UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

MODELOS AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAIS NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE MATÉRIA SECA DA CANA-DE-AÇÚCAR

JEFFERSON RODRIGO BATISTA DE MELLO

CAMPINAS
2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

MODELOS AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAIS NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE MATÉRIA SECA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

JEFFERSON RODRIGO BATISTA DE MELLO
Orientador: Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli
Co-Orientador: Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO JEFFERSON RODRIGO BATISTA DE MELLO E ORIENTADA PELO PROF. DR. RUBENS AUGUSTO CAMARGO LAMPARELLI

_____

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M489m

Mello, Jefferson Rodrigo Batista de, 1982-
Modelos agrometeorológico-espectrais na estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar / Jefferson Rodrigo Batista de Mello. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Rubens Augusto Camargo Lamparelli.
Coorientador: Jansle Vieira Rocha.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sensoriamento remoto. 2. Agricultura - Sensoriamento remoto. 3. Cana-de-açúcar. 4. Produtividade agrícola. I. Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. II. Rocha, Jansle Vieira,1961-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Agrometeorological-espectral models in estimating dry matter yield of sugar cane
Palavras-chave em inglês:
Remote sensing
Agriculture - Remote sensing
Sugar cane
Agricultural productivity
Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola
Banca examinadora:
Rubens Augusto Camargo Lamparelli [Orientador]
Glauco de Souza Rolim
Júlio César Dalla Mora Esquerdo
Data de defesa: 28-02-2014
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Jefferson Rodrigo Batista de Mello**, aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de fevereiro de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp

Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim – Membro Titular
FCAV/Unesp

Dr. Júlio César Dalla Mora Esquerdo – Membro Titular
Embrapa/CNPTIA

Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp

RESUMO

Cultivada no Brasil desde as primeiras décadas após a chegada dos Portugueses, a cana-de-açúcar vem desde então exercendo notável influência nos ciclos econômicos e no desenvolvimento do país, ganhando grande destaque com a percepção do etanol como opção de energia limpa e renovável e ainda em função da crescente demanda mundial por este tipo de energia. Estima-se que na Safra 2012/2013 a área cultivada no Brasil totalizou 8,49 milhões de hectares, os quais geraram uma moagem de 588,9 milhões de toneladas de cana-de-açúcar destinadas principalmente à produção de açúcar, etanol e energia elétrica.

Diante da magnitude dos números que envolvem a produção canavieira no Brasil, surge a importância do planejamento da produção da cultura, alicerçado nas estimativas de safra, imprescindíveis para o gerenciamento adequado da lavoura e para as negociações antecipadas do produto, inclusive da matéria seca que será a matéria-prima para a geração e comercialização da energia elétrica cogerada e num futuro próximo para a produção do etanol celulósico ou etanol de segunda geração.

Diante desta problemática, este trabalho surge com o objetivo específico de comprovar a hipótese de que o modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972) sobre a eficiência dos sistemas vegetais em aproveitar a energia radiante para a produção e acúmulo de matéria seca pode ser utilizado com eficácia, em nível aceitável, para a estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar.

Este estudo foi realizado em duas propriedades agrícolas localizadas na região de Matão (SP), cultivadas com o cultivar RB855156, em seu 3º ciclo de colheita mecanizada, na Safra 2011/2012, a qual teve sua produtividade de matéria seca avaliada em campo, pela coleta e análise de amostras, em quatro distintos períodos durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, representando cada uma de suas fases de desenvolvimento.

Os modelos agrometeorológico-espectrais foram implementados para as áreas de estudo variando a combinação (em pares) de quatro variáveis espectrais (valores de fAPAR derivados dos índices de vegetação obtidos pelas imagens dos sensores MODIS – a: NDVI do Satélite Aqua, b: NDVI do Satélite Terra, c: NDVI médio entre os Satélites Aqua e Terra e, d: NDVI máximo entre os Satélites Aqua e Terra) e quatro variáveis meteorológicas (dados obtidos por meio de estação meteorológica de superfície – a: dados diários, b: dados médios em

agrupamento de 8 dias, c: dados médios decendiais e dados médios obtidos pelo modelo ECMWF/ERA-Interim d: dados decendiais), os quais resultaram em dezesseis diferentes conjuntos de dados modelados que, comparados as observações de campo e submetidos às análises estatísticas (testes de normalidades, de igualdade de médias, coeficientes de correlação de Pearson, de concordância e de desempenho), demonstraram a viabilidade do uso deste modelo para a estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar em nível local, com boa precisão (r = 0,9707) e acurácia (d = 0,9821) quando da utilização das variáveis espectrais do Satélite Aqua, bem como com o valor médio das observações espectrais dos Satélites Aqua e Terra, ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento. Demonstraram ainda que os dados meteorológicos provenientes do ERA Interim, disponibilizados pelo ECMWF, podem ser utilizados nesta modelagem (r = 0,9617 e d = 0,9769), em opção aos dados das estações de superfície sem grandes perdas, como alternativa de obtenção de dados meteorológicos em locais onde haja carência de cobertura por estações meteorológicas de superfície.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; cana-de-açúcar; produtividade; MODIS; ECMWF

ABSTRACT

Cultivated in Brazil since the early decades after the arrival of the Portuguese, sugarcane has since then been exerting considerable influence on economic cycles and the development of the country, gaining great prominence with the perception of ethanol as an option for clean, renewable energy and also because of the growing global demand for this type of energy. It is estimated that in 2012/2013 the planted crop area in Brazil totalized 8.49 million hectares, which generated a crushing of 588.9 million tons of sugarcane mainly for the production of sugar, ethanol and electric energy.

Considering the magnitude of the numbers involving sugarcane production in Brazil, emerge the importance of planning in crop yield, based on crop estimates, essential for proper management of the crop and for early negotiations of the product, including the dry matter that will be the prime matter for the generation and sale of electricity and cogeneration for the production of cellulosic ethanol and second generation ethanol in the near future.

Faced with this problem, this paper comes up with the specific purpose of testing the hypothesis that the agrometeorological-spectral model based on the classical approach of MONTEITH (1972) on the efficiency of plant systems in harnessing the radiant energy for production and dry matter accumulation can be used effectively at an acceptable level for estimating dry matter yield of sugarcane.

This study was conducted on two farms in the region of Matão (SP), cultivated with the RB855156 cultivar in its 3rd cycle of mechanical harvesting in the 2011/2012 Harvest, which had its dry matter productivity evaluated in the field by collection and analysis of samples at four different times during the development cycle of culture, representing each phase of their of development.

The agrometeorological-spectral models were implemented for the study areas using a combination of four spectral variables, in pairs, (FAPAR values of vegetation indices derived from images obtained by the MODIS sensors - to: NDVI of Aqua Satellite, b: NDVI Satellite Earth, c: average NDVI between the Aqua and Terra satellites and d: maximum NDVI between Aqua Satellites and Earth) and four meteorological variables (data obtained from surface weather station - on: daily data, b: Mean data grouping of eight days, c: decennial average data and average data obtained by ECMWF / ERA-Interim d model decennial data), which resulted

in sixteen different sets of modeled data which, compared to field observations and subjected to statistical analysis (normality tests, equality of means test, Pearson correlation coefficients of agreement and performance), demonstrated the feasibility of using this model for estimating dry matter yield of sugarcane locally with good precision (r = 0.9707) and accuracy (d = 0.9821) when using the Aqua satellite spectral variables, as well as the average value of spectral observations of the satellites and the Earth Aqua over the entire development cycle. Also demonstrated that the meteorological data from the ERA Interim, provided by ECMWF, can be used in this model (r = 0.9617 e d = 0.9769) as an option to the data of surface stations without heavy losses, as an alternative of obtaining weather data in places where there is lack of coverage of ground meteorological stations.

Keywords: remote sensing; sugar cane; productivity; MODIS ; ECMWF

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 Justificativa 2
1.2 Objetivos 3
2. REVISÃO DA LITERATURA 4
2.1 A cultura da cana-de-açúcar 4
2.1.1 Biologia da Planta 5
2.1.1.1 Morfologia 5
2.1.1.1.1 Sistema radicular 6
2.1.1.1.2 Colmos 7
2.1.1.1.3 Folhas 8
2.1.1.2 Atividade fotossintética 8
2.1.1.3 Períodos fenológicos 9
2.1.1.3.1 Brotação e emergência 10
2.1.1.3.2 Perfilhamento 10
2.1.1.3.3 Crescimento 11
2.1.1.3.4 Maturação 13
2.1.2 Ecofisiologia 14
2.1.2.1 Fatores climáticos e ambientais 14
2.1.2.1.1 Temperatura do ar 16
2.1.2.1.2 Umidade 16
2.1.2.1.3 Energia 17
2.1.2.2 Fatores edáficos 17
2.1.2.2.1 Nutrientes 18
2.1.3 O cultivar RB855156 18
2.1.3.1 Importância econômica do cultivar 19
2.2 Sensoriamento Remoto Orbital 22
2.2.1 Comportamento espectral dos vegetais 24
2.2.2 Índices de Vegetação 27
2.2.3 As imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) 28

2.3 Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida pela planta (fAPAR) 29
2.3.1 Relação da fAPAR com os índices de vegetação 31
2.3.2 Relação da fAPAR com a produtividade agrícola 33
2.4 Os dados climatológicos do Projeto ERA/ECMWF 33
2.4.1 Correlação dos dados ERA com estações meteorológicas de superfície 35
2.5 Modelos para estimativa de produtividade agrícola 36
2.5.1 Modelos agronômicos 36
2.5.2 Modelos agrometeorológicos-espectrais 37
2.5.3 Radiação solar e Produtividade em Ecossistemas Tropicais 40
3. METODOLOGIA 44
3.1 Áreas de Estudo 44
3.2 Fluxograma do trabalho 52
3.3 Delineamento amostral 52
3.4 Coleta de amostras em campo 54
3.5 Análises laboratoriais para mensuração da matéria-seca da cana-de-açúcar 56
3.6 Aquisição e processamento das imagens do sensor MODIS 57
3.7 Aquisição e processamento dos dados ECMWF/ERA Interim 60
3.8 Aquisição e processamento dos dados da estação meteorológica de superfície 62
3.9 Aplicação do modelo para cálculo do acúmulo de matéria-seca 63
3.10 Cálculo da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS 66
3.10.1 Determinação da área vegetada e análise da variabilidade do canavial 67
3.10.2 Determinação da quantidade de cana-de-açúcar dentro de um pixel MODIS 71
3.10.3 Determinação da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS 74
3.11 Análises Estatísticas 74
3.11.1 Teste de igualdade de médias 75
3.11.2 Coeficiente de correlação linear de Pearson 77
3.11.3 Coeficiente de concordância de Willmott 78
3.11.4 Outros indicadores estatísticos 79
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 81
4.1 Determinação da área vegetada e análise da variabilidade do canavial 81
4.2 Coleta de amostras em campo 82
4.3 Resultados das análises laboratoriais das amostras coletadas em campo 84

4.4 Desempenho do modelo agrometeorológico-espectral avaliado na estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar. 89
5. CONCLUSÕES 102
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 103
REFERÊNCIAS 105
ANEXOS 115

OFEREÇO,

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por todas as graças recebidas...

... E aos meus pais Adenir (*in memorian*) e Roselene, pela dedicação e exemplos de vida.

DEDICO,

À minha esposa Keyla e a minha filha Ana Clara, por todo o apoio e compreensão ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as graças e bênçãos concedidas durante minha vida e especialmente pela oportunidade de vivenciar plenamente mais esta experiência.

A Nossa Senhora Aparecida pela constante intercessão e proteção durante toda esta jornada.

A Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela acolhida e pela oportunidade de cursar esta Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

A Raízen Energia S.A., na pessoa do seu diretor Eng. Agrônomo Cássio Manin Paggiaro, pela confiança, apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Mestre Fernando Aparecido Benvenuti, pela confiança e pelos muitos anos de amizade, ensinamentos e incentivos.

Ao Professor Dr. Rubens Lamparelli pela oportunidade, pela orientação, ensinamentos e paciência ao longo da realização deste estudo.

Ao Professor Dr. Jansle Vieira Rocha, pela co-orientação e contribuições ao longo deste estudo.

Aos amigos Edinaldo Teixeira, Vanderson Canales, Ralph Hammer, Marco Bortoletto, Alex Thiele, Eduardo Ceará e Luciano Vieira, pela compreensão e constante parceria, pelo suporte dado em todos os momentos que precisei estar ausente para concluir este estudo e por suas muitas contribuições.

À Dra. Michelle Picoli, ao Dr. Jerry Johann, e ao Eng. Agrícola Daniel Duft pela ajuda e orientação durante as análises deste estudo.

Ao biólogo Rogério do Nascimento, ao Eng. Agrônomo Filipe Arruda e a equipe do departamento agronômico da Usina Bonfim, por toda a disposição e ajuda durante a execução dos trabalhos de campo fundamentais para a conclusão deste estudo.

A Santiago & Cintra Consultoria, na pessoa de seu presidente Eng. Eduardo Martins de Oliveira, pela contribuição com o fornecimento das imagens do Satélite RapidEye utilizadas neste estudo.

Aos demais amigos do laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp pelas experiências e convivência durante todo o período que estive com vocês durante este período.

Aos meus avós, Lyrio e Amélia, que pela simplicidade sempre me incentivaram a fazer o melhor e a buscar meus sonhos.

A minha mãe, Roselene, exemplo de fortaleza, por toda a dedicação a mim durante minha vida.

A minha esposa Keyla e minha filha Ana Clara, por toda a compreensão e incentivo durante esta jornada.

Enfim, a todos os outros amigos e parceiros, que ao longo de todo esse tempo contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta jornada.

