



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



LEKSON RODRIGUES SANTOS

**PRODUTIVIDADE DE CULTIVAR DE CANA-ENERGIA PELO MODELO  
DSSAT/CANEGRO**

**Rio Largo-AL  
2018**

LEKSON RODRIGUES SANTOS

**PRODUTIVIDADE DE CULTIVAR DE CANA-ENERGIA PELO MODELO  
DSSAT/CANEGRO**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências do Programa de pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal.

**Orientador:** Professor Dr. Guilherme Bastos Lyra

**Co-orientador:** Professor Dr. André Luiz de Carvalho

**Rio Largo-AL  
2018**

Catálogo na fonte  
Universidade Federal de Alagoas  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias  
Bibliotecário: Erisson Rodrigues de Santana

S237p Santos, Lekson Rodrigues

Produtividade de cultivar de cana-energia pelo modelo  
dssat/canegro. Rio Largo - AL – 2018.  
80 f.; il; 33 cm

Dissertação - Programa de pós-graduação em produção  
vegetal (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de  
Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2018.

Orientador(a): Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra

Co-Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Carvalho.

1. Altura do colmo. 2. Produtividade. 3. Cenários Climáticos. I.  
Título.

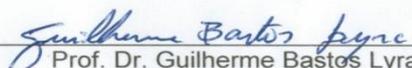
CDU: 633.61

TERMO DE APROVAÇÃO

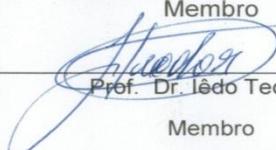
LEKSON RODRIGUES SANTOS  
(Matrícula 16130085)

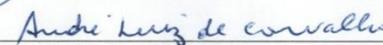
**"Produtividade de cultivar de cana-energia pelo modelo DSSAT/CANEGRO na região canavieira alagoana"**

Dissertação apresentada e avaliada pela banca examinadora em dezesseis de abril de 2018, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração em Produção vegetal do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.

  
Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra  
Presidente

  
Prof. Dr. Stécio Malta Ferreira Maia  
Membro

  
Prof. Dr. Iêdo Teodoro  
Membro

  
Prof. Dr. André Luiz de Carvalho  
Membro

Rio Largo - AL  
Abril/2018

Aos meus pais Cícero Rodrigues e Maria Lúcia Lino Santos;

Aos meus tios José Antelmo e Vânia da Hora, meus avos Manoel da Hora e Maria  
Ismênia da Hora;

A minha irmã Leidjane Rodrigues e sobrinho Heitor R. Pimentel

A minha esposa Milanne B. de lima e filha Marília B. Rodrigues

DEDICO!

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por ter me permitido tamanha vitória;

Aos meus pais, Cícero Rodrigues Santos e Maria Lúcia Lino Santos pelo amor, carinho e confiança;

A minha esposa Milanne B. de Lima e filha Marília B. Rodrigues pelo amor e carinho dedicado a mim;

Aos meus tios José Antelmo Alves Ribeiro e Vânia da Hora pelo amor e carinho;

Aos meus avós Manoel da Hora e Maria Ismênia da Hora pelo amor e carinho;

A minha irmã Leidjane e esposo Edinei pelo apoio e companheirismo;

À minha tia Marli e esposo Dotenio e primas Tays R. Hora e Millena R. Hora pelo apoio;

Aos meus primos-irmãos Juliana H. Ribeiro, João Paulo da H. Ribeiro e Jessica da H. Ribeiro;

Aos meus amigos-irmãos Moisés Ribeiro, Felipe Roland, Thyago Roland, Marcelo Guedes.

A minha sogra Maria Tereza B. de Lima e cunhada Isabella B. de Lima pelo apoio e incentivo;

Aos meus amigos Dona Carmelita, Alberto, Jaqueline B. e Charles pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Marcos Antonio Chagas e Ana Paula B. Chagas e seus filhos João Marcos, Pedro Rafael e Andre Felipe pelo apoio e incentivo;

Aos meus amigos Emerson Fabio, Letícia e sua filha Ana Laís pelo apoio e incentivo

Aos meus sobrinhos Heitor R. Pimentel, Redson Amélio, Gabriel Amélio e Cecília Ribeiro;

Ao Doutor Ivonbergue pela amizade e convivência;

Aos professores Dr. Guilherme Bastos Lyra, Dr. Iêdo Teodoro, Dr. José Leonaldo Souza, Dr. Andre Luiz de Carvalho e Dr. Ricardo de Araujo pelos ensinamentos, conselhos e pela oportunidade de fazer parte do setor de Irrigação e Agrometeorologia;

Aos meus companheiros do setor de Irrigação e Agrometeorologia: Aristides Neto, Arthur Cantarele, Augusto Cesar, Marcelo Augusto, Claudio Soreano, Constantino Junior, Ricardo Barbosa, Jeferson Miguel, Alan Moura, Madson e Ednaldo, pela amizade e companheirismo aos longos dos anos.

Ao corpo docente do curso de Agronomia pelos ensinamentos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

“Ninguém nunca vai bater tão forte como a vida  
Mas a vida não é sobre quão forte você bate  
Mas sobre quanta pancada você consegue agüentar  
e ainda assim seguir em frente. É assim que se vence!”  
Sylvester Stallone

## Resumo

A busca por novas culturas agrícolas voltadas para geração de energia fez ressurgir o interesse pela cana-energia. Uma cultura que tem sua síntese através do melhoramento genético de espécies selvagens com híbridos comerciais de cana-de-açúcar, obtendo-se uma cana com alta produção de biomassa. Por isso é de suma importância que seja realizada novas pesquisas com a cana-energia, para um melhor manejo da cultura. Os modelos matemáticos de previsões são excelentes ferramentas de suporte podendo auxiliar na implantação da cana-energia em novos ambientes, atualmente, o modelo DSSAT/CANEGRO e o mais utilizado para simulação de crescimento da cana-de-açúcar. O DSSAT/CANEGRO teve sua origem na África do Sul, foi baseado no modelo Ceres-Maize e pertencente à plataforma DSSAT sendo atualizado na versão 4.5. O objetivo desse trabalho foi a avaliação e calibração do modelo DSSAT/CANEGRO, com uso do mesmo ajustado para avaliação de impactos de projeções do clima na produtividade da matéria fresca e seca da cana-energia no estado de Alagoas em cenário presente e quatro cenários futuros de RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5). Para o processo de calibração foi utilizada a variedade de cana-energia vertex 2, no ciclo de cana planta irrigada, em um experimento de campo desenvolvido na fazenda Rocheira, município de Teotônio Vilela-AL (09°55'35"S; 36°17'03"W; 124 m) numa área de aproximadamente 1,0 hectare (ha). O modelo DESSAT/CANEGRO apresentou elevado grau de ajuste na simulação, do crescimento e produtividade da cana-energia. Os indicadores de desempenho do modelo foram os índices estatísticos: (d) Willmott, RMSE, R<sup>2</sup>, correlação de Pearson (r). Para a variável matéria verde o genótipo VERTIX 2 obteve valores de (0.98 e 0.94) para os índices d e r, respectivamente, tendo indicadores estatísticos similares para as variáveis matéria seca (d=0.99 e r= 0.88) e altura do colmo (d= 0.99 e r= 0.98). O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou um elevado grau de ajuste para as variáveis do genótipo de cana-energia analisadas. A avaliação dos cenários futuros foi realizada para uma série climática de 2018 a 2095 e a série presente de 1961 a 1990, esses dados meteorológicos foram adquiridos do modelo climático global MIROC-05. Em relação a produtividade de modo geral as quatro RCPs obtiver aumentos na matéria verde e seca em relação ao cenário presente, com destaque para RCPs 2.6 e 8.5, esse incremento poderá ser devido a aumentos na radiação solar, precipitação pluvial temperatura máxima e mínima para anos futuros.

**Palavras-chave:** Altura do colmo; Produtividade; Cenários climáticos;

## ABSTRAT

The search for new agricultural crops geared to power generation has rekindled the interest in energy cane. A crop that has its synthesis through the genetic improvement of wild species with commercial hybrids of sugarcane, obtaining a cane with high production of biomass. Therefore, it is of the utmost importance that new research be carried out with cane-energy, for a better management of the crop. The mathematical models of predictions are excellent support tools in the implantation of energy cane in new environments, currently the DSSAT / CANEGRO model and the most used for simulation of growth of sugarcane. DSSAT / CANEGRO originated in South Africa, was based on the Ceres-Maize model and belongs to the DSSAT platform and is updated in version 4.5. The objective of this work was the evaluation and calibration of the DSSAT / CANEGRO model, with its use adjusted to assess the impact of climate projections on the productivity of fresh and dry sugarcane matter in the state of Alagoas in the present scenario and four future scenarios of RCPs (2.6, 4.5, 6.0 and 8.5). For the calibration process, the cane-energy vertex 2 variety was used in the irrigated cane cycle in a field experiment developed at Rocheira farm, Teotônio Vilela-AL municipality (09 ° 55'35 "S, 36 ° 17'03 "W; 124 m) in an area of approximately 1.0 ha (ha). The DESSAT / CANEGRO model presented a high degree of adjustment in the simulation, growth and productivity of sugarcane. The performance indicators of the model were the statistical indices: (d) Willmott, RMSE, R<sup>2</sup>, Pearson's correlation (r). For the green matter variable the VERTIX 2 genotype obtained values of (0.98 and 0.94) for the indexes der, respectively, and had similar statistical indicators for the dry matter variables (d = 0.99 and r = 0.88) and height of the stem (d = 0.99 and = 0.98). The DSSAT / CANEGRO model presented a high degree of adjustment for the cane-energy genotype variables analyzed. The assessment of future scenarios was performed for a climatic series from 2018 to 2095 and the present series from 1961 to 1990, these meteorological data were acquired from the global climate model MIROC-05. Regarding productivity in general, the four CPRs obtained increases in green and dry matter in relation to the present scenario, especially CPRs 2.6 and 8.5, this increment may be due to increases in solar radiation, rainfall pluvial maximum and minimum temperature for years futures.

**Keywords:** Height of the stem; Productivity; Climate scenarios;

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Comparações entre a cana-energia e a cana-de-açúcar.....	6
<b>Figura 2.</b> Diagrama da esquematização do modelo DSSAT .....	10
<b>Figura 3.</b> Estação agrometeorológica automática.....	18
<b>Figura 4.</b> Precipitação pluvial (P), Temperaturas mínima, máxima e média no período de 01/01/2016 a 31/01/2017 na região do município Teotônio Vilela -AL. ....	25
<b>Figura 5.</b> Método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final. ....	26
<b>Figura 6.</b> Matéria Fresca observada e simulada ao longo do ciclo da cultura. Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final. ....	29
<b>Figura 7.</b> Matéria Seca observada e simulada ao longo do ciclo da cultura. Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final. ....	30
<b>Figura 8.</b> Índice de área foliar observado e simulado ao longo do ciclo da cultura. Fases fenológicas determinadas pelo método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final .....	32
<b>Figura 9.</b> Altura do colmo observada e simulada ao longo do ciclo da cultura. Fases fenológicas determinadas pelo método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final. ....	32
<b>Figura 10.</b> Perfilhamento observado e simulado ao longo do ciclo da cultura. Fases fenológicas determinadas pelo método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final. ....	34
<b>Figura 11.</b> Transpiração acumulada (T; mm) e evaporação (E; mm) simulada pelo modelo DSSAT / CANEGRO para cultura da cana-energia planta, para o estado de Alagoas. ....	35
<b>Figura 12.</b> Domínio do Modelo MIROC5.....	42
<b>Figura 13.</b> Desvios das temperaturas (a) máximas e mínimas (b) adquiridas mediante a comparação entre as RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 com cenário atual. ....	44
<b>Figura 14.</b> Desvios da precipitação pluvial (c) e radiação solar (d) adquiridas mediante a comparação entre as RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 com cenário atual. ....	45
<b>Figura 15.</b> Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 2.6. ....	47
<b>Figura 16.</b> Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 4.5. ....	48

<b>Figura 17.</b> Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 6.0. ....	49
<b>Figura 18.</b> Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 8.5. ....	50
<b>Figura 19.</b> Correlação entre o massa fresca (a,c) e seca (b,d) para as dados meteorológicos observados em campo e os simulada com dados meteorológicos do modelo MIROC 5, para as RCPs 2.6 e 4.5. ....	51
<b>Figura 20.</b> Correlação entre a massa fresca (a,c) e seca (b,d) para as dados meteorológicos observados em campo e os simulada com dados meteorológicos do modelo MIROC-05, para as RCPs 6.0 e 8.5. ....	52
<b>Figura 21.</b> Predições das matérias fresca (a) e seca (b) da cana-energia VX12-1744 em cenário presente e futuro ( RCPs 2.6), na região de Teotônio Vilela-AL. ....	55
<b>Figura 22.</b> Predições da matéria fresca (a) e seca (b) da cana-energia VX12-1744 em cenário presente e futuro (RCPs 4.5), na região de Teotônio Vilela-AL. ....	55
<b>Figura 23.</b> Predições da matéria fresca (a) e seca (b) da cana-energia VX12-1744 em cenário presente e futuro (RCPs 6.0), na região de Teotônio Vilela-AL. ....	56
<b>Figura 24.</b> Predições da matéria fresca (a) e seca (b) da cana-energia VX12-1744 em cenário presente e futuro (RCPs 8.5), na região de Teotônio Vilela-AL. ....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características da cana-energia Vertix 2 .....	19
<b>Tabela 2.</b> Coeficiente de cultivo para cana-energia de acordo com o DAT .....	20
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros de entrada do DSSAT/CANEGRO.....	22
<b>Tabela 4.</b> Parâmetros do modelo DSSAT/CANEGRO para a cultura padrão NCo376 e para cana-energia VX12=1744.....	28
<b>Tabela 5.</b> índices estatísticos $R^2$ , d, raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice de correlação de Pearson (r) para variedade de cana-energia Vx=1744 para massa fresca e seca do colmo. ....	30
<b>Tabela 6.</b> índices estatísticos $R^2$ , d, raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice de correlação de Pearson (r) para variedade de cana-energia VX12=1744 para índice de área foliar, Perfilamento e altura do colmo. ....	34
<b>Tabela 7.</b> Variáveis atmosféricas do modelo MIROC5.....	42

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.2 Cana para geração de energia .....	4
2.3 Modelagem na agricultura .....	7
2.4 Modelo DSSAT .....	9
2.4.1 DSSAT/CANEGRO .....	13
<b>CAPITULO 1. AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE PARAMETROS DE CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO DSSAT/CANEGRO PARA A CANA-ENERGIA NA ZONA CANAVIEIRA ALAGOANA</b> .....	15
<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	17
2.1 Localização e variáveis ambientais .....	17
2.2 Delineamento experimental e tratamentos .....	18
2.3 Plantio e manejo da cultura .....	19
2.4 Análises de crescimento e desenvolvimento da planta.....	19
2.6. Variáveis de produção .....	20
2.7 DSSAT/CANEGRO .....	20
2.8 Calibração dos parâmetros genéticos do modelo DSSAT/CANEGRO .....	23
2.9 Avaliação do modelo DSST/CANEGRO.....	23
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	25
3.2 Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO.....	27
3.3 Variáveis de produção .....	28
3.4 Variáveis de crescimento.....	30
3.4.1 Índice de área foliar .....	30
3.4.2 Altura do colmo .....	31
3.4.3 Perfilhamento .....	33
4. Análise do Balanço da água .....	34
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	36
<b>CAPITULO 2-SIMULAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE CANA-ENERGIA PELO MODELO DSSAT/CANEGRO USANDO CENÁRIOS CLIMÁTICOS RCPs</b> .....	37
<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	37

<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	39
2.1. Localização as variáveis ambientais .....	39
2.2 DSSAT/CANEGRO .....	39
2.3 Cenários futuros.....	39
2.4 Modelo MIROC5.....	41
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
3.1 Desvios dos dados climáticos .....	43
3.2 Análises dos cenários climáticos futuros.....	46
3.3. Correlação da predição realizada no DSSAT/CANEGRO utilizando dados meteorológicos observados com dados meteorológico do MIROC5.....	51
3.4. Impactos das mudanças climáticas na produtividade da cana-energia tendo com base os cenários climáticos RCPs.....	53
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	57
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	58

## 1.INTRODUÇÃO GERAL

No último século, após a adoção do petróleo e carvão mineral como insumos energéticos, houve uma redução na utilização da biomassa como matéria prima para a produção de energia. O uso indiscriminado desses insumos desencadeou um desequilíbrio das condições climáticas do planeta, devido à liberação em excesso dos gases causadores do efeito estufa (GEE), o qual tem potencializado o aumento da temperatura média global (MATSUOKA et al., 2014).

Diante deste cenário preocupante, pesquisas voltadas para a produção de fontes alternativas de energias renováveis têm sido avaliadas por muitos pesquisadores (JACKSON, 2005; DUVAL et al., 2013; MATSUOKA et al., 2014; OKUNO, 2016). Desta forma, o uso da energia contida na biomassa vegetal surge como uma das principais alternativas para a produção de energia sustentável e com potencial para mitigar as emissões de GEE. O interesse na produção de energia através da biomassa ocorre devido sua alta eficiência energética durante os ciclos de transformação, o qual aproveita ao máximo o seu potencial energético. Além disso, a fonte de biomassa pode ser cultivada em áreas agrícolas marginais, onde a produção de alimentos não é viável economicamente assim não há uma competição por áreas agricultáveis (DUVAL et al., 2013).

Nesse sentido, um dos principais destaques são os híbridos da espécie *Saccharun* spp., que devido sua alta capacidade de produzir biomassa, são denominados cana-energia. Anteriormente, para atender às necessidades das indústrias sucroalcooleiras, o melhoramento genético buscava com essa cultura apenas o aumento do teor de sacarose, através de sucessivos cruzamentos. Porém, com o crescente interesse pela bioenergia, principalmente nas últimas décadas, houve uma retomada no melhoramento genético para descoberta de novos híbridos para cultura da cana voltada para a produção de biomassa, desta forma, resultando na maior produção de biomassa por unidade de área (MATSUOKA et al., 2014).

Os novos híbridos desenvolvidos pelos programas de melhoramento genético possuem materiais vegetais mais rústicos, ou seja, uma cana mais resistente ao ataque de pragas e doenças, como também menos exigentes quanto a solo, clima, nutrientes e água (JACKSON, 2005; OKUNO, 2016). No entanto, as perspectivas de mudanças climáticas, custo oneroso e o longo período dos ensaios em campo são alguns dos

desafios a serem superados pelos pesquisadores para atingir a máxima produtividade de biomassa dessa cultura. Por outro lado, os modelos agrícolas surgem como alternativas viáveis para as avaliações dos múltiplos efeitos ambientais, planejamento e tomada de decisões durante o manejo de culturas agrícolas (DUVAL et al., 2013; OKUNO, 2016).

A modelagem consiste em uma técnica para determinar a dinâmica dos processos de um determinado sistema, objetivando dispor de informações desse sistema através das abordagens do modelo. O uso de modelos agrícolas para avaliar os efeitos das variáveis ambientais sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas ocorre há bastante tempo, porém, apenas nos últimos 70 anos observou-se um aumento no interesse pela área da modelagem agrícola no mundo (MAGALHÃES, 2017).

Conforme MAGALHÃES (2017), para o entendimento dos fundamentos da modelagem de culturas agrícolas são necessários o conhecimento básico da cultura que se deseja modelar, além disso, é imprescindível considerar os processos biofísicos-chave da cultura e as interações dos demais processos de produção. Dessa forma, possibilita a seleção de locais com áreas de maior fertilidade, seleção de genótipos mais produtivos e melhores formas de manejar as plantas.

Ao considerar a crescente demanda por bioenergia, surge a necessidade em aumentar a produtividade da biomassa de cana-energia, no entanto, sabe-se que as experimentações em campo demandam certo tempo e o custo é alto. Porém, o uso de modelos agrícolas para estimar o crescimento em biomassa e o rendimento de plantas cultiváveis é uma alternativa viável. Diante do exposto, o objetivo com esta pesquisa foi avaliação e calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para genótipo de cana-energia, com uso do mesmo ajustado na avaliação de projeções do clima para produtividade da matéria fresca e seca da cana-energia no estado de Alagoas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A classificação taxonômica da cana-de-açúcar é:

Reino: Plantae

Divisão: Magnoliophyta

Classe: Liliopsida

Ordem: Poales

Família: Poaceae

Gênero: Saccharum

A cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, autógama e perene, onde a mesma apresenta seis gêneros *saccharum*: *saccharum officinarum*, *saccharum spontaneum*, *saccharum robustum*, *saccharum barberi*, *saccharum sinense* e *saccharum edule* (DEER, 1911). Os gêneros mais utilizados pelos programas de melhoramento para síntese da cana-energia são variedades comerciais da (*saccharum spp*) e espécies selvagens dos *saccharum spontaneum* e *saccharum robustum*.

- ***Saccharum spontaneum***

Há uma hipótese que a espécie *Saccharum spontaneum* tenha sua origem na Índia, surgiu da hibridação natural das plantas de *Sclerostochya* e *Erianthus* seção *Ripidium* (RAO e BADU, 1955). Morfologicamente as plantas formam touceiras de hábito ereto com colmos de 2,5 metros de altura e diâmetro de 5 a 13 mm, os colmos apresentam internódios longos e nós sempre mais finos, são ricos em fibra e pobre em sacarose, apresentam tonalidade de amarela a verde dependendo do estágio de desenvolvimento da planta, as folhas possuem uma nervura central, pouco limbo com até 4 cm de largura, o rizoma é bastante vigoroso se distribuindo no solo de forma invasora, são plantas de grande perfilhamento (JORDÃO JUNIOR, 2009).

- ***Saccharum robustum***

A espécie *Saccharum robustum* possui uma grande variabilidade genética, destacando-se por possuir características agronômicas como: vigor, dureza, perfilhamento, capacidade de rebrota de soqueira, resistência a estresse hídrico, salinidade, doenças e pragas (NAIDU e SREENIVASAS, 1987). É uma espécie rica em teor de fibra, por isso, utilizada pelos programas de melhoramento quando se deseja obter variedades ricas em biomassa (ROACH, 1977).

Há uma hipótese que a espécie (*Saccharum Robustum*) seja oriunda da hibridação natural de *Saccharum spontaneum* ( $2n=80$ ) com gênero *Erianthus* e *Miscantus*. Tem como centro de origem a região de Nova Guiné; é morfologicamente uma espécie extremamente vigorosa, formando touceiras densas, assim como a *S. Spontaneum* as plantas *S.Robustum* possuem colmos ricos em fibras e pouca sacarose (DANIELS et al., 1975).

