



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



JAIR QUINTELA DA SILVA JUNIOR

**Desenvolvimento de um programa computacional para o modelo de cana-de-açúcar
QCANE**

RIO LARGO, AL
2023

JAIR QUINTELA DA SILVA JUNIOR

**Desenvolvimento de um programa computacional para o modelo de cana-de-
açúcar QCANE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador:
Prof. Dr. Marcos Alex dos Santos

RIO LARGO, AL
2023

**Catálogo na Fonte Universidade
Federal de Alagoas**
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S586d Silva Junior, Jair Quintela da.

Desenvolvimento de um programa computacional para o modelo de cana-de-açúcar

QCANE. / Jair Quintela da Silva Junior. – 2022.

34f.: il.

Orientador: Marcos Alex dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Graduação em Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2022.

Inclui bibliografia

1. Análise de sensibilidade. 2. Fortran 90. 3. Modelos Mecanísticos.
- I. Título.

CDU: 633.61

Folha de Aprovação

AUTOR: JAIR QUINTELA DA SILVA
JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O MODELO DE CANA-DE-
AÇÚCAR QCANE.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Campus de Engenharias
e Ciências Agrárias da Universidade
Federal de Alagoas, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo, aprovado em 03
de março de 2023



Documento assinado digitalmente
MARCOS ALEX DOS SANTOS
Data: 03/03/2023 16:57:46-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

ORIENTADOR: _____
(Prof. Dr. Marcos Alex dos Santos, Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente
RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR
Data: 03/03/2023 22:28:12-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Júnior (Examinador externo)



Documento assinado digitalmente
IVOMBERG DOURADO MAGALHAES
Data: 03/03/2023 17:15:22-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães, (Examinador Interno)



Documento assinado digitalmente
MARCOS ALEX DOS SANTOS
Data: 03/03/2023 16:58:59-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Marcos Alex dos santos (Examinador Interno)

DEDICATÓRIA

A Deus, que me presenteia todos os dias com a energia da vida, que me dá forças e coragem para atingir os meus objetivos;

A minha amada mãe, Evely Olindina da Silva, exemplo de honestidade e humildade, pelo apoio em todo meu processo de formação e toda educação com carinho e paciência.

Aos meus irmãos Millena Quintela, Luiz Quintela e Emilli Quintela, pelo apoio e companheirismo.

Aos meus avós, Luiz Caboclo e Zilda Quintela. A minha tia, Elane Quintela, por todo apoio incondicional durante minha graduação e pelo apoio em todo meu processo de formação e toda educação com carinho e paciência.

DEDICO!

AGRADECIMENTO

Aos meus pais e irmãos, por todo amor e carinho durante minha trajetória de vida e educação;

Ao meu orientador, professor Dr. Marcos Alex dos Santos, por todos os ensinamentos, conselhos, confiança e amizade durante a graduação; ao professor Dr. Iêdo Teodoro, pelos ensinamentos e conselhos;

Aos professores do LIA: Ricardo Araújo, André Carvalho, Gustavo Lyra, Ivomberg Dourado, Guilherme Lyra e Alexsandro Almeida pelas orientações e incentivos;

Ao corpo docente do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, pelas contribuições na minha formação;

Em especial aos colegas Jonathan e William que participaram na construção e desenvolvimento do código do programa.

Aos colegas e amigos de laboratório: Constantino Cavalcante, Wemerson Saulo, Manoel Alpiano, Iêdo Peroba, Jose Wanderson, Marcos Antonio, Julianna Catonio, Jonathan Tenório, José Antonio, Jailton Aciole e William Alexandre pela boa convivência, ajuda e amizade;

A meus amigos de turma, Ayrton Lima, Cleiton Andrade e João Lamenha, pela amizade e convivência;

A UFAL pelas concessões de bolsas;

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho e acreditaram no meu empenho.

MUITO OBRIGADO!

EPÍGRAFE

“Querer ser bem-sucedido sem trabalhar duro é como querer colher sem plantar”.

(David Bly)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre produção potencial, atingível e atual. Modificado de bouman	16
Figura 2. representação esquemática do modelo QCANE. P1 é o carboidrato produzido na fotossíntese e Pn, Pc e Pr são os carboidratos transportados para o topo não móvel (palmito), colmo e raiz, respectivamente Fld, Fnd e Frd representam a senescência das folhas, palmito e raiz, respectivamente.	18
Figura 3. Fluxograma do programa qcane.f90, indicando a sequência de sub-rotinas externas	21
Figura 4 Arquivo de compilação do modelo.	25
Figura 5. Código fonte da sub-rotina termaltime para o cálculo dos graus-dias com base na metodologia de Liu. (1998), de acordo com as Figuras. 9 a 11	27
Figura 6. Ilustração do arquivo de entrada do modelo, lido com sub-rotinas da biblioteca Tuttil	28
Figura 7. Ilustração de dados meteorológicos e fenológicos, lido com sub-rotinas da biblioteca Tuttil	29
Figura 8. Parte do código fonte da sub-rotina readmeteo.f90 para processamento dos dados meteorológicos	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de entradas usados pelo modelo e programa QCANE 22

RESUMO

O cultivo de cana de açúcar (*Saccharum spp*) é uma das principais atividades agrícolas do mundo, possuindo um importante papel na segurança alimentar mundial, devido ao seu principal produto e seus subprodutos. Apesar do Brasil ser o maior produtor de cana de açúcar do mundo, a produtividade do Estado de Alagoas é baixa. A aplicação modelo de crescimento de culturas é uma ferramenta fundamental para auxiliar na tomada de decisão de práticas agrícolas e no aumento de produtividade das culturas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa computacional para o modelo de cana-de-açúcar QCANE e avaliar a sensibilidade de variáveis de estado do modelo a parâmetros da fotossíntese. O QCANE é um modelo mecanístico baseado em processos eco-fisiológicos que fornece previsões de diárias do crescimento e desenvolvimento de cana-de-açúcar. O programa computacional foi desenvolvido em linguagem de programação Fortran 90. O programa foi estruturado em módulos e sub-rotinas externas. Para a leitura de arquivos ASCII, utilizou-se a biblioteca TUTTIL foram utilizadas para fazer a leitura do arquivo de entrada do modelo. O programa foi composto por dois módulos e várias sub-rotinas externas, representando cada processo simulado pelo modelo, além de cálculos das taxas diárias e correções para o tempo da simulação. As simulações de sensibilidade realizada nesse estudo apontaram que as variável de estado do modelo, como massa seca do colmo e IAF, apresentaram sensibilidade aos parâmetros relacionado com a concentração de N na folha. Desta forma, a calibração destes parâmetros para cada variedade de cana-de-açúcar torna-se um fator importante para o desempenho do modelo.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, Fortran 90, Modelos Mecanísticos.

ABSTRACT

The cultivation of sugar cane (*Saccharum spp*) is one of the main agricultural activities in the world, having an important role in world food security, due to its main product and its by-products. Despite Brazil being the largest producer of sugar cane in the world, productivity in the State of Alagoas is low. The application of crop growth models is a fundamental tool to assist in decision making regarding agricultural practices and to increase crop productivity. The objective of this work was to develop a computational program for the sugarcane model QCANE and to evaluate the sensitivity of state variables of the model to photosynthesis parameters. QCANE is a mechanistic model based on eco-physiological processes that provides daily predictions of sugarcane growth and development. The computational program was developed in Fortran 90 programming language. The program was structured in modules and external subroutines. To read ASCII files, the TUTTIL library was used to read the input file of the model. The program consisted of two modules and several external subroutines, representing each process simulated by the model, in addition to calculations of daily rates and corrections for the simulation time. The sensitivity simulations carried out in this study showed that the state variables of the model, such as stem dry mass and LAI, were sensitive to the parameters related to the concentration of N in the leaf. Thus, the calibration of these parameters for each sugarcane variety becomes an important factor for the performance of the model.

