**. 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação)-Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

LOZADA, B.I.; ANGELOCCI, L.R. Efeito da temperatura do ar e da disponibilidade hídrica do solo na duração de subperíodos e na produtividade de um híbrido de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.7, n.1, p37-43, 1999.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR, G. B., Produtividade Agrícola de Cultivares de Cana-de-Açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **ScientiaAgricola**, 58, 295-301, 2001.

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

MIRANDA, M. N. Algoritmos genéticos: fundamentos e aplicações. 2007. Disponível em: <<http://www.nce.ufrj.br/GINAPE/VIDA/alggenet.htm>>. Acesso em: 14 nov. 2013.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1981.440p.

PLANALSUCAR. **Cultura da cana-de-açúcar: manual de orientação**. Piracicaba: IAA, Coordenadoria Regional Sul, 1986. 56p.

PRELA, A., RIBEIRO A. M.A. Determinação de graus-dia acumulados e sua aplicação no planejamento do cultivo de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) para Londrina-PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 83-86, 2002.

RAMOS, R. P. Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização. Botucatu: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho UNESP 2014. 69p. Tese (Doutorado)

RICAUD, R. B.; COCHRAN, M. **Methods of planting sugarcane for sugar and biomass production in Louisiana**. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Louisiana, 1980. Proceedings. Louisiana: ISSCT, 1980. p. 118-120.

SALATA, J. C.; FERREIRA, L. J. **Estudo da interferência do florescimento nas qualidades agroindustriais de algumas variedades de cana-de-açúcar**. *Brasil Açuc.* 88: 19-24, 2007.

SANGOI, L.; SILVA, P.R.F. Comparação entre métodos de cálculo de unidades térmicas e os dias do calendário na previsão de subperíodos de desenvolvimento do girassol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.21, p. 901-908, 1986.

SANTOS, J. M. **Caracterização fisiológica e influência da época de plantio no florescimento de cultivares de cana-de-açúcar**. Rio Largo, 2007. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Alagoas.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E. e NÓBREGA, J.C.M. Atualizações em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, CP 2, 2006. 415p.

SEGATO, S.V.; PEREIRA, L.L. Colheita da cana-de-açúcar: corte manual, em Atualização em produção de cana-de-açúcar(Eds), **FUNEP**, Piracicaba, 2006.

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

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JR., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, p.171-178, 2004.

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

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. de. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p.33-63.

SLACK, D.C. et al. Growing-degree-days based crop coefficients for irrigation management. In: CONGRESSO NACIONAL ASSOCIACION MEXICANA DE INGENIERIA AGRICOLA, 4., Cuautitlán Izcali, , México, 1994. **Anais...**, Cuautitlán Izcali, México: Asociacion Mexicana de Ingenieria Agricola, 1994. p. 7-13.

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

SNYDER, R. L. Hand calculating degree days. **Agriculture and Forest Meteorology**, v.35, n.1/4, p.353-358, 1985.

SORDI, R. A.; BRAGA JUNIOR R. L. C. Florescimento, isoporização e peso médio dos colmos de novos clones e variedades de cana-de-açúcar no decorrer da safra. In: Anais Seminário Copersucar de Tecnologia Agronômica. 6. 1994, Anais. Piracicaba: Copersucar, 1994, p. 137-149.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.734-744, 2005.

SOUZA, P.R. Alguns aspectos de influência do clima e temperatura sobre a cultura do arroz irrigado no sul do Brasil. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 43, n. 389, p. 9-22, 1990.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.734-744, 2005.

STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria prima. In: PARANHOS, S. B. Cana-de-açúcar cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargil, 1987. V. 2 p. 761-804.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: Benjamin/ Cummings Pub. Co., 1991. 559p.

TAKAHASHI, J. R. competição de variedades e clones de cana-de-açúcar (*Sccharum spp*). 2004. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) – faculdade Dr. Francisco Maeda, Fundação educacional e Ituverava, Ituverava –SP,2004.

TAVARES, L. V.; CORREIA, F. N. Optimizaçãolinear e não linear. Fundação Calouste Gulbenkian. p. 462. 1986.