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir,
pois para mim, vencer é nunca desistir”

Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Representação da distribuição do sistema radicular de cana-planta (a) comparada à distribuição em cana-soca (b).....	07
Figura 2.	Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	09
Figura 3.	Ciclo evolutivo da cana planta de 12 e 18 meses na região Sudeste.....	12
Figura 4.	Curva de refletância típica da vegetação.....	25
Figura 5.	Localização das áreas de estudo nº 01 e nº 02.....	44
Figura 6.	Mapa com classificação de solos semi-detalhada para as áreas de estudo nº 01 (A) e nº 02 (B).....	46
Figura 7.	Mapa de relevo das áreas de estudo nº 01 (A) e nº 02 (B).....	47
Figura 8.	Extrato do balanço hídrico para as áreas de estudo na Safra 2011/2012	51
Figura 9.	Balanço hídrico sequencial para as áreas de estudo na Safra 2011/2012.....	51
Figura 10.	Fluxograma simplificado das entradas e processos necessários para a realização deste estudo.....	52
Figura 11.	Localização dos pixels selecionados que recobrem as áreas de estudo nº 01 (A) e nº 02 (B).....	53
Figura 12.	Distribuição dos pontos de coleta de amostra em campo sobre os pixels MODIS e a imagem de NDVI do Satélite Landsat5, cena de 19/11/2010.....	55
Figura 13.	Fluxograma do processo de coleta e análise de amostras em campo.....	56
Figura 14.	Fluxograma do processamento de imagens MODIS utilizando os softewares MRT e TNTMips para geração de imagens de NDVI.....	58
Figura 15.	Fluxograma do processo de extração dos valores de NDVI por pixel até o cálculo dos valores de fAPAR.....	60
Figura 16.	Fluxograma do processo da aquisição dos dados ECMWF/ERA Interim decendial em planilha com os dados em base de médias diárias.....	61
Figura 17.	Fluxograma do processo da aquisição dos dados meteorológicos horários da FCAV – UNESP até o agrupamento destes em dados diários, média de oito dias e médias decendiais.....	62

Figura 18.	Fluxograma do processo necessário para o cálculo do acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar aplicado neste estudo.....	63
Figura 19.	Fluxograma do processo para o cálculo da quantidade de matéria seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS.....	67
Figura 20.	Imagens de NDVI e NDVI classificado em quatro níveis geradas a partir de imagens RapidEye para a área de estudo nº 01 (A – NDVI e B – NDVI classificada) e nº 02 (C – NDVI e D – NDVI classificada)..	70
Figura 21.	Sequência demonstrando o processo de cálculo do percentual de área vegetada e o NDVI médio ponderado para o pixel A1-P06.....	71
Figura 22.	Fluxograma do processo de análise estatística submetida aos resultados das modelagens avaliadas neste estudo.....	75
Figura 23.	Distribuição das coletas de amostras em campo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura na área de estudo nº 01 (A) e nº 02 (B).....	83
Figura 24.	Curva de correlação de Pearson obtida entre o conjunto de dados do modelo 11 comparado ao conjunto de dados observados em campo para o período acumulado de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.....	92
Figura 25.	Gráfico com as curvas de produtividade média acumulada e a produtividade média potencial de matéria seca da cana-de-açúcar para as áreas de estudo nº 01 e nº 02 obtidas pelos modelos 11 e 15.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Legenda e critérios para a classificação da aptidão climática no Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar para o Brasil.....	15
Tabela 2.	Participação (%) das principais variedades no censo varietal de colheita e plantio das unidades produtoras do grupo Raízen durante a Safra 2011/2012.....	20
Tabela 3.	Dados climatológicos – Normal Climatológica para a região de Jaboticabal, SP.....	49
Tabela 4.	Dados climatológicos – Safra 2011/2012 para a região de Jaboticabal, SP.....	49
Tabela 5.	Períodos de coletas de amostras e idade do canavial em cada período..	56
Tabela 6.	Combinação de dados agrometeorológicos e espectrais para as modelagens de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar do estudo.	65
Tabela 7.	Classificação dos coeficientes de correlação adaptada de COSTA (2005).....	77
Tabela 8.	Critérios para interpretação do coeficiente de confiança (c) proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997).....	79
Tabela 9.	Variabilidade do canavial em cada área de estudo, segundo classificação do NDVI.....	81
Tabela 10.	Estatística descritiva das mensurações de quantidade de biomassa (cana integral) nas áreas de estudo, considerando o peso original (1 metro linear de cana-de-açúcar coletado) e o peso ponderado pelo valor médio de NDVI de cada área de estudo.....	85
Tabela 11.	Estatística descritiva das mensurações de quantidade e teor (%) de matéria seca na quantidade de cana-de-açúcar coletadas em campo.....	88
Tabela 12.	Indicadores estatísticos de precisão e acurácia dos conjuntos de dados modelados em comparação com o conjunto de dados observados em campo em cada período de amostragem e no acumulado de todo o ciclo.....	97
Tabela 13.	Valores de produtividade média de matérias seca da cana-de-açúcar (kg MS ha^{-1}) obtidos pelos modelos avaliados durante os quatro períodos de coleta de amostras em campo e sua variação percentual em relação a produtividade média observada em campo em cada período.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS

1. Abreviaturas

AR	Umidade Relativa do Ar
DM	Matéria Seca, do inglês *Dry Matter*
GPS	Sistema de Posicionamento Global, do inglês *Global Positioning System*
GVI	*Greeness Vegetation Index*
kg	Quilograma
kg MS ha^{-1}	Quilos de matéria seca por hectare
Km	Quilometro
LAI	Índice de Área Foliar, do inglês *Leaf Area Index*
LVA3-3	Latossolos Vermelho-Amarelo, com textura média-argilosa (25 a 35% argila) e fertilidade subsuperficial distrófica.
LVA3-4	Latossolos Vermelho-Amarelo, textura média-argilosa (25 a 35% argila) e fertilidade subsuperficial álica.
LVA4-3	Latossolos Vermelho-Amarelo, com textura média-arenosa (15 a 25% de argila) e fertilidade subsuperficial distrófica.
LVA4-4	Latossolos Vermelho-Amarelo, textura média-arenosa (15 a 25% de argila) e fertilidade subsuperficial álica.
m	metro
MGVI	*MERIS Global Vegetation Index*
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, do inglês, *Normalized Difference Vegetation Index.*
pixel	*Picture Element*
PUI	Período de Utilização Industrial
SIG	Sistema de Informações Geográficas
t	tonelada
t Cana ha^{-1}	tonelada de cana por hectare
UR	Umidade Relativa

2. Siglas

APAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa disponível, do inglês *Available Photosynthetically Active Radiation*
ATR	Açúcar Total Recuperável
AVHRR	*Advanced Very High Resolution Radiometer*
BA	Bahia
CASI	*Compact Airbone Spectrographic Image*
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONSECANA	Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
DMP	Produtividade de Matéria Seca, do inglês *Dry Matter Productivity*
ECMWF	*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*
EOS	*Earth Observing System*
ETM+	*Enhanced Thematic Mapper*
EVI	Índice de Vegetação Realçado, do inglês *Enhanced Vegetation Index*
fAPAR	Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela vegetação, do inglês *Fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by a plant canopy*
FCAV-UNESP	Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"
Geottif	*Geographical Tag Image File Format*
GIS	Sistema de Informações Geográficas, do inglês *Geographic Information System*
GVI	*Greeness Vegetation Index*
HDF	*Hierarchical Data Format*
IAA	Instituto de Açúcar e Álcool
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISNA	Índice de satisfação das necessidades de água
IV	Índice de Vegetação
JRC	*Joint Research Centre*
MAE	Erro Absoluto Médio
MARS	*Monitoring Agricultural Resources*

MG	Minas Gerais
MODIS	*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MRT	*MODIS Reproject Tools*
MS	Mato Grosso do Sul
MT	Mato Grosso
NASA	*National Aeronautical and Spatial Administration*
NC	Nível de cinza
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*
NIR	Infravermelho Próximo, do inglês *Near Infrared*
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration*
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa, do inglês *Photosynthetically Ative Radiation*
PMGCA	Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar
PR	Paraná
PVL	Argissolo Vermelho Latossólico
REM	Radiação Eletromagnética
RIDESA	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro
RLS	Regressão Linear Simples
RS	Rio Grande do Sul
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado por Solo, do inglês *Soil Adjusted Vegetation Index*
SC	Santa Catarina
SeaWiFS	*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*
SP	São Paulo
SWIR	Infravermelho médio, do inglês *Short Wave Infrared*
TM	*Thematic Mapper*
TSAVI	Índice de Vegetação Transformado e Ajustado por Solo, do inglês *Transformed - Soil Adjusted Vegetation Index*
TXT	*Text File Format*
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VITO	*Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek*
WGS84	*World Geodetic System, 1984.*

LISTA DE SÍMBOLOS

0,48	Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa disponível para a Planta [0,48]
NDVIpond.pixel	Valor de NDVI médio ponderado pelas classes de NDVI de um determinado pixel
µm	mícron
APAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa Disponível, do inglês *Available Photosynthetically Active Radiation*
AV	Área vegetada do pixel MODIS em metros quadrados
Bj	Brix do caldo
c	Coeficiente de confiança (CAMARGO & SENTELHAS, 1997)
cal m^2 min^{-1}	Caloria por centímetro quadrado por minuto
cm	centímetro
CO_2	Dióxido de Carbono
Cv	Coeficiente de variação
d	Coeficiente de concordância ou desempenho de Willmott
dm^2	Decímetro quadrado
DMP	Produtividade de matéria seca [Kg ha^{-1}]
$\mathcal{E}(T_1)$	Termo de eficiência [Kg DM $JPAR^{-1}$]
ETm	Evapotranspiração máxima
ETr	Evapotranspiração real
fAPAR	Fração da radiação Fotossinteticamente Ativa [%]
Fibra	Porcentagem de matéria insolúvel em água contida na cana [%]
Fpcts	Percentual de fibra (matéria-seca) da cana-de-açúcar obtido pela análise tecnológica laboratorial – Método da Prensa Hidraúlica (CONSECANA-SP).
g kg^{-1}	Gramas por quilograma
H0	Hipótese nula
H1	Hipótese alternativa

ha	hectare
ha^{-1}	por hectare
ºK	Graus Kelvin
Lcesp	Leitura sacarimétrica esperada
m^2	metro
mg	miligrama
MJ m^{-2} d^{-1}	Megajoules por metro quadrado por dia
mm $mês^{-1}$	milimetros por mês
MS	Matéria Seca
Mspixel	Quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar (em kg) para determinado pixel MODIS
N	Fotoperíodo
N	Insolação
N	Número de amostras
NDVIalto	Quantidade de pixels dentro da classe de NDVI alto
NDVIbaixo	Quantidade de pixels dentro da classe NDVI baixo
NDVIexposto	Quantidade de pixels dentro da classe de NDVI Solo Exposto
$NDVI_{max}$	Valor de NDVI máximo para um determinado tipo de vegetação
NDVImédio	Quantidade de pixels dentro da classe NDVI médio
$NDVI_{min}$	Valor de NDVI mínimo para um determinado tipo de vegetação
NDVIpond.	Valor de NDVI médio ponderado pelas classes de NDVI
NDVIpond.area	Valor de NDVI médio ponderado pelas classes de NDVI do conjunto de pixels dentro de uma área de estudo
NIR	Valor de refletância espectral obtido na faixa do espectro eletromagnético do Infravermelho próximo [%]
Nm	nanômetro
Ō	Média aritmética dos valores observados
ºC	Graus Celsius

Oi	Valor observado (kg matéria-seca de cana-de-açúcar medido em campo)
PAPP	Peso da amostra do pixel (em kg) ponderado pelo NDVI médio ponderado
PCA	Produção de cana-de-açúcar total (em kg) dentro do pixel MODIS
pH	Potencial Hidrogênionico
Pi	Valor estimado (kg matéria-seca de cana-de-açúcar estimado pelo modelo)
PM	Produtividade máxima
Pol cana	Porcentagem de massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal, determinada por sacarimetria no caldo [%]
Pureza	Porcentagem de sacarose contida nos sólidos solúveis [%]
Qg	Radiação Solar Global
R	Coeficiente de correlação de Pearson
R_1	Radiação solar de ondas curtas que chega à cultura [J m^2 dia^{-1}]
R^2	Coeficiente de determinação
Red	Valor de refletância espectral obtido na faixa do espectro eletromagnético do vermelho [%]
REmodis	Resolução espacial do pixel MODIS (em metros)
RMSE	Raíz do Erro Médio Quadrático
T_{12}	Temperatura de superfície média do dia [ºC]
T_{24}	Temperatura de superfície média da noite [ºC]
T_{max}	Temperatura de superfície máxima [ºC]
T_{min}	Temperatura de superfície mínima [ºC]
$\bar{X}$NDVIalto	Média aritmética dos valores de NDVI dentro da classe de NDVI baixo
$\bar{X}$NDVIbaixo	Média aritmética dos valores de NDVI dentro da classe de NDVI baixo
$\bar{X}$NDVImédio	Média aritmética dos valores de NDVI dentro da classe de NDVI médio
$\bar{X}$PesoAmostras	Média aritmética do peso de todas as amostras coletadas na área de estudo no período da coleta
σ	Desvio padrão

1. INTRODUÇÃO

Cultivada no Brasil desde as primeiras décadas após a chegada dos Portugueses, a cana-de-açúcar vem desde então exercendo notável influência nos ciclos econômicos e no desenvolvimento do país, ganhando grande destaque econômico com a percepção do etanol como opção de energia limpa e renovável e ainda em função da crescente demanda mundial por este tipo de energia.

Atualmente, o Brasil possui grandes áreas cobertas por canaviais, estimando-se que totalizem 8,49 milhões de hectares plantados, os quais geraram uma moagem de 588,9 milhões de toneladas de cana-de-açúcar durante a Safra 2012/2013, CONAB (2013), destinados à produção de açúcar e etanol, além de energia elétrica proveniente da queima da matéria seca (bagaço e palha) em caldeiras para geração de vapor nas unidades sucroalcooleiras.

A cogeração de energia elétrica por meio da biomassa seca da cana-de-açúcar não é nenhuma novidade no setor sucroalcooleiro, sendo há tempos praticada para suprir o consumo próprio de energia elétrica das indústrias e que, nos últimos anos, algumas delas passaram a disponibilizar seus excedentes de produção de energia elétrica para a comercialização direta a clientes ou para as concessionárias de energia elétrica. Muitas delas passaram ainda a fazer grandes investimentos na modernização de suas caldeiras e de seu sistema gerador de energia, principalmente pelo incentivo à cogeração e os leilões para o fornecimento de energia elétrica, realizados pelo Governo Brasileiro nos últimos anos.

BORGES et al. (2008) afirmam que a venda de excedente de energia elétrica produzida pela cogeração no setor sucroalcooleiro tem sido percebida como um negócio lucrativo pelos empresários do setor, oferecendo prazos de retorno de investimento relativamente baixos, impactos ambientes insignificantes e algumas vantagens regulatórias em relação às fontes convencionais.

Segundo BENVENUTI (2005), em função da magnitude dos números que envolvem a produção canavieira no Brasil, principalmente as extensas áreas cultivadas, depreendem-se a importância do planejamento da produção da cultura, alicerçado nas estimativas de safra, que é o conhecimento antecipado e imprescindível da produção da cultura, fornecendo subsídios para o gerenciamento adequado da lavoura e para as negociações antecipadas do produto, inclusive da matéria seca que será base para a geração e comercialização da energia elétrica

cogerada e num futuro próximo para a produção do etanol celulósico ou etanol de segunda geração. O aumento no volume de energia elétrica produzida pelas usinas e possível de comercialização de seu excedente depende de políticas públicas que incentivem novos investimentos na área tanto de produção quanto de distribuição desta, porém, estas políticas necessitam estar baseadas no conhecimento do potencial de matéria prima disponível para esta produção para que se torne um projeto sólido e sustentável.

A utilização do sensoriamento remoto para a estimativa de produção de diferentes culturas vem há anos sendo estudada em diferentes aspectos e muito já contribuiu para o melhor entendimento da produção agrícola, principalmente pela capacidade de obtenção de informações da condição e desenvolvimento da planta em um determinado momento e por possibilitar a cobertura de grandes áreas, em curto espaço de tempo, mesmo à distância.

Diante desta problemática, este trabalho surge com o objetivo específico de comprovar a hipótese de que o modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972) sobre a eficiência dos sistemas vegetais em aproveitar a energia radiante para produção e acúmulo de matéria seca pode ser utilizado com eficácia, em nível aceitável, para a estimativa da produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar.

1.1 Justificativa

Diante da atual importância econômica da produção da cana-de-açúcar no mercado agrícola nacional e das perspectivas de exploração desta cultura para o fornecimento de energias renováveis, tanto por meio da produção do etanol quanto da energia elétrica, cada vez mais se faz necessário o desenvolvimento de estudos que objetivem desenvolver melhorias no processo, ou ainda o melhor entendimento dos métodos de estimativa e monitoramento da produção da cana-de-açúcar, seja, em nível local, regional ou nacional.

Com base nestas necessidades, este trabalho surge com o objetivo principal de avaliar a eficácia do uso de um modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972), até então sem relatos de seu uso para a estimativa da produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar, como uma opção às estimativas de produtividade de matéria seca desta cultura.