## 2.2 Cana para geração de energia

A retomada pelo interesse da cultura da cana-energia teve seu início com Matsuoko e Rubion com a criação da cana Viales no ano de 2005. A partir desse ano grandes centros de melhoramento genético de plantas e alguns empresários passaram a investir em tecnologia e pesquisas para obtenção de novos genótipos de cana-energia. Com a venda da cana Viales em 2008 para multinacional Monsanto no valor de R\$ 300 milhões de reais, Matsuoko e Rubion criaram a Vignis uma empresa voltada para pesquisa e criação de novos tipos de cana-energia, com alto teor de fibra (FREITAS JR., 2011), figura 1(b). A Vignis possui a cana-energia tipo 1 (VIGNIS3) e tipo 2 (VG11283), a tipo 1 apresenta produtividade de  $221 \text{ t h}^{-1}$ ,  $79 \text{ t.h}^{-1}$  de bagaço e 17,9% de fibra, a tipo 2 mostra uma cana com 26% de fibra, produtividade de  $185 \text{ t.h}^{-1}$  e  $96 \text{ t.h}^{-1}$  de bagaço, esses valores de produtividade são cerca de 121% e 85%, respectivamente, superior a valores obtidos por uma cana-de-açúcar tradicional, sendo a cana-energia uma cultura que apresenta uma produção de bagaço muito elevada (MARIANO, 2015). A empresa GranBio possui sede em Campinas-SP, voltada para o desenvolvimento de variedades vertix de cana-energia para produção de biomassa e etanol.

A Granbio no ano de 2014 instalou sua fábrica no estado de Alagoas, com sua estação experimental localizada no território do município da Barra de São Miguel-AL, em parceria com Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e a rede Interuniversitaria para o Desenvolvimento do setor sucroenergetico (Ridesa), a região foi escolhida pelo microclima ideal para hibridização e seleção das novas variedades. Conforme PAIVA (2014), a empresa deu início na produção de etanol de segunda geração a partir da palha e bagaço da cana, podendo produzir até 100 milhões de litros por ano em sua plena capacidade, operando onze meses.

A cana-energia é uma cultura que apresenta uma produtividade de biomassa seca por área muito superior a cana-de-açúcar tradicional, chegando cerca de  $221 \text{ t.h}^{-1}$  ao

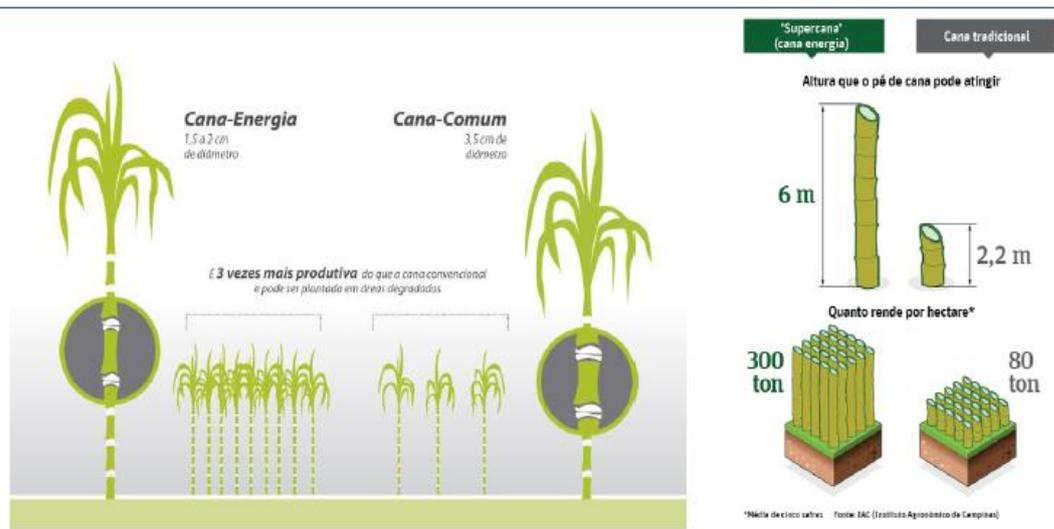
ano, Figura 1(a). A cana-energia tem 26% de fibra contra 13% da cana-de-açúcar comercial, mantendo uma alta produtividade com custos menores, sendo uma cultura ideal para geração de energia (VIOLANTE, 2012; BISCHOFF, 2008).

Uma cultura para ser considerada uma fornecedora ideal de biomassa para fins de exploração energética precisa atender os seguintes requisitos: rusticidade e alta eficiência na conversão de energia solar em biomassa; ser classificada como planta C4; ser perene, para fornecimento de biomassa por longos períodos; possui dossel de longa duração, permitindo colheita durante a maior parte do ano; possuir técnicas de produção dominadas com possibilidade de cultivo em larga escala; pode ser plantada em áreas de baixa aptidão agrícola para não competir com a produção de alimentos; colheitabilidade e possui uma exploração sustentável, conforme (MATSUOKA et al., 2012; RUBIN, 2008).

A cana-energia se enquadra perfeitamente como cultura energética, pois a mesma é uma variedade desenvolvida a partir do cruzamento de espécies ancestrais e híbridos comerciais de cana-de-açúcar. Como resultado obtendo-se uma cana mais robusta, com maior teor de fibra e alta potencial produtiva, sendo uma cultura ideal para fabricação de bicompostíveis e bioquímicos de segunda geração e para geração de energia elétrica. Uma de suas maiores vantagens é poder ser cultivada em áreas com baixa aptidão agrícola, permitindo assim a exploração de regiões desfavorecidas, exige menos água e insumos pra seu crescimento e desenvolvimento, aliada a uma alta produtividade por hectare e maior número de corte (Figura 1c), além de não competir com a produção de alimentos (BARBOSA, 2014).

Conforme Ulisses (2016), a cana-energia é classificada em cana-energia tipo 1 e tipo 2, dependendo da sua constituição e utilização dos seus insumos pelas indústrias. A cana-energia tipo 1 apresenta valores superiores a 15% e 18% para sacarose e fibra, respectivamente, sendo o tipo ideal para empresas que visam a produção de etanol celulósico. A cana-energia tipo 2 tem valor inferior a 6% de sacarose e acima de 28% para fibra, sendo o tipo ideal para empresas que querem produzir e fornecer biomassa para geração de energia.

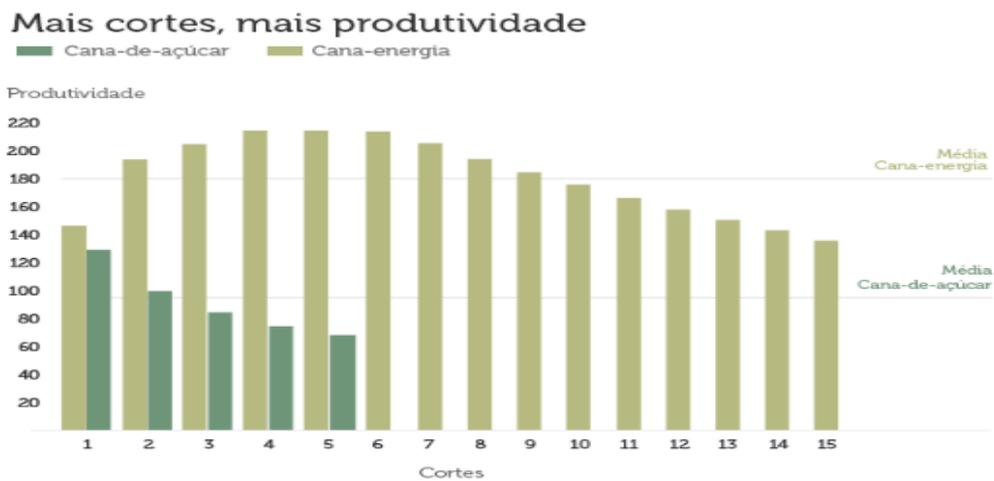
**Figura 1.** Comparações entre a cana-energia e a cana-de-açúcar



(a)



(b)



(c)

**Fonte:** MARIANO, (2015)

### 2.3 Modelagem na agricultura

O emprego de modelos na agricultura é datado desde os primeiros cultivos na história da humanidade. Pois, já era sabido que ao plantar determinada cultura em determinada época e modo, seu desenvolvimento ocorreria de maneira que a colheita seria em outra época. Dessa forma, foi sendo aprimorado pelos agricultores com o passar dos tempos, um modelo mental baseado nas suas próprias experiências (CORRÊA et al., 2011).

O uso de modelos objetivando quantificar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento e desenvolvimento das culturas vem ocorrendo há mais de 270 anos. De acordo com Zadocks & Rabbinge (1985), a partir da década de 50 trabalhos mais elaborados vieram formalizar o que seria o alicerce da modelagem em agricultura no mundo, como por exemplo, o trabalho desenvolvido pelo Professor C. T. de Wit, da Universidade de Wageningen-Holanda, em 1958, intitulado "*Transpiration and crop yield*", seguido em 1968 pelo clássico trabalho "*Photosynthesis of leaf canopies*".

Wit (1982), define modelo como uma representação simplificada de um sistema, enquanto simulação é a arte de construir modelos. Para Sinclair & Seligman (1996), modelo é uma caracterização de um sistema real, que pode ser representado com um simples desenho do sistema analisado, como uma simples descrição verbal escrita, ou ainda como um complexo conjunto de equações para ser utilizada na descrição numérica de um dado sistema. De acordo com Soler (2004), um modelo simula uma cultura pela estimativa do crescimento de seus componentes como folhas, raízes e caule. Sendo assim, um modelo de crescimento de cultura não somente estima a biomassa total, mas também inclui mais informações quantitativas sobre a maioria dos processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento vegetal.

De um modo geral, os modelos podem ser classificados como empíricos e mecanísticos. Modelos empíricos são basicamente relações matemáticas descritas a partir da observação do sistema, por informações biológicas ou por qualquer conhecimento analisado. Enquanto os modelos mecanísticos são relativamente mais complexos, porém, seu conteúdo normalmente aplica-se a uma maior gama de fenômenos, são baseados na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura e, por este motivo oferecem respostas mais consistentes (MARIN, 2009; THORNLEY & JOHNSON, 2000). Para Anjos (2011), os modelos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. O primeiro é quando, dadas às condições de experimentação, pode-se prever o resultado final do

experimento, enquanto que o último não é possível prever, com certeza, o resultado antes da realização do experimento. Praticamente 90% dos modelos agrícolas, normalmente consistem no balanço do carbono - que depende da interceptação e da utilização da luz - e de um balanço hídrico - que depende da demanda atmosférica e da utilização da água pelas plantas. Estes processos fisiológicos podem ser associados à absorção dos nutrientes e às perdas causadas por pragas, doenças e plantas daninhas (PENNING, 1982; CORRÊA et al., 2011).

A partir da década de 80, vários modelos para previsão de safra das principais culturas foram desenvolvidos baseados em processos fisiológicos e estatísticos (FRANCE & THORNLEY, 1984; COSTA et al., 2001). Esses modelos simulam o crescimento e desenvolvimento das plantas, usando como referência a fotossíntese, respiração, produção de biomassa, produtividade de grãos e outros. Posteriormente, modelos minuciosos e mais avançados foram construídos, alguns deles mais voltados à escala de plantas individuais, tais como CERES (JONES & KINIRY, 1986) e outros ao nível de copa, como EPIC (WILLIAMS et al., 1989), sua derivação ALMANAQUE (KINIRY et al., 1992) e o CropSyst (STOCKLE et al., 2003), servindo como ferramenta de gestão para auxiliar na tomada de decisão.

Existem diversos modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar em uso, como: Auscane (Jones et al., 1988), QCane (Liu & Kingston, 1995), APSIM (Keating et al., 1999), Mosicas (Martiné, 2003) e Casupro (Villegas et al., 2005). Entre esses modelos, o DSSAT/Canegro (Inman-Bamber, 1991; Singels et al., 2008) é um dos principais, por torna a modelagem do rendimento da cana-de-açúcar mais eficaz. De acordo com Marin et al. (2011), o uso de modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas podem contribuir no monitoramento e na previsão de produtividade, assim como auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas da cultura ao ambiente.

## 2.4 Modelo DSSAT

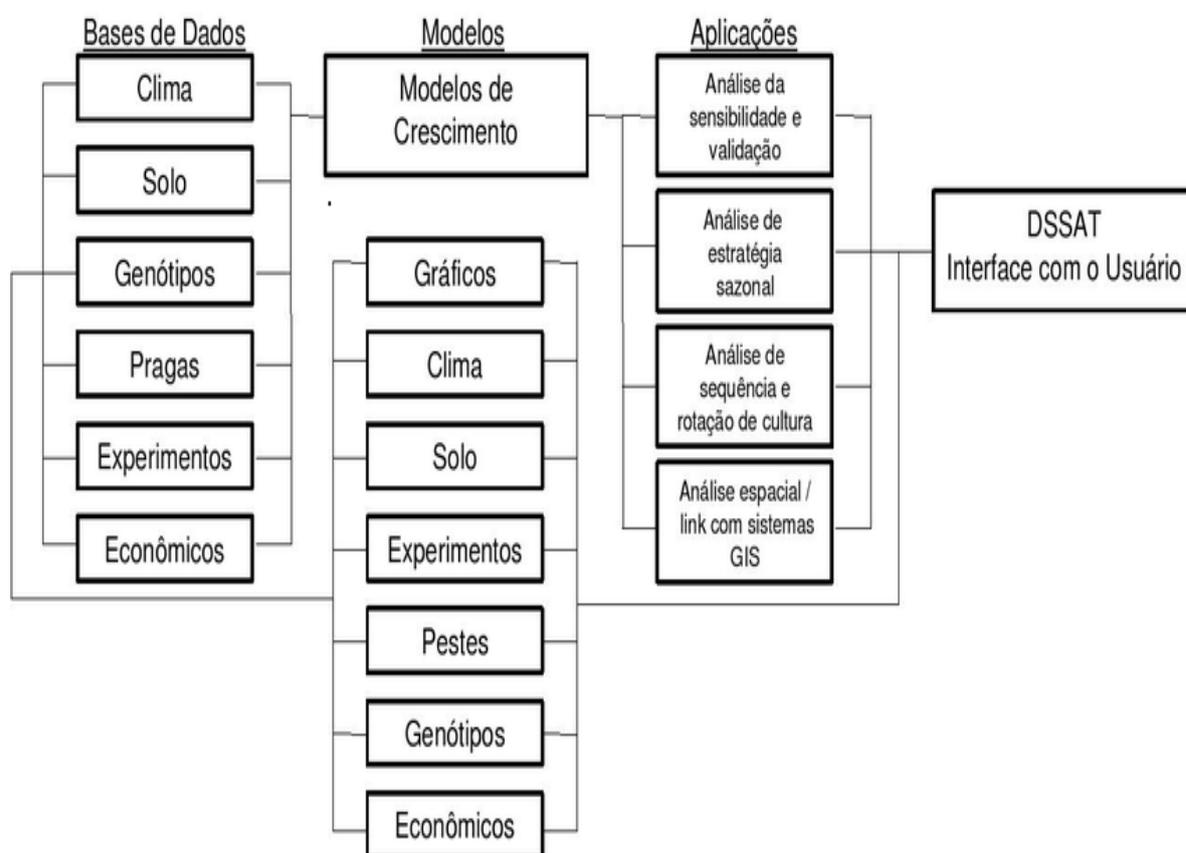
O DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer ) é uma dos principais modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas, como: milho, soja, sorgo, cana-de-açúcar entre outras. Esse modelo foi desenvolvido pelo projeto IBSNAT (International Benchmark Sites Network for AgrotechnologyTransfer) em parceria com a Universidade do Havaí a partir de 1974. O modelo DSSAT foi resultado de dez anos de pesquisa, atualmente é mantido pelo consorcio ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications), que reúne um grande numero de cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa, os quais trabalham de forma colaborativa para a construção dos modelos e suas aplicações (JONES et al., 2001, 2003; ICASA, 2007).

Conforme Jones et al., (1987), o DSSAT é uma plataforma composta por diversos modelos de simulação, onde são classificados como mecanísticos, sendo fundamentais no sistema solo-planta-atmosfera. O mesmo é um conjunto de programas de computador projetado para acomodar modelos padronizados de culturas, permitindo ao usuário inserir, organizar e armazenar dados de culturas, solo e clima, permite a calibração e validação de modelos de crescimento de culturas e, também permite a avaliação de diferentes sistemas de manejo em um local (James & Cutforth, 1996). Os componentes de software do DSSAT são grafados nas seguintes linguagens: FORTRAN (modelos), C (shell), PASCAL (gráficos), DBASE (base de dados), BASIC (programas de gerenciamento de estratégia e risco).

O DSSAT, atualmente é composto por 27 diferentes modelos de culturas, formada por uma coleção de programas independentes que operam em conjunto, estando inserida numa ferramenta que facilita a criação e o gerenciamento de arquivos de experimentos, de solo e de clima (Figura 2). Inclui aplicações que auxiliam na análise sazonal e sequencial dos riscos econômicos e impactos ambientais associados com a irrigação, uso de fertilizantes e nutrientes, mudanças climáticas, sequestro de carbono no solo, variabilidade climática e agricultura de precisão (JONES et al., 2003; ICASA, 2010). O DSSAT simula o crescimento, desenvolvimento e rendimento de uma cultura que cresce em uma área uniforme de terra sob administração prescrita ou simulada, bem como as mudanças na água do solo, carbono e nitrogênio que ocorrem sob o sistema de cultivo ao longo do tempo. É estruturado usando a abordagem modular descrita por Jones et al. (2001) e Porter et al. (2000), que tem como características mais importantes: separar os módulos ao longo de linhas disciplinares, define interfaces

claras e simples para cada módulo, permite que os componentes individuais sejam ligados ou desligados com pouco impacto no programa principal ou em outros módulos, facilita a manutenção do código, permite que módulos escritos em diferentes linguagens de programação sejam ligados em conjunto, fácil integração em diferentes tipos de aplicações devido à interface bem definida entre os módulos.

**Figura 2.** Diagrama da esquematização do modelo DSSAT



**Fonte:** (Adaptado de Jones et al., 2003)

O DSSAT possui um programa principal, uma unidade módulo terrestre e módulos para os componentes primários, compondo assim um sistema de cultivo. Os módulos Primários são para clima, solo, planta, interface solo/ planta/atmosfera e componentes de manejo, esses componentes descrevem as mudanças temporais no solo e plantas que ocorrem em uma única unidade de terra em resposta ao tempo e o manejo (JONES et al.,2003). Cada módulo tem seis etapas operacionais (inicialização de execução, inicialização da estação, cálculos de taxa, integração, saída diária e saída sumária), assim o programa principal controla quando cada uma dessas etapas está ativa e quando cada módulo executa a tarefa que é chamada. Este recurso, permite a cada módulo ler suas próprias entradas, inicializar-se, calcular taxas, integrar suas próprias variáveis de estado e gravar saídas completamente independentes da operação de outros módulos (PORTER et al., 2000).

A unidade modula solo e os módulos dos componentes primários (meteorológico, solo/planta/atmosfera, CROPGRO (módulo para a cultura), planta, manejo e pragas) ligam-se a submódulos, portanto são usados para agregar processos e informações que descrevem componentes sucessivos do sistema de cultivo. O modulo solo é representado como um perfil unidimensional, sendo homogêneo horizontalmente e consistindo em um número de camadas verticais do solo. O módulo do solo integra a informação de quatro submódulos: água do solo, temperatura do solo, carbono e nitrogênio do solo.

O submódulo de dinâmica do solo é projetado para ler os parâmetros do solo e modificá-los com base no plantio e mudanças de longo prazo no carbono do solo ou outras operações de campo. O submódulo água no solo é um modelo unidimensional, computando as mudanças diárias no conteúdo de água do solo à infiltração de chuvas, irrigação, drenagem vertical, fluxo não saturado, evaporação do solo e processos de captação de água da raiz (JONES e RITCHIE, 1991; JONES, 1993; RITCHIE, 1998).

Os processos de evaporação do solo, transpiração da planta e captação da água da raiz foram separados em um módulo solo/planta /atmosfera para criar mais flexibilidade para expansão e manutenção do modelo. O modelo usa um 'balde de tombamento' para calcular a drenagem de água do solo quando o teor de água de uma camada está acima do limite superior drenado. O fluxo insaturado ascendente também é calculado usando uma estimativa conservadora da difusividade da água no solo. A infiltração de água no solo durante um dia é calculada subtraindo o escoamento superficial da precipitação pluvial que ocorre nesse dia, através do método SCS (Soil

Conservations Service) e usado para dividir a precipitação em escoamento e infiltração, com base em um "número de curva" que tenta explicar a textura, declive e cobertura, assim explica os solos em camadas e o teor de água do solo no momento em que a precipitação ocorre (Williams et al., 1984).

A drenagem da água através do perfil é primeiramente calculada com base num parâmetro global de drenagem do solo, assumido como sendo constante com a profundidade. Se a condutividade hidráulica saturada de qualquer camada for menor que a drenagem vertical computada, a água é acumulada na camada acima. Quando há ocorrência de irrigação a quantidade de água é somada à precipitação pluvial para cálculos de infiltração e escoamento diário (FARIA; BOWEN, 2003).

O módulo de temperatura do solo é calculado a partir da temperatura do ar e da condição limite da temperatura profunda do solo, que é calculada a partir da temperatura média anual do ar e da amplitude das temperaturas médias mensais. Inclui também uma abordagem simples para calcular o impacto da radiação solar e do albedo na temperatura da superfície do solo. No entanto, não considera diferenças na umidade do solo ou condições de superfície (Williams et al., 1984, Jones et al., 1991). O módulo solo / planta / atmosfera reúne os insumos do solo, da planta e da atmosfera e calcula a interceptação de luz pelo dossel, evapotranspiração (ET), assim como a evaporação do solo e a transpiração da planta, ele também calcula a absorção de água da raiz de cada camada de solo (Ritchie, 1972). O módulo foi desenvolvido como uma abordagem em modelagem de culturas no sentido de que tem um código fonte comum, mas pode prever o crescimento de um número de diferentes culturas.

Módulo de manejo determina quando as operações de campo são executadas chamando submódulos. Atualmente, essas operações são de plantio, colheita, aplicação de fertilizantes inorgânicos, irrigação e aplicação de resíduos de colheita e material orgânico. Essas operações podem ser especificadas pelos usuários no arquivo de entrada padrão de "experiência" (Hunt et al., 2001). Os usuários observam que todas as operações devem ser automáticas ou fixas com base nas datas de entrada ou dias após o plantio. O módulo de praga permite aos usuários inserir observações de campo e dados de exploração em populações de insetos ou danos em diferentes partes de plantas, gravidade da doença em diferentes tecidos vegetais e danos físicos em plantas ou componentes de plantas para simular os efeitos de pragas e doenças especificadas no crescimento e rendimento.

Os dados mínimos requeridos pelo modelo DSSAT para sua funcionalidade são: o local onde o modelo será utilizado (latitude, longitude, altitude), dados climáticos diários do período do experimento de crescimento (radiação solar, temperatura do ar máxima e mínima e precipitação pluvial, umidade relativa do ar e velocidade do vento), características do solo, condições iniciais (cultura anterior, raiz etc.) e gerenciamento da cultura (tipo e nome do cultivar data de plantio e colheita, profundidade, espaçamento etc.). Conforme VERHAGEN et al., (2001), no modelo DSSAT encontram-se modelos de simulação para diversas culturas como: CSM-CERES de modelos: maize, wheat, (CSMCROPSIM- wheat), rice, barley, sorghum e millet; Modelos CSM-CROPGRO para leguminosas: soybean, peanut, drybean (*Phaseolus*); Modelos CSM-CROPSIM para culturas de raiz: CSMCROPSIM-cassava e CSM-SUBSTOR-potato e Outras culturas: CSM-CROPGRO-Tomato, CSM-CROPGRO Chickpea, Sugarcane e Sunower.