Keywords: Sensitivity analysis, Fortran 90, Mechanistic models.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. Revisão de Literatura	14
2.1 Cana-de-açúcar	14
2.2 Modelagem de crescimento da cultura.	15
2.3 Modelagem em cana-de-açúcar	16
2.4 Modelo QCANE	17
2.5 Outros modelos para a cana-de-açúcar	19
3. METODOLOGIA	21
3.1 Descrição das sub-rotinas do código do programa QCANE	21
3.2 Estimativa dos Graus-Dia e fases fenológicas	23
3.3 Compilação e execução do programa	25
3.4 Simulação numérica e análise de sensibilidade	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Sub-rotina <i>thermtime</i>	27
4.2 Arquivo de entrada (interface) do modelo QCANE	28
4.3 Sub-rotina <i>readmeteo.f90</i>	29
4.4 <i>Dados de Saida</i>	30
4.5 Análise de sensibilidade.....	31
5. CONCLUSÃO	34
6. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de cana de açúcar (*Saccharum spp*) é uma das principais atividades agrícolas do mundo, possuindo um importante papel na segurança alimentar mundial, devido ao seu principal produto e seus subprodutos. O Brasil é o maior produtor de cana de açúcar do mundo (CONAB, 2019), porém a produtividade do Estado de Alagoas é relativamente baixa. Um dos principais motivos comumente relatado na literatura é o fato da época chuvosa coincidir com o período de menor incidência da irradiância solar. Em contrapartida, os meses de menor índice pluviométrico coincidem com o período de maior incidência de irradiância solar (Santos et al., 2017; Martins et al., 2022)

Uma maneira de avaliar a produtividade das culturas é através do uso de modelos de crescimento de culturas. Para a cana-de-açúcar, há diversos modelos reportados na literatura, como, por exemplo, o APISM, CANEGRO e AUSCANE (Rui et al., 2017; Keating et al., 1999). Esses modelos são baseados na eficiência da radiação. Outros modelos como o QCANE (Liu e Bull, 2001) e DSSAT-CSM-CANEGRO (Singels, 2008) são baseados em processos físicos da planta, sendo mais flexível para calibração.

O modelo QCANE foi desenvolvido para fazer crescimento da cultura em condições potenciais da cultivar. A simulação quando realizadas em condições de cultivo não potencial (condições reais) leva em consideração a redução da transpiração da planta, que depende das condições hídricas do solo. Em outras palavras, para condições reais, é necessário simular a variação de conteúdo de água no solo.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa computacional para o modelo QCANE na linguagem Fortran 90 e análise de sensibilidade do modelo a parâmetros de relacionados com a concentração de nitrogênio (N) na folha. O desenvolvimento do código do programa pode ser então tomado como base para o acoplamento com outros modelos de simulação de água no solo e, então, avaliar a simulação da produtividade real da cultura.

2. Revisão de Literatura

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*saccharum spp*) é uma cultura da família poaceae, de ciclo semi-perene, e faz parte das plantas que possuem o metabolismo C4; ou seja, responde melhor em ambientes com elevada intensidade luminosa e altas temperaturas. O sistema radicular da cana-de-açúcar tem um formato de touceira e seu o colmo é cilíndrico, constituído de nós e entrenós e, a depender da variedade, fibroso e rico em açúcar (DIAS 2018). Devido a sua composição química, a cana-de-açúcar comercializada e possui múltiplas aplicações na alimentação e seus derivados como a produção de energia utilizando a biomassa, etanol, biometano que é produzido utilizando a vinhaça e a torta da cana-de-açúcar etc.,

A cultura da cana-de-açúcar possui papel importante na segurança alimentar mundial e socioeconômico de muitos países. Como exemplo, para o Brasil, a cultura tem uma importante participação socioeconômica para a agricultura, onde o funcionamento de diversos complexos industriais depende da matéria prima da cana de açúcar.

Os maiores produtores de cana-de-açúcar são o Brasil, Índia, China, Paquistão, Tailândia, Mexico, EUA, Australia (FAOSTAT 2020). O Brasil na safra 2020/21 alcançou uma produção de 654 milhões de toneladas de cana, ao combinar a produção do Brasil com China e Índia, percebe-se que esses três países correspondem a dois terços da produção mundial de cana-de-açúcar a partir de aproximadamente 17 milhões de hectares cultivados. O Brasil possui 5 regiões produtoras, a região que se destaca devido à sua produção é a sudeste com uma produção de 428,6 milhões de toneladas, seguida pela região Centro-oeste que na safra 2020/21 obteve uma produção de 139,8 milhões de toneladas colhidas, as regiões nordeste, sul e norte são as que possuem uma produção bem menor comparado com a região sudeste, as mesmas regiões possuem uma produção de 48,4; 34,2 e 3,36 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB 2021). Na região nordeste destaca-se Alagoas com a maior produção seguida por Pernambuco com uma produção de 11.8 milhões e toneladas. De acordo com a CONAB em Alagoas na colheita houve incremento na área colhida, alcançando 298500 hectares e 17 milhões de toneladas de cana-de-açúcar.

Os principais elementos meteorológicos que influenciam o desempenho da cana-de-açúcar são: radiação solar, as temperaturas do ar e do solo, a precipitação pluvial, a umidade do ar e a velocidade do vento. Essas variáveis são as mais importantes para o desenvolvimento dessa cultura (TERAMOTO, 2003). A faixa ótima de temperatura para o

desenvolvimento da cultura está entre 24 e 30 °C (Liu et al., 1999). Temperaturas abaixo de 20 °C interfere no desenvolvimento da planta, e temperaturas acima de 33 °C torna negativo o desenvolvimento da cultura. De acordo com SOUZA et al. (2003), a região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas apresenta condições térmicas bem estabelecidas para o desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar.

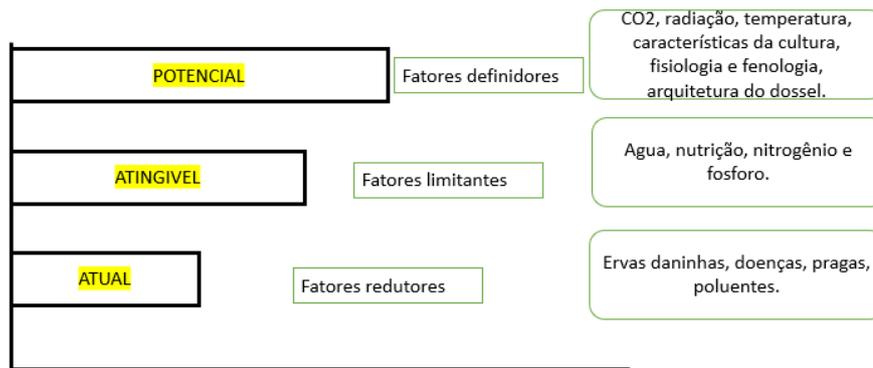
2.2 Modelagem de crescimento da cultura.

Os modelos são uma descrição de um sistema real, de forma a reunir conhecimento de suas partes para fornecer uma visão coerente. Ou seja, os modelos descrevem o sistema. Os modelos de crescimento de culturas podem ser definidos como um esquema quantitativo que permite prever o crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura. Com base em características genéticas, variáveis ambientais e parâmetros fisiológicos que variam entre as culturas o que significa que devem ser estimados a partir de dados para prever o crescimento e a produtividade.

Os modelos empíricos são baseados puramente em dados observados, ou seja, nesse modelo não há interesse em explicar afundo as respostas do sistema. Nesse modelo utiliza-se dados empíricos, que é de conhecimento determinado da ciência quando o interesse é apenas descrever superficialmente, os modelos empíricos servem bem ao propósito. Esses modelos devem ser utilizados e calibrado especificamente para a região que vai ser aplicado, pois o mesmo deve ser utilizado com restrição quando os resultados forem extrapolados para condições parecidas.

Os modelos mecanísticos são aqueles que tem suas estruturas toda detalhada processo a processo que ocorre em um sistema real. Tenta-se utilizar os princípios físico-químicos, biológicos e fisiológicos do sistema. Esses modelos tendem a ter uma maior dificuldade para obter todo os dados necessários para seu desenvolvimento, mas quando desenvolvido a quantidade de resultados que serão obtidas são bem detalhadas e os seus resultados podem ser extrapolados com um grau de confiança elevado, comparados com os outros tipos de modelo.

Figura 1. Relação entre produção potencial, atingível e atual.