TUBIELLO, F.N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C.O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, 2000.

UEHARA, N.; SASAKI, N.; AOKI, N.; OHSUG, R. Effects of the temperature lowered in the daytime and night-time on sugar accumulation in sugarcane. **Plant production Science**, v.12, n.4, p420-427, 2009.

WARINGTON, I.J.; KANEMASU, E.T. Corn growth response to temperature and photoperiod, 1, seedling emergence, tassel initiation and anthesis. **Agronomy Journal**. Madison, n. 75, p. 154-180, 1983.

WUTKEI, E. B. et al. Estimativa de temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p.55-61, 2000.

YAMORI, W.; NOGUCHI, K.; TERASHIMA, I. Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: analysis of photosynthetic components and temperature dependencies of photosynthetic partial reactions, **Plant Cell Environmental**, v. 28, 536-547. 2005.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P.S. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. *Ecological Modelling*, v. 175, p.261- 270, 2004.

Apêndice

A seguir são apresentadas as tabelas com os Graus-dias médios calculados para as duas regiões produtoras, com uma base histórica de 10 anos.

Tabela 1: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de Janeiro à Junho, para a região de Botucatu.

	Janeiro			Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho		
Dias	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GD
1	1	4,2	4,2	32	4,7	141,3	60	5,3	270,5	91	5,1	407,2	121	3,1	513,2	152	0,8	557,6
2	2	4,2	8,4	33	4,8	146,1	61	4,5	275	92	4,5	411,8	122	3	516,1	153	1,1	558,7
3	3	4,2	12,6	34	4,5	150,7	62	4,8	279,8	93	3,6	415,4	123	2,9	519	154	1,2	560
4	4	3,9	16,6	35	4,8	155,5	63	4,8	284,6	94	3,3	418,7	124	2,3	521,4	155	1,2	561,1
5	5	4,4	21	36	5,6	161,1	64	4,4	289	95	3	421,6	125	1,8	523,1	156	1	562,2
6	6	5,3	26,3	37	5,1	166,3	65	5,1	294,1	96	3,6	425,2	126	1,9	525	157	1,2	563,4