Para este estudo, procurou-se selecionar áreas que apresentassem características homogêneas quanto ao manejo da lavoura, condições edáficas e cultivar plantado, procurando-

se assim isolar a influência da variabilidade destes fatores nos dados coletados por sensoriamento remoto.

Procurou-se ainda, selecionar um cultivar com importância econômica relevante, surgindo ai, a opção pelo cultivar RB855156 que segundo censo varietal da UFSCAR (2011), ocupa a quinta posição entre as variedades mais plantadas no Estado de São Paulo durante a Safra 2011/2012, com 5,6% do total de área plantada no Estado, no entanto, ocupa a segunda posição entre as variedades mais plantadas na região de Ribeirão Preto/SP, com 10,3% do total de área plantada nesta região, onde estão localizadas as áreas deste estudo e que é considerada a principal região canavieira do país.

O uso de modelos que possibilitem a utilização de dados de sensoriamento remoto e ainda dados meteorológicos obtidos por modelos obtidos por sensoriamento remoto são extremamente importantes, principalmente pelo fato de possibilitar a cobertura de extensas áreas à distância e ainda suprir a carência de dados meteorológicos existentes em diversas regiões do país.

1.2 Objetivos

Este trabalho surge baseado na hipótese de que a abordagem clássica de MONTEITH (1972) sobre a eficiência dos sistemas vegetais em utilizar a energia radiante para produção e acúmulo de matéria seca pode ser empregada em níveis aceitáveis para a estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, com o uso de dados de sensoriamento remoto, mais precisamente, utilizando dos dados do sensor MODIS.

Este trabalho tem o objetivo principal estimar a produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar, em escala local, utilizando-se de um modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972).

Têm-se ainda como objetivos secundários:

Avaliar o desempenho do modelo ECMWF, pelo projeto ERA-Interim neste modelo, para estimativas de dados de superfície em climas sub-tropicais.

Testar se é possível utilizar o modelo para estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar ao longo do ciclo de desenvolvimento anual da cultura; e

Testar se é possível utilizar o modelo para estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar ao final do ciclo de desenvolvimento anual da cultura (colheita).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

Atualmente no agronegócio brasileiro, a cultura da cana-de-açúcar representa uma parcela bastante importante, totalizando cerca de 2% das exportações nacionais, além desse fato, a agroindústria representa 6% dos empregos brasileiros, e tem uma grande contribuição no crescimento do mercado interno de bens de consumo (BOLOGNA-CAMPBELL, 2007).

Existe uma grande versatilidade, na cultura da cana-de-açúcar, visto que ela é utilizada de várias formas desde a mais simples, como por exemplo, na ração de animais, e vai até a mais nobre que é na fabricação de açúcar. Neste contexto, Vasconcelos (2002) salienta que:

> Na cana nada se perde: do caldo obtêm-se o açúcar, a cachaça, o álcool, a rapadura e outros; do bagaço, o papel, a ração, o adubo ou o combustível; das folhas a cobertura morta ou ração animal. Assim, a agroindústria da cana-de-açúcar, direciona-se a integrar os sistemas de produção alimentar, não alimentar e energético, envolvendo atividades agrícolas e industriais, e ainda atua com vantagens comparativas em relação às outras matérias-primas, pelo fato de ser intensiva em mão-de-obra e o Brasil ter os menores custos de produção do mundo.

O cultivar RB855156, utilizado neste estudo é proveniente do programa do extinto IAA/Planalsucar, atualmente conduzido pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA), do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Segundo BENVENUTI (2005), além da produtividade, outra característica importante dos cultivares atuais está na existência de espécies com ciclos de crescimento e maturação melhor adaptados às diversas épocas de colheita, o que permite manter a qualidade da matéria prima entregue à indústria durante todo o período da safra.

O cultivo da cana-de-açúcar nas unidades produtoras é caracterizado pelo plantio de um conjunto de cultivares classificado de acordo com sua curva de maturação característica,

sendo considerados precoces ou cana de outono os cultivares cuja colheita é recomendada para o início de Safra (maio e junho), médio ou cana de inverno para os colhidos no meio de Safra (julho a setembro) e tardios ou cana de primavera para os cultivares colhidos no fim de Safra (outubro e novembro). O período de Safra no Estado de São Paulo normalmente é realizado entre os meses de maio e novembro.

De acordo com MARIN (2012), a produtividade média dos canaviais aumentou de 43 t Cana ha^{-1}, em 1961, para 74 t Cana ha^{-1}, em 2005, e grande parte desse aumento pode ser atribuída ao uso de cultivares geneticamente melhorados e que a máxima produtividade em cana-de-açúcar depende, também de um correto planejamento de plantio e de adequado manejo dos cultivares, os quais devem atender as exigências tanto do campo como da indústria, para maximizar os lucros da atividade.

2.1.1 Biologia da Planta

A habilidade única da cana-de-açúcar (*Saccharum*) é estocar sacarose nos colmos, sendo, sendo que se destaca como uma planta tropical que pertence à família das gramíneas ou *poáceas* adjunta com os gêneros *Zea* e *Sorghum*. "A cana-de-açúcar moderna, é considerada um híbrido complexo entre duas ou mais espécies do gênero *Saccharum* (*S. oficcinarum, S. spontaneum, S. barberi, S. sinense, S. edule e S. robustum*)" (CHEN etal., 2003).

De maneira generalizada, a planta é formada de um sistema radicular, dos colmos, onde a sacarose é essencialmente estocada, e das folhas dispostas ao redor da cana, dos nódulos inter colmos e ainda na parte superior da planta onde se centra a gema apical (palmito) (MANTELATTO, 2005).

2.1.1.1 Morfologia

Existe uma parte morfológica da cana-de-açúcar que é de interesse comercial chamada colmo, que tem sacarose que pode ser industrializada. Neste contexto, enfatiza-se que a composição química dos colmos é muito mutável em função de vários fatores como: "variedade, idade fisiológica, condições climáticas durante o desenvolvimento e maturação, propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, tipo de cultivo entre outros (MARQUES et al., 2001).

2.1.1.1.1 Sistema radicular

Pode-se dizer que o sistema radicular é constituído das raízes, sendo essas, órgãos especializados em fixação, absorção, reserva e condução. O sistema radicular da cana-de-açúcar se desenvolve entre 30 e 50 cm de profundidade, porém, dependendo do tipo de solo, determinadas raízes podem conseguir maiores profundidades. Salienta-se que o rizoma, com feitio de colmo subterrâneo, tem entrenós curtos, e são desenvolvidos por células adequadas a se multiplicarem velozmente. Depois do corte dos colmos, a porção subterrânea afiança a emissão de novos rebentos (MONTE, 2004).

Segundo DILLEWIJN (1952) há três tipos básicos de raízes na cana-de-açúcar: as raízes superficiais, ramificadas e absorventes; as raízes de fixação mais profundas, e, as raízes-cordão, que podem ser muito profundas.

Segundo HUMBERT (1974), o sistema radicular da cana-de-açúcar possui uma grande superfície de contato para a absorção de nutrientes e água e se adapta às características do meio ambiente.

VASCONCELOS (2011) menciona que, embora a cana-planta apresente menos raízes que as soqueiras, sua eficiência de absorção por unidade de superfície é maior, pois apresenta um conjunto de raízes mais novas e mais tenras que a cana-soca, que tem uma proporção maior de raízes mais velhas e mais lignificadas. Ainda segundo o mesmo autor, durante a realização de levantamentos do desenvolvimento radicular de diversos cultivares de cana-de-açúcar desde o início de desenvolvimento da cana-planta até a terceira soca, foi constatado que ocorre aumento da massa de raízes de um ciclo para o outro e também durante um mesmo ciclo. Em determinados períodos pode também ocorrer redução, comandada quase que exclusivamente pela quantidade de água no solo. A arquitetura do sistema radicular também muda de acordo com a idade da planta, tanto entre ciclos (cortes) como dentro de um mesmo ciclo (meses de desenvolvimento). O sistema radicular da cana-planta explora mais intensamente as camadas mais superficiais, se comparada à cana-soca, que apresenta um incremento na exploração das subsuperfícies, conforme pode ser visto nas Figuras 1a e 1b.

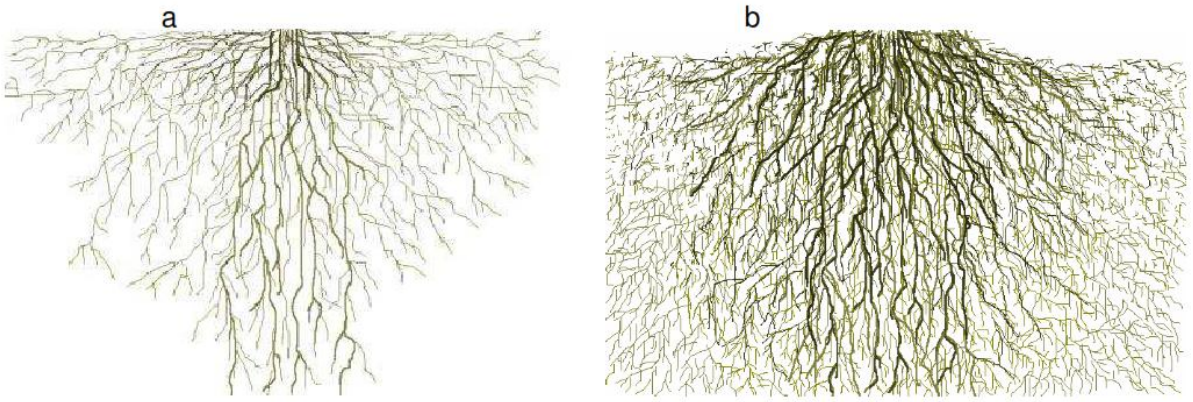


Figura 1. Representação da distribuição do sistema radicular de cana-planta (a) comparada à distribuição em cana-soca (b)
Fonte: VASCONCELOS (2011) p. 3.

2.1.1.1.2 Colmos

As *S. officinarum* têm colmos grossos abundantemente ricos em açúcar, exigentes quanto ao clima e solo. São versadas como canas nobres ou canas tropicais e concernem a essa espécie as antigas variedades preta, rosa, riscada, roxa e outras (FRANÇA & JASINSKI, 2007).

De acordo com Monte (2004):

> O Colmo, juntamente com as folhas e a inflorescência, forma a parte aérea da planta. O colmo é dividido em nós e entrenós sendo constituído de um cilindro sólido e fibroso, com espaços livres entre os tecidos vasculares ocupados por um parênquima com células ricas em carboidratos. O comprimento pode oscilar entre dois e cinco metros, porém, em alguns casos, alcançam até seis metros, principalmente quando ocorre tombamento.

Nos colmos, as fibras são feixes vasculares, onde a porcentagem pode variar de 9% a 17% dependendo do cultivar.

2.1.1.1.3 Folhas

As folhas da cana-de-açúcar são biofábricas de onde as matérias-primas (água, dióxido de carbono e nutrientes) são convertidas em carboidratos sob a ação de a luz solar (HUMBERT, 1974).

Enfatiza-se que a cana-de-açúcar mostra-se com folhas alternadas, longas, medindo de 1,00 a 1,80 metros de comprimento por cinco a sete cm de largura. A inflorescência é a panícula terminal, muito ramificada de forma piramidal, com 50 a 80 cm de comprimento, chamada pendão (MONTE, 2004). Estas folhas estão em contínua renovação, as maduras senescendo e as novas surgindo, as quais dependendo das condições de crescimento da planta podem variar entre dez a quinze folhas por planta (DILLEWIJN, 1952).

BENVENUTI (2005) menciona que todas essas características, em conjunto, são responsáveis pela arquitetura do dossel da cana-de-açúcar e que a resposta espectral, é grandemente influenciada por essas características.

2.1.1.2 Atividade fotossintética

Sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C_4, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO_2 fixado por dm^2 de área foliar por hora. A taxa fotossintética está diretamente condicionada a radiação fotossinteticamente ativa (radiação de ondas curtas – 400 nm a 700 nm, modulado pelas trocas gasosas, disponibilidade hídrica (Naves-Barbieri et al., 2000), sendo altamente condicionada pela abertura estomáticas (TAIZ, 2006).

Entretanto, esta alta atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa. A grande capacidade da cana-de-açúcar, para a produção de biomassa, reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciado pelo Índice de Áreas Foliar (IAF).

Os processos de bioconversão de energia na cana-de-açúcar são mais efetivamente afetados pelos seguintes parâmetros ambientais: luz (intensidade e quantidade), concentração de CO_2, disponibilidade de água e nutrientes e temperatura. O aumento de irradiância eleva a taxa fotossintética, ocorrendo à saturação acima de 0,9 cal cm^2 min^{-1}. A elevação do CO_2 da atmosfera aumenta a capacidade fotossintética, sendo que vento em velocidade moderada

eleva a fotossíntese por aumentar a disponibilidade de CO_2 às plantas; com baixa velocidade do vento, há depressão na fotossíntese, ao redor do meio do dia (RODRIGUES, 1995).

Segundo RODRIGUES (1995), a cana-de-açúcar poderá estar com alto teor de açúcar com apenas alguns meses de idade, bastando para isso ausência de água, nutriente e outros fatores necessários ao seu desenvolvimento, não significando que a planta estará fisiologicamente madura, ou seja, em ponto de colheita. Desta forma, apenas idade adulta não significa maturação total.

2.1.1.3 Períodos fenológicos

De acordo com Lucchesi (1987), chama-se de fenologia, o estudo dos acontecimentos periódicos da vida de uma planta (ou cultura) no que tange às condições ambientais.

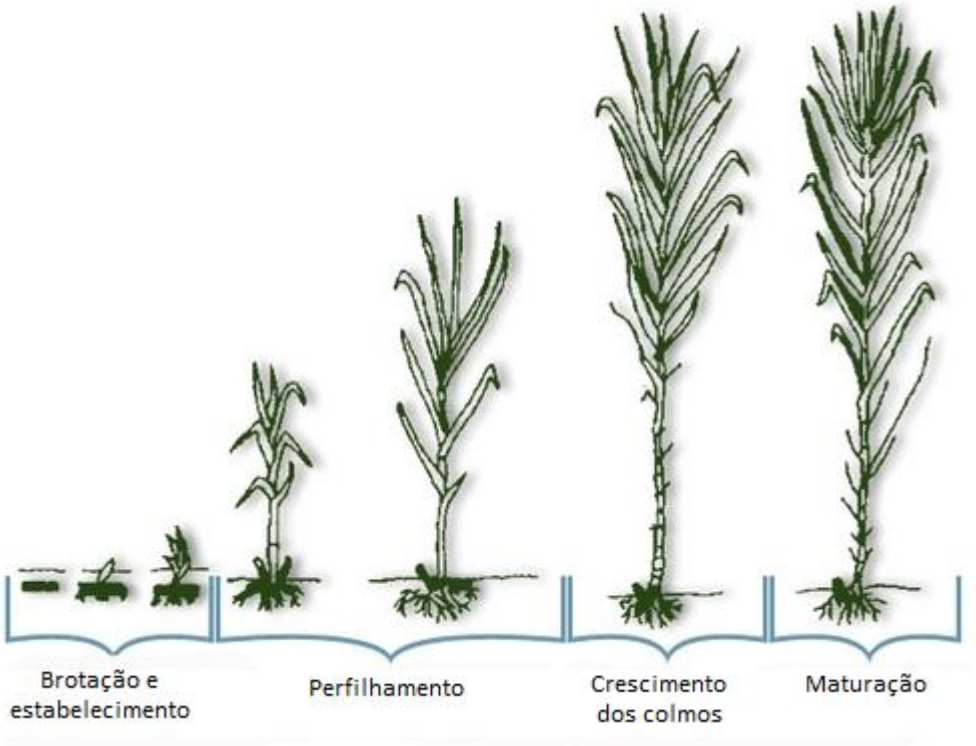


Figura 2. Estádios do desenvolvimento da cana-de-açúcar.
Fonte: Gascho & Shih (adaptado por MARIN, 2012).