Fonte: adaptado de Bouman (1996)

Os modelos têm sido muito utilizados para a parte de manejo de cultura, como por exemplo na irrigação e drenagem, quando se considera apenas os fatores irrigação e drenagem temos muitos modelos específicos para tomar ações o mais assertivo possível, temos modelos de irrigação e drenagem IRRIGA (TEIXEIRA et al., 2003), o CROPWAT (desenvolvido pela Land and Water Development Division - FAO) incorpora a evapotranspiração de referência, as necessidades de água da cultura e a lâmina a ser aplicada, criação de planos de irrigação em diferentes zonas de manejo etc.

A vantagem em utilizar modelos para resolução de problemas está que os modelos estimam valores através de um extenso banco de dados de experimentos realizados, os dados podem ser extrapolados ou não. O modelo pode ser utilizado para testar partes específicas do sistema todo, como mudar parâmetros de adubação, irrigação, data de plantio, colheita, forma de colheita, diferentes temperaturas, diferentes níveis de radiação etc. Dessa forma com a utilização dos bancos de dados visa reduzir os custos e tempo para obtenção de resultados e consequentemente tomada de ação. Os modelos apresentam 3 formas mais utilizadas: Empíricos, mecânicos e estocásticos. (Figura 1).

2.3 Modelagem em cana-de-açúcar

Alguns modelos possuem parâmetros genéricos no crescimento de culturas como o WOFOST. Para a cultura da cana existem alguns modelos muito utilizados mundialmente. Na Austrália por Bull e Tovey (1974), o APSIM – Sugarcane (Keating et al., 1999) e QCANE (Liu & Bull, 2001). Na África do Sul Thompson (1976) Desenvolveu um modelo simples, o qual é precursor do atual modelo CANEGRO/DSSAT. Esses modelos possuem uma boa base de modelagem mecânica. Esses modelos em sua maioria estão projetados apenas para

avaliar crescimento da cultura, deixando a maturação da cultura de lado dessa forma dificultava tomar alguma ação em relação a colheita.

2.4 Modelo QCANE

O modelo QCANE (Liu e Bull, 2001) é um modelo baseado em processos que simula o desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar, computando-se diversos processos, tais como fotossíntese, respiração e particionamento de carboidratos, entre outros. A descrição matemática e física de cada um desses processos pode ser vista com mais detalhes em (Liu e Bull, 2001)

fragmenta a planta em quatro componentes: folha (l), palmito (n), colmo (c) e raiz. A obtenção da quantidade de fibra (F_i), açúcar (S_i) e demais substâncias químicas (A_i) são obtidas a partir da quantidade de matéria seca ($g\ m^{-2}$). A massa seca W_i , $g\ m^{-2}$ pode ser obtida, para cada componente i ($= l, n, c, r$), por:

$$W_i = F_i + S_i + A_i \quad 01$$

em que A_i é obtida a partir de W_i por:

$$A_i = \frac{g_i - 1}{g_i} W_i \quad 02$$

em que g_i é um coeficiente maior ou igual a 1 (para $g_i = 1$, $A_i = 0$ e a matéria seca composta somente por fibra e açúcar). Substituindo a eq. (02) na eq. (01), obtem-se:

$$W_i = g_i S_i + g_i F_i \quad 03$$

Ao definir as concentrações de açúcares (C_{si} , $g\ g^{-2}$) e fibra (C_{fi} , $g\ g^{-1}$), respectivamente, por $C_{si} = \frac{s_i}{w_i}$ e $C_{fi} = \frac{f_i}{w_i}$ e substituindo na eq. (03), obtem-se:

$$g_i = \frac{1}{C_{si} + C_{fi}}, \quad i = l, n, r \quad 4$$

As concentrações de açúcar e fibra, por não se tratarem de órgãos de reserva, podem ser consideradas constante para folha, palmito e raiz (Liu et al., 2001). Isto implica que, pela

eq. 04, g_i também é constante e, por conseguinte, o acúmulo de açúcar e fibra é simplesmente uma proporção de W . Para o caule, ocorre um equilíbrio entre o crescimento do colmo e acúmulo de açúcar. Este acúmulo é calculado a partir da matéria seca, atribuindo-se a relação entre a taxa de crescimento diário e produção de sacarose (Liu et al., 2001).

O resumo dos processos simulados pelo modelo QCANE é demonstrado na Figura 2. A taxa de incrementos diários de açúcares e fibras pode ser obtida por balanço de massa da Figura 2, em que P_l representa a quantidade de carboidratos produzida na fotossíntese e P_n , P_c e P_r a quantidade de carboidratos translocados para palmito, colmo e raiz, respectivamente. Diante do balanço de massa obtido pelo esquema da Figura 2, pode-se inferir as seguintes equações para a taxa de produção açúcares:

$$\frac{dS_l}{dt} = P_l - P_n - M_l - Q_l - G_l \quad 05$$

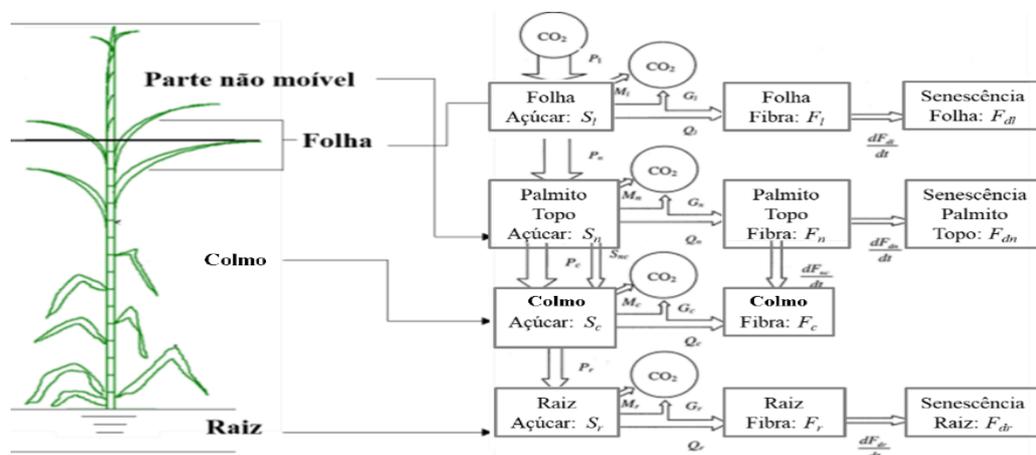
$$\frac{dS_n}{dt} = P_n - P_c - M_n - Q_n - G_n - S_{nc} \quad 06$$

$$\frac{dS_c}{dt} = P_c - P_r - S_{nc} - M_c - Q_c - G_c \quad 07$$

$$\frac{dS_r}{dt} = P_r - M_r - Q_r - G_r \quad 08$$

em que M é a respiração de manutenção, Q a taxa de crescimento de novas fibras, G a respiração de crescimento, e S_{nc} é a taxa de transformação de açúcar do palmito para açúcar do colmo através do processo de maturação.

Figura 2. representação esquemática do modelo QCANE. P_l é o carboidrato produzido na fotossíntese e P_n , P_c e P_r são os carboidratos transportados para o topo não móvel (palmito), colmo e raiz, respectivamente F_{ld} , F_{nd} e F_{rd} representam a senescência das folhas, palmito e raiz, respectivamente.



Fonte: adaptado de Liu (2001)

O QCANE foi construído para incorporar a atual compreensão dos processos ecofisiológicos básicos relacionados ao desenvolvimento e crescimento da cultura, o processo de crescimento e desenvolvimento estão relacionados com fenologia e meio ambiente. O modelo utiliza valores diários de radiação, temperatura do ar, latitude e duração do dia. O particionamento de carboidratos em folha, colmo, palmito e raiz, utilizam equações relacionadas a temperatura do ar que altera conforme o estágio de desenvolvimento da cultura. Dois princípios foram seguidos para criação do modelo, o primeiro foi o princípio matemático, onde as funções matemáticas foram utilizadas para descrever o processo os que foram derivados sempre que possível sem recorrer a simplificações, dessa forma a generalidade do modelo foi garantida. O segundo princípio foi que sempre que forem necessários as descrições empíricas, conhecimento e dados da literatura ou experimentos foram analisados e ajustados para adequar a equação. O empirismo envolvido em um modelo deve ser baseado em observações para serem confrontados com dados reais (Liu et al. 2001).