7	7	4,4	30,7	38	4,8	171	66	5	299,1	97	3,2	428,4	127	1,4	526,4	158	1,2	564,5
8	8	4,4	35,1	39	4,9	176	67	5	304,1	98	3,8	432,3	128	1	527,4	159	1,1	565,6
9	9	3,8	38,9	40	4,3	180,3	68	5,3	309,3	99	4,5	436,8	129	1,1	528,5	160	1,4	567
10	10	4,2	43,1	41	4,5	184,7	69	5	314,3	100	4,3	441,1	130	1,6	530,1	161	1,4	568,5
11	11	4,2	47,3	42	4	188,7	70	5,1	319,4	101	4,2	445,3	131	1,6	531,8	162	1,5	569,9
12	12	4,1	51,4	43	3,8	192,5	71	4,9	324,3	102	4,5	449,8	132	1,7	533,5	163	1,5	571,5
13	13	4	55,4	44	3,6	196,1	72	5,1	329,4	103	4	453,8	133	1,9	535,3	164	1,8	573,2
14	14	4,4	59,8	45	3,1	199,2	73	4,8	334,2	104	4,2	458	134	1,8	537,1	165	1,6	574,8
15	15	4,6	64,4	46	3,8	203	74	4	338,2	105	3,9	461,9	135	1,8	538,9	166	1,3	576,1
16	16	4,1	68,5	47	4	207	75	4,1	342,3	106	4	465,9	136	1,3	540,1	167	1,4	577,5
17	17	4,2	72,7	48	3,5	210,6	76	3,9	346,2	107	3,4	469,3	137	1,9	542,1	168	1,4	578,9
18	18	4,5	77,2	49	4,5	215,1	77	4	350,2	108	3,2	472,5	138	1,5	543,6	169	1	579,9
19	19	4,9	82	50	5,5	220,6	78	4,6	354,8	109	3,1	475,6	139	1,5	545,1	170	1,3	581,2
20	20	4,3	86,4	51	4,8	225,4	79	4,6	359,5	110	2,5	478,2	140	1,4	546,5	171	0,9	582,1
21	21	4,7	91	52	4,9	230,3	80	3,6	363	111	2,5	480,7	141	1	547,5	172	1,3	583,5
22	22	5,2	96,3	53	5,2	235,4	81	3,8	366,9	112	2,8	483,5	142	0,7	548,2	173	0,9	584,3
23	23	5,3	101,6	54	5,5	240,9	82	4,2	371,1	113	3,6	487,1	143	0,6	548,9	174	1	585,3
24	24	5,6	107,2	55	4,3	245,3	83	4,2	375,3	114	4,1	491,2	144	0,4	549,3	175	1,1	586,4
25	25	4,4	111,6	56	4,6	249,8	84	4,2	379,6	115	3,8	494,9	145	0,6	549,9	176	1,6	587,9
26	26	3,9	115,5	57	5,3	255,1	85	3,1	382,7	116	3,4	498,4	146	1,2	551,1	177	1,2	589,1
27	27	3,9	119,4	58	4,9	260	86	3,3	385,9	117	2,7	501	147	1	552,1	178	1,2	590,3
28	28	3,9	123,3	59	5,2	265,2	87	3,8	389,8	118	2,9	503,9	148	1	553	179	1,1	591,4
29	29	4	127,3				88	4,1	393,8	119	2,9	506,8	149	1,3	554,4	180	1,2	592,6
30	30	4,6	131,9				89	3,9	397,7	120	3,3	510,1	150	1,2	555,5	181	1,3	593,9
31	31	4,7	136,6				90	4,4	402,1				151	1,3	556,8			