Conforme Gascho & Shih (1983), a cana-de-açúcar oferece quatro distintos subperíodos ou estádios em sua fenologia: "1º estádio: Brotação e Emergência dos brotos, (colmos primários); 2º estádio: Perfilhamento e Estabelecimento da cultura (da emergência

dos brotos ao final do perfilhamento); 3º Estádio: Período do Grande Crescimento (do perfilhamento final ao inicio de acumulação da sacarose); e 4º estádio: Maturação (intensa acumulação de sacarose nos colmos)".

2.1.1.3.1 Brotação e emergência

Como bem se sabe a brotação vai do plantio até a completa brotação das gemas. Segundo as condições do solo, a brotação começa de 7 a 10 dias após o plantio e comumente dura ao redor de 30 a 35 dias. A brotação da gema é influenciada por fatores externos e internos. Os fatores externos são a umidade do solo, temperatura do solo e aeração. Os fatores internos são a saúde da gema, a umidade do tolete, a diminuição do conteúdo de açúcar do tolete e o estado nutritivo do tolete (COLL et al., 2001).

Vale frisar que o broto rompe as folhas da gema e se desenvolve em direção à superfície do solo. Também nascem as raízes do tolete. A emergência do broto acontece de 20 a 30 dias após o plantio. O broto é um caule em miniatura que surge acima da superfície do solo (chamado de colmo primário). Esta etapa depende da qualidade da muda, ambiente, época e manejo do plantio. Nesta fase advém, também, o enraizamento inicial (duas a três semanas após a emergência) e o começo das primeiras folhas (GASCHO & SHIH, 1983).

Segundo BENVENUTI (2005), a fase da brotação é o estádio mais prematuro em que a cultura, ainda, não cobriu totalmente o solo e este vai predominar na resposta espectral durante esta fase.

2.1.1.3.2 Perfilhamento

Tem-se conhecimento que perfilhamento é o processo de emissão de colmos por uma mesma planta, os quais ganham o nome de perfilhos. O processo de perfilhamento é regulado por hormônios e deriva no crescimento de brotos que vão em direção à superfície do solo. Esses brotos surgem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. Através desse processo, advém a formação da touceira da cana-de-açúcar e a população de colmos que será colhida. É válido enfatizar que a formação do sistema radicular da touceira é resultado do desenvolvimento das raízes de cada perfilho (GASCHO & SHIH, 1983).

De acordo com Castro et al. (1994) o perfilhamento ajusta ao cultivo o número de colmos imprescindíveis para uma boa produção. Diversos fatores tais como cultivar, luz,

temperatura, irrigação (umidade do solo) e adubação influenciam o perfilhamento. Luz é o mais importante fator externo que o influencia. É de extremada importância conter a luminosidade adequada alcançando a base da planta durante o período de perfilhamento. Temperatura do ar ao redor de 30ºC é avaliada ideal para o perfilhamento, sendo que temperatura abaixo de 20ºC retarda-o. Perfilhos formados mais cedo ajudam a produzir colmos mais grossos e mais pesados, enquanto os formados mais tarde morrem ou permanecem curtos ou imaturos. A população de perfilho máxima é alcançada ao redor de 90 a 120 dias depois do plantio, com quantidades entre 10 e 20 plantas por metro. Ao redor de 150 a 180 dias, pelo menos 50% dos brotos (perfilhos) morrem e uma população constante é formada (CASTRO et al., 1994).

O auge do perfilhamento é quando ocorre a total cobertura do solo pela folhagem das plantas. Momento em que cada touceira possui o máximo de perfilhos (MARIN, 2012).

Segundo BENVENUTI (2005), um menor ou maior perfilhamento, certamente, influenciará a resposta espectral do dossel da cana-de-açúcar, pois, está diretamente relacionado com a densidade do dossel e, portanto, à menor ou maior exposição do solo.

2.1.1.3.3 Crescimento

Sabe-se que a fase de crescimento dos colmos começa a partir de 120 dias depois do plantio e dura até 270 dias em um cultivo de 12 meses. Durante o período anterior, no perfilhamento, ocorre uma estabilização. Do total de perfilhos produzidos apenas 40 a 50% sobrevivem até 150 dias para formar colmos. Essa é a fase mais importante do cultivo onde acontece a formação e alongamento do colmo e deste modo resultando na produção da cana-de-açúcar. A produção foliar é comum e ligeira durante essa fase com IAF alcançando ao redor de 6 a 7. Sob condições favoráveis, os colmos crescem ligeiramente quase que de 4 a 5 entre nós por mês. Irrigação, fertirrigação, calor, umidade e condições climáticas solares beneficiam um melhor alongamento da cana-de-açúcar. Carência de umidade reduz a extensão dos entrenós. Uma temperatura ao redor de 30ºC com uma umidade ao redor de 80% é o ideal para esta fase (CASAGRANDE, 1991).

SCARPARI (2011) afirma que para facilitar o entendimento do crescimento da cana-de-açúcar é necessário inicialmente definir os ciclos da cultura, em função principalmente da época de plantio. Temos três épocas de plantio, cana de ano e meio (18 meses) que é plantada

de janeiro a maio, cana de inverno (12 meses) plantada de maio a agosto e cana de ano (12 meses) que é plantada de outubro a dezembro. A Figura 3 mostra o ciclo evolutivo da cana planta de 12 e 18 meses na região Sudeste do Brasil.

Segundo BENVENUTI (2005), a distribuição do crescimento da cana-de-açúcar é variável e depende principalmente da época de plantio que determina em quais condições climáticas se dará o desenvolvimento da cultura. Por exemplo, uma cana plantada ou cortada em maio passará todo o inverno com crescimento lento para posteriormente aproveitar as condições climáticas favoráveis – calor e umidade – experimentando o período de grande crescimento.

Segundo MARIN (2012), durante esta fase, o crescimento radicular é vigoroso, tornando-se mais intenso, tanto nas laterais quanto em profundidades. As raízes ficam concentradas nos primeiros 40 cm de profundidade, principal zona de absorção de água e nutrientes para o crescimento da cultura.

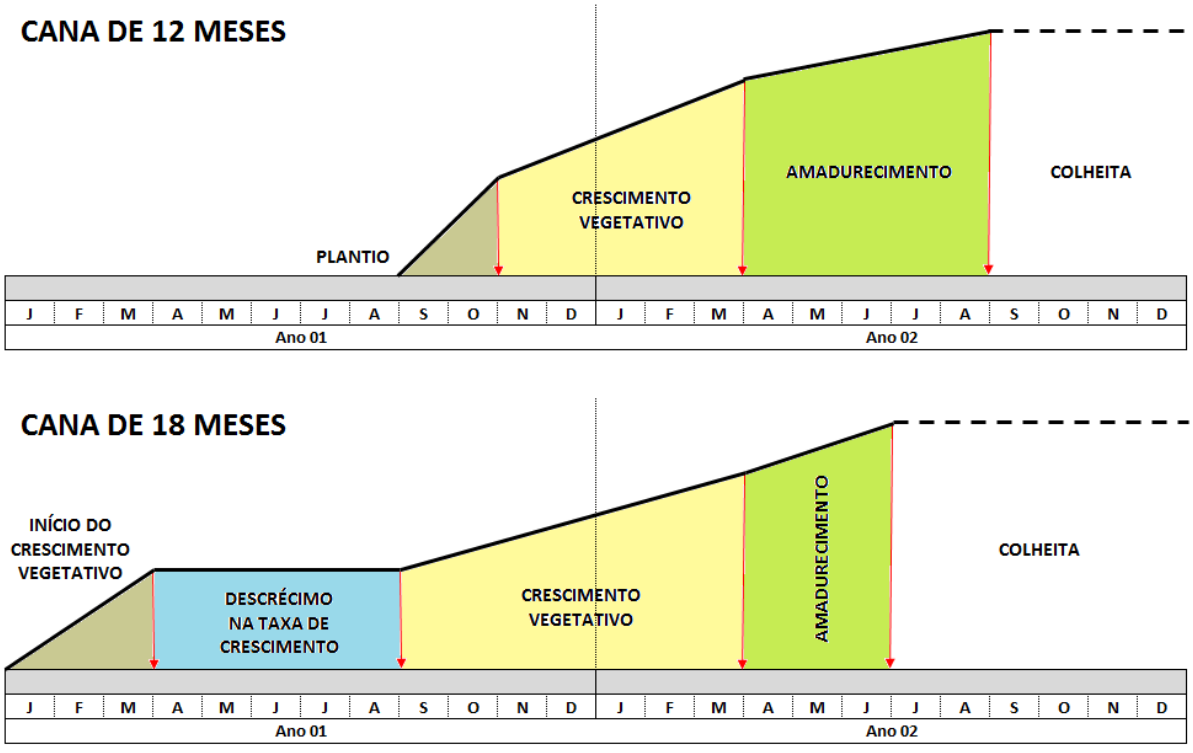


Figura 3. Ciclo evolutivo da cana planta de 12 e 18 meses na região Sudeste do Brasil.
Fonte: Alfonsi (adaptado por MACHADO, 2003)

O pico da população de colmos ocorre entre o terceiro e quinto mês após a brotação, quando ocorre o fechamento do dossel, sendo que após esse período cerca de 50% da população morre e a população final se estabelece com cerca de nove meses de idade em média.

BENVENUTI (2005) conclui que para a aquisição de imagens de Satélite para fins de monitoramento da produção da cana-de-açúcar, a idade do canavial deve ser levada em consideração, sendo necessário seu conhecimento prévio para uma correta interpretação dos dados espectrais.

2.1.1.3.4 Maturação

Sobre o processo de maturação Câmara (1993) expõe que:

> A maturação é o procedimento fisiológico de transporte de glicose e frutose e armazenamento da sacarose nas células parenquimatosas dos colmos. A concentração de açúcares é maior no sentido da base dos colmos para o ápice e da parte externa dos colmos para a parte interna. A maturação é uma característica inerente à planta, podendo ser estimulada por fatores ambientais e de manejo. De maneira geral, a cana-de-açúcar requer seis a oito meses com temperaturas elevadas, radiação solar intensa e precipitações regulares para que haja pleno crescimento vegetativo, seguidos de quatro a seis meses com estação seca e ou baixas temperaturas, condições estas desfavoráveis ao crescimento e benéfica ao acúmulo de sacarose. Sob condições climáticas favoráveis ao rápido crescimento não há armazenamento significativo dos fotossintetizados inclusive em internódios maduros.

Segundo HUMBERT (1974) quando a cana-de-açúcar se aproxima da maturação o número de folhas ativa diminui e o crescimento retarda.

A maturação da cana-de-açúcar é definida pelos fisiologistas, como um estádio senescente, entre o crescimento rápido e a morte final da planta. Somente os entrenós

imaturos das folhas verdes e os entrenós superamadurecidos da base (com alto conteúdo de fibra), não retêm apreciável quantidade de açúcar. Cada entrenó acumula seu próprio açúcar, sendo os valores de sacarose mais elevados na direção do centro do colmo, declinando no sentido das pontas (RODRIGUES, 1995).

Segundo MARIN (2012), o período entre o outono e o inverno, quando há presença de chuvas variáveis e temperaturas mais baixas, é quando ocorre maior atividade de maturação e menor atividade de crescimento, sendo que há intenso armazenamento de açúcar neste período.

2.1.2 Ecofisiologia

Pode-se dizer que a cana-de-açúcar se desenvolve melhor em solos de boa fertilidade, intensos, argilosos ou mistos, com boa capacidade de retenção de água sem acontecer encharcamento e com pH variando entre 6,0 a 6,5. A cultura apresenta variação vegetativa altamente dependente de fatores climáticos, sendo que as variações na disponibilidade térmica, pluviosidade e amplitude de luz cumprem grande influência a respeito do desenvolvimento fenológico da cultura afetando sua produtividade (LUCCHESI, 1987).

Denota-se que a cana-de-açúcar se desenvolve no mundo entre a latitude 36.7° N e 31.0° S, do nível do mar até 1000m de altitude ou um pouco mais. É avaliada fundamentalmente como uma planta tropical. É um cultivo de longa duração e, por conseguinte convive com todas as estações, chuvosa, inverno e verão durante seu ciclo de vida (ALFONSI et al., 1987).

2.1.2.1 Fatores climáticos e ambientais

Em meio às atividades econômicas, a agricultura é a que proporciona maior conexão das condições climáticas. O clima, na escala regional, é o primeiro fator a ser avaliado por causa da sua condição de fator praticamente imutável (ALFONSI et al, 1987).

Segundo RODRIGUES (1995), sendo a cana-de-açúcar uma planta C_4, as altas eficiências fotossintéticas devem-se às altas intensidades luminosas. Com elevadas taxas de energia, os colmos são mais grossos, mas mais curtos; as folhas mais longas e mais verdes e o perfilhamento mais intenso.

MANZATTO et al. (2009), descreveram que para fins da avaliação da aptidão climática para a cana-de-açúcar no Brasil, foram utilizados quatro variáveis: temperatura média do ar, deficiência hídrica anual, índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) e o risco de geada, possibilitando assim a classificação de áreas segundo a análise de risco climático para o cultivo da cana-de-açúcar, em cinco diferentes classes, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Legenda e critérios para a classificação da aptidão climática no Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar para o Brasil.

CLIMA	DESCRIÇÃO
A	Baixo Risco – Sem limitação ao cultivo – Área indicada • Temperatura média anual > 19º C • ISNA > 0,6 • Geada < 20% • Deficiência hídrica < 200 mm
B	Baixo Risco – Irrigação de salvamento indicada – Área indicada • Temperatura média anual > 19º C • ISNA > 0,6 • Geada < 20% • Deficiência hídrica > 200 mm e < 400 mm
C	Carência Térmica ou alto risco de geada – Área não indicada • Temperatura média anual < 19º C ou geada > 20% • ISNA > 0,6 • Geada < 20% • Deficiência hídrica < 200 e 400 mm
D	Irrigação intensiva imprescindível – Área não indicada • ISNA < 0,6 e Deficiência hídrica > 400 mm
E	Excesso de água com prejuízo para maturação e colheita – Área não indicada • Período seco < 3 meses

2.1.2.1.1 Temperatura do ar

A temperatura do ar é fundamental para o cultivo da cana-de-açúcar, neste contexto, salienta-se que de uma forma geral, quando se está abaixo de 20ºC de temperatura, a brotação, o perfilhamento e o crescimento são quase nulos, e entre 25ºC e 30ºC são ótimos; acima de 35ºC regressam a ser quase nulos. Na maturação, a temperatura média do ar necessita ser menor que 20ºC. No período do frio, o desenvolvimento vegetativo é estacionado e a planta passa a preparar mais sacarose que será acumulada como substância de reserva, elevando seus teores no colmo (ANDRADE, 2004).