2.5 Outros modelos para a cana-de-açúcar

O modelo DSSAT/CANEGRO é um dos principais e mais utilizados para modelar a cultura cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS & BEZUIDENHOUT, 2002.) O modelo simula crescimento e desenvolvimento da cultura a partir de variáveis agrometeorologias diárias, cultivares e propriedade do solo e dados de entrada de manejo.

Existe um módulo de fases fenológicas, no qual o modelo simula do plantio ou rebrota até a colheita, ele é dividido em: emergência, quantidade de perfilho, alongamento de colmo, senescência. Para determinar essa mudança de fases, o modelo utiliza o acúmulo de graus-dia (GD), na emergência é estimado um acúmulo térmico de 203 a 428 °C dia, para a quantidade de perfilho o acúmulo de temperatura está entre 400 a 800 °C dia e o alongamento do colmo foi determinado para começar a acumular depois de 1050 °C dia. A senescência folhas é baseado em que uma planta saudável e irrigada não mais que um número específico de folhas verdes, para a expansão foliar é utilizado uma equação que depende de temperatura do ar e disponibilidade hídrica

Jones e Singels (2008) realizaram o refinamento do modelo para melhorar os resultados obtidos ao utilizar o mesmo, adicionou o fator para limitar temperaturas altas no cálculo de somas térmicas. Foram feitas substituições no modelo de perfilhamento que de acordo com Jones e Singels (2008), é extremamente difícil calibrar o modelo para simulação precisa do dossel da cultura, por ser de natureza empírica, dito isso, foi substituído por um

algoritmo simples e dinâmico que leva em consideração a temperatura, déficit hídrico, população de gemas e efeito do sombreamento do dossel em desenvolvimento. Na respiração de manutenção onde anteriormente era utilizado a biomassa total (INMAN-BAMBER, 1991), agora é levado em consideração apenas tecidos vivos e ciclagem da sacarose armazenada no colmo.

3. METODOLOGIA

3.1 Descrição das sub-rotinas do código do programa QCANE

O modelo QCANE é um modelo baseado em processos, que simula o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, computando-se diversos processos, tais como fotossíntese, respiração e particionamento de carboidratos, entre outros. A descrição matemática e física de cada um desses processos pode ser vista com mais detalhes em Liu e Bull (2001). Cada um desses processos foi representado por sub-rotinas externas escritas em linguagem computacional Fortran 90, e acopladas ao programa principal *qcane.f90*, conforme o fluxograma da (Figura 3).

Figura 3. Fluxograma do programa *qcane.f90*, indicando a sequência de sub-rotinas externas



Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

O programa inicia com chamada da sub-rotina *READQCANE*, responsável pela leitura do arquivo de entrada dos parâmetros do modelo QCANE; ou seja, constitui a interface entre o programa e o usuário. Optou-se por uma interface através de um arquivo ASCII, com extensão **.in*, sendo o arquivo padrão denominado *qcane.in*. Caso o usuário altere o nome deste arquivo, a execução do programa do programa deve ser feita informando o novo nome do arquivo, como detalhado na Seção 3.3. A escolha da interface por meio de um arquivo ASCII é preferível à interface gráfica devido à possibilidade de se automatizar as simulações. Para facilitar o código do arquivo *qcane.in*, utilizou-se a biblioteca em Fortran 90 Tuttil (Kraalingen e Rappoldt, 2002). O objetivo dessa biblioteca é reduzir problemas recorrentes com arquivos de entrada e facilitar a entrada e saída de dados, de uma forma mais organizada e prática, com um fácil entendimento sobre a origem e destino dos dados. Esta biblioteca também é utilizada do código do programa SWAP (*Soil Water Atmosphere Plant*) (Kroes, 2017).

Os parâmetros de entrada que foram inseridos neste arquivo de entrada (extensão **.in*) são todos os parâmetros necessários para a simulação de todos os processos do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, resumidos na Tabela 1. Os valores

dos parâmetros usados, na simulação teste deste trabalho, foram os obtidos por Liu (2001). Além desses parâmetros, são informados dados gerais para a simulação, tais como: data de plantio, data de colheita, nome do arquivo meteorológico etc.

Tabela 1. Parâmetros de entradas usados pelo modelo e programa QCANE

Parâmetro	Valor	Referência	Parâmetro	Valor	Referência
α_{max}	1.608×10^{-5} $g CO_2 J^{-1}$	Hartt and Burr (1967)	B_{dn}	1500 °Cd	Exp. A
β_d	12.7 °C	Liu et al. (1998)	β_{dr}	2000.0 $g m^{-2}$	Exp A, Ball-Coelho et al.
β_e	11.6/11.8 °C [†]	Liu et al. (1998)	β_{gc}	11.79	Liu and Kingston (1993)
β_s	12.4/13.2 °C	Liu et al. (1998)	b_{Lma}	0.0863 $g m^{-2} d^{-1}$	Exp. A
γ_c	0.059 °C ⁻¹	Glover (1973)	b_{NI}	0.167 $m^{-2} m^2$	Allison et al. (1997)
γ_l	0.046 °C ⁻¹	Kong and Chu (1972)	b_{pm}	7.656×10^{-5} $g CO_2 m^{-2} d^{-1}$	Allison et al. (1997)
γ_n	0.054 °C ⁻¹	Tovey (1978)	c_{pm}	0.5774 $m^2 g^{-1}$	Allison et al. (1997)
γ_r	0.059 °C ⁻¹	Tovey (1978)	d_{lgN}	60.0	Exp. A, Exp. B [§]
λ_ϕ	0.23	Exp. A [‡]	d_{lgnc}	0/349	Exp. a
λ_c	8.52×10^{-5} $g CO_2 g^{-1} min^{-1}$	Glover (1973)	d_{lgs}	39.0	Exp. a
λ_l	3.991×10^{-6} $g CO_2 g^{-1} min^{-1}$	Kong and Chu (1972)	d_{pm}	2.13	Allison et al. (1997)
λ_n	2.03×10^{-6} $g CO_2 g^{-1} min^{-1}$	Tovey (1978)	d_l	1.09	Liu and Kingston (1993)
λ_r	2.01×10^{-6} $g CO_2 g^{-1} min^{-1}$	Tovey (1978)	g_n	1.10	Liu and Kingston (1993)
ω	0.33	Thornley and Johnson (1990)	g_r	1.10	Liu and Kingston (1993)
μ	0.34/0.29 °C ⁻¹	Exp. A	k	0.58	Exp. A

θ_d	800 °Cd	Liu et al. (1998)	C_{sl}	0.05 $g g^{-1}$	Liu and Kingston (1993)
θ_e	119/138 °Cd	Liu et al. (1998)	C_{sn}	0.25 $g g^{-1}$	Liu and Kingston (1993)
θ_s	1132/1119 °Cd	Liu et al. (1998)	C_{sr}	0.11 $g g^{-1}$	Liu and Kingston (1993)
τ	0.41	Exp. A	C_{fl}	0.87 $g g^{-1}$	Liu and Kingston (1993)
a_α	8.28 °C	Hartt and Burr (1967)	C_{fn}	0.66 $g g^{-1}$	Liu and Kingston (1993)
a_ψ	0.4	Exp. A	C_{fr}	0.80 $g g^{-1}$	Liu and Kingston (1993)
a_{dn}	0.03 °Cd	Exp. A	T_o	29/30 °C [#]	Liu et al. (1998)
a_{dr}	2.0 $g m^{-2} d^{-1}$	Exp. A, Ball-Coelho et al.	T_s	40 °C	Liu et al. (1998)
a_{gc}	0.976	Liu and Kingston (1993)	T_{ro}	40 °C	Bieleski (1958)
a_{Lma}	85.5 $g m^{-2}$	Exp. A	V_{SN}	1.20	Exp. A, Exp. B
a_{NI}	1.85 $g m^{-2}$	Allison et al. (1997)	V_{snc}	446/581 $g m^{-2}$	Exp. A
a_{pm}	1.4243x10 ⁻³ $CO_2 d^{-1}$	Allison et al. (1997)	V_{ss}	1.163	Exp. A
a_{sr}	1.4x10 ⁻³ $m^2 g^{-1}$	Exp. A	V_{wn}	0.75	Exp. A, Exp. B
b_α	2.82 °C	Hartt and Burr (1967)	V_{wnc}	227/332 $g m^{-2}$	Exp. A
b_ψ	499.0	Exp. A	V_{ws}	0.027	Exp. A

†Valores para Q138/Q141.