Tabela 2: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de Julho à Dezembro, para a região de Botucatu.

	Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro			Dezembro		
Dias	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA
1	182	1	594,9	213	1,9	638,2	244	2,8	710,3	274	2,6	790,1	305	3,4	895,9	335	3,3	1004,8
2	183	1,5	596,4	214	1,3	639,5	245	2,5	712,8	275	2,3	792,4	306	2,9	898,8	336	3,5	1008,4
3	184	1,9	598,3	215	1,5	641,1	246	3,1	715,9	276	2,2	794,6	307	3,9	902,7	337	3,8	1012,1
4	185	1,8	600,1	216	1,9	643	247	3,1	719	277	3,6	798,2	308	3,2	906	338	4	1016,1
5	186	1,3	601,4	217	1,8	644,7	248	2,3	721,3	278	4,3	802,5	309	2,9	908,8	339	4,6	1020,7
6	187	1,1	602,5	218	1,8	646,5	249	3,2	724,5	279	3,1	805,6	310	2,8	911,7	340	4,7	1025,4
7	188	1	603,5	219	2,4	648,9	250	3,2	727,7	280	3,4	809	311	3,5	915,2	341	3,7	1029,2
8	189	1,7	605,2	220	1,9	650,8	251	3,3	731,1	281	2,9	811,9	312	3,6	918,8	342	3,7	1032,9
9	190	1,2	606,4	221	1,7	652,5	252	3,3	734,3	282	3,6	815,5	313	3,9	922,7	343	3,7	1036,6
10	191	1,3	607,7	222	1,5	654	253	3,4	737,7	283	4,1	819,6	314	4,6	927,4	344	3,7	1040,3
11	192	1,5	609,2	223	1,4	655,4	254	2,2	740	284	4	823,6	315	4,3	931,6	345	3,7	1044
12	193	0,7	609,9	224	1,8	657,2	255	2	742	285	3,6	827,1	316	3,5	935,1	346	3,7	1047,7
13	194	0,6	610,5	225	2	659,3	256	2,1	744,1	286	5	832,2	317	2,2	937,3	347	3,5	1051,1
14	195	0,8	611,2	226	2,2	661,5	257	2,1	746,2	287	4,2	836,4	318	3	940,3	348	3,9	1055
15	196	1,1	612,3	227	2,4	663,9	258	2,8	749	288	4,2	840,6	319	3,1	943,4	349	5,1	1060
16	197	1,7	614	228	2,5	666,4	259	2,3	751,3	289	3,3	843,9	320	3,5	946,9	350	5,9	1065,9
17	198	1,2	615,3	229	1,7	668,2	260	1,6	752,9	290	3	847	321	3,1	950	351	4,9	1070,8
18	199	1	616,3	230	2,3	670,4	261	1,8	754,6	291	3	850	322	3,2	953,3	352	4	1074,9
19	200	1,2	617,4	231	2,5	673	262	2,6	757,3	292	3,1	853,1	323	3	956,2	353	4,8	1079,7
20	201	1,9	619,3	232	2,6	675,6	263	2,8	760,1	293	3	856,1	324	4	960,2	354	5,1	1084,8
21	202	1,9	621,2	233	2,6	678,2	264	3,2	763,3	294	2,8	858,9	325	4,6	964,8	355	4,2	1089
22	203	1,1	622,3	234	3,1	681,3	265	2,4	765,8	295	2,2	861,1	326	3,4	968,1	356	4,4	1093,4
23	204	1,4	623,6	235	3,4	684,7	266	2,5	768,3	296	2,8	863,9	327	4,4	972,6	357	3,9	1097,3
24	205	1,4	625	236	3,2	687,9	267	3,2	771,5	297	3,8	867,8	328	4,7	977,2	358	4,5	1101,8
25	206	1,6	626,7	237	2,3	690,3	268	2,4	773,9	298	3,7	871,5	329	4,7	981,9	359	3,9	1105,7
26	207	1,5	628,1	238	2,5	692,8	269	1,8	775,7	299	3,7	875,2	330	3,4	985,3	360	4	1109,8
27	208	1,5	629,7	239	3,2	696	270	1,9	777,6	300	3,1	878,3	331	4,7	990	361	4	1113,8
28	209	1,4	631	240	3	699	271	3,5	781	301	3,6	882	332	4,2	994,2	362	4,5	1118,2
29	210	1,4	632,4	241	2,7	701,7	272	3,5	784,6	302	3,7	885,6	333	4	998,2	363	4,6	1122,9
30	211	2,1	634,5	242	2,8	704,6	273	3	787,5	303	3,2	888,8	334	3,3	1001,5	364	5,1	1127,9
31	212	1,8	636,3	243	2,9	707,5				304	3,6	892,5				365	5,9	1133,8