RODRIGUES (1995) afirma que, um dos graves problemas para a cultura da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil seria a geada, tanto, a "branca" como a "negra". A "branca" é quando o ponto de orvalho está abaixo de 0ºC, normalmente em condições de alta umidade relativa. Quando a umidade está baixa e a temperatura cair abaixo de 0ºC, ocorre a geada "Negra", nome devido ao surgimento de tecido vegetal escuro, sem a presença de gelo, após o período da geada. Sendo que, dependendo das condições do tempo e da exposição, a geada "negra" pode ser mais prejudicial que a "branca", possivelmente devido à liberação de energia, que ocorre quando a água passa do estado líquido para o sólido, retardando o abaixamento da temperatura.

Segundo BRINHOLI (1972), os danos às folhas de cana-de-açúcar se dão na faixa de 2,2ºC a -5,0ºC; o congelamento do colmo de -1,1 a -7,7ºC; a rachadura do colmo em temperaturas iguais ou inferiores à -5,0ºC; a gema apical, na média morre sob temperaturas em torno de -2,2ºC por cerca de 3 horas, enquanto que temperaturas de 0ºC a -6,0ºC por 54 horas matam todas as gemas laterais.

2.1.2.1.2 Umidade

Alfonsi et al.(1987), enfatiza que:

> A cana-de-açúcar acha suas melhores condições para o crescimento perante clima quente e úmido, com intensa radiação solar. Na fase de maturação e colheita, é melhor um período de restrição hídrica e térmica. No Brasil, em função de sua extensão territorial, existem as mais variadas condições edafoclimáticas e, possivelmente, é o único país que proporciona duas colheitas

anuais: de setembro a abril no nordeste, e de maio a dezembro no centro-sul, correspondendo às épocas secas nessas regiões.

2.1.2.1.3 Energia

Vale lembrar que por ser uma planta do tipo C_4, a cana é analisada de alta eficiência fotossintética na conversão de energia radiante em energia química, com taxas calculadas em até 100 miligramas de CO_2 por dm^{-2} de área foliar por hora. Com a fotossíntese acontece a produção de carboidratos, utilizados primeiramente no desenvolvimento de folhas e raízes e, em seguida, na formação de matéria seca estrutural e acúmulo na forma de açúcares no colmo; quanto maior for o ponto de saturação lumínico, mais fotossíntese será realizada colaborando para o aumento da sacarose acumulada durante a maturação dos entrenós (MAGALHÃES, 1987).

Segundo RODRIGUES (1995), com elevadas taxas de energia, os colmos são mais grossos, mas mais curtos; as folhas mais longas e mais verdes e o perfilhamento mais intenso. Em condições de baixas irradiâncias os colmos são mais finos e longos, as folhas estreitas e amarelas.

RODRIGUES (1995) afirma ainda que o fotoperíodo também é importante, afetando o comprimento do colmo. Em fotoperíodos de 10 a 14 horas há aumento do colmo; no entanto; há redução dos colmos em fotoperíodos longos, entre 16 e 18 horas.

Segundo ALEXANDER (1973), a cana-de-açúcar absorve mais fortemente a energia relativa ao comprimento de onda do azul (0,48 µm) e, também, ocorrem picos embora menores, na faixa do vermelho (0,62 µm a 0,64 µm).

2.1.2.2 Fatores edáficos

Segundo CASTRO & KLUGE (2001), a cana-de-açúcar se desenvolve melhor em solos de boa fertilidade, profundos, argilosos, com boa capacidade de retenção de água, mas sem encharcamento e com pH de 6,0 a 6,5. Os solos ácidos são mais prejudiciais à cana-de-açúcar do que os alcalinos (HUMBERT, 1974).

Segundo BENVENUTI (2005), a cana-de-açúcar, devido aos diferentes cultivares, se mostra uma cultura bastante adaptável, sendo cultivada em solos de fertilidade e textura bastante distintas, desde arenosas até muito argilosas.

As condições edáficas, ou seja, as características e propriedades físicas e químicas do solo influenciam de maneira significativa a profundidade do sistema radicular (FAUCONNIER & BASSEREAU, 1975).

2.1.2.2.1 Nutrientes

Destaca-se que em meio aos minerais, carece ser destacado o nitrogênio, por seu envolvimento com o florescimento. No entendimento de Humbert (1974), elevadas doses de nitrogênio alteram a relação carbono/nitrogênio, diminuindo o florescimento, igualmente como os demais minerais também têm relações com o florescimento na cana-de-açúcar. Um crescimento forte da cana-de-açúcar antes da indução é preciso para se alcançar o máximo florescimento na cultura. Contudo, doses altas de nitrogênio, especialmente no momento da indução, diminuem o florescimento. Berding et al. (2004) confirmaram que o dobro da dosagem de nitrogênio diminuiu a emergência das panículas. Em Edgecombe Mount, no Sul da África, o florescimento foi reduzido por 25 dias em razão da quantidade exagerada de nitrogênio no solo (HUMBERT, 1974).

Cabe frisar que em relação ao fósforo, a quantidade ótima exigida para um apropriado crescimento da cana-de-açúcar é de 3 a 5g kg^{-1} de matéria seca de planta durante o estádio vegetativo. A perspectiva de toxicidade com fósforo amplia com quantidades maiores que 10g kg^{-1} de matéria seca (BELL et al, 1990).

No que diz respeito ao potássio, Humbert (1974) notou que a variação da cana-de-açúcar tem variado em relação à variedade usada. Doses altas de potássio acrescem o índice de florescimento da variedade H42-8596, porém abrandou para a variedade H38-2915 e outras variedades não apontaram qualquer sensibilidade.

2.1.3 O cultivar RB855156

O cultivar RB855156 é fruto dos trabalhos do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA), desenvolvido pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), tendo como genitores os cultivares RB72454 e TUC71-7.

Como aspectos gerais, o cultivar apresenta elevado touceiramento, principalmente na cana-soca, com colmos eretos, mas decumbentes na fase adulta, empalhados, de diâmetro fino a médio e cor verde-clara, e com presença de rachaduras (HOFFMANN et al., 2008).

De acordo com o catálogo de cultivares elaborado por HOFFMANN et al. (2008), o cultivar apresenta produtividade agrícola média, mesmo em ambientes restritivos de produção. O período ideal de colheita é entre abril e maio de cada ano, por se tratar de um cultivar considerado super-precoce (quando apresentam teor de Pol acima de 13% no início de maio e Período de Utilização Industrial (PUI) curto, menor que 120 dias). Apresenta ótima condição de brotação tanto na cana-planta quanto na cana-soca, mesmo quando colhidas manual ou mecanicamente e com ou sem uso de fogo para despalhamento durante a colheita. O perfilhamento é médio tanto na cana-planta quanto na cana-soca, com bom fechamento do dossel e ocorrência de tombamento eventual. O florescimento é frequente, com pouca ocorrência de chochamento dos colmos. O teor de sacarose é alto e o de fibra é baixo. Quanto às doenças e pragas, o cultivar é considerado resistente ao carvão, ferrugem, escaldadura, mosaicos, estrias vermelhas e falsas estrias vermelhas.

Como recomendação de manejo, HOFFMANN et al. (2008) sugere que o cultivar não deve ser plantado como cana de ano, ou seja, entre maio e novembro; e que a colheita deve ser sempre realizada no início da safra, entre abril e maio. O plantio deve ser feito em solos bem preparados e deve-se manter o mínimo intervalo entre as operações de sulcação, distribuição de mudas e cobrição.

2.1.3.1 Importância econômica do cultivar

De acordo com RAÍZEN ENERGIA S.A. (2011), os cultivares RB somaram 66% do total de cultivares cultivados nas unidades produtoras de cana-de-açúcar do grupo durante a Safra 2011/2012, seguidas pelos cultivares SP com 24% e os CTC e PO com 4% cada. O cultivar RB855156 ocupou a segunda posição entre os cultivares mais cultivados durante a Safra 2011/2012, com 8,6% do total de cana cultivada/produzida, superada apenas pelo cultivar RB867515, com 23,5% do total de cana, conforme pode ser visto na Tabela 2. O cultivar ocupa ainda a terceira posição com relação aos cultivares a serem plantados durante o plantio da Safra 2011/2012, sendo plantado em 13%das áreas de renovação/plantio, conforme apresentado na Tabela 2, e ainda com previsão dos mesmos 13% para o plantio 2012/2013.

Segundo UFSCAR (2011), durante a Safra 2011/2012, os Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, cultivaram 4.917.390 hectares com cana-de-açúcar e segundo o censo varietal elaborado pela entidade a partir de informações obtidas junto a 116 unidades produtoras associadas ao PMGCA/UFSCar e a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA), representando 3.110.666 hectares, ou seja, uma representatividade de 63% do total de área cultivada, o cultivar RB867515 ocupa a primeira posição entre os cultivares mais cultivados, com 23,3% do total cultivado, seguida pelo SP813250 com 13,5% do total cultivado, pelo RB855453 com 8,4% e do RB855156 com 5,2% do total cultivado.

Ainda segundo UFSCAR (2011), a área de plantio entre os associados durante a Safra 2011/2012 é de 451.800 hectares, dos quais o cultivar RB855156 representa o cultivar que poderá ser plantada em 5,6% da área total, ocupando a quinta posição entre os cultivares mais plantados.

Tabela 2. Participação (%) das principais variedades no censo varietal de colheita e plantio das unidades produtoras do grupo Raízen durante a Safra 2011/2012.

Variedade	Participação (%) na Safra 2011/2012	
	Colheita	Plantio
RB86 7515	23,5%	32,0%
RB85 5156	8,6%	13,0%
SP81 3250	6,9%	5,0%
RB85 5453	6,6%	5,0%
SP83 2847	6,3%	1,0%
RB96 6928	4,2%	22,0%
SP80 3280	3,4%	-
PO88 62	3,3%	1,0%
RB92 579	2,8%	8,0%
Outras	34,4%	13,0%

Em relação à presença do cultivar RB855156 nas regiões canavieiras do Estado de São Paulo, ainda segundo o censo varietal da UFSCAR (2011), considerando o plantio

realizado em 101 unidades produtoras, numa área de 369.280 hectares de plantio de cana-de-açúcar durante a Safra 2011/2012, o cultivar ocupa a quinta posição no ranking dos cultivares mais plantados no Estado, com 5,6% do total de área. O cultivar, porém,ocupa a segunda posição entre os cultivares mais plantados na a região de Ribeirão Preto/SP, com 10,3%(9.398 hectares) do total de área plantada na região.

O Gráfico 1 apresenta um comparativo de desempenho do cultivar RB855156 versus outros cultivares, quanto à produção de Kg ATR por t de cana, obtidos durante 6 safras, em 20 unidades produtoras de cana-de-açúcar do grupo Raízen, localizadas no Estado de São Paulo.

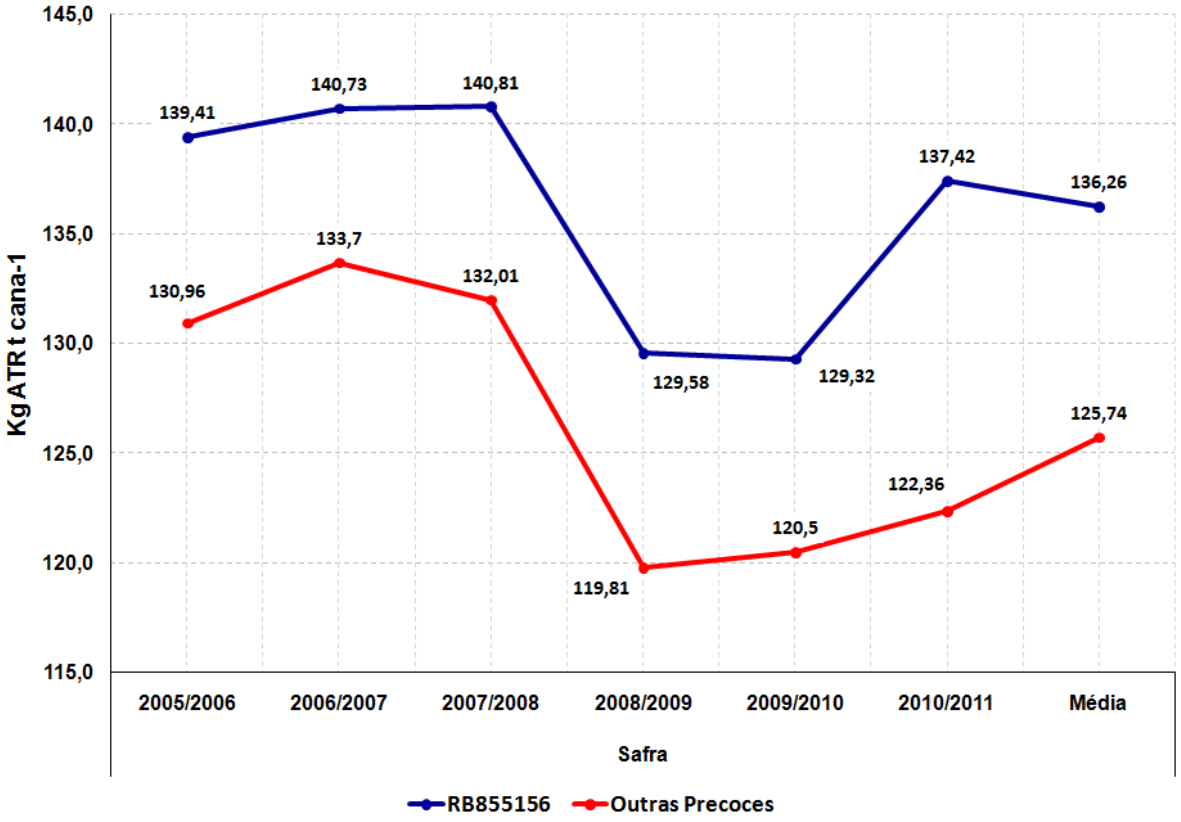


Gráfico 1. Comparativo de produção de Kg ATR por t de cana do cultivar RB855156 versus outros cultivares, obtidos durante 6 safras, em 20 unidades produtoras no Estado de São Paulo. Fonte: RAÍZEN ENERGIA S.A. (2011).

Diante das informações acima, podemos constatar a grande importância econômica do cultivar na produção sucroalcooleira do Estado de São Paulo e principalmente da região de

Ribeirão Preto, onde estão localizadas as áreas experimentais deste estudo, razão pela qual foi escolhida para a elaboração deste estudo.

2.2 Sensoriamento Remoto Orbital

Segundo GARCIA (1982), sensoriamento remoto pode ser definido de maneira ampla como a detecção da natureza de um objeto sem que haja contato direto entre o referido objetivo e o sistema sensor.

RUDORFF et al. (2002), afirmam que o sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos, sendo que essas atividades envolvem a detecção, aquisição e a análise (interpretação e extração de informações) da radiação eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos.

Todos os materiais da superfície terrestre com temperatura superior a zero absoluto (0ºK) podem emitir seletivamente Radiação eletromagnética (REM). Sendo que, na maioria das vezes, o uso do sensoriamento remoto no estudo das vegetações, inclui a refletância como fenômeno físico mais analisado (PONZONI, 2002). A principal fonte de radiação eletromagnética para o sensoriamento remoto é a radiação solar.

A quantidade e a qualidade da radiação eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres resultam das interações entre a energia eletromagnética e estes objetos, as quais são determinadas pelas propriedades fisioquímicas e biológicas desses objetos e podem ser identificadas nas imagens e dados de sensoriamento remoto, possibilitando a quantificação da energia espectral refletida e/ou emitida por estes, e assim avaliar suas principais características, fazendo com que os sensores remotos sejam ferramentas indispensáveis para a realização de inventários de mapeamento e monitoramento de recursos naturais (RUDORFF et al., 2002).