‡Experiência de Bundaberg.

§ Bull dados inéditos.

29 °C só aplicado à emergência de Q138.

3.2 Estimativa dos Graus-Dia e fases fenológicas

Dentre esses processos simulados, o particionamento da biomassa é o mais afetado pela descrição dos estágios fenológicos da planta. O cálculo dos estágios fenológicos é realizado pela sub-rotina *THERMALTIME*. O modelo QCANE divide o desenvolvimento da cana-de-açúcar em três fases fenológicas: emergência, perfilhamento e maturação. A determinação dessas fases fenológicas foi obtida por Liu et al. (1998) e foram relacionadas aos Graus-dias Acumulados (*GDA*), obtido pela (Equação 09).

$$GDA = \sum_{k=1}^D \theta_k \quad 09$$

em que D é o número de dias e $\theta_k = \theta_m - \theta_a - T_b$, em que T_b ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura basal, e θ_m é o tempo térmico (Equação 10).

$$\theta_m = \begin{cases} \frac{T_{max} + T_{min}}{2}, & T_{min} \geq T_b \\ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{(T_b + T_{min})^2}{2(T_{max} - T_{min})}, & T_{max} > T_b > T_{min} \\ T_b, & T_b \geq T_{max} \end{cases} \quad 10$$

em que T_{max} ($^{\circ}\text{C}$) T_{min} ($^{\circ}\text{C}$) são as temperaturas máximas e mínimas, respectivamente, e θ_a é uma variável que avalia efeito das altas temperaturas no desenvolvimento da cultura (Equação 11).

$$\theta_a = \begin{cases} 0, & T_o > T_{max} \\ \frac{T_s + T_b}{2(T_s + T_o)} \frac{(T_{max} + T_o)^2}{(T_{max} - T_{min})}, & T_o > T_{min} \text{ e } T_{max} < T_s \\ \frac{T_{max}(T_{max} - 2T_b) - T_o(T_s - T_b) + T_s T_b}{2(T_{max} + T_{min})}, & T_o > T_{min}, T_{max} \geq T_s \\ \frac{(T_s - T_b)(T_{max} + T_{min} - 2T_o)}{2(T_s - T_o)}, & T_s > T_{min} \geq T_o, T_{max} < T_s \\ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - \frac{(T_o - T_b)(T_s - T_{min})}{1(T_s - T_o)(T_{max} - T_{min})}, & T_s > T_{min} \geq T_o, T_{max} \geq T_s \\ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b, & T_{min} > T_s \end{cases} \quad 11$$

em que T_s ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura basal superior, T_o ($^{\circ}\text{C}$) temperatura ótima.

O procedimento acima de cálculo de graus-dias foi realizado pela sub-rotina *THERMALTIME*, escrita em Fortran 90.

3.3 Compilação e execução do programa

Para a compilação do modelo é necessário a compilação de todas as sub-rotinas. A compilação é feita de modo sequencial, de modo que, para facilitar a compilação, foi criado um arquivo (extensão *.bat*) para o sistema Windows iniciando com a subrotina *variables.f90*, responsável por definir todas as variáveis utilizada no modelo, em seguida a subrotina *functions.f90*. Dessa as subrotinas seguem compilando até o final do arquivo de compilação, que finaliza gerando um arquivo executável e realizando um link com a biblioteca *tutil* (Figura 4).

Figura 4 Arquivo de compilação do modelo.

```
gfortran -c variables.f90
gfortran -c functions.f90
gfortran -c readqcane.f90
gfortran -c readmeteo.f90
gfortran -c initialize.f90
gfortran -c timing.f90
gfortran -c meteoday.f90
gfortran -c photosynthesis.f90
gfortran -c respiration.f90
gfortran -c thermaltime.f90
gfortran -c partitioning.f90
gfortran -c senesgrothrate.f90
gfortran -c derivaccumulation.f90
gfortran -c output.f90
gfortran qcane.f90 *.o -o qcaneW.exe -L. libttutilW.a
```

Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

3.4 Simulação numérica e análise de sensibilidade

Uma simulação numérica com o modelo foi feita para o período de 16/08/2011 a 31/10/2012. Os dados das variáveis meteorológicas foram obtidos da estação meteorológica automática que fica localizada no município de Rio Largo no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA que é vinculada Universidade Federal de Alagoas- UFAL.

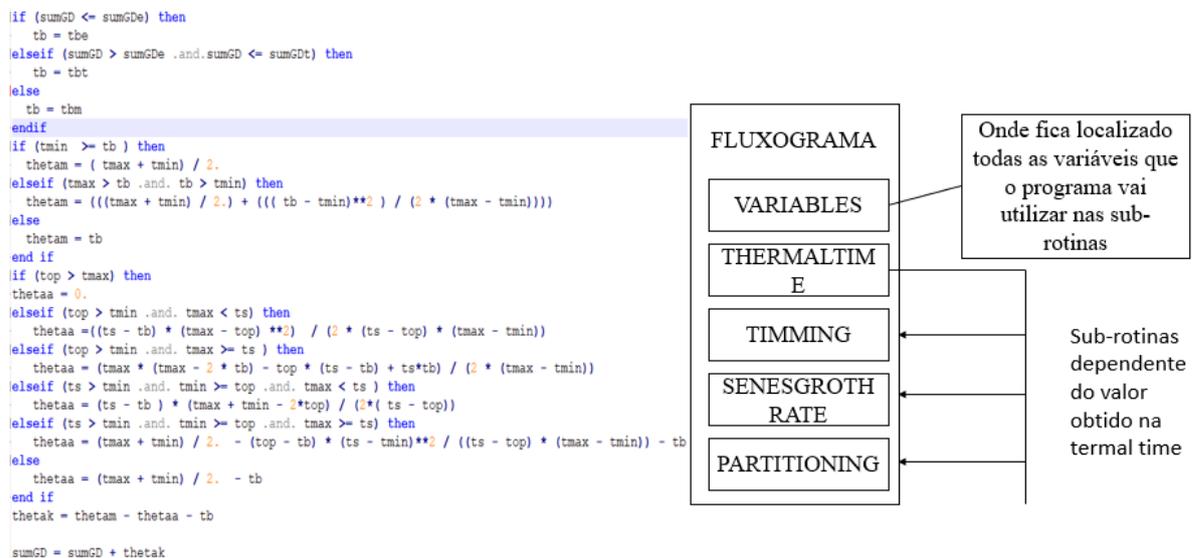
A sensibilidade das variáveis de saída do modelo IAF e produtividade de colmos aos parâmetros de fotossíntese foi feita para o período avaliado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Sub-rotina *thermaltime*

O código fonte da sub-rotina *thermaltime* (Figura 5), usada no programa principal *qcane.f90*, juntamente com um fluxograma indicando as ordens e dependência das sub-rotinas. O código fonte na *termaltime* resulta na determinação dos graus-dias acumulados (*sumGDA*, na sub-rotina), conforme descritos pelas Eqs. (9) - (11). A *thermaltime* depende dos valores de temperatura máxima e mínima, lidas pela sub-rotina *readmeteo* e dos parâmetros *Tb*, *Ts*, *To* lidos pela sub-rotina *readqcane*. Na sub-rotina *partitioning.f90*, a *sumGD* obtido na *thermaltime.f90* é usado na estrutura de condição para verificar o estágio fenológico atual da cana de açúcar (determinado pela sub-rotina *timing.f90*), necessário para determinar o particionamento de fotoassimilados. Na *senesgrothrate.f90*, a *sumGD* é utilizada para testar a condição de taxa de matéria seca transformado, para verificar em que local está ocorrendo a distribuição de fibras e açúcares.