Conforme PAVAN (2007), os modelos de culturas compartilham um formato comum de entrada e saída e são similares em nível de detalhe, operando num passo de tempo diário; são baseados num entendimento de processos biofísicos. Os modelos são projetados para aplicações globais e trabalham independentemente de localidade, estações climáticas, cultivar e sistemas de gerenciamento. Os modelos simulam o efeito do clima, água no solo, genótipo e dinâmica do nitrogênio na cultura e no solo em relação ao crescimento da cultura e produção (VERHAGEN et al., 2001).

#### **2.4.1 DSSAT/CANEGRO**

O DSSAT/CANEGRO teve como base o modelo Ceres-Maize (Jones & Kiniry, 1986), tendo sua síntese na África do sul com objetivo de modelar os processos fisiológicos e aperfeiçoar o planejamento da indústria açucareira sul africana (Inman-Bamber, 1991). O DSSAT/CANEGRO é um dos principais modelos de simulação da cultura da cana, sendo utilizado em varias localidades pelo mundo na simulação do sistema de produção da cultura da cana-de-açúcar (SINGLE e BENZUIDENHOUT, 2002; INMAN BAMBER et al., 2002). Pertencente a Plataforma DSSAT “decision support system for agrotechnology transfer” (DSSAT versão 3.1) (Inman-Bamber & Kiker, 1997) foi atualizado na versão 4.5 do DSSAT (Singels et al., 2008). O modelo CANEGRO simula o desenvolvimento do dossel, radiação capturada, balanço de água usando o princípio contínuo solo-planta-atmosfera, acúmulo de biomassa e sua partição para os diferentes componentes da planta (SILVA, 2012). No CANEGRO, a radiação

solar capitada e calculada conforme a 'lei de Beer', usando dados de índice de área foliar total e índice da área de folhas verde, sendo assim calculada a evapotranspiração, através do método de Peman-Monteith, conforme Alen et., al (1998).

Conforme Singles et., al (2008), o DSSAT/CANEGRO tem entre suas principais características o detalhamento dos processos fisiológicos de crescimento, tendo como exemplos: as projeções para emergência do perfilhamento primário que ocorre quando uma soma térmica é acumulado em uma fase específica do momento do plantio ao corte, o início do crescimento e desenvolvimento dos colmos que tem suas estimativas realizadas quando uma quantidade específica de graus-dia é somada desde emergência ate a fase de máximo perfilhamento. O período de perfilhamento abrange a emergência dos primeiros perfilhos ate o perfilhamento máximo, já a fase do início do crescimento até a colheita é classificada como crescimento dos colmos. O modelo DSSAT/CANEGRO não realiza simulações na fase do florescimento, no entanto a senescência para a cultura é simulada do máximo perfilhamento até a colheita (OLIVEIRA, 2015).

## **CAPITULO 1. AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE PARAMETROS DE CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO DSSAT/CANEGRO PARA A CANA-ENERGIA NA ZONA CANAVIEIRA ALAGOANA**

### **1.INTRODUÇÃO**

A cana-energia é oriunda do melhoramento genético de espécies selvagens (*Sorghum spontaneum* e *sorghum robustum*) com híbridos comerciais de cana de açúcar. Com isso, obtendo-se uma cana com alto teor de fibra, alto nível de perfilhamento e alta produção de biomassa; sendo assim, classificada como uma cultura energética, pois é ideal para a produção de biocombustível, energia elétrica e térmica, a partir da sua biomassa, (BAIÃO, 2004). Esse híbrido, devido a sua rusticidade e maior resistência ao ataque de pragas e doenças, pode ser cultivada em áreas de baixa aptidão agrícola sendo uma aliada na recuperação das áreas degradadas e no controle da erosão dos solos, requerendo uma menor quantidade de insumos e ainda mantendo uma alta produtividade (JOHNSON et al; 2007).

As pesquisas com cana-energia pelos programas de melhoramento genético tiveram início no mundo na década 1970 em países como: Índia, Cuba e Austrália, já no Brasil iniciaram-se em 1980, sendo encerrados anos depois. O retorno das pesquisas com cana-energia se deu em 2003 com a empresa cana vialis (Monsanto e Syngenta), voltada para produção de variedades rica em biomassa, (MATSUOKA et al., 2012). E em 2012 foram criados outros dois programas de melhoramento genético no setor privado, que foram: Vignis e GranBio. No Estado de Alagoas, o programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar (PMGCA) foi pioneiro no desenvolvimento de genótipos de cana-energia, pelo potencial do estado para cultura da cana. A empresa GranBio montou sua estação experimental onde são conduzidos ensaios com a cultura da cana-energia, tendo como objetivo o lançamento de variedades para ser cultivada em grandes áreas para fins industriais. Então é imprescindível novas pesquisas para um manejo adequado e detecção de problemas no crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-energia, em que os modelos de simulação de crescimento podem ser um grande aliado.

A análise de crescimento é o meio mais simples para acompanhar o desenvolvimento das plantas, mostrando a atuação de diferentes órgãos no crescimento, permitindo, assim, conhecer o funcionamento das estruturas da planta (BENINCASA, 1988). De acordo com BEADLE (1993) e HUNT (1978), a análise de crescimento é um

método que tem sido utilizado com o objetivo primordial de gerar discussão clara do padrão de crescimento das plantas ou de parte delas, permitindo comparações entre situações distintas, podendo ser aplicado as mais diversas modalidades de estudo.

Para a análise de crescimento vegetal utilizam-se modelos de crescimento que geram dados estimados durante o crescimento do ciclo da cultura (LYRA et al; 2008). Esses modelos são excelentes ferramentas para auxiliar em decisões como: o melhor manejo para a cultura em ambientes heterogêneos, em processos biofísicos que ocorrem no sistema solo-água-planta-atmosfera, na análise de desempenho da cultura em diferentes tipos de solo, clima e época de semeadura e no monitoramento e previsão da produtividade (HEINEMANN et al., 2000). Atualmente, o modelo de simulação de crescimento mais utilizado para cultura da cana-de-açúcar é o DSSAT/CANEGRO (SINGELS et al., 2008).

O DSSAT/CANEGRO é um módulo de partição de matéria seca que teve sua síntese na África do Sul, visando melhorar as previsões de sacarose, por meio de partição diária de assimilados entre as raízes e a parte aérea como uma função não linear da biomassa total, tendo como finalidade o aperfeiçoamento do planejamento da produção açucareira daquela região (SINGELS et al., 2002), sendo baseado no módulo Ceres-Maize (Jones & Kiniry, 1986). Pertencente a plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) versão 3.1 (Inman-Bamber & Kiker, 1997) e atualizado na versão 4.5, o DSSAT/CANEGRO vem sendo utilizado em diversas localidades pelo mundo, tornado as análises de produção para cultura da cana-de-açúcar mais ágil e eficaz (Marin et al., 2011). No Brasil, o modelo DSSAT/CANEGRO foi usado para simular variáveis de produção e crescimento de diferentes variedades de cana-de-açúcar em São Paulo (JONES et al., 2015), e na análise do impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade da cana-de-açúcar na Bahia (SILVA, 2012).

Modelos de simulação vêm sendo utilizados para dar perspectivas da variação da produtividade da cana-de-açúcar devido às constantes mudanças climáticas. Segundo Carvalho et al., (2015), a produção da cultura da cana poderá ser limitada pela redução na disponibilidade de água em algumas regiões, áreas nas quais poderão se tornar mais quente e seca prejudicando o cultivo de diversas culturas agrícolas. Assim, o objetivo desse trabalho foi a avaliação e calibração de parâmetros de crescimento e desenvolvimento do modelo DSSAT/CANEGRO para o genótipo de cana-energia VERTIX 2 na zona canavieira de Alagoas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Localização e variáveis ambientais

O experimento foi conduzido na área comercial da empresa GranBio na Fazenda Roqueira, região de Teotônio Vilela-AL (09°55'35"S; 36°17'03"W; 124 m) em uma área de aproximadamente 1,0 hectare (ha).

As variáveis meteorológicas foram obtidas pela estação agrometeorológica automática do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar da Universidade Federal de Alagoas (LARAS - UFAL), situada na área do experimento, (Figura 3). A temperatura e umidade relativa do ar foram registradas por um termohigrômetro (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah) instalado a 2,0 m acima da superfície do solo. A precipitação pluvial foi obtida através de pluviômetro (TB3, Hydrological Services PTY. LTD., Sydney, Austrália) instalado a 1,5 m da superfície do solo. A irradiância solar global ( $R_g$ ,  $W m^{-2}$ ) foi monitorada por um piranômetro (Eppley, modelo 848, B&W) na faixa espectral de 305 a 2800 nm. A velocidade do vento foi medida através de um anemômetro (Modelo RM Young, Campbell Scientific). Com exceção do piranômetro que armazenou em média a cada 1 minuto, as demais medidas foram efetuadas a cada 10 segundos e armazenada as médias de cada 10 minutos, através de um sistema de aquisição automática de dados (*datalogger*).

**Figura 3.** Estação agrometeorológica automática



## **2.2 Delineamento experimental e tratamentos**

O campo experimental foi composto por vinte e três (23) genótipos de cana-energia e mais um genótipo de cana-de-açúcar, sendo avaliados no experimento apenas sete (7) genótipos de cana-energia e um genótipo de cana-de-açúcar, irrigado por aspersão, sistema de deslocamento linear móvel. A pesquisa deu prioridade aos genótipos de cana-energia da sigla VERTIX 2, da empresa GranBio e a variedade de cana-de-açúcar mais produtiva do nordeste, RB92579. Para realizar a modelagem na plataforma DSSAT/CANEGRO foi selecionado o genótipo VX12=1744, dentre as 7 utilizada no experimento, devido a mesma possuir registro no ministério da agricultura, pecuária abastecimento, (Tabela 1). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições. As parcelas foram constituídas de 6 linhas com 10 metros. Os genótipos utilizados de cana-energia pertencem a fase experimental da seleção de melhoramento genético da empresa, em que seis são clones em desenvolvimento e uma variedade em fase de lançamento. A cultivar apresentada se diferencia da cultivar mais parecida, RB92579, conforme declaração do requerente, pelas características descritas na Tabela 1:

**Tabela 1.** Características da cana-energia Vertix 2

<b>Características</b>	<b>Expressão na cultivar mais parecida</b>	<b>Expressão na cultivar apresentada</b>
1. Touceira: hábito de crescimento	Ereto	Levemente decumbente
7. Colmos: diâmetro dos entrenós, medido no terço médio do colmo	Médio	Fino a médio
14. Colmos: quantidade de cera no entrenó	Pouca	Muita
25. Gemas: inserção da gema em relação ao anel de crescimento	Ocasionalmente ultrapassa	Sempre ultrapassa

### **2.3 Plantio e manejo da cultura**

O plantio (04/02/2016) foi realizado por meio de mudas pré-brotadas (MPB), são mudas propagada via assexuadamente por meio de gemas em tubetes, utilizando substrato. O plantio foi realizado quando as plantas estiveram com mais de 45 dias após o plantio (DAP). O espaçamento entre mudas foi de 0,70 m e entre linhas foi alternado de 0,90 x 1,50 m. Para o controle das ervas daninhas foi realizado a matologia da área e aplicado produtos seletivo a cultura. Os tratos culturais foram realizados de acordo com análise de solo e recomendação para a cultura da cana-de-açúcar, a colheita foi realizada 31/01/2017.

### **2.4 Análises de crescimento e desenvolvimento da planta**

As análises de crescimento foram realizadas mensalmente a partir de dez plantas marcadas nas duas linhas centrais de cada parcela, sorteadas logo após o plantio. As variáveis de crescimento analisadas foram: Altura de planta (AP), índice de área foliar (IAF), diâmetro do colmo (DC), perfilhamento e biomassa seca (BS). As avaliações para determinar a biomassa seca foram destrutivas e consistiu na coleta de três touceiras por parcela. O material vegetal foi identificado e levado a estufa a 65 °C com ventilação forçada até que a massa de todas as partes da planta apresentasse valor constante (PEREIRA; MACHADO, 1987; BENINCASA, 1988).

A área foliar foi medida por meio de equipamento (LAI-2000) e também quantificada pelo método de Hermam & Câmara (1999). Posteriormente foi calculado o IAF, a partir da relação entre o total de área foliar pela área ocupada pelas plantas (BEADLE, 1993). O ciclo da cultura foi dividido em quatro fases fenológicas, Tabela 2, de acordo com Allen et al., (1998). Para essas fases foram determinados os requerimentos hídricos acumulados e os coeficientes de cultura médios (Kc).

**Tabela 2.** Coeficiente de cultivo para cana-energia de acordo com o DAT

Fase/ Período	I	II	III	IV	Total
Início da fase	04/02/2016	25/03/2016	03/06/2016	08/01/2017	
Período (dias)	50	70	220	26	366

Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final.

## 2.6. Variáveis de produção

O rendimento agrícola da cultura e as análises agroindustriais foram realizadas bimestralmente e na colheita do experimento. Foram avaliadas toneladas de massa verde por hectare, tonelada de massa seca por hectare, brix, fibra e açúcares totais redutores.

## 2.7 DSSAT/CANEGRO

Para a simulação das variáveis de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, utilizou-se o modelo CANEGRO, que está incluído no modelo DSSAT (Jones et al., 2003, Singels et al., 2008). A parametrização do modelo DSSAT-CANEGRO consistiu na inserção de dados climáticos radiação solar global ( $Wm^{-2}$ ), temperatura máxima e mínima do ar ( $^{\circ}C$ ), precipitação (mm), velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) e umidade do ar (%) e dados do solo classificação, textura (areia, limo e argila), densidade e pH da área de estudo. Além disso, o modelo também requer dados que regulam as propriedades hidrofílicas do solo, como capacidade de campo, ponto de murcha permanente, saturação de água e profundidade do solo, com base em processos de crescimento de cana-de-açúcar e modelagem de desenvolvimento, incluindo fenologia, crescimento do dossel, acumulação de biomassa e sacarose, partição, crescimento radicular, estresse hídrico e alojamento (Nassif et al, 2012, Ritchie, 1998, Singels et al., 2008). E os dados de gerenciamento de culturas (variedade, espaçamento entre linhas, população de plantas e informações sobre a quantidade e a data na irrigação e adubação).

O modelo foi ajustado através de mudanças feitas em parâmetros específicos relacionados à cultura da cana-de-açúcar (Tabela 3), de uma variedade padrão NCo-376

previamente calibrada no modelo DSSAT / CANEGRO como sugerido por Singels et al. (2008).

**Tabela 3.** Parâmetros de entrada do DSSAT/CANEGRO

PARÂMETROS	DESCRIÇÕES	UNIDADES
PARCEMAX	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração por unidade PAR.	gMJ <sup>-1</sup>
APFMX	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuída a massa seca da parte aérea	tt <sup>-1</sup>
STKPFMAX	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura	tt <sup>-1</sup> base massa seca
SUCA	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo	tt <sup>-1</sup>
TBFT	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose e 50% do valor máximo	°C
TTHALFO	Graus-dias para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento	°C dia
TBASE	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel	°C dia
LFMAX	Numero máximo de folhas verdes saudáveis	Numero de folhas cm <sup>2</sup>
MXLFAREA	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o numero e folha MXLFARNO(cm <sup>2</sup> )	cm <sup>2</sup>
MXEFARNO	Numero de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFARNO (cm <sup>2</sup> )	Numero de folhas
PI <sub>1</sub>	Intervalo de filocrono 1 (para o numero de folhas abaixo do PSWITCH)	°Cdia
PI <sub>2</sub>	Intervalo de filocrono 1 (para o numero de folhas acima do PSWITCH)	°Cdia
PSWITCH	Numero de folhas em que há mudanças no filocrono	Numero de folhas
TTPLNTEM	Graus-dias para emergência da cana planta	°Cdia
TTRATNEM	Graus-dias para emergência a soqueira	°Cdia
CHUPIBASE	Graus-dias para o inicio do crescimento do colmo	°Cdia
TT_POPGROWTH	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento	°Cdia
MAX_POP	Máxima população de perfilhos	Colmos m <sup>-2</sup>
POPTTI6	População de colmos após 1.600 °C dia	Colmos m <sup>-2</sup>
LG_AMBASE	Massa fresca da parte aérea (colmo, folhas) onde ocorre inicio do acamamento	t h <sup>-1</sup>

## 2.8 Calibração dos parâmetros genéticos do modelo DSSAT/CANEGRO

Os parâmetros genéticos para cultivar padrão NCo-376 do modelo DSSAT/CANEGRO são pertinentes tanto para cana-planta como para cana-soca, Tabela 4. Os ajustes foram realizados de forma manual com base nas características expostas pelo genótipo de cana-energia VERTIX 2 em campo. Primeiramente foi ajustado os parâmetros relacionados a fenologia e crescimento da cultura ( TTHALFO, TBASE, LFMAX, MXLFAREA, MXEFARNO,  $PI_1$ ,  $PI_2$ , PSWITCH, TTPLNTEM, CHUPIBASE, TT\_POPGROWTH, MAX\_POP, POPTTI6) e posteriormente os parâmetros relacionados a produtividade e a rendimento (PARCEMAX, APFMX, STKPFMAX, SUCA, TBFT, LG\_AMBASE).

## 2.9 Avaliação do modelo DSST/CANEGRO

Para avaliação estatística do ajuste entre os dados observados e estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO foi utilizado o índice de concordância (d), proposto por (Willmott et al., 1985), raiz quadrada do erro médio RMSE, (WILKS, 2006) , coeficiente de determinação  $R^2$ , (LAPPONI, 2005), e coeficiente de correlação Pearson (r) (STEVENSON, 2001) .

Aproximação entre os dados observados e estimados foi avaliada pelo índice de concordância (d) proposto Willmott (1982), que varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior concordância entre os dados estimados e observados (equação 1). O RMSE (erro do quadrado médio) é uma ferramenta estatística fundamental na avaliação do modelo, quanto menor for o RMSE melhor e a capacidade do modelo fazer previsões, (equação 2). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado. O  $R^2$  varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o  $R^2$ , mais explicativo é o modelo, melhor ele se ajusta a os dados observados em campo, (equação 3). O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede o grau da correlação linear entre os dados observado e estimado . É um índice adimensional com valores situados ente -1 e 1 refletindo a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados.  $r= 1$  Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.  $r= -1$  Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.  $r=0$  Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra, (equação 4).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|\hat{y}_i - \hat{O}|) + (|y_i - \hat{O}|)]^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{O})\hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y} - \hat{F})^2} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (4)$$

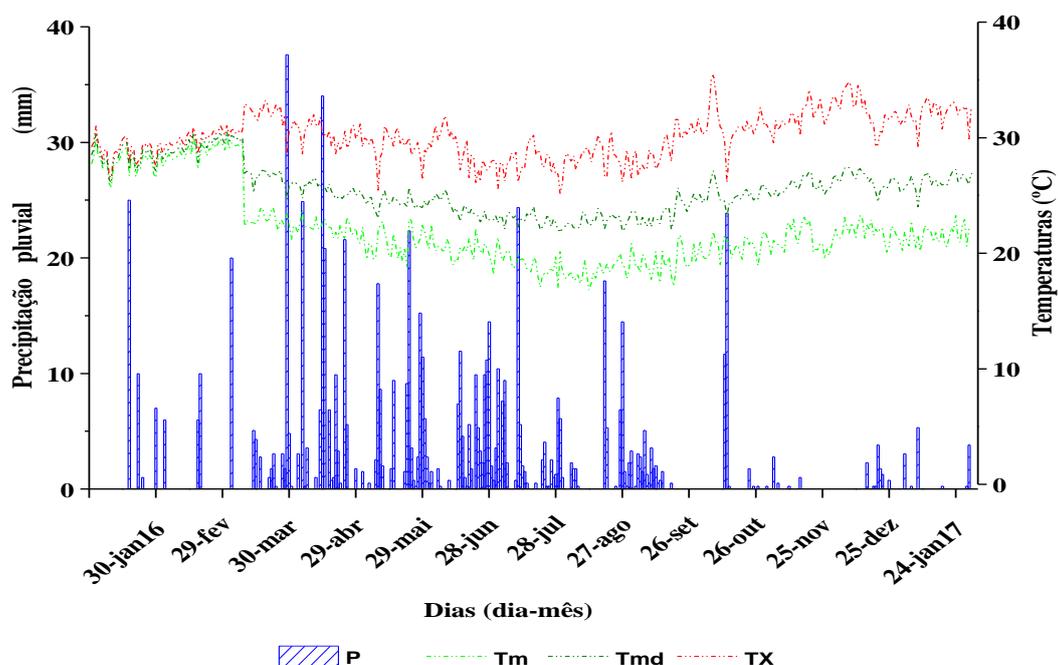
Onde:  $\hat{y}$  é o valor estimado pelo modelo;  $\mathbf{Y}_i$  é o valor observado;  $\hat{\mathbf{O}}$  é a média dos valores observados e  $\mathbf{n}$  é o número de dados. O  $\hat{\mathbf{F}}$  media dos valores estimados,  $\mathbf{X}_i$  e  $\mathbf{Y}_i$  valores observados,  $\bar{\mathbf{Y}}$  e  $\bar{\mathbf{X}}$  são medias dos observados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Variáveis Meteorológicas

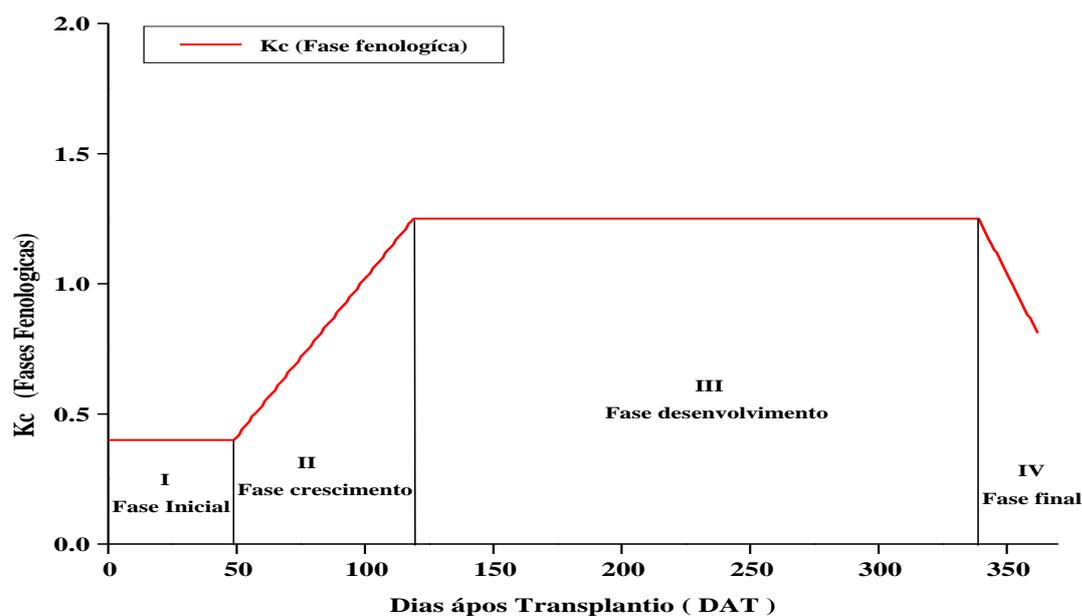
Os fatores ambientais variaram no decorrer do ano, apresentando oscilações de disponibilidades térmicas e hídricas. Durante o período experimental, a temperatura do ar média foi de 25 °C, com extremos médios de 17 °C a 35°C, Figura 5. Conforme Doorembos & Kassan (1979), a temperatura média do ar esteve na faixa ótima, na qual a cultura da cana apresenta crescimento máximo entre 22 e 30 °C. O período do experimento foi seco e com chuvas bem abaixo da média apresentando precipitação pluvial (P) total de 760,4 mm, mas de 80% (668,9 mm) dessas chuvas ocorreram entre os meses de março e agosto de 2016, apresentando distribuição irregular e com intensidades bastante variáveis (Figura 4). Conforme dados da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), a cultura da cana necessita de 1.500 a 2.500 milímetros bem distribuídos, esses valores são muito superiores a os dados observados na região em estudo, por isso se fez necessário o uso de irrigação (230 mm), na área experimental.