Os sensores remotos são capazes de detectar a radiação eletromagnética (em determinadas faixas do espectro eletromagnético) proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las, de tal forma que este possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre, podendo ser coletadas por sistemas sensores

imageadores ou não-imageadores (RUDORFF et al., 2002). No caso do sensoriamento remoto orbital, que é um sensor imageador, a porção da radiação eletromagnética é captada por um sistema sensor a bordo de Satélites orbitais que, por sua vez, geram imagens desses registros (BENVENUTI, 2005). Os sensores não-imageadores seriam os radiômetros ou espectroradiômetros, que apresentam os dados coletados em forma de dígitos ou gráficos.

Dentre as características fundamentais do sensor estão à resolução radiométrica, que define a eficiência do sensor em detectar pequenos sinais, ou seja, refere-se à maior ou à menor capacidade do sistema sensor em detectar e registrar diferenças na radiação refletida e/ou emitida pelos elementos que compõem a cena é relacionado com a quantidade de níveis de cinza que o sensor pode converter a informação sobre o alvo detectado; a energia espectral que se refere à largura espectral em que opera o sensor, definindo o intervalo no qual são realizadas as medidas, e consequentemente a composição espectral do fluxo de energia que atinge o detector, definindo o tamanho de cada pixel da imagem e a área amostrada pela média da radiação refletida por determinado alvo; e por fim, a resolução temporal, que está relacionada com a repetitividade com que o sistema sensor pode adquirir informação referente ao objeto, ou seja, qual o intervalo de tempo necessário para que o sensor revisite o alvo e adquira nova amostragem espectral (RUDORFF et al., 2002).

A imagem digital obtida pelos sensores remotos orbitais é discreta e constituída por um arranjo de elementos (dígitos) sobre a forma de malha ou grade regular. A área de cruzamento entre colunas e linhas dessa malha é chamada de pixel, do inglês "*Picture element*", onde a cada pixel é atribuído um valor numérico indicativo da intensidade da radiação eletromagnética denominada nível de cinza (NC). Os NCs variam em tonalidades que vão do preto (nível mínimo) ao branco (nível máximo) (CRÓSTA, 1993).

Ainda segundo CRÓSTA (1993), a imagem digital é, portanto, uma função bidimensional da intensidade de energia eletromagnética refletida – ou emitida no caso das bandas termais, pela área imageada, representada por uma matriz f(x, y), onde os valores de f são resultantes da intensidade (brilho) dos materiais da área correspondente ao pixel de coordenada (x, y).

2.2.1 Comportamento espectral dos vegetais

As propriedades ópticas de uma folha são função de sua composição, morfologia e estrutura interna as quais definem a variação da resposta espectral registrada pelo sensor ao longo da faixa do espectro eletromagnético analisada. Na região do visível (0,4 a 0,7 μm) se observa baixa refletância devido à absorção da radiação incidente pelos pigmentos, como as clorofilas *a* e *b* os carotenóides; na região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μm) a refletância das folhas é alta devido às múltiplas reflexões da energia nas paredes das células; e na região do infravermelho médio (1,3 a 2,6 μm) o teor de água contido nas folhas é responsável pela absorção em 1,4μ e 1,95 μ, diminuindo a refletância da folha (GATES et al., 1965).

Investigando a refletância especificamente para a cultura da cana-de-açúcar, MACHADO et al. (1985) mencionam que a refletância engloba os efeitos de muitos fatores biofísicos, tais como elevação solar, tamanho, estrutura e geometria das plantas, tamanho, anatomia e idade das folhas, arranjo das plantas no campo, entre outros.

A absorção, reflexão e transmissão da radiação incidente pode ser total ou parcial, guardando sempre o princípio de conservação de energia. A capacidade de um objeto absorver, refletir e transmitir a radiação eletromagnética é denominada, respectivamente, de absortância, refletância e transmitância, sendo que os valores variam entre 0 e 1. O comportamento espectral de um objeto pode ser definido como sendo o conjunto de valores sucessivos da refletância do objeto ao longo do espectro eletromagnético, também conhecido como a assinatura espectral do objeto (RUDORFF et al., 2002).

A resposta espectral da vegetação também é influenciada pela resposta espectral do solo, principalmente na fase inicial do crescimento da planta, quando a percentagem de cobertura do solo pela vegetação é pequena. Da mesma forma, a declividade e o relevo também influenciam a resposta espectral da vegetação (PONZONI, 2002 e VALERIANO, 2003).

Em duas regiões do espectro a luz é fisiologicamente eficaz – na faixa de radiação do ultravioleta ao azul, e na faixa do vermelho até próximo ao infravermelho. O alongamento e o fototropismo são regulados por receptores de luz azul, tais como o caroteno e a riboflavina (LARCHER, 2000). TUCKER et al. (1979) afirmam que a radiância no canal do vermelho é inversamente proporcional à quantidade de clorofila presente no dossel vegetal e, que,

portanto, é sensível ao componente fotossinteticamente ativo presente na vegetação. Ainda com relação à absorção de luz na região do visível, a clorofila se caracteriza como o fotorreceptor principal (65%) e os carotenos (6%) e xantofilas (29%) são receptores auxiliares (LARCHER, 2000; PONZONI, 2002). A radiação é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese (PONZONI, 2002).

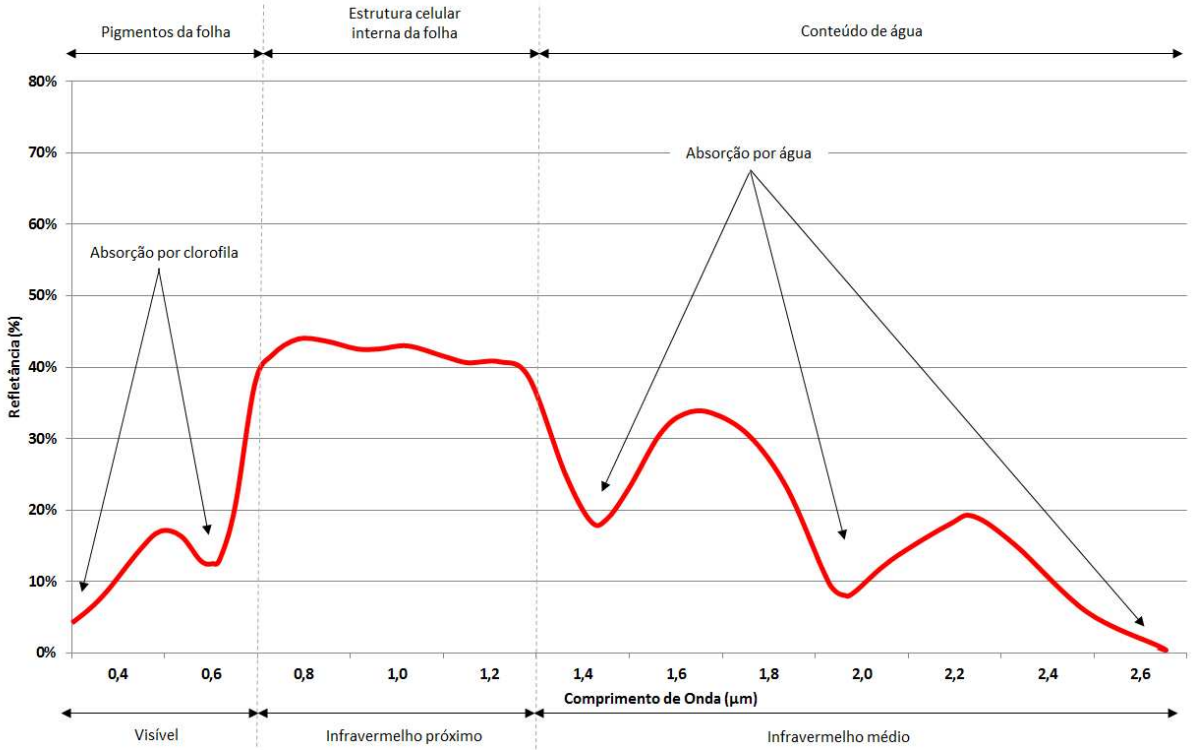


Figura 4. Curva de refletância típica da vegetação.
Fonte: Adaptada de SWAIN e DAVIS (1978, p. 232).

Já na região do infravermelho próximo há uma absorção pequena da radiação eletromagnética e considerável espalhamento interno na folha. A absorção pela presença de água na planta é geralmente baixa nessa região (PONZONI, 2002). A refletância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da energia incidente, e consequentemente, maior será também a refletância.

Na região do infravermelho médio a absorção devido à água líquida predomina na refletância espectral das folhas, sendo que na região em torno de 2,0 μ, a água líquida apresenta uma refletância geralmente pequena, sendo menor que 10% para um ângulo de incidência de 65º e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20º. Há considerável absorção de radiação eletromagnética pela água na região compreendida entre 1,3 e 2,0, ocorrendo pontualmente em 1,1μ; 1,45μ; 1,95μ; 2,7μ e 6,3μ (PONZONI, 2002).

Além das diferenças da resposta espectral entre as espécies vegetais em função de suas diferenças genéticas e morfológicas, MOREIRA (2000) cita o estádio fenológico, os aspectos sanitários e as condições climáticas como fatores que também influenciam a resposta espectral dos vegetais.

Com relação à senescência da vegetação devido à idade e à maturação, CURRAN (1986) menciona que a refletância das folhas na região do infravermelho próximo não tem alteração significativa. Entretanto, a diminuição dos pigmentos da planta, resulta em um aumento da refletância em comprimentos de onda relativos ao azul e ao vermelho.

Segundo CURRAN (1986), outros fatores que influenciam consideravelmente a refletância das coberturas vegetais são: o efeito do brilho do solo e a elevação angular do sol e do sensor. A influência do brilho do solo é inversamente proporcional ao IAF, ou seja, à medida que aumenta o IAF diminui o efeito do brilho do solo sobre a refletância das coberturas vegetais.

PONZONI (2002) afirma que vale salientar que o que é efetivamente medido pelo sensor colocado em órbita terrestre é a radiância espectral. Como cada sensor de cada banda espectral, na qual tal sensor é apto a coletar a REM refletida pelos objetos possui sua própria sensibilidade, implicando num "desbalanceamento" entre as radiâncias espectrais medidas, podendo ocasionar diferenças de brilho de um mesmo objeto entre as bandas, ora subestimando-o, ora superestimando-o.

Cada dossel, em particular, possui suas características próprias e desenvolve-se em diferentes tipos de solos sob diferentes condições ambientais. Não há como prever todas as possibilidades, tentar elencá-las, relacionando-as a possíveis padrões em imagens orbitais. Assim como acontece com qualquer outro objeto de estudo à luz das técnicas de sensoriamento remoto, são inerentes as chamadas ambiguidades nas quais efeitos de diferentes fatores/parâmetros podem assumir valores iguais de radiância, o que implicará em uma

"mesma" aparência nas imagens, mesmo em se tratando de diferentes coberturas vegetais. Cabendo ao interprete estar preparado para conviver com estas limitações e extrair dos produtos de sensoriamento remoto o máximo de informação confiável (PONZONI, 2002).

2.2.2 Índices de Vegetação

Índices espectrais de vegetação (IVs) ou simplesmente índices de vegetação têm sido largamente utilizados para monitorar a cobertura vegetal da Terra em escalas global e/ou local (MIURA et al., 2001). Tais índices são combinações de dados espectrais de duas ou mais bandas, selecionadas com o objetivo de sintetizar e melhorar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos da vegetação (MOREIRA, 2000).

Índices de vegetação, que podem ser calculados por meio das bandas espectrais das imagens de Satélite, têm boa relação com a produtividade agrícola (RUDORFF, 1985;RUDORFF e BATISTA, 1990; RUDDORF et al., 1995; BERKA et al., 2003; RIZZI, 2004).

Os IVs se baseiam em combinações lineares, razões ou transformações ortogonais de várias bandas espectrais de tal forma que resumem estes dados espectrais em um valor único (PICOLLI, 2007). Estes índices são sensíveis à biomassa verde de uma comunidade de plantas e, portanto, a quantidade de clorofila por unidade de área. A quantidade dessa biomassa pode estar diretamente relacionada ao IAF e a produção da cultura. PONZONI (2002) menciona que é importante lembrar que a clorofila absorve seletivamente a energia radiante que é convertida e estocada na forma de compostos orgânicos através da fotossíntese e que, portanto, pode ser monitoramento por meio de índices de vegetação.

Os IVs também têm a finalidade de destacar a contribuição espectral da vegetação minimizando a influência de fatores como solo, ângulo solar, vegetação senescente, atmosfera e inclinação do terreno (GUTMAN et al., 1995 e ALMEIDA et al., 2005). Porém, os efeitos das imagens adquiridas com visada fora do nadir produzem diferenças significativas no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*).

Proposto por ROUSE et al. (1973), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), é o IV mais utilizado. Este índice está baseado em duas regiões do espectro, a do vermelho (Red) (0,6 a 0,7 µm) e do infravermelho próximo (NIR) (0,7 a 1,3 µm) e é calculado

pela combinação dos valores de refletância nos comprimentos de onda de ambos, conforme a equação 2.1.

(2.1)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Sendo,

Red → valor de refletância espectral obtida na faixa do espectro eletromagnético doVermelho (0,6 a 0,7µm);

NIR → valor de refletância espectral obtido na faixa do espectro eletromagnético do Infravermelho próximo (0,7 a 1,3µm).

A utilidade do índice de vegetação foi demonstrada em diversos campos, tais como, agricultura de precisão, estudo da fenologia da vegetação, em classificações espectrais e avaliações primárias de produtividades (MIURA et al., 2001).

2.2.3 As imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)

O sensor MODIS é o instrumento chave a bordo do Satélite Terra (EOS AM) e do Satélite Aqua (EOS PM). O Satélite Terra está em órbita descendente ao redor da Terra a 705 km de altitude e é sincronizado de forma que passa do Norte ao Sul cruzando o Equador durante a manhã (10:30 h), enquanto que o Aqua está em órbita ascendente ao redor da Terra, também a 705 km de altitude e é sincronizado para passar do Sul para o Norte sobre o Equador à tarde (13:30 h). Os dois Satélites possibilitam o imageamento de toda a superfície terrestre a cada um ou dois dias, adquirindo dados em trinta e seis bandas espectrais, os quais fornecem informações que possibilitam um melhor entendimento da dinâmica global e os processos que estão ocorrendo na terra, nos oceanos e na baixa atmosfera (NASA, 2012).

O instrumento MODIS foi concebido pelo projeto *Earth Observing System* (EOS) da *National Aeronautical and Spatial Administration* (NASA), com o objetivo de auxiliar os estudos das complexidades das mudanças globais. Desenhado e desenvolvido desde o Modelo de Engenharia, o sensor foi completado em meados de 1995, sendo que o primeiro instrumento foi lançado em 18 de dezembro de 1999 a bordo do Satélite Terra e o segundo instrumento foi lançado em 04 de maio de 2002 (NASA, 2012).

Outro fator importante das imagens do sensor MODIS é a resolução espacial, uma vez que permite obter imagens quase que diárias com resolução espacial de 250 m (bandas 1 e 2), que embora considerada moderada, parecem ser adequadas para estudos regionais de monitoramento de grandes culturas agrícolas (RUDORFF et al., 2007).