Figura 5. Código fonte da sub-rotina *termaltime* para o cálculo dos graus-dias com base na metodologia de Liu. (1998), de acordo com as Figuras. 9 a 11



Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

4.2 Arquivo de entrada (interface) do modelo QCANE

A Figura 6 ilustra parte do arquivo de entrada do modelo QCANE, produzido para ser lido pelas sub-rotinas da Tutuil. Inicialmente, o modelo solicita ao usuário o nome do arquivo dos dados meteorológicos. A organização desse arquivo é detalhada em *readmeteo.f90*. Posteriormente, informar a data do plantio na variável *plantdate*, informar a data da primeira colheita que é cana planta e a da segunda que é cana soca, informar a latitude (Lat) de onde fica localizado o experimento responsável pelos dados. Na mesma também podem ser feitas várias simulações com datas distintas de colheita.

Figura 6. Ilustração do arquivo de entrada do modelo, lido com sub-rotinas da biblioteca Tutuil

```

1  * Arquivo com os parametros de entrada do modelo QCANE
2  ****
3
4  ****
5  ****
6  * Parte 1 : Dados iniciais de entrada para o QCANE
7
8  * Informe os dados de entrada , no lugar em que esta 'ceca_all.qca' coloque o seu arquivo de dados
9  meteofilename = 'ceca2004.qca' ! Nome do arquivo meteorológico
10
11 * Informe a data do plantio
12 plantdate      = 01-OCT-2003    ! Data de plantio
13
14 * Informe o periodo de simulação
15 haverst       datehaverst      ! haverst data correspondente
16 1             01-OCT-2004
17 2             25-FEB-2006
18 * Insira o valor da Latitude local
19 lat           = -9.36          ! Latitude local

```

Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

Nessa parte vai ser necessário substituir os dados meteorológicos e fenológicos das variáveis, utilizando os dados locais e das variedades de cana de açúcar que serão objeto de estudo, o programa inicialmente pede o valor de temperatura suportada pela cultura que após essa temperatura o crescimento cessa. Após pede os valores de temperatura basal, perfilhamento, maturação, ótima e temperatura máxima. Essas variáveis devem ser utilizadas dados locais da cultura (Figura 7).

Figura 7. Ilustração de dados meteorológicos e fenológicos, lido com sub-rotinas da biblioteca Tuttil

```

44
45 * Informe o valor da temperatura suportada pela variedade
46
47 totm   = 40.0           ! Digite o valor da temperatura ideal suportada pela variedade (*C)
48
49 * Insira os valores de temperatura Basal, Top e Máxima suportados pela variedade
50
51 TBe    = 11.5           ! Temperatura Basal para emergência (C)
52 TBt    = 12.4           ! Temperatura Basal para o perfilhamento (C)
53 TBm    = 12.7           ! Temperatura Basal para a maturação (C)
54 Top    = 30.0           ! Temperatura Top (C)
55 Ts     = 40.0           ! Temperatura maxima (C)
56
57 * Digite o valor da soma do grau de dia para: Emergência, perfilhamento e maturação da variedade
58
59 sumGDe = 120.0          ! Tempo térmico diário acumulado para emergencia (*Cd)
60 sumGDt = 800.0          ! Tempo térmico diário acumulado para perfilhamento (*Cd)
61 sumGDM = 1132.0         ! tempo térmico diário acumulado para maturação (*Cd)
62
63 *****
64
65

```

Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

As principais sub-rotinas usadas da Tuttil são: rdinit, rdscha, rdstim, rdsdou, rdadou. A rdstim é utilizada para variáveis do tipo real simples segue a mesma lógica da rdscha, a rdsdou que é utilizada para variáveis reais com uma maior precisão dos dados, a mesma segue a formatação da rdscha, já rdadou é utilizada para variável que possui mais de um dado para a mesma variável porem em tempos diferentes a formatação dela é: o primeiro nome que está entra as aspas deve estar da mesma forma que no arquivo de entrada, o segundo o nome da variável, o terceiro será a matriz dos dados, e o quarto contabiliza a quantidade de dados na variável, rdatim é utilizada para variáveis de tempo lê uma lista de dados e armazena na variável a formatação segue a mesma lógica da rdadou.

4.3 Sub-rotina *readmeteo.f90*

Parte do código fonte da sub-rotina *readmeteo.f90*, cabeçalho e declaração de variáveis, é ilustrado na Figura 8. A subrotina é usada para processamento de dados oriundo de estação meteorológica e organiza os dados no formato requerido pelo programa principal *swapqcanew1.0.f90*. A formatação e organização do arquivo é a mesma requerida pelo modelo SWAP. A subrotina *readmeteo.f90* faz a leitura do arquivo em formato ACSII, o qual deve conter as seguintes variáveis meteorológicas: temperatura do ar máxima e mínima (°C), velocidade do vento (m/s), umidade relativa do ar máxima (%) e irradiância solar global ($W m^{-2}$), precipitação pluvial (mm). Após fazer a leitura do arquivo em formato ASCII, a subrotina executa o cálculo das máximas, mínimas e médias diárias da Tar, UR e VV, calcula o total de diário de precipitação pluvial (somando-se os valores) e a irradiação solar global

(KJ m² d⁻¹) por integração numérica, utilizando a regra de Simpson. A ETo (mm d⁻¹) é calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO-56. O código fonte da subrotina está em constante atualização de modo a se tornar o mais amplo possível em relação à formatação e organização do arquivo de entrada.

Figura 8. Parte do código fonte da sub-rotina *readmeteo.f90* para processamento dos dados meteorológicos

```

!! File VersionID:
!! $Id: readmeteo.f90 328 2017-06-03 21:05:50z kroes006 $
!!
!! This file contains the following subroutines, in order of calling:
!! 1. ReadMeteo      : reads meteorological input data; called in SWAP
!! 2. ReadRainEvents : reads input data on rain events; called in ReadMeteo (optional)
!!
!! SUBROUTINE 1.
!! -----
!!      subroutine ReadMeteo
!! -----
!!      Last modified      : March 2014
!!      Purpose           : read meteorological data of one calendar year
!! -----
!!
!!      use variables
!!      implicit none
!!
!!      --- global
!!      - general
!!
!!      --- local
!!      character(len=11)  datedum
!!      character(len=3)   ext
!!      character(len=200) filnam
!!      character(len=800) messag
!!      character(len=80)  station(366)
!!      integer            ad(mrain), am(mrain), datea(6), daynumber, i, ifnd
!!      integer            getun2, wth
!!      real(4)            fsec
!!      real(8)            etrmax, etrmin, hummax, hummin, radmax, radmin, raimax, raimin
!!      real(8)            tmeteo, tmnmax, tmnmin, tmxmax, tmxmin, winmax, winmin

```

Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

4.4 Dados de Saída

O programa *qcane.f90* possui dois arquivos de saída, um para a concentração de fibras e açúcares *qcane.fsu*, o outro para a quantidade de matéria seca *qcane.dwe*. Ambos são gerados simultaneamente, os dados gerados pelo arquivo de saída *qcane.fsu*: data, DAP (dias após plantio), DAE (dias após emergência), Graus-dia (GD), tfibre, nfibre, cfibre, tsugar, lsugar, nsugar, csugar, rsugar. Inicia com total de fibras, fibra na folha, topo não moivel, cana e raiz. Depois as concentrações de açúcares que inicia pelo massa total de açúcar, açúcar na folha, topo não moivel, cana e raiz, sucessivamente (Figura 10). Os dados de saída do arquivo *qcane.dwe* muda algumas coisas, inicialmente começa com a data, DAP, DAE e GD. Esses são iguais ao outro arquivo de saída, os dados que o outro arquivo não possui são: Índice de área foliar (IAF), matéria seca total, matéria seca da folha, topo não moivel, cana, matéria seca acima do solo, abaixo do solo e por final matéria seca da raiz (Figura 11).