**Figura 4.** Precipitação pluvial (P), Tm, Tx e Tmd no período de 01/01/2016 a 31/01/2017 na região do município Teotônio Vilela -AL.



Verificou-se que o valor médio do  $K_c$  na fase inicial (0,48) foi superior ao sugerido no boletim 56 da FAO ( $K_c \sim 0,40$ ) e por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003) ( $K_c \sim 0,40$ ), porém semelhante ao informado por Doorenbos & Pruitt (1975; 1977) e Doorenbos & Kassam (1979) ( $K_c$  entre 0,40 e 0,60). Na Fase II o valor de  $K_c$  aumentou para 1,12 (Figura 5), como resposta ao rápido incremento da área foliar, (Souza et al.,1999) estudando a função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ, observaram valores variando entre 0,85 e 1,02. Para a Fase III o valor médio de  $K_c$  foi aproximadamente igual a 1,25, estes valores corroboram aos informados no boletim da FAO 56 (Allen et al., 1998) e ratificados por Inman-Bamber & Mcglinchey (2003), sendo igual a 1,25. Na Fase IV verificou-se que os valores de  $K_c$  reduziram ao final do ciclo, para 0,79 (Figura 6), valor este superior ao informado no Boletim 56 da FAO ( $K_c = 0,70$ ), resultado que pode estar associado ao fato dos dados terem sido oriundos de dados médios de experimentos realizados sob condições de menor disponibilidade de água no solo, durante esta fase de crescimento da cultura (Inman-Bamber & McGlinchey, 2003), quando comparado com o presente experimento. Souza et al. (1999) obtiveram valores de  $K_c$  para esta fase (junho a agosto), reduzindo-os de 0,85 para 0,60 ao final do ciclo (novembro a dezembro).

**Figura 5.**  $K_c$  determinado pelo Método FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final.



### 3.2 Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO

A calibração dos parâmetros genéticos da cultivar de cana-energia VERTIX 2 em comparação com a variedade padrão NCo-376 uma cultivar que foi desenvolvida por um convênio, em que os cariopses eram produzidas em Coimbatose (Co), Índia e as cultivares eram desenvolvidas em Natal (N), África do Sul, pode ser observada na Tabela 4. O parâmetro MAXPARCE através do seu resultado aponta que, a cultivar de cana-energia VX12-1744, apresenta, mas que o dobro da máxima eficiência da conversão da radiação solar expressa em assimilados produzidos antes da respiração, sendo muito superior a variedade padrão NCo-376 da plataforma DSSAT/CANEGRO. O valor do resultado do parâmetro MXLFAREA mostra que a variedade padrão apresenta área foliar máxima inferior ao da cultivar de cana-energia VX12-1744, em contrapeso, o MXFARNO (número de folhas sobre a qual é limitada pelo MXLFAREA,  $\text{cm}^{-2}$ ) apresenta valor muito próximo entre a cana-energia VX12-1744 e a padrão NCo-376. Nassif et al., (2012) para variedades comerciais de cana-de-açúcar obteve valores similares para estes parâmetros. A cultivar VX12-1744 mostrou uma necessidade térmica muito superior para a emergência da cana-planta (TTPLNTEM) em relação a padrão NCo-376, sendo o parâmetro com maior acréscimo; Barros et al., (2016) para as variedades de cana-de-açúcar RB92579, RB93509, SP79-1011 e RB931530 em um experimento conduzido para cana-planta no Centro de Ciências Agrárias (CECA-UFAL), Rio Largo, também observou bom ajuste para o parâmetro. Os graus dias necessários para que ocorra o ápice do perfilhamento (TT\_POPGROWTH) foi menor na variedade padrão e maior para a VX12-1744, em contraposição, a máxima população de perfilho (MAX\_POP) foi superior na variedade NCo-376 e inferior para cultivar de cana-energia. A população de colmos após atingir 1.600 graus dias acumulados (POPTTI6) obteve maior acréscimo para a VX12-1744 e menor para a variedade padrão Indo-Sul africana. A disparidade entre parâmetros do genótipo em questão mostra a necessidade da calibração do DSSAT/CANEGRO para cana-energia nas condições edafoclimáticas da região em estudo.

**Tabela 4.** Parâmetros do modelo DSSAT/CANEGRO para a cultura padrão NCo376 e para cana-energia VX12-1744.

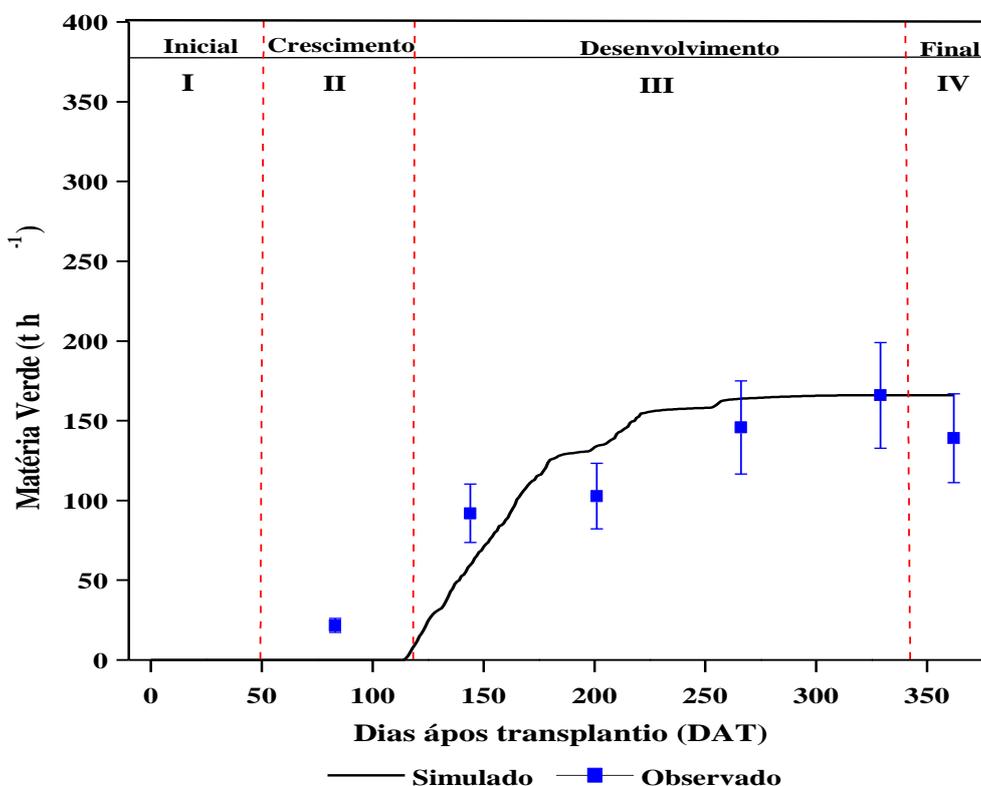
<b>PARÂMETROS</b>	<b>NCo-376</b>	<b>VERTIX 2</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>PARCEMAX</b>	9.90	30.90	gMJ <sup>-1</sup>
<b>APFMX</b>	0.88	0.90	tt <sup>-1</sup>
<b>STKPFMAX</b>	0.65	0.65	tt <sup>-1</sup> base massa seca
<b>SUCA</b>	0.58	0.58	tt <sup>-1</sup>
<b>TBFT</b>	25	25	°C
<b>TTHALFO</b>	250	250	°C dia
<b>TBASE</b>	16	16	°C dia
<b>LFMAX</b>	12	11	Numero de folhas
			cm <sup>2</sup>
<b>MXLFAREA</b>	360	380	cm <sup>2</sup>
<b>MXEFARNO</b>	14	15	Numero de folhas
<b>PI<sub>1</sub></b>	69	120	°Cdia
<b>PI<sub>2</sub></b>	169	169	°Cdia
<b>PSWITCH</b>	18	18	Numero de folhas
<b>TTPLNTEM</b>	428	950	°Cdia
<b>TTRATNEM</b>	203	203	°Cdia
<b>CHUPIBASE</b>	1050	1050	°Cdia
<b>TT_POPGROWTH</b>	600	900	°Cdia
<b>MAX_POP</b>	30	27	Colmos m <sup>-2</sup>
<b>POPTI6</b>	13.3	18.58	Colmos m <sup>-2</sup>
<b>LG_AMBASE</b>	220	220	t h <sup>-1</sup>

### 3.3 Variáveis de produção

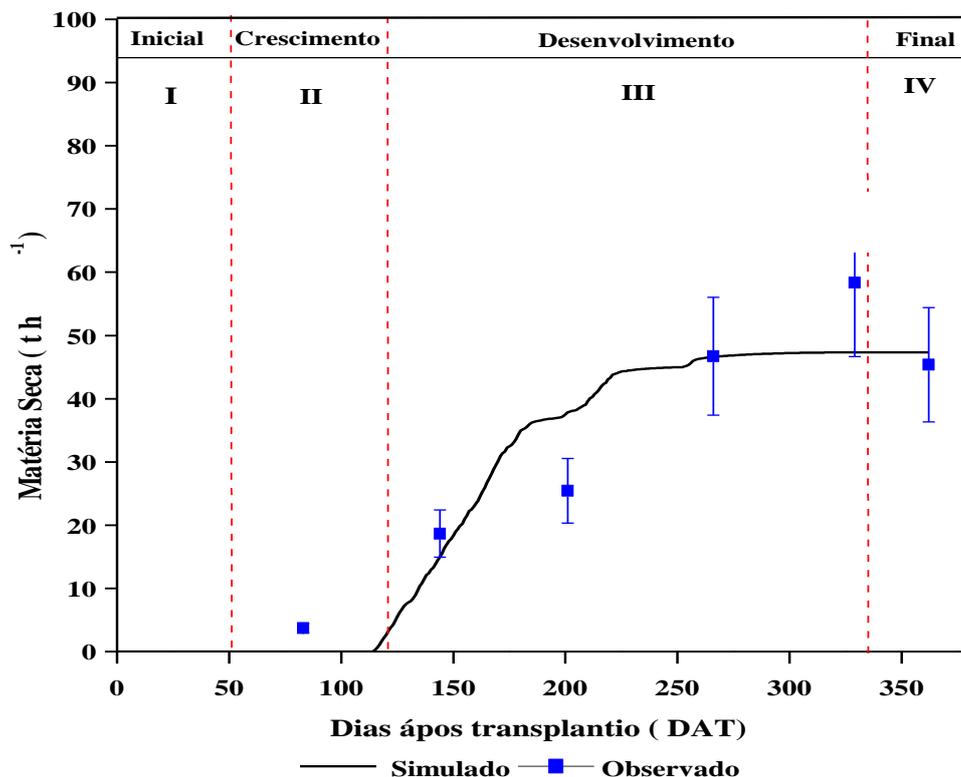
A cultivar de cana energia VERTIX 2 para a variável matéria fresca apresentou valores observados igual a: 21.67, 91.55, 102.71, 147.48, 165.67 e 138.96 (t.h<sup>-1</sup>), isso com 83, 144, 201, 266, 329 e 362 dias após o transplântio (DAT). A simulação dessa variável para VERTIX 2 é apresentada na Figura 6. Nota-se que durante o ciclo da cultura houve superestimação do modelo em quase todo período (83, 201, 266 e 362 DAT), com a subestimação do modelo para variável apenas com 144 DAT, mas simulando com boa precisão a produtividade para matéria fresca. A estimativa feita pelo DSSAT/CANEGRO obteve alto grau de ajuste para os dados observados de matéria verde em campo, isso é observado através de elevados valores para os índices estatísticos adquiridos (Tabela 6), com valores de  $d=0,98$  e  $R^2=0,94$  (1) e  $RMSE=24,37$  t.h<sup>-1</sup> para matéria verde. Os resultados expostos por O'Leary (2000) para variedade NCo-376 ( $R^2=0,73$  e  $RMSE=11,11$  t.h<sup>-1</sup>) e Nassif (2010) para a variedade de cana-de-açúcar RB86-7515 ( $d=0,74$ ,  $R^2=0,51$  e  $RMSE=30,3$  t.h<sup>-1</sup>) também obtiveram bons ajustes para essa variável.

A avaliação da matéria seca para o genótipo de cana-energia VERTIX 2 foi feita aos 83, 144, 201, 266, 329 e 362 dias após o transplântio (Figura 7). É apresentado valor máximo observado para a variável de  $58,3 \text{ t h}^{-1}$  aos 329 DAT. Observa-se que durante quase todo o ciclo da cultura ocorreu subestimação do modelo, com superestimação apenas com 201 e 362 DAT. A produtividade foi estimada com boa precisão. Os índices estatísticos gerados foram:  $d=0,99$ ;  $\text{RMSE}=10,27$ ,  $r=0,88$  (Tabela 5), os valores dos índices  $d$  e  $\text{RMSE}$  observados por Silva, (2012) para a variedade RB92579 ( $d= 0,98$  e  $\text{RMSE}= 5,05 \text{ t/ha}^{-1}$ ) também apresentaram um bom ajuste com o modelo DSSAT/CANEGRO. Os resultados observados por Marin et., al (2011) para as variedades RB72454 ( $\text{RMSE}= 9,8 \text{ t/ha}^{-1}$ ) e SP83-2847 ( $\text{RSME}= 9,6 \text{ t/ha}^{-1}$ ) mostra bons índices estatísticos para matéria seca. O coeficiente de correlação de Pearson  $r$  e o índice de concordância  $d$  indicaram uma correlação forte entre os dados estimados e observados, tendo o modelo indicado um elevado grau de ajuste para esta variável com relação aos dados observados em campo.

**Figura 6.** Matéria Verde observada e simulada ao longo do ciclo da cultura. Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final.



**Figura 7.** Matéria Seca observada e simulada ao longo do ciclo da cultura. Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final.



**Tabela 5.** índices estatísticos  $R^2$ ,  $d$ , raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice de correlação de Pearson ( $r$ ) para variedade de cana-energia Vx=1744 para massa fresca e seca do colmo.

Cana -energia VX12=1744	$R^2$	$d$	RMSE	$r$
Matéria fresca	0,94	0,98	24,37	0,94
Matéria seca	0,88	0,99	10,27	0,88

### 3.4 Variáveis de crescimento

#### 3.4.1 Índice de área foliar

O índice de área foliar verde para a cana-energia VERTIX 2 foi medido através do integrador de área foliar (LAI 2000, LI-COR Inc., Lincoln, NE). Essa variável foi avaliada menos vezes do que as demais (83, 122, 154, 188, 201, e 236 DAT), isso devido ao tombamento da cana, o que impossibilitou a continuidade da aquisição de dados, o IAF observado da VERTIX 2 oscilou de  $1,23 \text{ m}^2$  (83 DAT) a  $3,56 \text{ m}^2$  (362 DAT), com pico máximo aos 188 DAT ( $3,27 \text{ m}^2$ ), Figura 8.

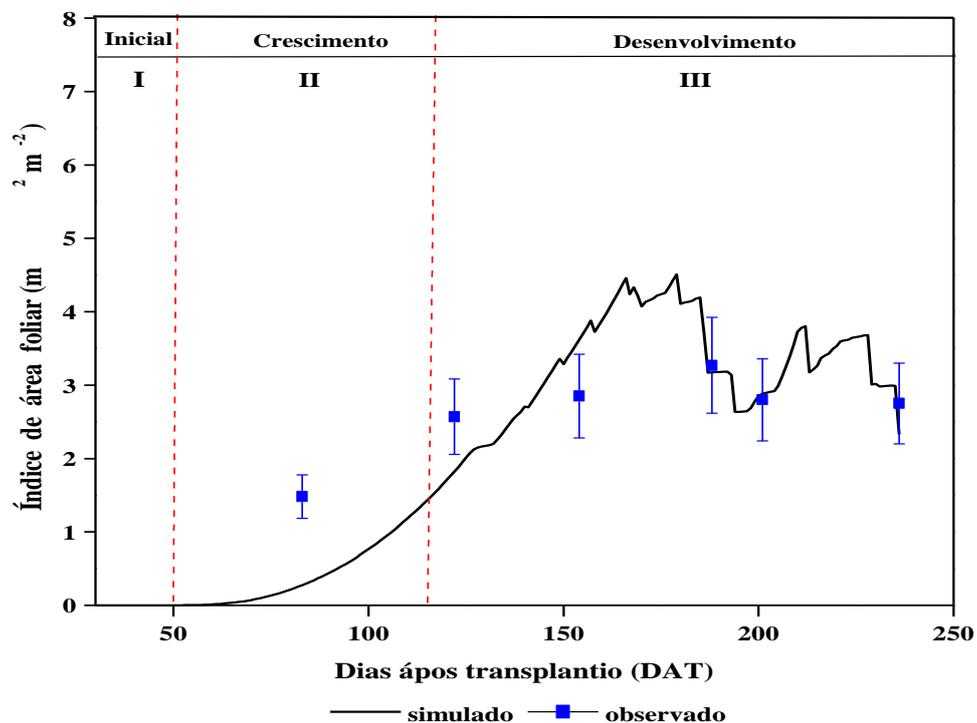
O modelo subestimou a variável durante quase todo ciclo e superestimando apenas nos pontos com 83 e 122 DAT. A simulação para variável foi boa, em relação

aos dados observados. A redução no número de amostragem desses dados prejudicou o desempenho do modelo. SILVA, (2012) observou limitação na parametrização do IAF para a variedade de cana-de-açúcar RB92579. Conforme Marim et al., (2009) mais estudos se faz necessário para melhor ajuste dessa variável no modelo DSSAT/CANEGRO. Na Tabela 6, observa-se que ocorreu boa correlação entre os dados observados e simulados para cana-energia, gerando bons índices estatísticos  $R^2=0,72$ ;  $d=0,99$  e  $RMSE=1,66\text{ m}^2$ . Nassif et al., (2012) na parametrização do índice de área foliar de três variedades de cana-de-açúcar  $CTC_4$  ( $R^2=0,97$ ,  $d=0,94$  e  $RMSE=0,42$ ),  $CTC_7$  ( $R^2=0,91$ ,  $d=0,87$  e  $RMSE=0,73$ ) e  $CTC_{20}$  ( $R^2=0,99$ ,  $d=0,92$  e  $RMSE=0,64$ ), obteve boa precisão do modelo DSSAT/CANEGRO no ajuste do IAF.

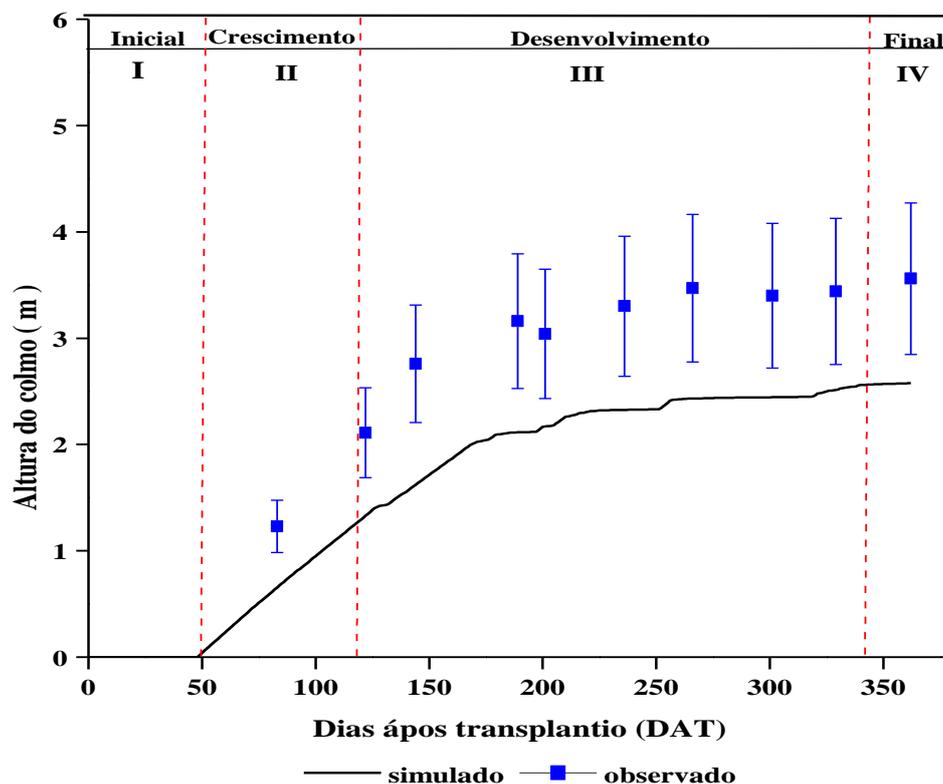
### 3.4.2 Altura do colmo

A avaliação da altura do colmo para cana-energia VX12=1744 foi feita com: 83, 122, 144, 188, 201, 236, 266, 301, 329 e 362 dias após o transplante, quando a altura máxima do colmo foi 3,56 m (362 DAT). Na figura 9 é possível observar a estimativa feita pelo modelo DSSAT/CANEGRO para essa variável, em que se observa uma boa correlação com os dados observados em campo. O modelo subestimou o crescimento do colmo por todo ciclo dos 83 aos 362 dias após o transplante. A parametrização da altura do colmo realizada pelo CANEGRO forneceu altos valores para todos os índices estatísticos (Tabela 7), com  $d=0,99$ ,  $RMSE=0,94$ ,  $R^2=0,98$  indicando um elevado grau de ajuste do modelo para essa variável. Os resultados encontrados por Nassif (2010) com as variedades  $CTC_7$  ( $d=0,80$ ;  $RMSE=0,48$ ;  $R^2=0,94$ ) e  $CTC_{20}$  ( $d=0,81$ ;  $RMSE=0,63$ ;  $R^2=0,92$ ), também indicaram um bom grau de ajuste do modelo com essas variedades em relação aos dados observados.

**Figura 8.** Índice de área foliar observado e simulado ao longo do ciclo da cultura. Fases fenológicas determinadas pelo método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final



**Figura 9.** Altura do colmo observada e simulada ao longo do ciclo da cultura. Fases fenológicas determinadas pelo método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final.