O fato da revisita quase diária pelos sensores MODIS é relevante devido à alta dinâmica dos alvos agrícolas, possibilitando o acompanhamento das culturas ao longo de seu ciclo e também pelo fato de aumentar a probabilidade de se obter imagens livres de nuvens pelo aumento da frequência de observação da superfície terrestre pelo sensor (SUGAWARA, 2010).

Outro fator importante sobre os sensores MODIS é a disponibilização gratuita na internet desses dados sob a forma de diferentes produtos, o que permite sua utilização em trabalhos que requerem obtenção sistemática de dados de sensoriamento remoto de alta qualidade. Estes produtos são disponibilizados ainda, com correções: geométrica, radiométrica e atmosférica, permitindo sua utilização imediata nas mais variadas aplicações (RUDORFF et al., 2007).

Segundo CARREIRAS et al. (2003), mesmo com essas correções valores anômalos ainda podem ser observados tanto nas imagens diária quanto nas composições de 8 e 16 dias, disponibilizadas pela NASA, principalmente devido à presença de nuvens e de baixo ângulo de visada do sensor (superiores a 45º). A despeito disto, diversos pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de filtragens para a eliminação destes valores anômalos.

Para a realização deste estudo foram utilizadas as imagens dos produtos MOD09Q1 e MYD09Q1, as quais contêm informações sobre as refletância de superfície das bandas do vermelho (620-670 nm) e infravermelho próximo (841-876 nm), respectivamente dos Satélites MODIS e AQUA, obtidos pela composição de imagens no período de 8 dias e com resolução espacial de 250 m.

2.3 Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida pela planta (fAPAR)

Como bem se sabe para que a fotossíntese aconteça é imprescindível a presença da energia solar. A biosfera recebe a radiação solar em comprimentos de onda de 290 nm a quase 3000 nm. Os menores comprimentos de onda são, em comum, absorvidos na alta atmosfera pelo ozônio e oxigênio do ar, sem atingir a superfície terrestre, e os maiores comprimentos de

onda são absorvidos de acordo com a concentração de vapor de água e gases na atmosfera, especialmente, CO_2 (LIOU, 1980).

Segundo OLIVEIRA (2008), a superfície continental terrestre e a atmosfera interagem continuamente por meio de trocas turbulentas, principalmente de calor, umidade e carbono. As trocas de energia, massa e *momentum* dependem do tipo de cobertura da terra, mais precisamente de parâmetros biofísicos a ele associados, como o Índice de Área Foliar (IAF), a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (fAPAR), rugosidade e albedo, sendo a IAF e a fAPAR, provavelmente, os parâmetros biofísicos mais importantes em estudos de modelagem terrestre por serem indicadores da fotossíntese e transpiração do dossel.

É extremamente importante ressaltar que a fAPAR tem o papel de fonte de energia durante o processo fotossintético do vegetal e pode ser utilizada como um indicador da presença e estado da cobertura vegetal ou como uma estimativa (quantitativa) de um dos fundamentais fatores que controlam a produtividade desta cobertura. Depende da arquitetura e sistema ótico do dossel, da refletância do solo e da radiação incidente, a qual altera diariamente (ZHANG et al, 2000).

A fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida por um dossel de plantas (fAPAR), do inglês *Fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by a plant canopy*, é definida como a fração da APAR para o processo fotossintético que é efetivamente absorvida pela copa dos vegetais verdes (aqueles que possuem a clorofila como pigmento predominante). Na fAPAR não estão incluídas as frações da APAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa disponível) refletida pela copa, tampouco a fração absorvida pela superfície do solo e do sub-bosque. Mas inclui a porção da APAR que é refletida pelo solo/sub-bosque, a qual é interceptada pela copa também.

A fAPAR pode ser usada como uma quantidade mensurável, um índice que descreve o estado do sistema vegetativo, sendo que os valores de f da APAR variam de 0 em áreas sem cobertura vegetal a próximo de 1 para a vegetação em seu pico de atividade fotossintética. Seu valor é estimado do balanço de radiação entre os fluxos incidente, refletido e transmitido pela vegetação (SPOLADOR et al., 2006).

2.3.1 Relação da fAPAR com os índices de vegetação

Ressalta-se que o monitoramento da superfície da terra, a detecção e a estimativa da quantidade da vegetação em tempo real são terminantes, pois fornecem informações importantes a respeito da produtividade da vegetação. O progresso de ecossistemas terrestres é marcado por variáveis físicas, bioquímicas e fisiológicas, podendo, algumas delas, ser extraídas a partir de dados de sensoriamento remoto recolhidos no espaço com ótimo índice de aceitação, fazendo da Fração Absorvida da Radiação Ativa Fotossinteticamente (fAPAR) um ótimo indicador de status do dossel (GOBRON et al, 2000).

Observa-se que a radiação absorvida pelos tecidos fotossintetizantes do dossel pode ser utilizada para quantificar a presença da vegetação com ótima confiabilidade em escala global. Devido à natureza do regime dos dosséis e da radiação, a fAPAR pode ser empregada como uma quantidade mensurável, facilitando propor e projetar um índice da vegetação que descreva o estado do sistema. A resolução da fAPAR depende da estrutura do dossel, quantidade de folhagem (Índice de Área Foliar - LAI), ângulo zenital solar, proporção de radiação difusa e a refletância do solo (MARISCAL et al, 2000).

Denota-se que as medições diretas de radiação fotossinteticamente ativa em sítios experimentais podem ser desafiadoras, de modo especial em dosséis heterogêneos como as florestas, em que as medidas instantâneas comumente podem sofrer interferências da estrutura do dossel, das características da vegetação, e componentes micro meteorológicas como ventos predominantes, cobertura de nuvens em meio a outros (GOWER et al, 1999).

Na maioria das vezes a fAPAR é medida inteiramente com um método que use dados da APAR medidos a longo prazo. Porém, as medidas diretas de APAR em locais experimentais podem ser desafiadores, notadamente em dosséis heterogêneos como as florestas, onde as medidas instantâneas volta e meia podem sofrer intervenções. A resolução da fAPAR depende da estrutura do dossel, quantidade de folhagem, ângulo solar zenital, proporção de radiação difusa e a refletância do solo. Em florestas, amostragens espaciais apropriadas são muito difíceis de serem obtidas. Algumas ocasiões o Índice de Área Foliar (LAI) é considerado e a fAPAR calculada, assumindo um modelo do dossel padrão adequado (MARISCAL et al, 2000).

Para uma avaliação precisa da fAPAR é indispensável um monitoramento detalhado para constatar a produtividade de uma superfície vegetada. Sendo o dossel um dos fatores que

influenciam na radiação, o seu aspecto na floresta pode trazer variações na refletância, transmitância e absortância. A PAR absorvida pelas folhas verdes é suficiente para se apreciar a fixação do carbono do dossel. Afortunadamente, os índices remotos de vegetação são mais bem pautados com fAPAR (GALLO et al, 1993).

Enfatiza-se que a fAPAR proporciona um comportamento mais complexo do que os obtidos do índice de vegetação, sendo muito variável tanto anualmente, quanto entre os anos, sem um padrão de comportamento por tipo de vegetação, como oferecido pelo índice de vegetação (SELLERS et al, 1997).

A radiação fotossinteticamente ativa disponível (APAR, do inglês *Available Photosynthetically Active Radiation*) é determinada através da estimativa da PAR que atinge a superfície e a fAPAR, sendo que, se somente a PAR e a APAR forem usadas, então a relação logarítmica entre a fAPAR e IAF pode ser encontrada.

ASRAR et al. (1984), afirma que apesar da relação existente entre a fAPAR e oIAF, obter esses parâmetros é difícil, podendo ser medidos em campo por métodos diretos, com sucesso em determinações de IAF em áreas agrícolas, porém, pouco prático para florestas e por métodos indiretos que geralmente empregam instrumentos comercialmente indisponíveis, além de terem a desvantagem de coberturas espacial e temporal limitadas.

ASRAR et al. (1984), em estudo desenvolvido nos Estados Unidos, no Estado do Arizonas, em experimento de laboratório e com uso de radiômetro estabeleceu um procedimento para estimar a fAPAR e IAF para o trigo, nos quais os resultados das análises teóricas e as medidas de campo indicaram a correlação da fAPAR do trigo com o NDVI com R^2 igual a 0,965 e erro médio quadrático de 0,053, pela equação 2.2.

(2.2)

$$fAPAR = -0{,}019 + 1{,}253 \times NDVI$$

GROBON et al. (1999) desenvolveram um algoritmo denominado MGVI (*MERIS Global Vegetation Index*) otimizado, para medir fAPAR enquanto minimiza os efeitos do espalhamento por partículas atmosféricas, a presença de solos e a mudança da geometria de iluminação e observações, algoritmo este posteriormente adaptado por GROBON et al. (2006) para outros sensores como o MODIS e *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS).

2.3.2 Relação da fAPAR com a produtividade agrícola

Compete lembrar que o interesse em checar a fAPAR com o produtividade agrícola, advém do fato deste parâmetro biofísico ser indicativo da atividade fotossintética da vegetação e possivelmente funcionar como um estimador da produção da biomassa, esperando-se assim, que o mesmo tivesse uma relação quase linear com o produtividade agrícola (LOS et al, 2000).

Tem-se conhecimento e existem sinais da relação da fAPAR com a produtividade, precisando de estudos mais precisos, em regiões menores e piloto, onde se possa monitorar melhor o uso e cobertura do solo e com dados de Satélite em melhores resoluções espaciais (KOGAN & ZHU, 2001).

De acordo com Goward et al.(1992) a análise é preliminar e intuitiva, a investigação de outras variáveis, como a umidade do solo, e a tendência da curva de produtividade em relação à FAPAR, ao mesmo tempo ajudariam na determinação de equações de estimativas de produtividade, as quais poderiam ser de grande utilidade nas expectativas e inclusive no monitoramento.

Destarte são intensos os vestígios da relação da fAPAR com a produtividade agrícola, embora da forma de obtenção e as generalizações das informações, tais como: resolução espacial dos dados da fAPAR, resolução temporal dos dados do BME, recorte por estado (BEURS & HENEBRY, 2005).

2.4 Os dados climatológicos do Projeto ERA/ECMWF

Considerado um dos mais importantes centros de pesquisas e desenvolvimentos em previsão numérica do tempo, o Centro Europeu de Previsão do Tempo (ECMWF, do inglês *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*), vêm desde 1979 fornecendo arquivos de análises e previsões que tem sido uma importante fonte de dados para pesquisadores (ALMEIDA et al., 2012). Dentre os projetos desenvolvidos pelo ECMWF, estão os projetos de re-análise atmosférica global, os projetos ERA-40, ERA-15 e o ERA-Interim.

O ERA-Interim é a mais recente re-análise atmosférica global produzida pelo ECMWF, recobrindo o período desde 1º de janeiro de 1989 até os dias atuais e ainda em desenvolvimento para em breve fornecer dados quase em tempo real.

O ERA-Interim é considerado pela ECMWF, o mais ambicioso projeto de re-análise por eles desenvolvido. O objetivo primário do ERA-Interim é a correção de problemas de

difícil assimilação de dados encontrados durante a produção do ERA-40, relatados principalmente com a representação do ciclo hidrológico, a qualidade da circulação estratosférica e a consistência no tempo de campos geofísicos novamente analisados. O segundo objetivo é o de melhorar o projeto em vários aspectos técnicos das re-análises, tais como seleção de dados, controle de qualidade, correção de viés e monitoramento de desempenho, cada um dos quais podendo ocasionar grande impacto sobre a qualidade dos produtos das re-análises (DEE et al., 2011).

As re-análises são um campo de estudo relativamente jovem, com origens na exploração de dados meteorológicos coletados em 1979, os quais foram re-analisados por diversas vezes, principalmente com o objetivo de aprender como se fazer o melhor uso destas observações para iniciar a previsão numérica do tempo. Sucessivas re-análises atmosféricas produzidas por diversos institutos resultaram em adição de qualidade aos modelos numéricos de previsão do tempo, como modelos melhores e melhores dados de entrada. Estas re-análises têm gerado ainda uma crescente variedade de uso dos dados destes produtos, inclusive pelo incremento de melhores resoluções espaciais e temporais ao longo dos anos (DEE et al., 2011).

Os dados do ERA-Interim são produzidos utilizando um esquema sequencial de assimilação de dados, avançando em tempo com análise de ciclos de 12 horas. Em cada ciclo, as observações disponíveis são combinadas com informações prévias do modelo de previsão para estimar o estado envolvente da atmosfera global e da superfície subjacente. Isto envolve o processamento de uma análise variacional dos campos atmosféricos básicos superiores ao ar livre (temperatura, vento, umidade, ozônio e pressão da superfície), seguidos por separadas análises de parâmetros próximos à superfície temperatura e umidade do ar a 2 m, temperatura e umidade do solo, neve e ondas oceânicas. Estas análises também são utilizadas nos modelos de previsão de curto-prazo, fornecendo uma estimativa prévia necessária para o próximo ciclo das análises (DEE et al., 2011).

As reanálises ERA-Interim geradas diariamente podem ser acessadas por usuários do JRC/MARS (*Joint Research Centre – Monitoring Agricultural Resources*), estando disponíveis também, duas vezes por dia, análises com previsões por decêndios e mensais. Os dados do ERA-Interim são ainda disponíveis publicamente no servidor de dados do ECMWF,

com resolução espacial de 1,5º, incluindo muitos parâmetros até antes não disponíveis nos dados do ERA-40 (ECMWF, 2012).

2.4.1 Correlação dos dados ERA com estações meteorológicas de superfície

Diversos pesquisadores têm procurado desenvolver estudos que comprovem a concordância dos dados dos projetos ERA com dados de estações meteorológicas de superfície.

JOHANN et al. (2011) realizaram a comparação de dados de temperatura média obtidos de 38 estações meteorológicas automáticas e 08 estações meteorológicas convencionais com dados de temperatura média de 303 pixels com resolução espacial de 0,25º do ERA-40 distribuídos sobre o Estado do Paraná. Foram utilizados dados decendiais, num total de 360 decêndios, entre o 1º decêndio de 2000 e o 3º decêndio de 2009.

Como resultado de seu estudo, JOHANN et al. (2011), demonstram que houve correlação entre as duas fontes de informações para os 303 valores analisados, com R^2 variando entre 0,840 e 0,921, com média de 0,889 e coeficiente de variação (CV) de 1,92%, indicando baixa variabilidade espacial. Concluiu-se que, em parte do Estado do Paraná os dados do ERA-40 informam corretamente o fenômeno.

MELO & FONTANA (2006), desenvolveram um trabalho objetivando avaliar a qualidade dos dados fornecidos pelo ERA-40 em comparação com dados observados em estações meteorológicas de superfície, obtidos entre o período de 1º de janeiro de 2003 a 31 de dezembro de 2005. Neste trabalho foram analisados os dados de temperaturas máxima, média e mínima, precipitação pluviométrica e evapotranspiração que foram comparados aos dados de 17 estações meteorológicas de superfície distribuídas no Estado do Rio Grande do Sul. Como resultado deste trabalho, os autores mencionam que os dados decendiais de temperatura máxima obtida pelo ERA-40 superestimam em 5,2ºC, em média, os dados observados nas estações meteorológicas de superfície, enquanto que os dados de temperatura média apresentaram leve tendência de subestimativa deste parâmetro, ficando muito próximos da linha 1:1, com um desvio médio de 1,1ºC. Os coeficientes de correlação, analisando os períodos decendiais para temperatura máxima, média e mínima foram de 0,739; 0,957 e 0,863, respectivamente. Para os dados de precipitação pluviométrica foi observada uma grande dispersão quando comparados aos dados das estações de superfície, apresentando coeficiente

de correlação de 0,586 para os dados decendiais. Quanto aos dados de evapotranspiração, notou-se razoável dispersão, com tendência de subestimativa de valores baixos e superestimativa de valores de maior magnitude dos dados do ERA-40 comparados aos das estações de superfície. O coeficiente de correlação foi de 0,893 para o período decendial. Por fim, conclui-se que os dados de temperatura média do ERA-40, para o Rio Grande do Sul, podem ser usados com segurança em modelos ou outras ferramentas para estimativa de produtividade de culturas, porém, os demais dados necessitam de uma calibração ou introdução de um fator de correção.