Figura 10. Resultados do arquivo de saída *qcane.fsu*.

```

Model version: qcane1.0
Generated at: 17-02-2023 18:25:59
Explanation of the output variables:
  tfibre: total weight of fibre
  lfibre: leaf fibre weight
  nfibre: non-milliable fibre weight
  cfibre: cane fibre weight
  rfibre: root fibre weight
  tsugar: total weight of sugar
  lsugar: leaf sugar weight
  nsugar: non milliable top sugar weight
  csugar: cane sugar weight
  rsugar: root sugar weight

```

data dd-mm-yyy	DAP d	DAE d	GD *Cd	tfibre (g/m2)	lfibre (g/m2)	nfibre (g/m2)	cfibre (g/m2)	rfibre (g/m2)	tsugar (g/m2)	lsugar (g/m2)	nsugar (g/m2)	csugar (g/m2)	rsugar (g/m2)
21-08-2011	10	0	130.350	2.075	0.596	0.452	0.479	0.548	0.349	0.034	0.171	0.068	0.075
22-08-2011	11	1	140.460	2.138	0.621	0.468	0.495	0.554	0.386	0.036	0.177	0.097	0.076
23-08-2011	12	2	150.820	2.185	0.639	0.481	0.507	0.558	0.416	0.037	0.182	0.121	0.077
24-08-2011	13	3	162.060	2.248	0.663	0.497	0.523	0.565	0.455	0.038	0.188	0.150	0.078
25-08-2011	14	4	171.260	2.340	0.699	0.521	0.546	0.575	0.507	0.040	0.197	0.190	0.079
26-08-2011	15	5	182.425	2.382	0.715	0.532	0.556	0.579	0.535	0.041	0.201	0.213	0.080
27-08-2011	16	6	194.050	2.475	0.753	0.557	0.580	0.590	0.590	0.043	0.211	0.255	0.081
28-08-2011	17	7	205.470	2.589	0.796	0.585	0.607	0.601	0.651	0.046	0.221	0.301	0.083
29-08-2011	18	8	216.345	2.711	0.844	0.616	0.636	0.615	0.719	0.049	0.233	0.353	0.085
30-08-2011	19	9	227.775	2.801	0.879	0.639	0.658	0.624	0.771	0.050	0.242	0.393	0.086
31-08-2011	20	10	238.600	2.938	0.932	0.674	0.692	0.640	0.847	0.054	0.255	0.450	0.088
01-09-2011	21	11	249.820	3.064	0.981	0.707	0.722	0.655	0.919	0.056	0.268	0.505	0.090
02-09-2011	22	12	260.285	3.207	1.036	0.743	0.756	0.671	0.999	0.060	0.282	0.566	0.092
03-09-2011	23	13	271.270	3.315	1.078	0.771	0.782	0.684	1.063	0.062	0.292	0.615	0.094
04-09-2011	24	14	281.980	3.472	1.139	0.811	0.820	0.703	1.152	0.065	0.307	0.682	0.097

Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

Figura 11. Parte dos resultados obtidos no arquivo *qcane.dwe*.

```

Model version: qcane1.0
Generated at: 17-02-2023 18:25:59
Explanation of the output variables:
  tfibre: total weight of fibre
  lfibre: leaf fibre weight
  nfibre: non-milliable fibre weight
  cfibre: cane fibre weight
  rfibre: root fibre weight
  tsugar: total weight of sugar
  lsugar: leaf sugar weight
  nsugar: non milliable top sugar weight
  csugar: cane sugar weight
  rsugar: root sugar weight

```

data dd-mm-yyy	DAP d	DAE d	GD *Cd	tfibre (g/m2)	lfibre (g/m2)	nfibre (g/m2)	cfibre (g/m2)	rfibre (g/m2)	tsugar (g/m2)	lsugar (g/m2)	nsugar (g/m2)	csugar (g/m2)	rsugar (g/m2)
21-08-2011	10	0	130.350	2.075	0.596	0.452	0.479	0.548	0.349	0.034	0.171	0.068	0.075
22-08-2011	11	1	140.460	2.138	0.621	0.468	0.495	0.554	0.386	0.036	0.177	0.097	0.076
23-08-2011	12	2	150.820	2.185	0.639	0.481	0.507	0.558	0.416	0.037	0.182	0.121	0.077
24-08-2011	13	3	162.060	2.248	0.663	0.497	0.523	0.565	0.455	0.038	0.188	0.150	0.078
25-08-2011	14	4	171.260	2.340	0.699	0.521	0.546	0.575	0.507	0.040	0.197	0.190	0.079
26-08-2011	15	5	182.425	2.382	0.715	0.532	0.556	0.579	0.535	0.041	0.201	0.213	0.080
27-08-2011	16	6	194.050	2.475	0.753	0.557	0.580	0.590	0.590	0.043	0.211	0.255	0.081
28-08-2011	17	7	205.470	2.589	0.796	0.585	0.607	0.601	0.651	0.046	0.221	0.301	0.083
29-08-2011	18	8	216.345	2.711	0.844	0.616	0.636	0.615	0.719	0.049	0.233	0.353	0.085
30-08-2011	19	9	227.775	2.801	0.879	0.639	0.658	0.624	0.771	0.050	0.242	0.393	0.086
31-08-2011	20	10	238.600	2.938	0.932	0.674	0.692	0.640	0.847	0.054	0.255	0.450	0.088
01-09-2011	21	11	249.820	3.064	0.981	0.707	0.722	0.655	0.919	0.056	0.268	0.505	0.090
02-09-2011	22	12	260.285	3.207	1.036	0.743	0.756	0.671	0.999	0.060	0.282	0.566	0.092
03-09-2011	23	13	271.270	3.315	1.078	0.771	0.782	0.684	1.063	0.062	0.292	0.615	0.094
04-09-2011	24	14	281.980	3.472	1.139	0.811	0.820	0.703	1.152	0.065	0.307	0.682	0.097

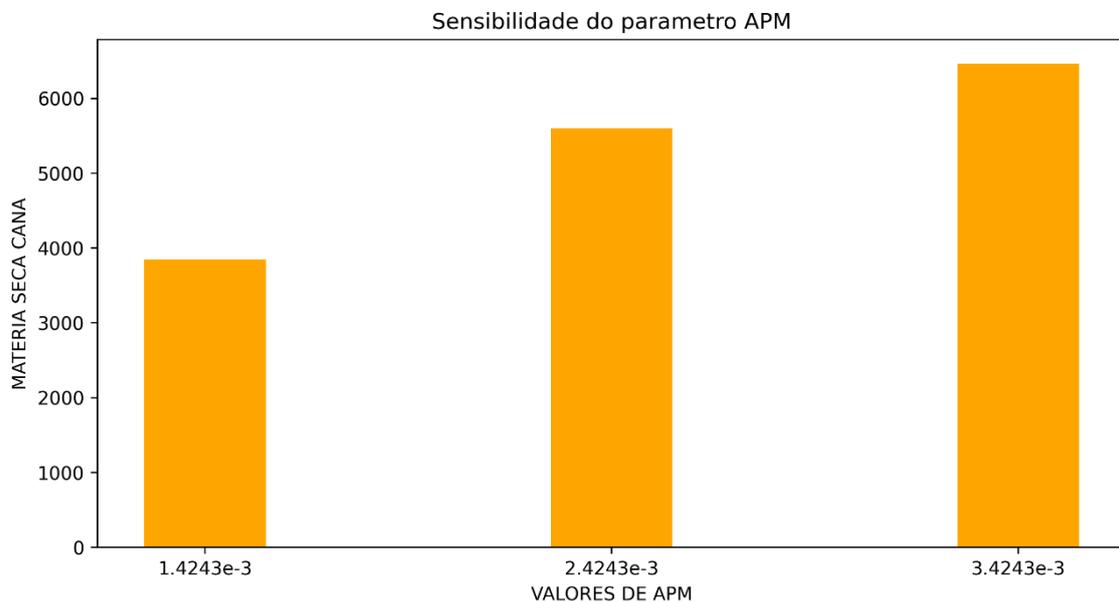
Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

4.5 Análise de sensibilidade

O modelo QCANE contém diversos parâmetros de entrada que podem influenciar as variáveis de estados simuladas pelo modelo. Desta forma, aplicou-se o teste de sensibilidade de alguns parâmetros nas principais variáveis simuladas pelo modelo. Foi realizado testes nas variáveis α_{pm} e b_{pm} que estão ligados diretamente ao nitrogênio foliar específico no processo de fotossíntese. A relação de P_m e N é derivada de (Alisson et al. 1997).