Tabela 3: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de Janeiro à Junho, para região de Votuporanga.

	Janeiro			Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho		
Dias	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GD
1	1	5,4	5,4	32	5,7	154,2	60	5,3	306,2	91	5,2	464,0	121	2,3	589,9	152	1,1	660,8
2	2	5,0	10,4	33	5,9	160,1	61	5,1	311,3	92	4,5	468,5	122	1,8	591,7	153	1,0	661,8
3	3	4,9	15,3	34	5,9	166,0	62	5,3	316,6	93	4,4	472,8	123	2,2	593,9	154	1,4	663,2
4	4	5,2	20,5	35	5,9	171,8	63	5,7	322,3	94	4,9	477,7	124	2,5	596,4	155	2,0	665,2
5	5	5,3	25,8	36	5,6	177,5	64	6,5	328,7	95	5,4	483,1	125	3,0	599,4	156	1,5	666,7
6	6	4,9	30,7	37	5,8	183,3	65	6,2	335,0	96	4,8	487,9	126	3,4	602,8	157	1,9	668,6
7	7	5,1	35,8	38	5,4	188,6	66	6,0	341,0	97	3,9	491,9	127	3,3	606,1	158	2,0	670,6
8	8	5,2	41,0	39	4,8	193,4	67	6,0	346,9	98	3,2	495,0	128	3,4	609,5	159	1,7	672,3
9	9	5,3	46,3	40	4,8	198,2	68	5,7	352,6	99	3,8	498,8	129	1,9	611,4	160	1,9	674,2
10	10	5,0	51,3	41	5,4	203,5	69	5,2	357,9	100	4,4	503,3	130	2,5	613,9	161	1,8	676,0
11	11	4,5	55,9	42	5,2	208,8	70	5,3	363,1	101	4,4	507,7	131	2,8	616,8	162	1,8	677,8
12	12	4,6	60,5	43	5,4	214,2	71	5,7	368,8	102	5,2	512,9	132	1,9	618,7	163	2,1	679,9
13	13	4,5	65,1	44	4,8	219,0	72	5,5	374,4	103	4,4	517,2	133	2,0	620,6	164	2,3	682,1
14	14	4,1	69,2	45	5,1	224,1	73	5,2	379,6	104	4,6	521,8	134	2,5	623,2	165	2,3	684,4
15	15	4,1	73,3	46	5,0	229,1	74	4,8	384,4	105	4,6	526,4	135	2,2	625,3	166	2,6	687,0
16	16	3,6	76,9	47	5,3	234,5	75	4,1	388,6	106	4,9	531,3	136	2,2	627,6	167	2,0	688,9
17	17	4,7	81,7	48	5,9	240,3	76	4,4	392,9	107	4,8	536,1	137	2,5	630,0	168	2,0	690,9
18	18	4,8	86,4	49	5,8	246,1	77	3,6	396,5	108	4,8	540,9	138	2,3	632,3	169	2,5	693,5
19	19	5,3	91,8	50	5,6	251,7	78	3,8	400,3	109	4,3	545,2	139	2,2	634,6	170	2,8	696,2
20	20	4,9	96,7	51	5,4	257,1	79	3,9	404,1	110	4,1	549,3	140	2,3	636,8	171	2,6	698,9
21	21	4,9	101,5	52	5,5	262,6	80	4,1	408,3	111	3,6	552,9	141	2,4	639,2	172	2,5	701,3
22	22	4,1	105,7	53	5,8	268,4	81	4,4	412,7	112	4,1	557,0	142	1,9	641,1	173	2,4	703,7
23	23	4,6	110,3	54	6,1	274,5	82	4,5	417,1	113	4,8	561,9	143	2,0	643,1	174	2,2	706,0
24	24	5,1	115,3	55	5,6	280,2	83	4,7	421,8	114	4,7	566,6	144	2,0	645,1	175	2,2	708,2
25	25	5,0	120,4	56	5,0	285,2	84	5,3	427,2	115	4,7	571,2	145	2,2	647,2	176	2,3	710,4
26	26	4,8	125,2	57	4,9	290,1	85	5,4	432,5	116	4,2	575,4	146	2,9	650,1	177	1,7	712,1
27	27	4,3	129,5	58	5,2	295,2	86	4,9	437,4	117	3,3	578,7	147	2,3	652,4	178	1,6	713,7
28	28	4,1	133,6	59	5,6	300,8	87	5,5	443,0	118	3,3	582,0	148	2,4	654,8	179	2,0	715,8
29	29	4,6	138,2				88	5,2	448,2	119	3,2	585,2	149	2,1	656,8	180	2,6	718,4
30	30	4,9	143,1				89	5,4	453,6	120	2,4	587,6	150	1,6	658,4	181	2,9	721,3
31	31	5,4	148,5				90	5,2	458,7				151	1,3	659,7			

Tabela 4: Graus-dias Médios e Graus-dias Acumulados (GDA) Médios para os meses de Julho à Dezembro, para região de Votuporanga.

	Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro			Dezembro		
Dias	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA	DA	GD	GDA
1	182	2,9	724,2	213	3,9	806,1	244	4,8	920,5	274	6,5	1079,6	305	5,9	1259,3	335	6,3	1422,1
2	183	2,8	727,0	214	3,2	809,3	245	5,8	926,3	275	5,1	1084,7	306	5,1	1264,4	336	6,5	1428,6
3	184	2,2	729,2	215	2,2	811,5	246	6,3	932,6	276	5,4	1090,1	307	5,2	1269,6	337	5,9	1434,5
4	185	2,1	731,4	216	2,6	814,0	247	5,8	938,4	277	6,4	1096,5	308	5,5	1275,1	338	6,0	1440,5
5	186	2,5	733,9	217	3,0	817,0	248	6,1	944,5	278	6,4	1102,9	309	5,4	1280,5	339	6,3	1446,8
6	187	2,9	736,8	218	3,8	820,8	249	4,9	949,4	279	5,8	1108,7	310	4,8	1285,2	340	5,9	1452,7
7	188	3,0	739,7	219	4,5	825,3	250	4,1	953,4	280	5,3	1114,1	311	4,0	1289,3	341	6,0	1458,7
8	189	2,3	742,0	220	4,4	829,7	251	5,4	958,9	281	5,7	1119,7	312	4,1	1293,4	342	5,9	1464,6
9	190	2,7	744,7	221	4,3	834,0	252	5,4	964,3	282	4,7	1124,4	313	4,8	1298,2	343	5,9	1470,4
10	191	3,0	747,7	222	2,7	836,7	253	6,1	970,5	283	4,6	1129,1	314	5,0	1303,2	344	5,8	1476,2
11	192	2,0	749,8	223	3,2	839,9	254	6,6	977,1	284	5,5	1134,6	315	5,8	1309,0	345	5,5	1481,7
12	193	1,8	751,6	224	4,1	843,9	255	6,9	984,0	285	5,4	1140,0	316	5,8	1314,8	346	5,8	1487,5
13	194	1,7	753,3	225	4,5	848,4	256	6,3	990,3	286	4,4	1144,3	317	5,7	1320,5	347	4,6	1492,1
14	195	1,7	755,0	226	3,4	851,9	257	5,9	996,2	287	6,2	1150,6	318	4,9	1325,4	348	3,7	1495,8
15	196	2,4	757,4	227	3,5	855,4	258	6,1	1002,3	288	6,1	1156,7	319	4,8	1330,2	349	4,4	1500,2
16	197	1,9	759,4	228	3,2	858,6	259	6,9	1009,2	289	6,2	1162,9	320	5,1	1335,3	350	4,9	1505,1
17	198	2,1	761,5	229	3,9	862,5	260	7,2	1016,4	290	6,2	1169,1	321	5,4	1340,7	351	4,9	1510,0
18	199	2,1	763,6	230	3,5	866,0	261	6,6	1023,0	291	5,4	1174,5	322	5,6	1346,3	352	4,8	1514,8
19	200	2,0	765,6	231	3,5	869,5	262	5,3	1028,2	292	4,7	1179,2	323	5,6	1351,9	353	5,3	1520,0
20	201	2,6	768,2	232	2,3	871,7	263	4,7	1032,9	293	5,2	1184,4	324	5,6	1357,4	354	5,7	1525,7
21	202	3,6	771,8	233	2,4	874,1	264	4,4	1037,3	294	5,4	1189,8	325	6,2	1363,6	355	5,9	1531,6
22	203	4,3	776,1	234	3,2	877,3	265	4,2	1041,5	295	5,2	1195,1	326	5,7	1369,3	356	5,8	1537,4
23	204	4,3	780,4	235	3,1	880,5	266	4,9	1046,4	296	4,6	1199,7	327	5,2	1374,5	357	5,9	1543,4
24	205	2,5	782,9	236	4,0	884,5	267	3,2	1049,6	297	5,0	1204,6	328	5,3	1379,8	358	6,3	1549,6
25	206	1,6	784,5	237	4,5	888,9	268	2,8	1052,4	298	5,8	1210,4	329	5,7	1385,5	359	5,6	1555,2
26	207	2,1	786,6	238	5,0	893,9	269	3,3	1055,7	299	6,2	1216,6	330	6,4	1391,8	360	5,8	1560,9
27	208	2,5	789,1	239	4,4	898,4	270	3,6	1059,4	300	6,9	1223,6	331	6,4	1398,2	361	5,8	1566,7
28	209	3,1	792,2	240	4,4	902,8	271	4,2	1063,6	301	8,0	1231,5	332	6,4	1404,6	362	5,7	1572,4
29	210	3,2	795,4	241	4,4	907,1	272	4,2	1067,8	302	9,0	1240,5	333	5,8	1410,4	363	6,5	1579,0
30	211	3,2	798,6	242	4,5	911,6	273	5,4	1073,2	303	6,5	1247,1	334	5,4	1415,8	364	5,8	1584,7
31	212	3,6	802,2	243	4,1	915,7				304	6,3	1253,4				365	5,3	1590,0