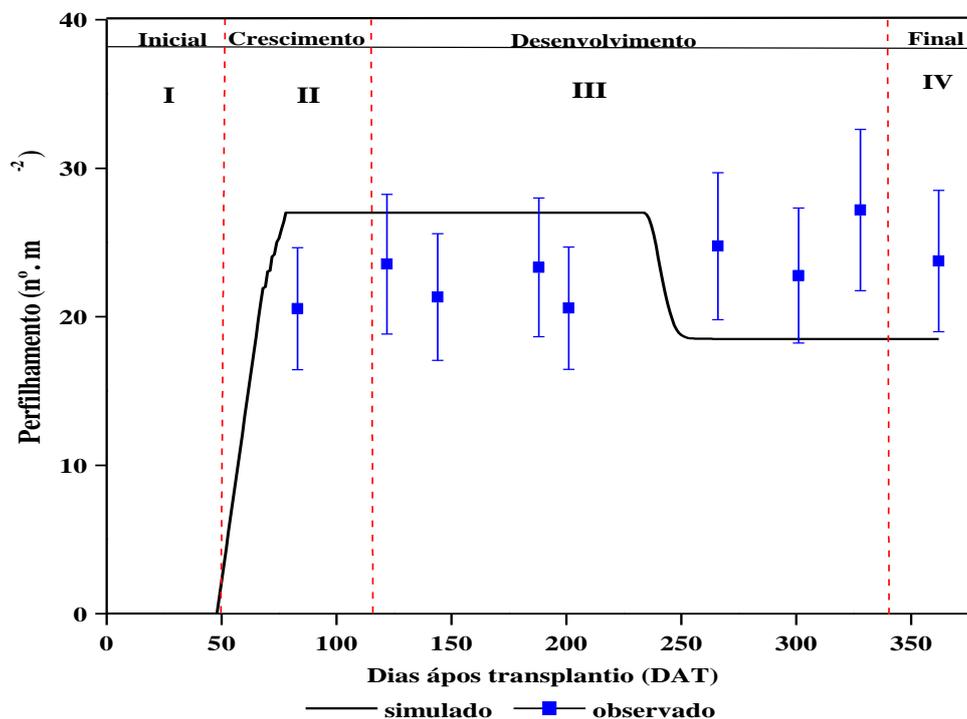


### 3.4.3 Perfilhamento

A parametrização do perfilhamento da cana-energia VERTIX 2 pode ser observada na Figura 10. As avaliações dessa variável foram aos 83, 122, 144, 188, 201, 266, 301, 328 e 362 dias após o transplante (DAT), o perfilhamento máximo por metro quadrado foi 27,18 aos 328 DAT. O perfilhamento da cana-energia VERTIX 2 no modelo CANEGRO não apresentou o comportamento típico de variedades de cana-de-açúcar que atingem o pico máximo, decresce e posteriormente se estabiliza. Esse comportamento atípico para a cana-energia pode ser devido ao fato da mesma possuir rizomas, implicando em plantas que brotam mais rápido, com um perfilhamento mais denso, a cana-de-açúcar nos seus primórdios detinha essa característica (rizomas), mas nos últimos 100 anos os programas de melhoramentos se concentraram somente em variedades com maior teor de sacarose, e fez com que essa característica dos rizomas se reduzisse (MATSUOKA et al., 2012).

Os índices estatísticos gerados foram:  $d= 0,99$ ;  $RMSE= 5,43$ ;  $r= -0,75$  e  $R^2= 0,75$ , Tabela 7. O alto índice  $d$  indica que ocorreu uma boa proximidade dos valores estimados com os dados observados em campo, o valor do erro do quadrado médio (RMSE) indica que o modelo é capaz de fazer boas previsões para essa variável e índice de concordância de Pearson indica uma boa correlação entre os dados estimados e observados, mas na avaliação geral dos índices estatísticos os valores estimados e observados estão em concordância. Valores similares dos índices  $d$  e  $R^2$  foram observados por Nassif, (2012) com a variedade RB867515 ( $d= 0,873$  e  $R^2= 0,57$ ). Barros et al., (2016) obteve índices de RMSE em cana-planta com as variedades RB92579 (1,82 n°.m<sup>2</sup>), RB93509 (2,06 n°.m<sup>2</sup>), SP79-1011(1,42 n°.m<sup>2</sup>) e RB931530 (1,61 n°.m<sup>2</sup>) onde observou bons resultados com o modelo DSSAT/CANEGO. O modelo CANEGRO encontrou algumas dificuldades na análise do perfilhamento, sendo necessárias mais avaliações para genótipos de cana-energia.

**Figura 10.** Perfilamento observado e simulado ao longo do ciclo da cultura. Fases fenológicas determinadas pelo método do Kc FAO 56: Fase I – inicial; Fase II – crescimento; Fase III – desenvolvimento e Fase IV – final.



**Tabela 6.** Índices estatísticos  $R^2$ , d, raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice de correlação de Pearson (r) com variedade de cana-energia VX12-1744 para índice de área foliar, Perfilamento e altura do colmo.

Cana-energia VERTIX 2	$R^2$	d	RMSE	r
IAF	0,72	0,99	1,66	0,72
Perfilamento	0,75	0,99	5,77	-0,75
Altura do colmo	0,98	0,99	0,94	0,98

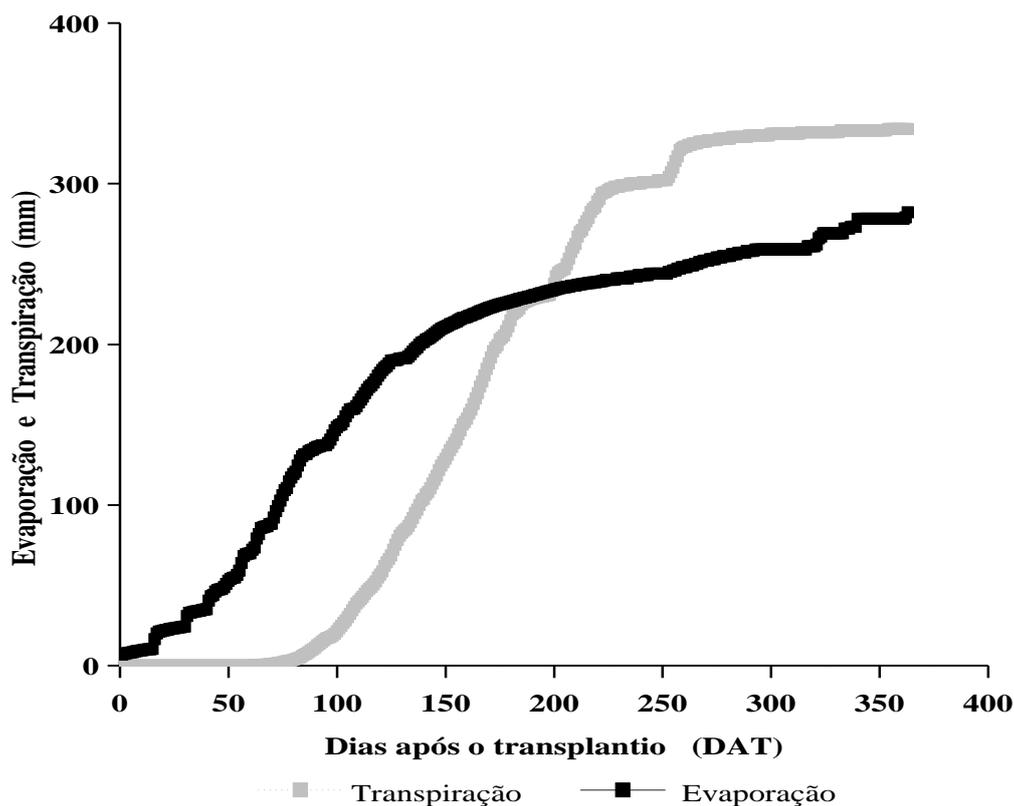
#### 4. Análise do Balanço da água

Modelo DSSAT simulou o acumulado da transpiração e evaporação com bom desempenho, para a cultura da cana-energia. Inicialmente, a evaporação foi maior que a transpiração devido ao crescimento lento da área foliar da cana-energia, mas o total acumulado da transpiração foi maior (Figura 11). O modelo obteve bom desempenho nas simulações da evapotranspiração da cultura (ETc), apresentado ETc simulada de 616 mm e observada de 1080 mm para o genótipo de cana-energia VERTIX 2.

De acordo com Allen et al. (1998) em condições de campo, a relação entre a evaporação do solo nu e ETo geralmente varia de 25 a 40%. Neste estudo, não foi possível estimar essa relação, mas foi calculada a relação entre evaporação (E) e

transpiração (T) a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração da cultura (ETc). As relações E/ETr foi 16% e T/ETr foi 19,2% para o genótipo de cana-energia VX12-1744 . A relação E/ETc foi 26,1% e T/ETc foi 30,9% para cana-energia planta em estudo. Esses valores foram inferiores a os encontrados por Carvalho et al., (2017) com a variedade de cana-de-açúcar RB93509 em cana-planta e soca, em um experimento conduzido por Almeida et al., (2008) em Rio Largo Alagoas, em que a relação E/ETr foi 44% na cana- planta e 32% na soca e a relação T/ETr foi 56% no ciclo da planta e 68% no ciclo da primeira soca de soca. E a relação E/ETc foi 32% na cultura da planta e 20% na soca e T/ETc foi de 42% na cana planta e 42% na soca. Mostrando assim a boa capacidade do modelo DSSAT/CANEGRO em fazer previsões.

**Figura 11.** Transpiração acumulada (T; mm) e evaporação (E; mm) simulada pelo modelo DSSAT / CANEGRO para cultura da cana-energia planta, para o estado de Alagoas.



## 5. CONCLUSÕES

O modelo DSSAT/CANEGRO foi ajustado para a calibração do genótipo de cana-energia planta. O modelo CANEGRO ajustou muito bem os parâmetros de máxima eficiência da conversão da radiação solar expressa em assimilados produzidos antes da respiração (PARCEMAX) e necessidade térmica para a emergência da cana-planta (TTPLNTEM) para cultivar de cana-energia VERTIX 2, os valores foram mais elevados do que os observados na cultivar padrão Nco-376 e indica que a fisiologia dessas cultivares são diferentes.

O CANEGRO tem melhor desempenho nas predições das variáveis de matéria seca e matéria fresca do colmo e altura do colmo. Além de boa capacidade para estimar o balanço de água no solo.

O modelo DSSAT/CANEGRO tem relativamente bom desempenho para estima o índice de área foliar, (onde a falta de mais dados afetou melhor desempenho do modelo), e baixa representatividade do perfilhamento onde a cana-energia tem comportamento atípico.

O DSSAT/CANEGRO desde que bem ajustado é uma ferramenta para a previsão de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultivar de cana-energia VERTIX 2.

## **CAPITULO 2-SIMULAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE CANA-ENERGIA PELO MODELO DSSAT/CANEGRO USANDO CENÁRIOS CLIMÁTICOS RCPs**

### **1.INTRODUÇÃO**

O conhecimento das variações climáticas e suas implicações no crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas e de suma importância para melhorar o rendimento das culturas agrícolas porque a agropecuária, em todas partes do mundo, é muito dependente do clima. Por isso, as previsões acerca do clima futuro têm incentivado estudos sobre os possíveis impactos dessas variações sobre a produção agrícola de diversas culturas SILVA, (2012). A cana-energia é uma nova variedade de cana com características ancestrais e modernas, suas maiores qualidades são maior quantidade de fibra, rusticidade, maior rebrotação na soca, raízes mais fortes, maior resistência ao déficit hídrico e adversidades climáticas, considerada como cultura com alto potencial na síntese do etanol de segunda geração e produção de energia, aumentando assim a demanda de energia elétrica nacional (MATSUOKA et al., 2012).

No Brasil, a maior parte dos trabalhos realizados para cenários futuros com a cultura da cana-de-açúcar tem sido desenvolvida para o estado de São Paulo, onde projeções regionalizadas de mudanças climáticas em cenário desfavoráveis de clima apresentaram elevação na produtividade média com ganho de 6% de produção total (Marim et., al 2009). No estado de Alagoas a cultura da cana-energia é estudada e cultivada pela empresa GRANBIO, onde a mesma desenvolver pesquisas para o lançamento de novas cultivares. Por isso surge a necessidade de pesquisas através de modelos que venha auxiliar na previsão de safra e em possíveis impactos de alterações climáticas futuras para cultura da cana-energia em Alagoas.

Os modelos mecanísticos são excelentes ferramentas para auxiliar nas análises das possíveis mudanças climáticas futuras e seu impacto na agricultura (LYRA et al; 2008). Atualmente, o modelo de simulação de crescimento mais utilizado para cultura da cana-de-açúcar é o DSSAT/CANEGRO. O CANEGRO é um módulo de partição de matéria seca que foi desenvolvido na África do Sul, visando melhorar as previsões de sacarose, por meio de partição diária de assimilados entre as raízes e a parte aérea como uma função não linear da biomassa total, tendo como finalidade o aperfeiçoamento do planejamento da produção açucareira Sul-africana. Pertencente a plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), o DSSAT versão 3.1 (Inman

Bamber & Kiker, 1997) e atualizado na versão 4.5 do DSSAT, o DSSAT/CANEGRO vem sendo utilizado em diversas localidades do mundo, tornando as análises de produção para cultura da cana-de-açúcar mais ágil e eficaz (Marin et al., 2011).

As projeções de cenários futuros de clima pela sua relevância têm como base os relatórios divulgados pelo IPCC (*Intergovernmental Panel of Climate Change*) os quais indicam diversas variabilidades climáticas de acordo com o desenvolvimento socioeconômico para cada localidade, utilizando as Representativas de Concentração radiativa RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 (OLIVEIRA, 2015). Para auxiliar na síntese desses cenários faz-se uso do sistema operacional Marksim (DSSAT weather file generator) o qual fornece utilitários para essa finalidade, com destaque para o MIROC-05, também conhecido como Modelo Interdisciplinar sobre Clima, é um modelo de origem japonesa que simula impactos climáticos devido as condições de poluição atmosférica por aerossóis em escala global (WATANABE *et al.*, 2010). Em que atende a todas as exigências de formatação da plataforma DSSAT/CANEGRO, tornado sua aplicabilidade simples e eficaz. Portanto, o objetivo desse trabalho foi a simulação de produtividade de cana-energia utilizando série climatológica obtida a partir do modelo MIROC-05 para biomassa seca e fresca do colmo da cultivar de cana-energia VERTIX 2, com base no modelo DSSAT/ CANEGRO no Estado de Alagoas.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Localização as variáveis ambientais**

O experimento foi conduzido na área experimental da empresa GranBio na Fazenda Roqueira, região de Teotônio Vilela-AL (09°55'35"S; 36°17'03"W; 124 m) numa área de aproximadamente 1,0 hectare (ha). As variáveis meteorológicas foram obtidas na estação agrometeorológicas automática do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar da Universidade Federal de Alagoas (LARAS - UFAL), situada na área do experimento.

### **2.2 DSSAT/CANEGRO**

As previsões futuras para o ganho de biomassa verde e seca do colmo do cultivar de cana-energia VERTIX 2 foi realizada na plataforma DSSAT/CANEGRO. Consistiu na inserção de dados climáticos de radiação solar global ( $W.m^{-2}$ ), temperatura máxima e mínima do ar ( $^{\circ}C$ ), precipitação (mm), velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) e umidade relativa do ar (%), essa serie climática futura (2018-2095) foi adquirida pelo modelo climático global MIROC5. Todos os demais arquivos como: textura do solo (areia, limo e argila), densidade e pH do solo da área estudada, propriedades hidrofísicas do solo como capacidade de campo, ponto de murcha permanente, saturação de água e profundidade do solo, com base em processos de crescimento de cana-de-açúcar e modelagem de desenvolvimento, incluindo fenologia, crescimento do dossel, acumulação de biomassa e sacarose, partição, crescimento radicular, estresse hídrico, informações agrônômicas (variedade, espaçamento entre linhas, população de plantas e informações sobre a quantidade e a data na irrigação e aplicação de fertilização) contem as informações referentes aos coeficientes genéticos calibrados no capítulo 1 para a cultivar de cana-energia.

### **2.3 Cenários futuros**

As previsões climáticas que compreendem o clima futuro (2018-2095) e o clima presente (1961-1990) foram adquiridas a partir do modelo MIROC-05, através do software Marksim DSSAT Weather File Generator ([gismap.ciat.cgiar.org/Marksim](http://gismap.ciat.cgiar.org/Marksim)). Onde contrastaram-se valores da produtividade da safra 2016-2017 (experimento), com a produtividade das safras futuras (2018-2095), para a cultivar de cana-energia VERTIX 2. As projeções climáticas no MIROC5 foram realizadas utilizando quatro

(*Representative Concentration Pathways – RCP*) RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5. No Quinto Relatório de Avaliação – AR5 (2013), o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) determinou quatro rotas Representativas de Concentração radiativa (*Representative Concentration Pathways – RCP*) para formar seus cenários. As RCPs representam trajetórias percursos diferentes para o forçamento radiativo total até 2100, e são identificados por seus níveis totais de forçamento radiativo: RCP2.6 = 2,6 W m<sup>-2</sup>; RCP4.5 = 4,5 W m<sup>-2</sup>; RCP6.0 = 6,0 W m<sup>-2</sup>; e RCP8.5 = 8,5 W m<sup>-2</sup>. RCPs são cenários climáticos com projeções para o futuro forçamento radiativos de taxas de emissão de gás e esforços de mitigação. O RCP 2.6 é o cenário, mas otimista atingindo seu pico na metade do século XXI, a RCP 4.5 e 6.0 é uma continuação da rota atual de emissões, que atinge um forçamento radiativo global até o ano 2100. Para o RCP 8.5 o aquecimento é projetado para se estender além de 2100 em todos os cenários, com exceção do RCP 2.6, com a forçante radiativa de 8,5 W m<sup>-2</sup> mais que os níveis pré-industriais. Cada RCP provê conjuntos de dados, espacialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100 (BURKETT *et al.*, 2014).

Os dados meteorológicos adquiridos do software Marksim através do modelo global MIROC5 já se encontram na forma ideal para serem aplicados na plataforma DSSAT, com suas unidades comuns ao do programa, em escala diária. A metodologia usada por OLIVEIRA (2015) foi utilizada para se atentar a falhas dos dados adquiridos, com a finalidade que nem um erro ocorra nas análises (Equação 1). A equação indica o cálculo dos desvios presentes em comparação a os dados meteorológicos dos cenários futuros em relação ao cenário atual.

$$\mathbf{DESVIO} = (\mathbf{CENÁRIO FUTURO} - \mathbf{CENÁRIO ATUAL}) \quad (1)$$

Sendo:

**Desvio** – diferença entre o dado do cenário atual e cenário futuro

**Cenário futuro** - dado climático referente ao cenário futuro

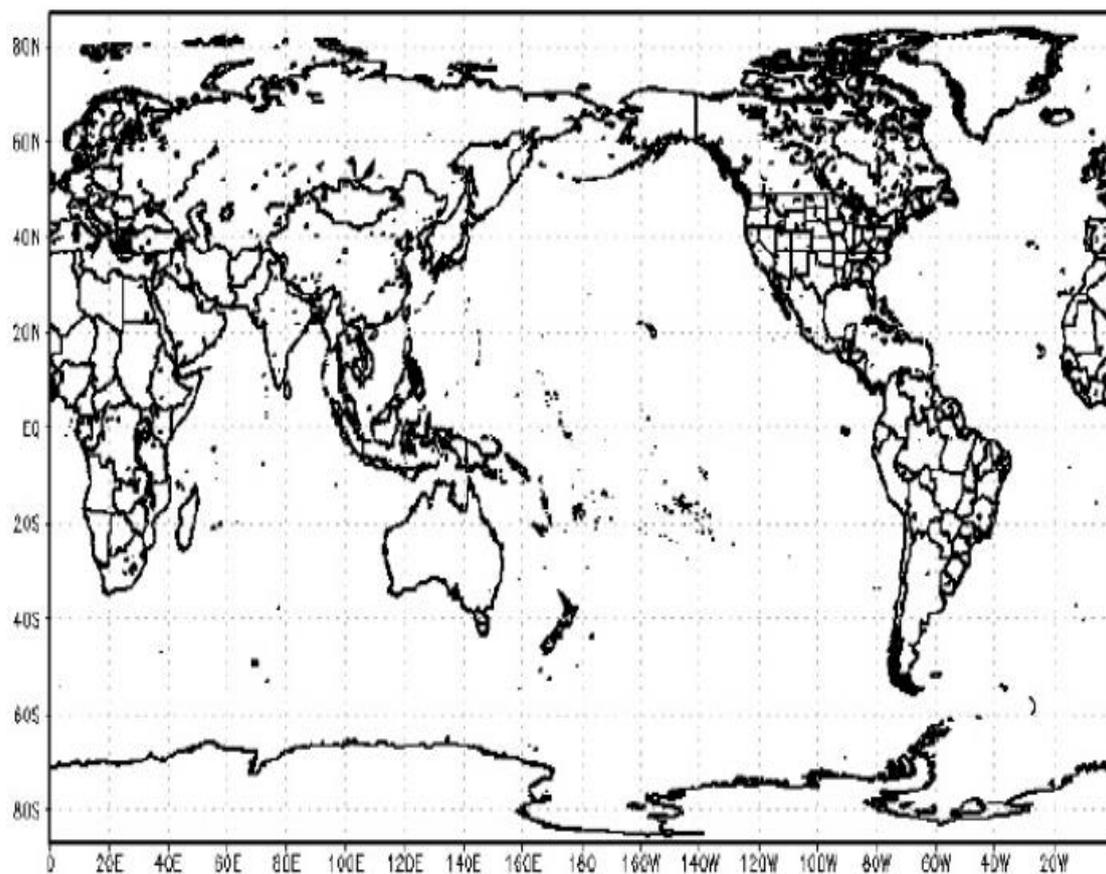
**Cenário atual** – dado climático referente ao cenário atual

Conforme a metodologia de OLIVEIRA, (2015), se os desvios forem positivos apresentaram aumentos nos valores para os cenários futuros em relação ao cenário

presente. Caso sejam negativos os valores dos desvios, poderá ocorrer, uma diminuição de valores no cenário futuro em relação ao cenário atual.

#### **2.4 Modelo MIROC5**

O MIROC5 Model for Interdisciplinary Research on Climate (WATANABE et al., 2010), teve sua criação em conjunto pelo National Institute of Environmental Studies (NIES), Center for Climate System Research (CCSR) e Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), sendo essa nova versão utilizada no Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), no AR5 (IPCC, 2013), Tabela 8. Conforme Reis et al.,(2016) o MIROC5 Possui componente espectral atmosférica com uma resolução T85, que chega a um alcance aproximadamente 150 km na horizontal, contendo 40 níveis atmosféricos verticais. Sendo acoplado a COCO 4,5, um modelo oceânico com 50 níveis de profundidade e 1° de resolução horizontal. Seus fluxos radiativos calculados pelo regime de k-distribuição, o seu modelo de aerossol (SPRINTARS), é conectado ao esquema de microfísica de nuvens, juntamente com o esquema de radiação, que usa o esquema de superfície terrestre MATSIRO com seis camadas de solo. Cada “grid box” é formado por três peças de vegetação potencial, terras cultiváveis e lago, contando com roteamento de rio e os efeitos da neve no albedo, Este modelo não requer correção de fluxo com o conjunto padrão de valores dos parâmetros físicos. O domínio dos dados do modelo MIROC5 abrange toda área limitada pelas longitudes 0° oeste e 360° leste e latitudes 87° sul e 87° norte, conforme a Figura 12.