Os resultados obtidos após as simulações com alterações nos valores das variáveis α_{pm} e b_{pm} , para mudança de uma unidade nos valores de α_{pm} tem se diferença mais significativa entre os valores de 1.4243×10^{-3} e 2.4243×10^{-3} que possui uma diferença de 45% entre eles. Porém a diferença entre os valores 2.4243×10^{-3} e 3.4243×10^{-3} é de 15 %, o que indica que quanto maior o parâmetro α_{pm} menor será a produção de matéria seca (Figura 12).

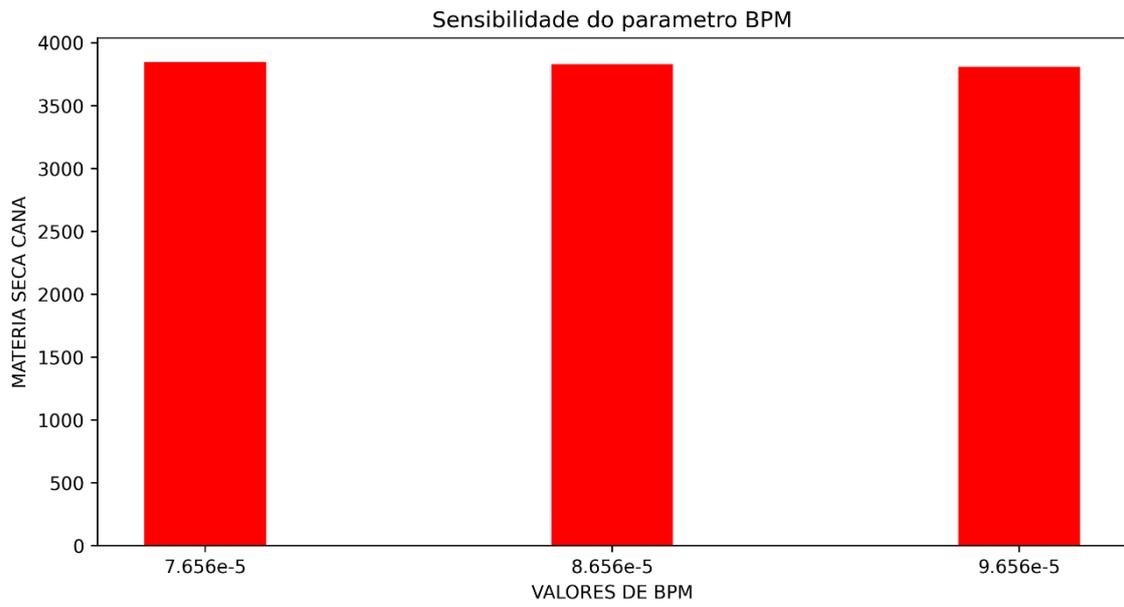
Figura 12. Variação da matéria seca da cana em relação a diferentes valores de α_{pm}



Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

Diferente dos resultados obtidos apenas com a alteração dos valores de α_{pm} os resultados obtidos com a mudança do parâmetro b_{pm} , foram bem menos sensíveis enquanto as variações em percentagem do α_{pm} teve uma diferença de 45% e 15 %, nos resultados de b_{pm} foram de 0,47% e 0,48% (Figura 13), respectivamente. O que indica que a variável α_{pm} é bem mais sensível a alterações e modificações relacionadas a ela. Logo a sensibilidade da variável α_{pm} é muito superior em relação a outra, dessa forma qualquer alteração que seja feita no valor dela pode causar grandes alterações nos resultados obtidos.

Figura 13. Variação da matéria seca da cana em relação a diferentes valores de b_{pm}



Fonte: Elaborado pelo organizador (2023)

5. CONCLUSÃO

As simulações de sensibilidade realizada nesse estudo apontam que as variáveis de estado do modelo, como massa seca do colmo e IAF, apresentaram sensibilidade aos parâmetros relacionados com a concentração de N na folha. Desta forma, a calibração destes parâmetros para cada variedade de cana-de-açúcar torna-se um fator importante para o desempenho do modelo.

O código apresentado permite o acoplamento com outros modelos de simulação de água no solo e, então, avaliar a simulação da produtividade real da cultura.

6. REFERÊNCIAS

- B. A. M. BOUMAN, H. VAN KEULEN, H. H VAN LAAR & R. RABBINGE. The 'school of de Wit' Crop Growth Simulation Models: A Pedigree and Historical Overview. *Agricultural Systems*. Vol. 52. Nos 2/3, pp. 171-198. 1996
- BEZUIDENHOUT, C.N. A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugar cane crop model. 2000. 78 p. MTech Technikon natal, Durban, 2000.
- CONAB Acomp. safra bras. cana, v. 7- Safra 2020/21, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-57 maio de 2021.
- D. L. LIU., T. A. BULL. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model, Received 29 June 2000; received in revised form 22 May 2001; accepted 15 June 2001
- D.W.G. VAN KRAALINGEN, C. RAPPOLDT. 2002. Reference manual of the FORTRAN utility library TTUTIL v. 4 March 2000. Report 5. Updated for TTUTIL 4.13 (as PDF version only, April 2002).
- DA COSTA FARIA MARTINS, S., DOS SANTOS, M.A., LYRA, G.B. et al. Actual Evapotranspiration for Sugarcane Based on Bowen Ratio-Energy Balance and Soil Water Balance Models with Optimized Crop Coefficients. *Water Resour Manage* 36, 4557–4574 (2022).
- DIAS, J. *Ecofisiologia de culturas agrícolas*. Belo Horizonte; EdUEMG, 2018. 169 p.
- FERREIRA JUNIOR, R. A., *Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar*. Rio Largo, 2010. UFAL – 68 F.: Grafts., tabs.
- Food and agriculture organization of the United Nations. FAOSTAT. Countries by commodity 2020 disponível em:
https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity
- <https://www.atlasbig.com/pt-br/paises-por-producao-de-cana-de-acucar>

INMAN-BAMBER, NG; KIKER, G. CANEGRO 3.10. DSSAT versão 3.1 1998 distribution software. Honolulu: University of Hawaii, 1997. P. 162 - 165

JIANG, R., WANG, T., SHAO, J, GUO, S., ZHU, W., YU, Y., CHEN, S., HATANO. R., 2017. Modeling the biomass of energy crops: Descriptions, strengths and prospective. *Journal of Integrative Agriculture* 2017.

JONES, C.A., KINIRY, J.R., 1986. CERES-MAIZE: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A & M University Press, Texas.

KEATING, B.A., ROBERTSON, M.J., MUCHOW, R.C., HUTH, N.I., 1999. Modelling sugarcane production systems. 1. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.* 61, 253–271.

KEATING, B.A., ROBERTSON, M.J., MUCHOW, R.C., HUTH, N.I., 1999. Modelling sugarcane production systems. 1. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.* 61, 253–271.

KROES, J. G., J.C VAN DAM, R.P. BARTHOLOMEUS, P. GROENENDIJK, M. HEINEN R.F.A. HENDRIKS, H.M. MULDER, I. SUPIT, P.E.V. VAN MALSUM, 2017. SWAP version 4; Theory description and user manual. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780. 244 pp.; 57 fig.; 17 tab.; 312 ref.

LIU, D.L., KINGSTON, G., BULL, T.A., 1998. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub-optimum and supraoptimum temperature regimes. *Agric For. Meteorol.* 90, 119–139

SINGELS, A; BEZIDENHOUT, C, N. A new method of simulating dry matter partitioning in the DSSAT/CANEGRO sugarcane model. *Field crops research*, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

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

SOUZA, J. L.; FILHO, J. M.; LYRA, R. F. F.; TEODORO, I.; SANTOS, E. A.; SILVA, J. L.; SILVA, P. R. T.; CARDIM, A. H.; AMORIM, E. C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na Região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 131-141, 2003

TEIXEIRA, MARCONI BATISTA ; REIS, CLEIBER GERALDO DOS ; MANTOVANI, EVERARDO CHARTUNI ; VICENTE, MARCELO ROSSI Utilização do programa computacional IRRIGA para estimativa do consumo de água da cafeicultura irrigada do Triângulo Mineiro e oeste da Bahia. Trabalho apresentado no Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil (3.: 2003: Porto Seguro, BA). Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2003.

TERRAMOTO, E. R. Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana de açúcar (*saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima. Picaricaba, 2003, 85p. (tese doutorado) esalq. Usp