**Figura 12.** Domínio do Modelo MIROC5

Fonte: (RODRIGUES, 2014)

**Tabela 7.** Variáveis atmosféricas do modelo MIROC5.

ID	Descrição	Sigla	nº de Níveis	Unidade
1	Componente meridional do vento	va	40	m/s
2	Componente zonal do vento	ua	40	m/s
3	Temperatura do ar	ta	40	K
4	Umidade específica do ar	hus	40	1
5	Pressão do ar á superfície	ps	1	Pa
6	Pressão à nível médio do mar	psl	1	Pa

Fonte: (RODRIGUES, 2014)

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Desvios dos dados climáticos

Os desvios para temperatura máxima e mínima, precipitação pluvial e radiação solar podem ser observados nas Figuras 13 e 14, respectivamente. A RCP 8.5 foi o cenário que apresentou os maiores aumentos para temperatura máxima com valores que oscilaram de 1,9 °C (Dez) a 2,2°C (Fev). Na RCP 2.6 observam-se os menores acréscimos para temperatura máxima entre as quatro RCPs, com valores que variam de -0,4 °C (Mai) e -0,3 °C (Nov). As RCPs 4.5 e 6.0 mantiveram menor oscilação entre seus valores, ficando com valores intermediários entre as RCPs que apresentaram maiores e menores incrementos de temperatura máxima, os valores variaram 0,5 (Ago) a 1,4 °C (Nov) e 0,4 °C (Abr) a 1,3°C (Out), respectivamente, para as RCPs 4.5 e 6.0.

Os desvios relacionados à temperatura mínima para as RCPs 4.5 e 6.0 apresentaram um comportamento similar a temperatura máxima, onde mantiveram pouca oscilação entre si ficando com valores intermediários entre as RCPs que apresentaram maior e menor grau de acréscimo para temperatura mínima. Os Valores para RCPs 4.5 e 6.0 encontram-se entre 0,6°C (Ago) a 1,5°C (Nov) e 0,5 (Jul) a 1,3 °C (Jan), respectivamente. A RCP 8.5 apresentou o maior incremento para temperatura mínima quando equiparada a os outros cenários com valores de 0,5 °C (out) e 2,1 °C (Nov), o menor grau de aumento foi constatado para RCPs 2.6 com 0,1 (Fev) e 0,5 °C (Out).

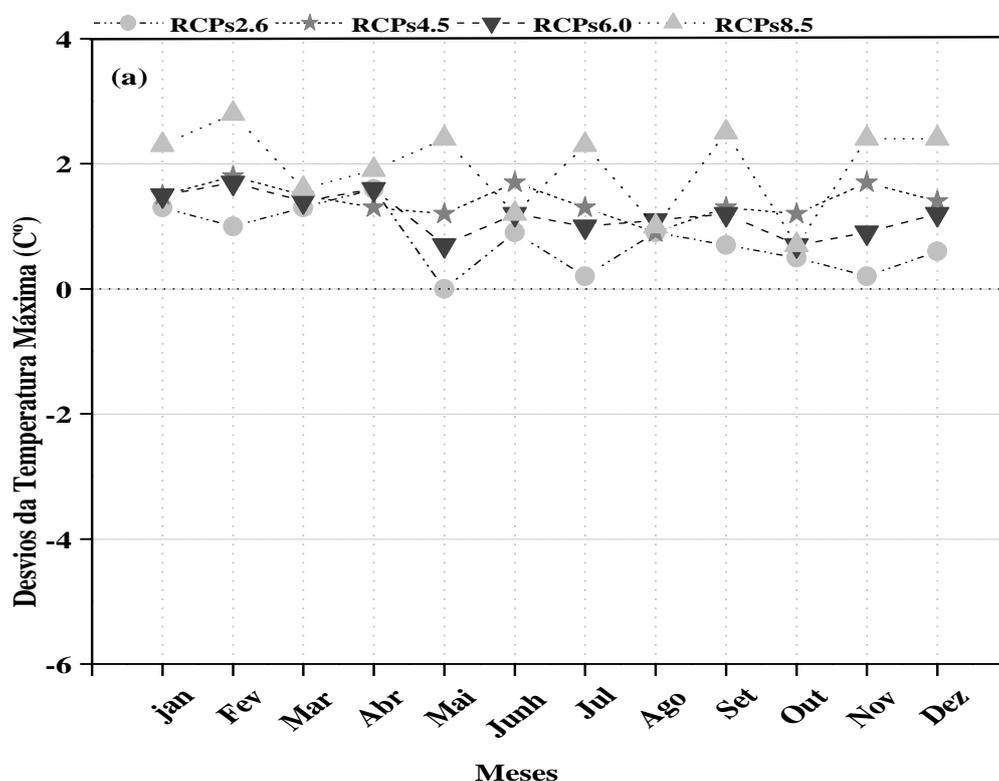
As médias dos desvios para precipitação pluvial mostram maiores lâminas precipitadas nos meses de maio a agosto com destaque para RCPs 2.6 e 6.0 que apresentaram um acúmulo de 121,3 e 78.3 mm, respectivamente. No mês de maio todas as RCPs apresentaram uma queda na concentração das chuvas, com destaque para RCPs 2.6 que apresentou o menor valor acumulado -81,4 mm. No mês de junho as RCPs 4.5, 6.0 e 8.5 tiveram baixos valores, sendo a RCPs 8.5 a com menor redução -75.3 mm. Para o período de setembro a dezembro as quatro RCPs mantiveram-se com uma regularidade entre elas com poucas oscilações entre as médias. Os meses de maio a agosto as RCPs apresentaram os maiores picos de precipitação pluvial devido estarem englobado na quadra chuvosa do Estado de Alagoas, onde 70% das chuvas ocorrem de abril a agosto e os 30% restantes de setembro a março (SOUZA et al., 2004).

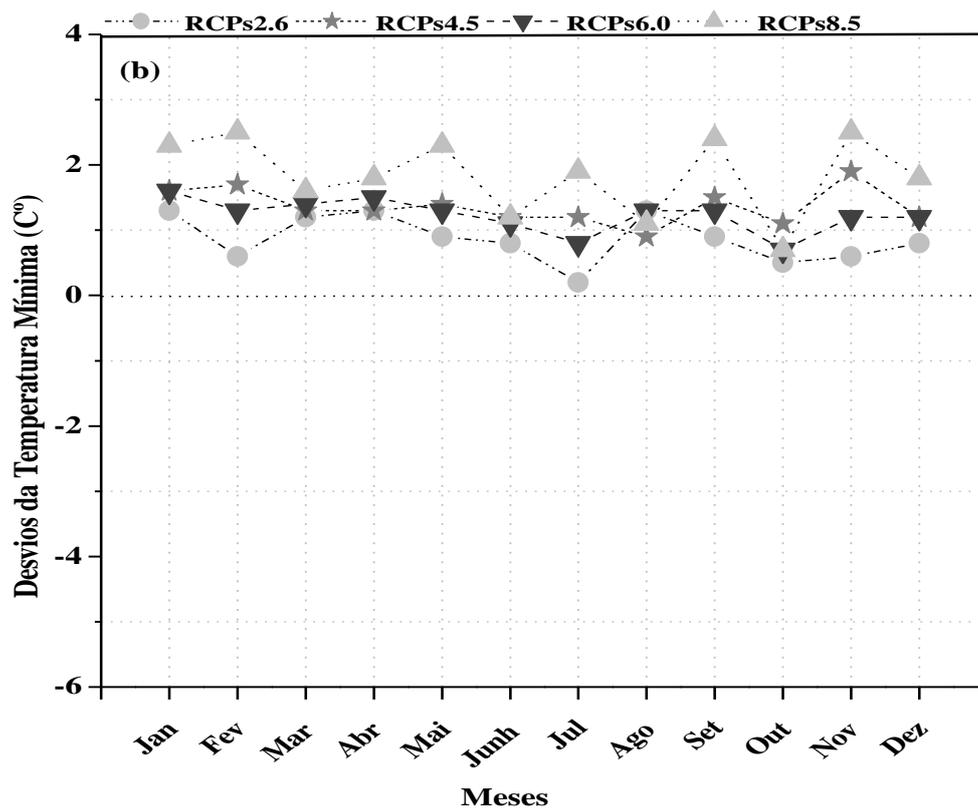
Nos valores dos desvios relacionados a radiação solar observa-se que ocorreu uma diminuição da radiação solar nos meses de maio a agosto para as quatro RCPs

tendo como destaque a RCPs 4.5 que obteve o menor valor  $-5,0 \text{ Mj m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , isso poderá ocorrer porque esses meses pertencerem ao período chuvoso do Estado de Alagoas, e isso aumenta a nebulosidade, o que faz diminuir a incidência de radiação solar na superfície. O mês de abril apresentou o maior pico de radiação solar pra todas RCPs com ênfase para RCPs 4.5 e 6.0 que obtiveram valores de  $3,1$  e  $1,7 \text{ Mj m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Esses maiores valores ocorreram devido o mês de abril se apresentar com céu claro, favorecendo a incidência da radiação solar na superfície.

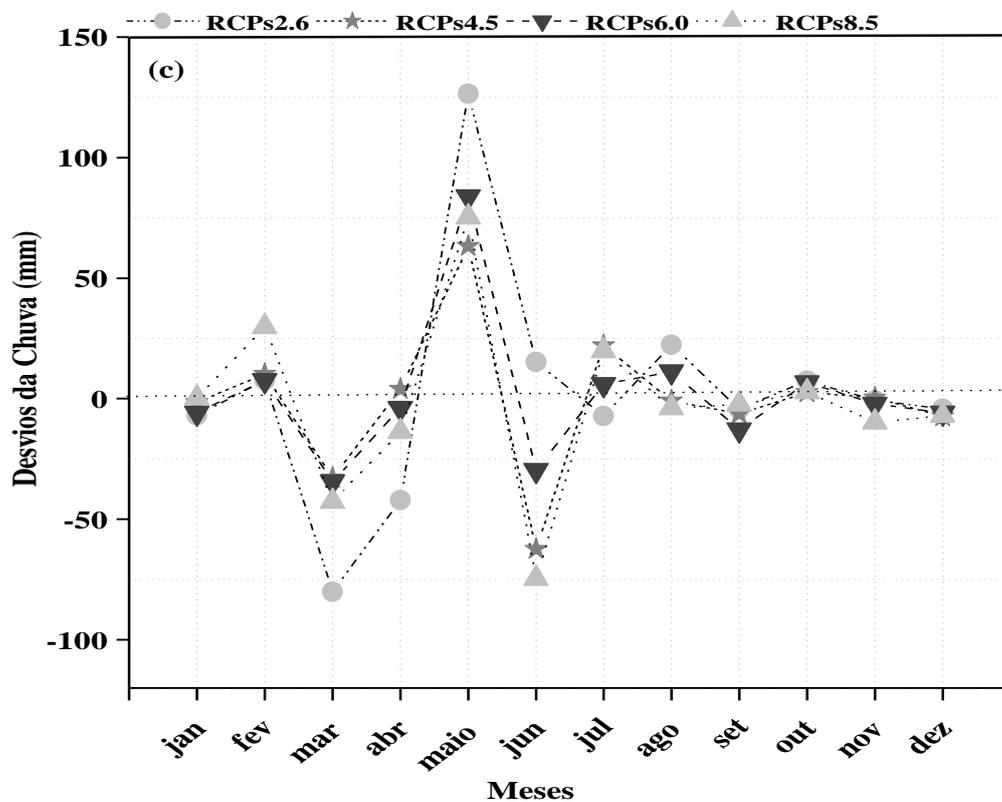
De modo geral a temperatura máxima, mínima, precipitação pluvial e radiação solar apresentaram aumento em relação ao cenário atual. O trabalho realizado por OLIVEIRA (2015), aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE, conduzido para região de Piracicaba-SP, apresentaram valores de desvios de temperatura máxima, mínima, radiação solar e precipitação pluvial superiores a os resultados deste trabalho, em que a temperatura máxima e mínima apresentou valores de  $3,05$  e  $4,8 \text{ C}^\circ$ , respectivamente, a radiação solar de  $7,0 \text{ Mj m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e chuva de  $220 \text{ mm}$ , constatando um aumento em relação ao cenário atual.

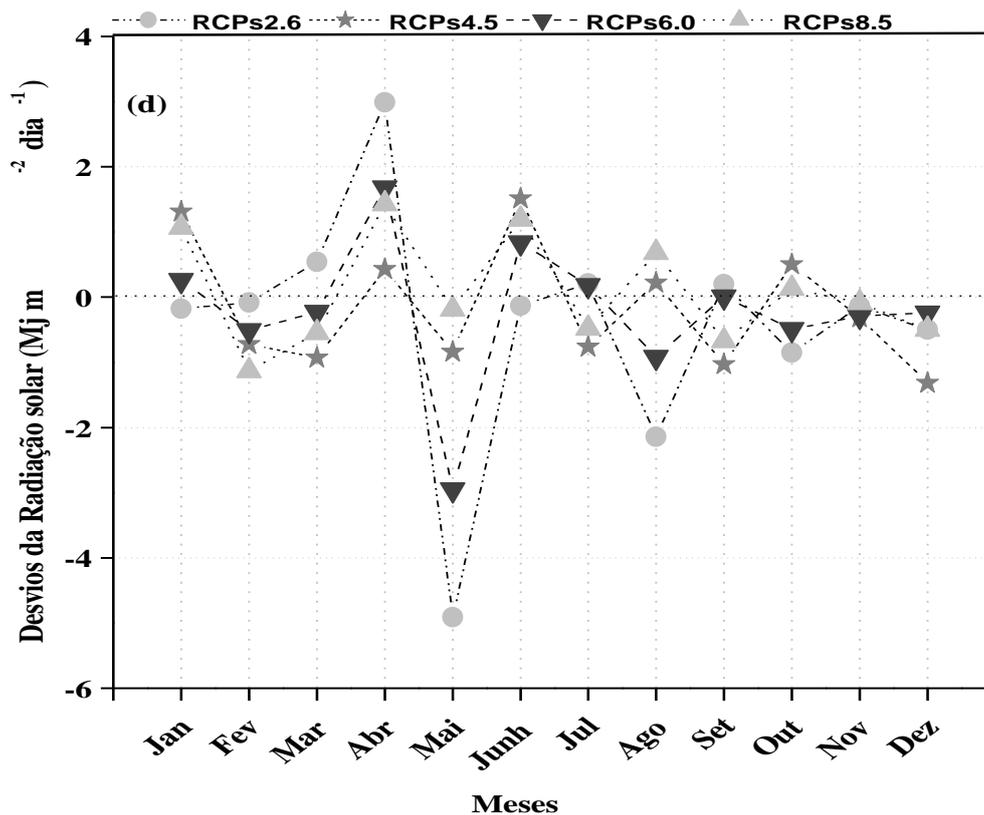
**Figura 13.** Desvios das temperaturas (a) máximas e mínimas (b) adquiridas mediante a comparação entre as RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 com cenário atual.





**Figura 14.** Desvios da precipitação pluvial (c) e radiação solar (d) adquiridas mediante a comparação entre as RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 com cenário atual.

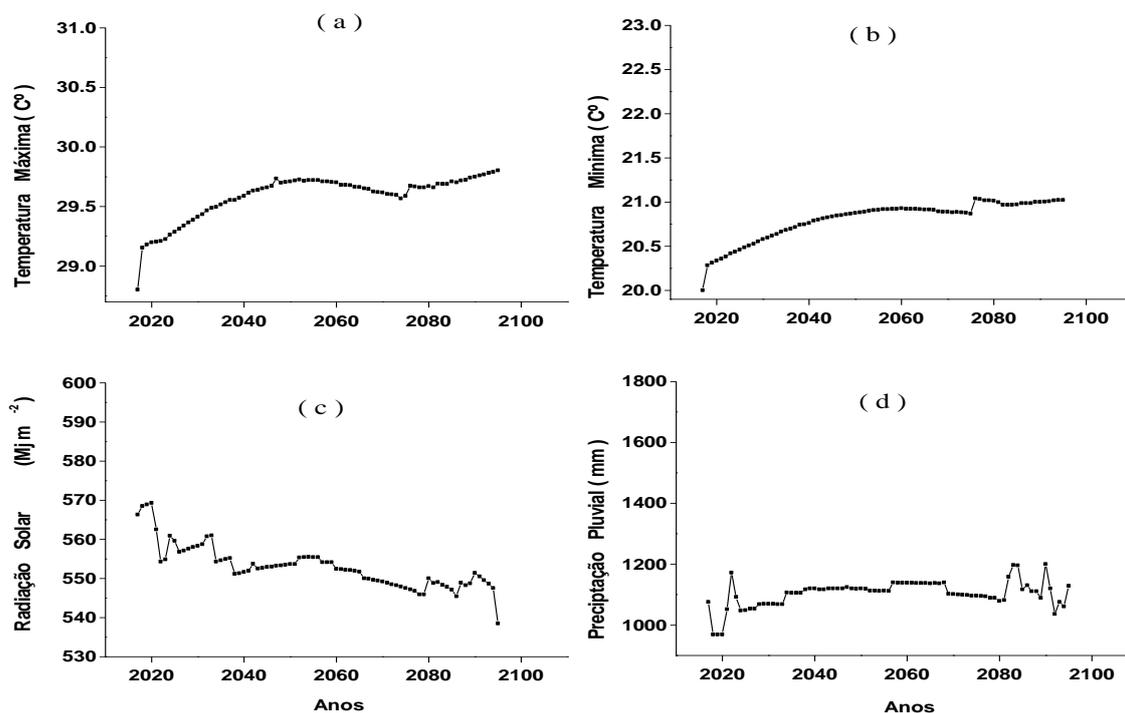




### 3.2 Análises dos cenários climáticos futuros

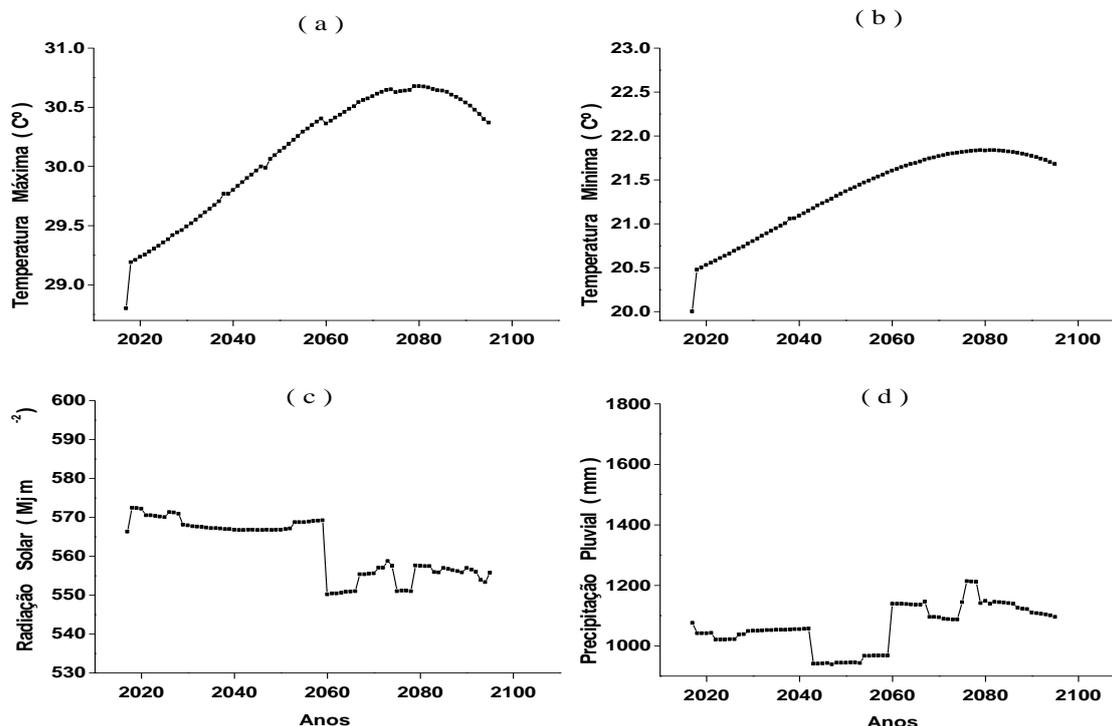
As quatro RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) em média, demonstraram um aumento, em que o primeiro ano nas respectivas Figuras 15, 16, 17 e 18 representa o clima presente (1961-1990). Na Figura 15, observa-se as médias mensais futuras para temperatura máxima, mínima, radiação solar e precipitação pluvial, relacionadas a RCP 2.6. A temperatura máxima e mínima mostrou um aumento para o futuro de 1°C em relação ao cenário presente, com valores de 29.8°C (2095) e 21.03°C (2077), respectivamente. A radiação solar mostrou uma queda acentuada em relação ao clima presente com extremos de 538  $\text{Mj.m}^{-2}$  (2095) e 569  $\text{Mj.m}^{-2}$  (2020), com aumento de 31  $\text{Mj.m}^{-2}$  para anos iniciais; A chuva para o cenário futuro aumenta 123 mm na sua concentração, com acumulo máximo de 1.199 mm para o ano de 2090.

**Figura 15.** Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 2.6.



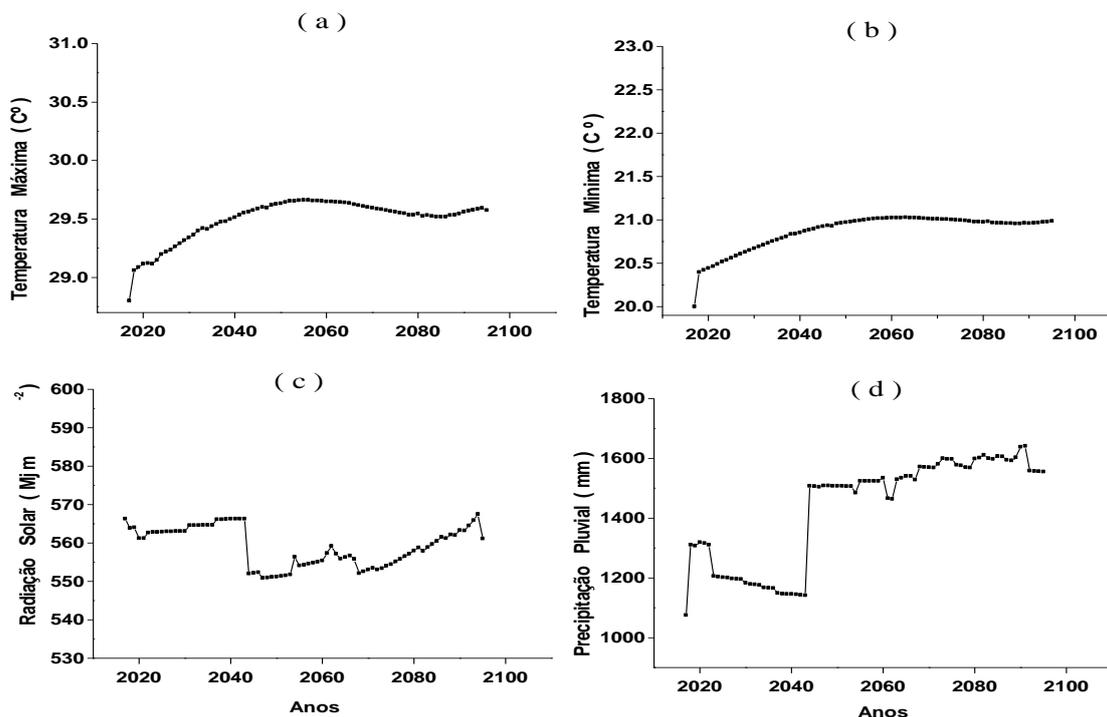
A RCP 4.5 para temperatura máxima e mínima obteve aumento de 1,8 °C em relação ao tempo presente, com declínio apenas nos últimos anos, os maiores valores obtidos foram 30,6 °C (2080) para temperatura máxima e 21,8 °C (2083) para temperatura mínima, Figura 16. A radiação solar nos anos futuros apresentou um acréscimo em anos iniciais 22 MJ.m<sup>-2</sup> em relação ao clima presente, ocorrendo em seguida um decréscimo da radiação, em que o menor valor foi 550 MJ.m<sup>-2</sup> no ano 2060 e o maior incremento será 572 MJ.m<sup>-2</sup>. A precipitação pluvial teve aumento de 72 mm quando comparado com cenário atual, com extremos de 941 mm (2045) e 1.148 mm (2080).

**Figura 16.** Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 4.5.



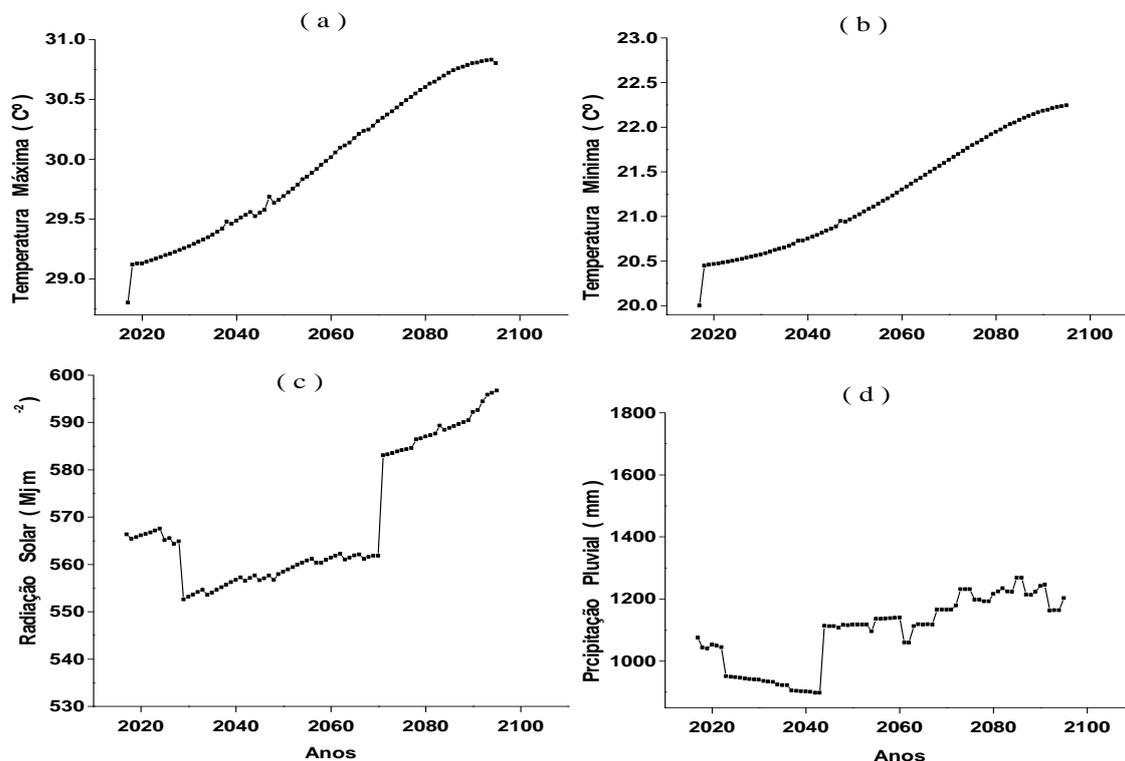
Conforme se pode observa na Figura 17 a RCP 6.0 apresentou aumentos para temperatura máxima, mínima e chuva, sendo o cenário futuro com menor valor para radiação solar em relação ao cenário atual. A chuva apresentou o maior acumulo entre os quatros cenários com valor de 1.641mm (2091) e um aumento de 565 mm em relação ao cenário atual. A radiação solar para este cenário obteve uma aumento de 16  $\text{Mj.m}^{-2}$ , demonstrando um decréscimo, com leves picos de aumento até alcançar máximos incrementos para anos futuros com extremos de 551  $\text{Mj.m}^{-2}$  (2048) e 567 ( $\text{Mj.m}^{-2}$ ) (2094). A temperatura máxima e mínima obteve aumento de 0.8 e 1 C°, respectivamente, em relação ao cenário presente, seguindo a tendência das RCPs 2.6 e 4.5, onde os aumentos mais significativos foram 29,6 C° (2056) para temperatura máxima e 21,0 C° (2063) para mínima.

**Figura 17.** Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 6.0.



A Figura 18 esta relacionada ao cenário futuro RCP 8.5 em que os maiores aumentos entre as quatro RCPs para temperatura máxima e mínima em relação ao cenário presente, com valores de 30,8 °C (2093) e 22,2 °C (2095) e aumentos de 2,0 e 2,2 °C, respectivamente. A chuva em relação ao cenário atual apresentou um aumento de 170 mm de lâmina precipitada, com extremos de 846 mm (2043) e 1.245 mm (2091). A radiação solar para RCP 8.5 mostrou um comportamento com oscilações, em que o menor pico foi 552  $\text{Mj.m}^{-2}$  para o ano de 2029 e o maior de 596  $\text{Mj.m}^{-2}$  para o ano 2094, apresentando um aumento de 44  $\text{Mj.m}^{-2}$  quando comparado ao cenário atual.

**Figura 18.** Médias anuais para temperatura máxima (a), mínima (b), radiação solar (c) e precipitação pluvial (d) para RCP 8.5.

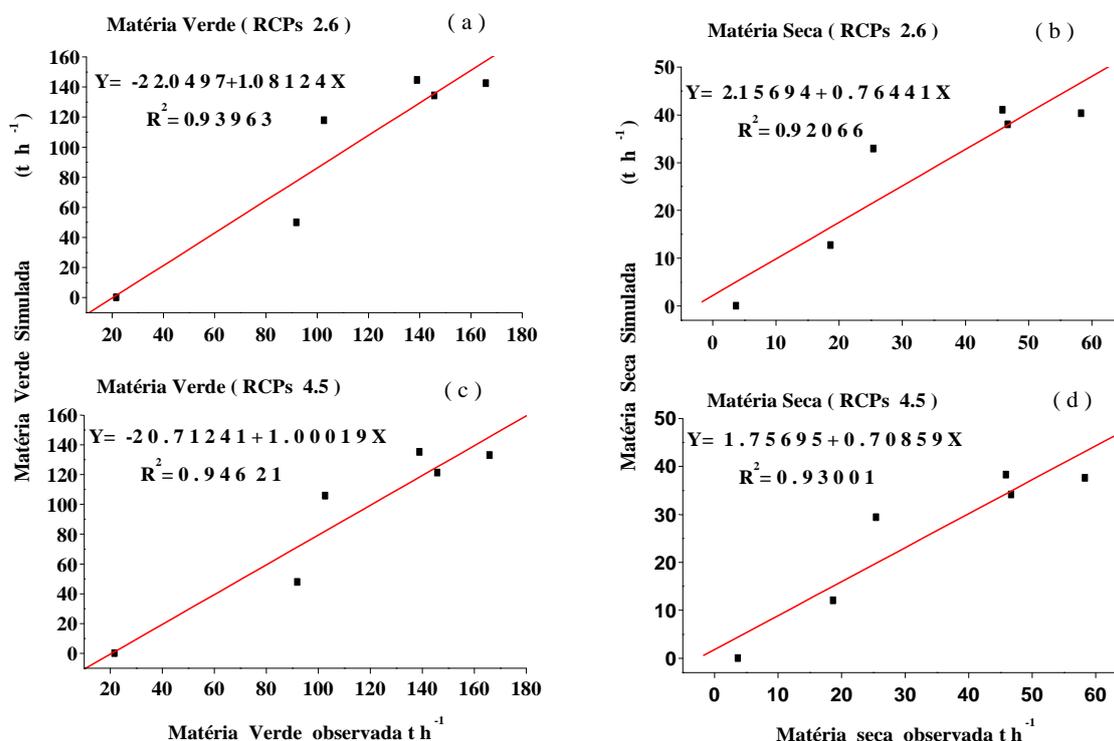


Os aumentos relacionados a temperatura máxima e mínima, radiação solar e precipitação pluvial para as quatro RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) e explicado devido a ocorrência de oscilações de temperaturas na superfície que excede 1,5 °C pra todas as quatro RCPs até o final do século XXI, tendo como única exceção a RCP 2.6 por ser o cenário mais positivo e de menor emissão radiativo (1C°), para as RCPs 4.5 e 6.0 é provável que não ocorra aumentos que supere a casa dos 2 C°, com valores de 1.8 e 2,2 °C, respectivamente, tendo como maior aumento de emissão radiativo a RCP 8.5 com valor de 3,7 C°, isso devido ao mesmo ser o cenário mais pessimista entre as RCPs. Esse possível aquecimento e direcionado para se prolongar além de 2100 para todos os cenários, tendo como única exceção a RCP 2.6, pois esse complexo determina rotas para emissões futuras (IPCC, 2014). PINTO (2015), no trabalho: projeções de risco da produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo com base em simulações de multimodelos e cenários futuros para cultivar de cana-de-açúcar RB867515, observou incrementos na precipitação pluvial anual de 45 mm, na temperatura máxima e mínima anual de 3 °C, para os cenários gerados no DSSAT/ CANEGRO e APSIM-SUGAR, com a serie climática fornecida pelos modelos de circulação global CSIRO-MK 3-6-0 e HadGEM2-ES.

### 3.3. Correlação da predição realizada no DSSAT/CANEGRO utilizando dados meteorológicos observados com dados meteorológico do MIROC5.

A necessidade de utilizar os dados meteorológicos do modelo MIROC-05 e pela maior precisão na análise e representatividade no modelo DSSAT/ CANEGRO, tornando as simulações para os cenários presente e futuro mais precisas. Na Figura 19 observa-se a simulação da matéria fresca e seca para RCPs 2.6 e 4.5, fazendo uso de dados meteorológicos observados em campo com dados simulados pelo modelo climático global MIROC-05. Nota-se uma alta correlação para a matéria fresca e seca com dados adquiridos da estação meteorológica, com a matéria fresca e seca estimada usando dados adquiridos pelo modelo MIROC-05. As correlações para matéria fresca e seca da RCPs 2.6 apresentaram  $R^2= 0,93$  e  $R^2= 0,92$  respectivamente, já a RCPs 4.5 na matéria fresca apresentou  $R^2= 0,94$  e seca de  $R^2= 0,93$  apresentando uma ótima correlação entre os dados observados e simulados.

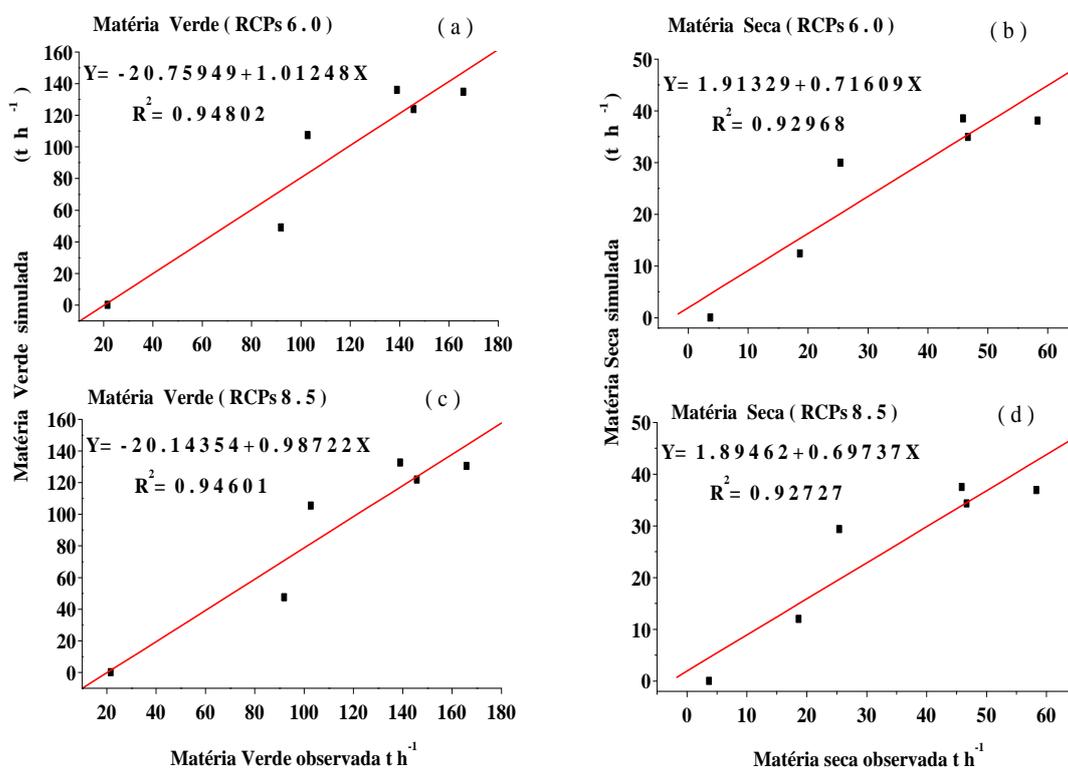
**Figura 19.** Correlação entre o massa verde (a,c) e seca (b,d) para os dados meteorológicos observados em campo e os simulada com dados meteorológicos do modelo MIROC 5, para as RCPs 2.6 e 4.5.



Para a análise feita nas RCPs 6.0 e 8.5 foi utilizado os dados meteorológicos observados na estação meteorológica e os adquiridos pelo modelo MIROC-05, (Figura 20). Observa-se na RCP 6.0 que a matéria fresca e seca obteve valores para correlação

de  $R^2=0,94$  e  $R^2=0,92$ , respectivamente. A RCP 8.5 obteve valores de  $R^2= 0,94$  para matéria fresca e  $R^2= 0,92$  para seca, apresentando alta correlação para a matéria fresca e matéria seca simulada com dados meteorológicos observados em campo e os adquiridos do modelo MIROC5 para RCPs 6.0 e 8.5. Para as quatro RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) tendo como base a correlação para matéria fresca e seca em cenário presente, pode-se gerar estimativas da produtividade para safras em cenários climáticos futuros.

**Figura 20.** Correlação entre a massa fresca (a,c) e seca (b,d) para as dados meteorológicos observados em campo e os simulada com dados meteorológicos do modelo MIROC-05, para as RCPs 6.0 e 8.5.



### **3.4. Impactos das mudanças climáticas na produtividade da cana-energia tendo com base os cenários climáticos RCPs**

As sequências climáticas para as projeções futuras foram adquiridas do modelo global MIROC-05, para as RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, tanto para cenário atual como para mudanças climáticas futuras, os valores da matéria fresca e seca observados em campo são 138 e 45 ( $t h^{-1}$ ), respectivamente. As previsões para variabilidade da produtividade da matéria verde e seca do genótipo de cana-energia VERTIX 2 pode ser observadas na figuras 21, 22, 23 e 24. As simulações realizadas para as variáveis de matéria verde e seca do cenário atual (2016-2017) obtiveram valores de 144 e 41 ( $t h^{-1}$ ), respectivamente, se obtendo um incremento de 3,6% na matéria verde e um decréscimo de 10,4% no valor da matéria seca, quando equiparado com os dados observado em campo, (Figura 21). Para projeções futuros o cenário RCPs 2.6, nota-se uma crescente para previsões da matéria fresca e seca, os menores valores foram 141 e 40 ( $t h^{-1}$ ) para produtividade da matéria verde e seca respectivamente, sendo prevista para safra (2018-2019), os maiores valores foram 161 e 45 ( $t h^{-1}$ ), estando previsto para safra (2082-2083). Os maiores acréscimos na produtividade para matéria fresca e seca para cenário futuro em relação ao cenário atual e explicado por aumentos na temperatura máxima e mínima, altos valores precipitados de chuvas e um acréscimo de  $0.4 \text{ Mj m}^{-2}$  para a radiação solar. O menor valor para matéria fresca e seca e explicada por menores números de laminas precipitada, mesmo obtendo temperaturas e radiação solar ideais.

A simulação da produtividade da matéria fresca e seca para RCP 4.5 na safra atual (2016-2017) pode ser observada na figura 22. Onde nota-se um incremento de 9,4% para matéria verde e decréscimo de 6% para matéria seca em relação a os dados observados em campo, ao longo das projeções futuras (2018-2094) foi notada oscilações nas previsões da produtividade da matéria fresca e seca, apresentado crescimento ate a safra de (2059-2060) em relação ao cenário atual. O maior valor previsto para matéria fresca foi  $152 t h^{-1}$  e seca de  $43 t h^{-1}$  para a safra de (2053-2054), os menores valores de rendimento para a matéria fresca e seca foram  $118$  e  $33 t h^{-1}$ , respectivamente, na safra de (2072-2073). Os menores valores para produtividade ocorreu devido a diminuição da radiação solar para os anos (2061-2062), os maiores valores de rendimento para matéria fresca e seca e explicada por altas temperaturas, radiação solar ideal e boa distribuição das chuvas para as RCPs 4.5.

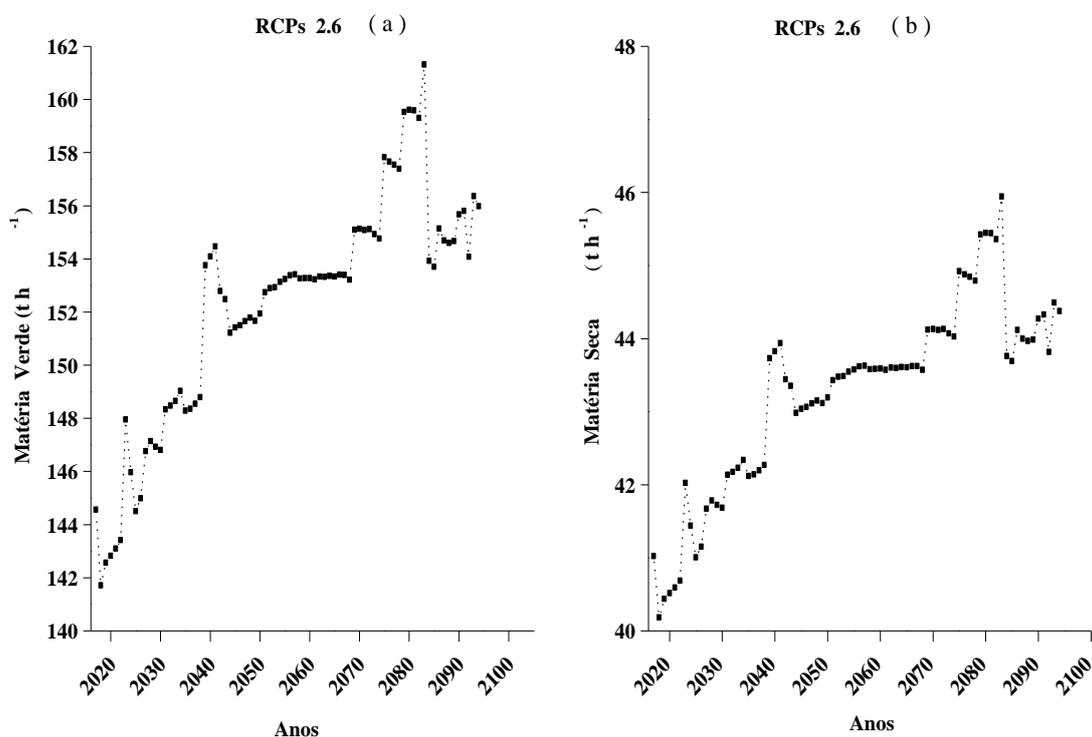
As previsões para RCP 6.0 com relação a produtividade da matéria fresca e seca na safra atual apresentaram valores de 135 e 38 ( $t h^{-1}$ ), respectivamente, representando

um decréscimo de 3,9% na matéria verde e 17% na matéria seca em relação a os dados observados em campo, (Figura 23). Os maiores valores de matéria fresca e seca observada nas projeções futuras foram para a safra de (2052 e 2053), 166 e 47 ( $t h^{-1}$ ). Os menores valores para produtividade da matéria fresca ( $110 t h^{-1}$ ) e seca ( $31 t h^{-1}$ ) na RCP 6.0 foi na safra de (2090 e 2091). As predições para os maiores acréscimos de matéria verde e seca e explicada pelos maiores projeções da temperatura mínima, máxima e precipitação pluvial. Os menores valores de produtividade relacionado a matéria verde e seca e explicada por uma baixa projeção da radiação solar media acumulada durante o período (2060-2080).

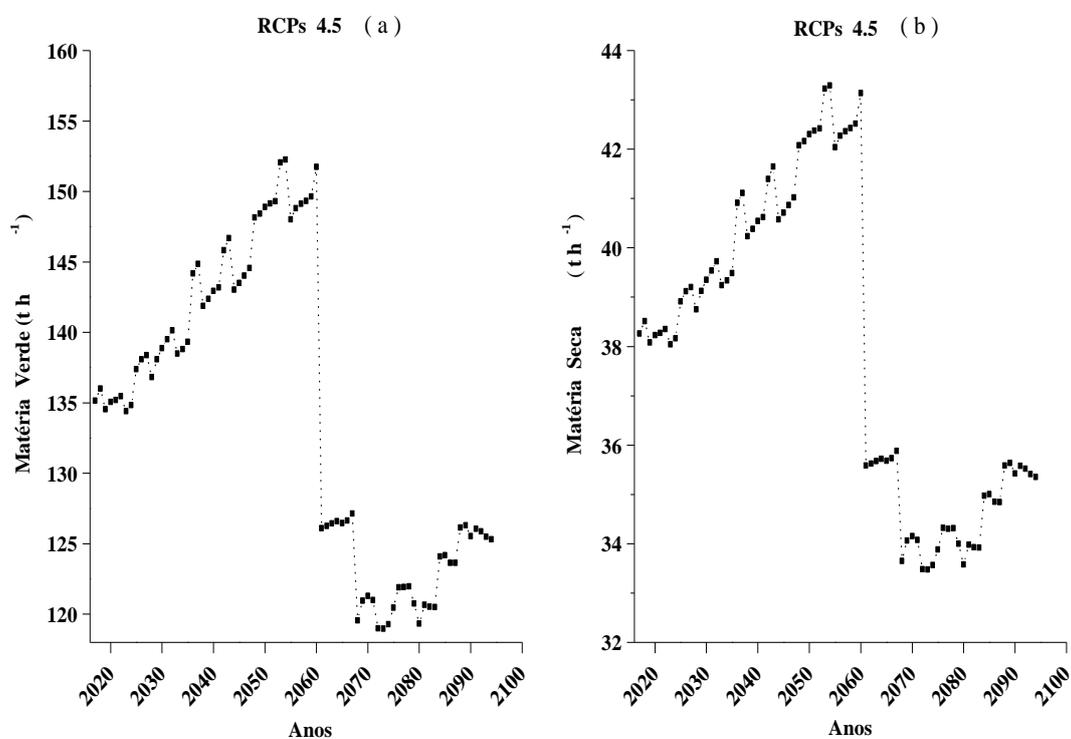
A produtividade para matéria verde e seca do cenário atual e projeções futuras para RCP 8.5 pode ser observada na Figura 24. Neste cenário observam-se variações no comportamento da produtividade para matéria fresca e seca, a simulação para o cenário atual (2016 e 2017) apresentou valores de matéria fresca e seca de 132 e 37 ( $t h^{-1}$ ), respectivamente, obtendo um decréscimo de 4,9% para matéria verde e 19% na matéria seca. Os maiores valores para produtividade de matéria verde ( $177 t h^{-1}$ ) e seca ( $50 t h^{-1}$ ) esta prevista para safra (2091 e 2092). As projeções para os menores valores esta prevista para safra de (2061 e 2062), 110 e 30 ( $t h^{-1}$ ), matéria fresca e seca, respectivamente. O grande acréscimo ocorrido na produtividade para matéria fresca e seca para o ciclo de (2070 a 2092) e explicado por altos incrementos de radiação solar media acumulada ao longo do período, com um acumulo de  $422,4 Mj.m^{-2}$ , em consorcio com temperatura máxima e mínima elevada e suporte hídrico adequado.

Observa-se para os quatro cenários (RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) que o aumento ou diminuição das projeções futuras da radiação solar media teve influencia direta para safras futuras. Sendo essencial o bom equilíbrio entre as temperaturas máximas, mínimas, radiação solar e suporte hídrico (chuvas) para melhor crescimento e produtividade relacionada a biomassa fresca e seca para cultura da cana-energia. SILVA (2012), avaliando projeções da variabilidade da produtividade e rendimento do açúcar para cultivar RB92579 no modelo DSSAT/CANEGRO, observando incrementos na produtividade de matéria seca, tendo como variável meteorológica determinante pra esse acréscimo a radiação solar mensal acumulada. Knox et., al (2010), em seu trabalho conduzido na África do SUL obteve acréscimos semelhantes para projeções da produtividade da cana-de-açúcar para cenários climáticos futuros.

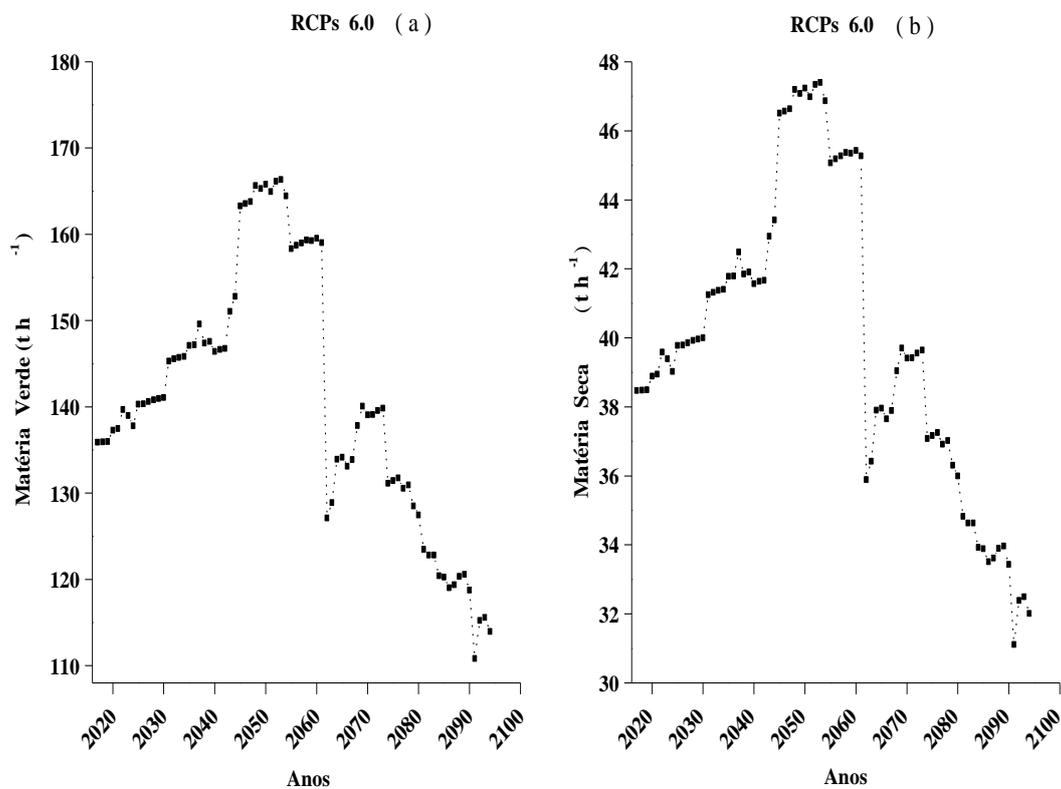
**Figura 21.** Predições das matérias fresca (a) e seca (b) da cana-energia VERTIX 2 em cenário presente e futuro ( RCPs 2.6), na região de Teotônio Vilela-AL.



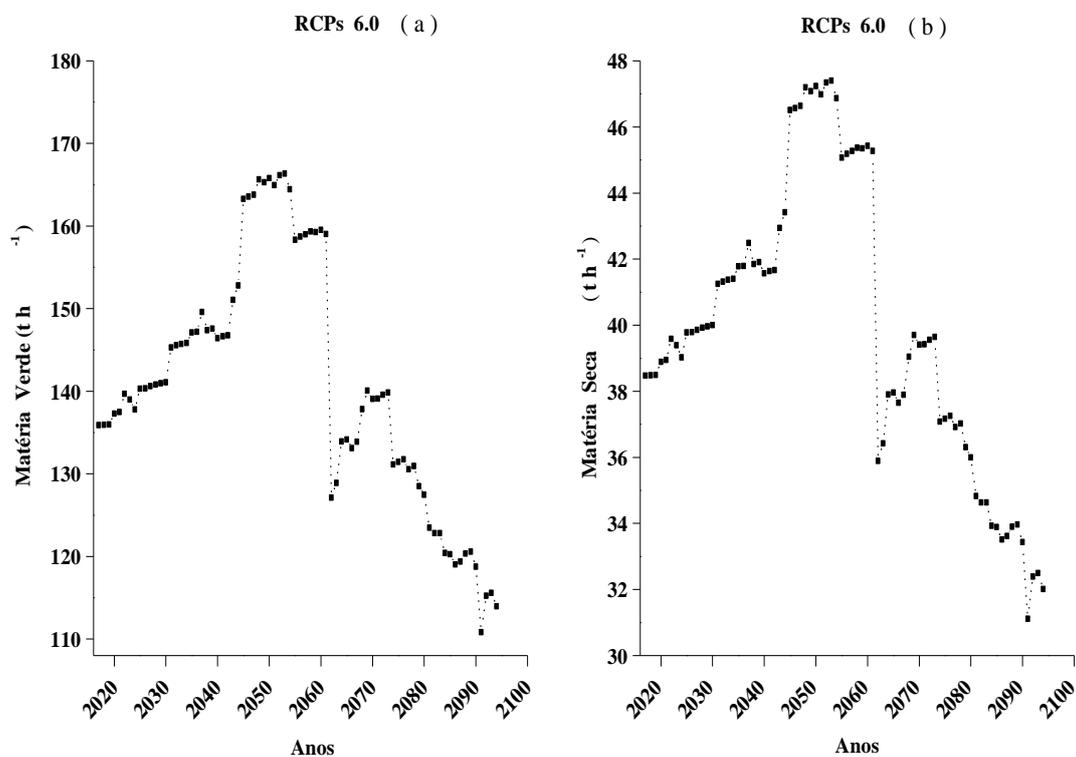
**Figura 22.** Predições da matéria fresca (a) e seca (b) da cana-energia VERTIX 2 em cenário presente e futuro (RCPs 4.5), na região de Teotônio Vilela-AL.



**Figura 23.** Predições da matéria fresca (a) e seca (b) da cana-energia VERTIX 2 em cenário presente e futuro (RCPs 6.0), na região de Teotônio Vilela-AL.



**Figura 24.** Predições da matéria fresca (a) e seca (b) da cana-energia VERTIX 2 em cenário presente e futuro (RCPs 8.5), na região de Teotônio Vilela-AL.



#### **4. CONCLUSÃO**

A utilização do modelo DSSAT/CANEGRO ajustado para a cultivar de cana-energia VERTIX 2, foi aplicado a cenários climáticos futuros (RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5), em que os desvios de dados climáticos apresentaram de modo geral aumentos para temperatura máxima, mínima, precipitação pluvial e radiação solar, com os maiores picos de chuvas detectadas pelas RCPs 2.6 e 6.0 e os maiores acréscimos na temperatura máxima e mínima foram detectadas RCPs 4.5 e 8.5. As análises das medias mensais dos cenários climáticos presente e futuro para temperatura máxima, mínima, radiação solar e precipitação pluvial apresentam aumento para as quatro RCPs em relação ao cenário presente, destacando-se a RCP 8.5 com maior pico de aumento. As produtividades de matéria verde e seca apresentaram algumas oscilações para os quatro cenários, mas de forma geral todos tiveram aumentos em relação ao cenário presente, obtendo maiores incrementos as RCPs 2.6 e 8.5. Observando-se alta correlação na produtividade para matéria fresca e seca com os dados meteorológicos adquiridos da estação e os do modelo MIROC-05.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, F. A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeadura em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. 2011. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Produção vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011

ALLEN, R. G.; *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.1998. 300p.(FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

BAIÃO, A., 2004. **As culturas energéticas no âmbito do PAC**, Revista Espaço Rural, CONFRAGI, 40, 2004.

Barros, A.C, J.L Souza, R.D Coelho, A.H.C Barros, A.C.S Almeida and J.M.Silva.2016. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. 10: 631 – 639.

BEADLE, C.L. Growth analysis. In: HALL, D.O.; SCURLOCK, J.M.O.; BOLHAR-NORDENKAMPF, H.R.; LEEGOOD, C.; LONG, S.P. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. Chapman & Hall, London, 1993. p.36-45.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 41p.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. **Crop and Pasture Science**, v. 56, n. 11, p. 1159-1168, 2005.

BURKETT, V.R. *et al.* (2014) Point of departure. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 169-194

CARVALHO A.L, J.L Souza, A.C.S Almeida, G.B Lyra, G.B Lyra, I. Teodoro, R.A Ferreira, I.D Magalhães, L.R Santos. 2017. **Sugarcane productivity simulation under different planting times by 1 DSSAT/CANEGRO model in Alagoas, Brazil**. (Trabalho aceito: EJFA-2017-07-1622 was accepted for publication in the Emirates Journal of Food and Agriculture).

CARVALHO, A.L., MENEZES, R.S.C., NÓBREGA, R.S., PINTO, A.S., OMETTO, J.P.H.B., RANDOW, C.V., GIAROLLA, A., 2015. **Impact of climate changes on potential sugar cane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil**. Renewable Energy 78, 26–34.

COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p. 75-82, 2001.

CORRÊA, S. T. R. *et al.* Aplicações e limitações da modelagem em agricultura: Revisão. **Revista de Agricultura, Piracicaba**, v. 86, n. 1, p. 1-13, 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 172p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 179p. FAO. Irrigation and Drainage, Paper, 24.

DEER, N. **Text book on the agriculture of the sugar cane the manufacture of cane sugar, and the analysis op sugar house products.** Londres: Norman Rodger, 1911.

DUVAL, B. D.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; DAVIS, S. S.; KEOGH, C.; LONG, S. P.; PARTON, W. J.; DELUCIA E. H. Predicting Greenhouse Gas Emissions and Soil Carbon from Changing Pasture to an Energy Crop. **Plos One**, v. 8, n. 8, p. 1-12, 2013.  
e Simulação de Doenças de Plantas. Universidade de Passo Fundo, 2007.

FARIA, R.T.D. & BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. Brazilian Archives of Biology and Technology, scielo, 2003, 46, 489-498.

FRANCE, C.; THORNLEY, J. H. M. **Matematic models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences.** London: Butterworth, 1984.

FREITAS JR., G. Fundadores da Cana Vialis criam cana só para biomassa. **Valor Econômico**, São Paulo, 8 agosto 2011, Agronegócios, p. B11.

Gijsman, A.J., Hoogenboom, G., Parton, W.J., Kerridge, P.C., 2002. Modifying DSSAT for low-input agricultural systems, using a soil organic matter\* residue module from CENTURY. **Agronomy Journal** 94 (3), 462-474.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils to achieve greater water use efficiency. **Agronomy journal**, v. 93, n. 2, p. 271-280, 2001.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; GEORGIEV, G. A.; FARIA, R. T.; FRIZZONE, J. A. **Center pivot irrigation management optimization of dry beans in humid areas.** Transactions of the ASAE, St Joseph, v. 43, n. 6, p. 1507-1516, Nov./Dec. 2000.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. **Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar.** Revista da STAB, Piracicaba, n.17, p.32-34. 1999.

HUNT, R. **Plant growth analysis.** London: Arnold, 1978. 67 p.

Hunt, L.A., White, J.W., Hoogenboom, G., 2001. Agronomic data: advances in documentation and protocols for exchange and use. **Agricultural Systems** 70, 477\_ 492.

ICASA. ICASA - International Consortium for Agricultural Systems Applications. 2007. Disponível em: [http:// icasa.net](http://icasa.net).

ICASA. ICASA - International Consortium for Agricultural Systems Applications. 2010. Disponível em: <http://icasa.net>

(IPCC): **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel**

**on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. 2013.

(IPCC): **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. 2014.

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

INMANBAMBER, N.G.; KIKER, G. **DSSAT/CANEGRO 3.10**: DSSAT version 3.1. Honolulu: University of Hawaii, 1997. **Irrigation and Drainage Paper**, 33

INMAN-BAMBER, N.G; MUCHOW, R.C; ROBERTON, M.J. **Dry matter partitioning of Sugarcane in Australia and south Africa**. Field Crops Research, London, v.76, p.71-84, 2002.

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

JOHNSON, J. M. F.; COLEMAN, M.D.; GESH, R.; JARADAT, A.; MITCHELL, R.; REICOSKY, D.; WILHELM, W.W. **Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm**. The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology v.1(1), p.1-28, 2007.

JONES, J. W.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Texas A&M Univ. Press, College Station. 1986.

JONES, J. W.; MISHOE, W. K.; BOOTE, L. Introduction to simulation and modeling. In: The Seminar/Workshop on Computer Crop Simulation and Data Base management for Agrotechnology Transfer, coord. **Food & Fertilizer Thecnology Center, national Chung Hsing University and IBSNAT/USAID. Taaiwan**, 21 p. (FFTC. Technical Bulletin, 100). 1987.

Jones, C.A., Dyke, P.T., Williams, J.R., Kiniry, J.R., Benson, V.W., Griggs, R.H., 1991. **EPIC: an operational model for evaluation of agricultural sustainability**. *Agricultural Systems* 37, 341\_ 350.

Jones, J.W., 1993. Decision support systems for agricultural development. In: Penning de Vries, F., Teng, P., Metselaar, K. (Eds.), *Systems Approaches for Agricultural Development*. Kluwer Academic Press, Boston, pp. 459\_ 471.

Jones, J.W., Keating, B.A., Porter, C.H., 2001. **Approaches to modular model development**. *Agricultural Systems* 70, 421-443.

Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**. 18: 235–265. 494.

Jones, M. R., A. Singels and A. C. Ruane. 2015. **Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa**. *Agricultural Systems*. 139: 260-270.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v.61, p.253-271, 1999.

KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; GASSMAN, P. W.; DEBAEKE, P.A **general, process-oriented model for two competing plant species**. *Trans. ASAE* 35, p. 801–810, 1992.

KNOX, J.W.; RODRÍGUES DÍAS, J.A.; NIXON, D.J.; MKHWAZANI, M.A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems** 103 p. 63-72. 2010.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando Excel**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

LIU, D.L.; KINGSTON, G. QCANE: a simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constrains**. St. Lucia: University of Queensland, 1995. p.25-29.

LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; MOURA FILHO, G. **Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio**. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.7, n.3, p.211-230, 2008.

MAGALHÃES, I. D. **Cultivo do feijão comum irrigado em Alagoas e Modelagem com o Aquacrop/FAO**. 2017. 106p. Tese (Doutorado em Agronomia - Área de concentração: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2017.

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

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/ CANEGRO for sugar cane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, v.103, p.100.110, 2011.

MARTINÉ, J.F. **Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées**. Applications du modèle. 2003. 130p. Tese (Doutorado) -Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2013.

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J. A.; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. Bioenergia da Cana. In: **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool**. (Eds. Santos, F.; Borém, A. e Caldas, C.) 2 ed. Viçosa: UFV, v.1. p 487-517, 2012.

MATSUOKA, S.; KENNEDY, A. J.; SANTOS, E. G. D.; TOMAZELA, A. L.; RUBIO, L. C. S. Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristics, and Prospects. **Advances in Botany**, v. 2014, p. 1-13, 2014.

MARIANO, J. Cana-energia, a revolução sucroenergética está começando. NovaCana.com, 20 outubro 2015.

NASSIF, D. S. P. , **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar** . Piracicaba, 2010. 92p. : II. Dissertação (mestrado)- Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, ESALQ.

Nassif, D. S. P., F. R. Marin, W. J. Pallone Filho, R. S. Resende and G. Q. Pellegrino. 2012. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. Pesquisa agropecuária brasileira. 47: 311-318.

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L.; Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop, **Agricultural Water Management** 146 280–296, 2014.

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

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. IAC, 33p., (boletim técnico, 114), 1987.

OLIVEIRA, L.A **Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários futuros: aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE**. Piracicaba, 2015.93p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ.

OKUNO, F. M. **Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia**. 2016. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”,

PAIVA, L. A cana é 2G. **Cana Online**, Ribeirão Preto, setembro 2014, n. 14, p. 41-48,. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/edicao/edicao14-portal/canaonlinesetembro2014.html>>. Acesso em: 10 março 2018.

PAVAN, W. T -tecnicas de Engenharia de Software Aplicadas \_a Modelagem Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/ CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, v.103, p.100.110, 2011

PENNING de VRIES, F.W.T. System analysis and models of crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Pudoc, Wageningen: Elsevier, 1982. p.9-22

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. IAC, 33p., (boletim técnico, 114), 1987.

PINTO, H.M.S **Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo baseadas em simulações de multimodelos e cenários futuros**. Piracicaba-SP, 2015. 126p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ.

Porter, C., Jones, J.W., Braga, R., 2000. An approach for modular crop model development. International Consortium for Agricultural Systems Applications, 2440 Campus Rd., 527 Honolulu, HI 96822, pp. 13. Available from <http://www.icasanet.org/modular/index.html>.

REIS, A. C. R.; DERECZYNSKI, C. ; CHOU, S. C. . **Ciclones Extratropicais no Atlântico Sul: Clima Presente e Projeções Futuras**. 2016. (Apresentação de Trabalho/Seminário.

Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8, 1204\_ 1213.

Ritchie, J. T. 1998. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G.Y.; Hoogenboom, G. and P. K. Thornton (Ed.). *Understanding options for agricultural production*. Dordrecht: Kluwer, 1998, 41-53.

RODRIGUES, D.C **Integração do modelo ETa usando as condições do MIROC-05 para RCP 4.5, para o período de 2011-2040 anexando mídia contendo copia das integrações e arquivos separados em precipitação diária , temperaturas, variáveis bidimensionais e variáveis tridimensionais**. Cachoeira Paulista-SP, 2014.26p. Relatório (relatório técnico). Instituto Nacional de estudo e Pesquisas educacionais Anísio Teixeira, (INEP).

RUBIN, E. M. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature*, v. 454, n. 14, p. 841-845, 2008.  
SILVA, R. F. **Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas**. Viçosa, 2012. 56p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, UFV.

SILVA, R. F. **Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas**. Viçosa, 2012. 56p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, UFV.

SINCLAIR, T. R.; TANNER, C. B.; BENNETT, J. M. Water-use efficiency in crop production. *BioScience*, v. 34, n. 1, p. 36-40, 1984.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agronomy Journal*, Madison, v.88,p. 698–704, 1996.

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., M. Jones and M. Van der Berg. 2008. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO: sugarcane plant module: scientific documentation**. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling: South African Sugarcane Research Institute, 34.

STEVENSON, Willian J. Estatística Aplicada à Administração. 1. ed. São Paulo: Editora Harbra, 2001.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal Agronomy**, v. 18, p. 289-307, 2003.

THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. Plant and crop modelling. New Jersey: **Blackburn Press**. 669p., 2000.

ULISSES, E.A. **Respostas morfofisiológicas de genótipos de cana-de-açúcar e cana-energia sob diferentes regimes hídricos na fase de crescimento**. Rio Largo, 2016. 91p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal de Alagoas, UFAL.

VERHAGEN, A.; CONIJN, S. & SCHAPENDONK, A. (ed.) Quickscan of simulations models Plant Research International, 2001.

VILLEGAS, F.D.; DAZA, O.H.; JONES, J.W.; ROYCE, F.S. **CASUPRO: an industry-driven sugarcane model**. Tampa: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005. 22p. (ASAE Annual International Meeting).

VIOLANTE, M. H. S. R. **Potencial de produção de cana-de-açúcar em áreas agrícolas marginais no Brasil**. 2012. 112f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia). Curso de Pós graduação em Economia, Escola de Economia de São Paulo, São Paulo.

Watanabe, M. *et al.* Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *J. Climate*, 23, 6312– 6335; 2010.

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd. ed. Amsterdan: Academic Press, 2006. 627p.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. **EPIC - Erosion/ productivity impact calculator. 1. The EPIC model**. USDA-ARS, Temple, TX, 1989.

Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationships between erosion and soil productivity. Transactions of the ASAE 27, 129\_ 144.

WIT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H (ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, p. 3-8, 1982.

ZADOKS, J.C.; RABBINGE, R. Modelling to a purpose. In: C.A. Gilligan, Editor, **Advances in Plant Pathology**, Vol. 3, **Mathematical Modelling of Crop Disease**, Academic Press, London, pp. 231–244, 1985.

ZHANG, Y. et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 107-122, 2004.