2.5 Modelos para estimativa de produtividade agrícola

Segundo BENVENUTI (2005), na cana-de-açúcar, é crescente a necessidade de estimativas de Safra confiáveis para o planejamento adequado das unidades produtoras, entidades de classe e governo.

As estimativas de safras podem ser obtidas em escalas locais, regionais ou globais, podendo ser obtidas e/ou apoiadas por modelos agronômicos que utilizam variáveis agrometeorológicas, espectrais ou modelos híbridos que simulem o desenvolvimento da cultura durante o ciclo.

Segundo PICOLLI (2007), a estimativa de produtividade agrícola por meio de modelos matemáticos visa simular ou estabelecer relações entre o crescimento das culturas e sua produtividade.

Os modelos se subdividem em empíricos e mecanísticos, que podem ser lineares ou não lineares. Nos lineares, para se estimar parâmetros é necessário resolver um sistema de equações lineares com relação aos coeficientes de regressão desconhecidos, são os modelos de regressões lineares. Já os modelos não-lineares não fazem uma descrição puramente empírica do fenômeno em estudo, procurando uma relação teórica entre as variáveis observáveis de interesse a partir de suposições importantes sobre o problema.

2.5.1 Modelos agronômicos

Doorembos & Kassam (1979) indicaram um modelo agronômico para valorizar produtividade de diferentes culturas. Tal modelo se fundamenta na penalização da produtividade máxima (PM) em função do estresse hídrico dado pela relação entre a

evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima (ETm), restrito por um fator de resposta à produtividade, cujo valor é dado em função da cultura e do seu estágio de desenvolvimento.

Vale lembrar que este modelo consente o cálculo da produtividade para várias culturas. A produtividade derradeira é o resultado do somatório das produtividades parciais alcançadas em cada um dos intervalos de tempo desde o plantio até a colheita (DELGADO-ROJAS & BARBIERI, 1999). Deste modo os autores desenvolveram um modelo com variáveis agrometeorológicas para avaliar a produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar fundamentado no modelo de penalização proposto por Jensen (1968). Os autores distinguiram os efeitos da deficiência hídrica no solo sobre a produtividade agrícola (colmo) e a produtividade industrial (açúcar) em escala municipal. Os autores findaram que, para a área experimental estudada, o modelo pode ser empregado para este tipo de estimativa, já que o erro médio absoluto representou 3,8% da produtividade média observada de colmo e 4,7% da produtividade média observada de açúcar. O erro máximo foi de 13% para colmo e 9,8% para o açúcar.

Os modelos agronômicos devem ser simples, com a menor quantidade de dados de entrada possível (PASSIOURA, 1986), sem, contudo, comprometer a capacidade do modelo em descrever as relações entre o solo, a vegetação e o ambiente na expressão da produtividade agrícola (SUGAWARA, 2010).

2.5.2 Modelos agrometeorológicos-espectrais

Diversos autores têm desenvolvido ao longo dos anos, trabalhos que demonstram a correlação dos dados espectrais provenientes de sensoriamento remoto e sua correlação com a produtividade da cana-de-açúcar, além de seu uso em conjunto em modelos que possibilitem a estimativa da produtividade agrícola desta cultura.

Ressalta-se que ultimamente, com o aparecimento dos Satélites de observação da Terra, que agem de forma sistemática, estimável atenção foi dada ao desenvolvimento de modelos de produtividade que usam dados coletado por sensores abordo destes Satélites. Muitos empenhos foram concentrados no estabelecimento de relações empíricas em meio a parâmetros agronômicos (por exemplo: índice de área foliar e biomassa) e variáveis espectrais

(por exemplo: índices vegetativos) para serem usados em modelos de estimativa de produtividade (RUDORFF & BATISTA, 1990).

Assim Rudorff & Batista (1990) sugeriram um modelo de regressão com o uso de variáveis espectrais para aperfeiçoar a estimativa da produtividade de cana-de-açúcar obtida pelo modelo agronômico de Doorembos & Kassam (1979), numa área de 40.000 ha. A associação de dados agronômicos e espectrais originou um modelo com maior poder explicativo.

Foi deste modo que Rudorff et al. (1995) empregaram variáveis espectrais e ao mesmo tempo variáveis qualitativas (por exemplo: variedade e estágio de corte) e notaram melhora na estimativa produzida pelo modelo de regressão.

Pode-se dizer e se tem conhecimento que modelos agronômicos implementados numa plataforma SIG são importantes, pois consentem examinar simulações de fenômenos espaciais e temporais, além de promover a manipulação, a análise e a visualização espacial dos dados. Contudo, carece se tomar cuidado com a escala espacial e temporal do modelo, pois todos os dados necessitam estar na mesma escala. Do mesmo modo precisa se tomar cuidado com o tipo de interpolação e o tipo de dado (raster ou vetorial) utilizado, em meio a outros (HARTKAMP, 1999).

MACHADO (2003), em seu trabalho, na região de Araras (SP), demonstrou o uso das imagens do sensor ETM+ na caracterização da variabilidade espacial da cana-de-açúcar e sua relação com a estimativa de produção de biomassa pela cultura, comprovando a hipótese de existência de correlação entre a quantidade de biomassa do dossel da cana-de-açúcar com sua resposta espectral.

BENVENUTI (2005), em seu trabalho, na região de Santa Maria da Serra (SP), objetivou agregar conhecimento sobre a resposta espectral da cana-de-açúcar, utilizando técnicas de processamento digital de imagens e análise estatística, para o subsídio das estimativas de safras e o monitoramento do estado geral dos canaviais das unidades produtoras. Com uso de imagens do sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) a bordo do Satélite Landsat7, analisou a relação do *Greeness Vegetation Index* (GVI), NDVI e a refletância da Banda 4 com a produtividade da cana-de-açúcar revelando que os maiores coeficientes de correlação foram determinados pela relação do GVI com a produtividade da cana-de-açúcar.

PICOLLI (2007) utilizou um modelo agrometeorológico-espectral agregado a rede neural para estimar a produtividade da cana-de-açúcar na região de Catanduva (SP). Para isto usou uma série de variáveis meteorológicas e agronômicas, com adição do IAF obtido a partir de imagens de NDVI do sensor MODIS. Tal modelo explicou 66% da variabilidade da produtividade nos talhões estudados, em área de cana soca.

JUNGES & FONTANA (2011) objetivaram elaborar uma equação de regressão linear múltipla, empregando variáveis agrometeorológicas e espectrais para estimativa de produtividade de grãos de trigo em municípios na região norte do Estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados climatológicos de estação meteorológica de superfície da rede do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e dados espectrais do NDVI obtido pelas imagens do sensor MODIS, no período entre 2000 e 2006. Com o uso das variáveis identificadas como independentes, precipitação pluviométrica do mês de outubro, índice de geadas do mês de setembro e o NDVI integrado de junho a outubro, mais o emprego da variável graus-dia acumulados de maio a outubro, construiu-se uma equação que apresentou-se adequada à estimativa de produtividade de grãos de trigo, sendo que somente em um dos anos estudados, foi obtido erros superior a 10%.

EERENS et al. (2001) descrevem a aplicação de um modelo agrometereológico-espectral baseado em MONTEITH (1972), com o uso de imagens SPOT-Vegetation, como parte do programa da União Européia para Monitoramento da Agricultura com uso de Sensoriamento Remoto (MARS, do inglês *Monitoring Agriculture with Remote Sensing*) para a estimativa de produção de matéria seca em aproximadamente 600.000 parcelas agrícolas na Bélgica, para diferente culturas, gerando por meio deste modelo, imagens em composições de dez dias, com o acúmulo de matéria-seca no período. Alguns pontos de controle demonstraram coeficientes de correlação (R^2) de cerca de 60%, 50% e 35% para trigo do inverno, beterraba para açúcar e milho forrageiro.

LIU et al. (2010) estudaram o uso de dados ópticos multi-temporais combinados ao modelo de eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa proposto por MONTEITH (1972) para estimar a produção de biomassa seca e produtividade de milho. O estudo desenvolvido em uma área na região de Ottawa, Canadá durante os anos de 2001 e 2006 durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Foram utilizados dados hiperespectrais e realizadas medições de crescimento da cultura, por métodos destrutivos e não-destrutivos. Os

dados hiperespectrais provenientes do *Compact Airbone Spectrographic Image* (CASI) em três períodos (13 de junho, 26 de junho e 19 de julho de 2001) e três passagens livres de nuvens do sensor ETM+ do Satélite Landsat7 (15 de junho, 17 de julho e 25 de agosto). Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de estações meteorológicas de superfície. Os dados espectrais foram utilizados para estimar a fAPAR tanto com os dados multiespectrais do sensor ETM+ quanto os dados hiperespectrais do sensor CASI, além de quantificar o índice de estresse hídrico usando as banda do NIR e do SWIR do sensor ETM+. O Estudo demonstrou que índices de vegetação calculados tanto a partir do sensor ETM+ quanto do CASI podem ser usados em complemento um ao outro, quando da necessidade de cálculo do fAPAR. A estimativa de acúmulo de biomassa seca foi linearmente relacionada com a cumulativa APAR com R^2 de 0,96 e RMSE = 133 g.

2.5.3 Radiação solar e Produtividade em Ecossistemas Tropicais

Em termos de termodinâmica, os ecossistemas são máquinas supridas com energia de um campo externo, geralmente o Sol. Quando a entrada de energia num ecossistema é exatamente igual ao total de saída de energia, o estado de equilíbrio que existe no sistema é um caso especial da Primeira Lei da Termodinâmica, sendo a Segunda Lei da Termodinâmica igualmente relevante. Dividindo a energia útil de um processo termodinâmico pela energia total envolvida tem-se a eficiência do processo, o qual tem sido amplamente utilizado para analisar o fluxo de energia nos ecossistemas. Por exemplo, a eficiência com que cada estágio da planta produz matéria seca pela fotossíntese pode ser definida como a relação da energia química armazenada na assimilação da energia radiante absorvida pelas folhas durante o período de assimilação (MONTEITH, 1972).

A eficiência (Ɛ) com que cada cultura ou comunidade natural produz matéria seca é definida como o valor líquido da radiação solar armazenada pela fotossíntese em cana período, dividido pela constante solar integrada pelo mesmo período, possibilitando que Ɛ seja expressa como produto de sete distintos fatores: Ɛg determinado pela geometria da Terra com relação ao Sol; Ɛa determinada pela transmissividade da atmosfera terrestre; Ɛs determinada pela composição espectral da radiação solar e das propriedades ópticas das folhas; Ɛq relacionada a quantidade de luz necessária ao processo fotossintético; Ɛi fração da radiação interceptada pelo dossel; Ɛd determinado pela taxa finita em que as moléculas de dióxido de carbono podem

difundir da atmosfera para a superfície das unidades fotossintéticas nas células verdes; Ɛr a fração assimulada e não usada para a respiração, podendo a eficiência de todo o sistema ser escrita pela equação 2.3.

(2.3)

$$Ɛ= Ɛ(g,r)= Ɛg \times Ɛa \times Ɛs \times Ɛq \times Ɛi \times Ɛd \times Ɛr$$

A eficiência de parte do sistema pode ser determinada multiplicando-se o grupo adequado de fatores consecutivos, e.g, segundo equação 2.4.

(2.4)

$$Ɛ= Ɛ(s,d)= Ɛs \times Ɛq \times Ɛi \times Ɛd$$

MONTEITH (1972), conclui que a eficiência com que cada planta armazena a radiação solar pode ser expressa como o produto de sete fatores que descrevem a produção de matéria seca em latitude e estação (Ɛc), na nebulosidade e conteúdo de aerossóis da atmosfera (Ɛa), na composição espectral da radiação (Ɛs); a necessidade quântica necessária para o processo fotoquímico (Ɛq), no índice de área foliar e disposição das folhas (Ɛi), na concentração de CO_2 no dossel e a difusão de folhas individuais (Ɛd), e da fração de assimilados usados na respiração (Ɛr).

Estimativas de produção de matéria seca para uma variedade de culturas agrícolas em desenvolvimento entre 14ºS e 43ºN concordam com medições feitas durante o estágio vegetativo de crescimento, mas superestimam a produção durante o crescimento reprodutivo, seja porque as taxas de fotossíntese são superestimadas ou porque taxas de respiração são subestimadas ou ambos. A relação com o crescimento vegetativo não é necessariamente peculiar a um determinado modelo de fotossíntese de dossel, mas provavelmente é comum a vários modelos (MONTEITH, 1972).

As principais limitações do modelo, usado para predizer o crescimento da cultura a partir de taxas de fotossíntese são: (i) a impossibilidade de avaliar a diminuição na concentração de CO_2 no dossel e a difusão das folhas individuais devido à idade das folhas é resultado principalmente de um aumento na resistência à difusão de CO_2 no tecido mesófilo ou de uma diminuição na concentração de enzimas carboxilatizantes; (ii) a impossibilidade de avaliar a maneira pela qual as taxas de respiração estão relacionadas com a taxa de fotossíntese

e contemporânea ao acúmulo de matéria seca no momento; e (iii) não prevê as formas que a partição de assimilados pode ser determinado por uma interação de fatores ambientais e controles endógenos. A necessidade de utilizar medidas em vez de previsões de índice de área foliar é uma fraqueza da maioria dos modelos.

Segundo SMEETS (2010), quando a cultura está saudável e água e nutrientes não são limitantes, a produção de matéria seca é proporcional a quantidade de luz interceptada pelo dossel. Diante disto, estimativas de produtividade da vegetação terrestre podem ser feitas pela combinação de imagens de Satélite com radiação solar e temperatura, usando a abordagem clássica de MONTEITH (1972). De acordo com essa abordagem, A produtividade de matéria seca (DMP, do inglês *Dry Matter Productivity*) em base diária pode ser formulada pela equação 2.5.

(2.5)

$$DMP1 = R1 \times 0{,}48 \times fAPAR \times Ɛ(T1) \times 10000$$

Sendo:

R1 → [J m^2 dia^{-1}] é a radiação solar global incidente;

0,48 → compostos pelo valor médio da Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa disponível - 48% da PAR (radiação fotossinteticamente ativa: 400 – 700 nm);

fAPAR → é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação verde;

Ɛ(T1) → é um termo de eficiência [kg MS MJ^{-1} PAR] que conta com a conversão desta energia absorvida pela biomassa (radiação usada com eficiência) e pela perda relativa do transporte da fotossíntese, a manutenção da permanência da fitomassa. A função Ɛ(T1) é simplificada e aproximada em função da temperatura diária T1. A função Ɛ(T1) é não-linear e em forma de sino: ele atinge um máximo a uma temperatura de 22ºC e se aproxima de zero para temperaturas abaixo de 0ºC e acima de 40ºC. O termo de eficiência Ɛ(T1) é função de duas componentes (Ɛ = Ɛ1 × Ɛ2): eficiência fotossintética Ɛ1 e respiração autotrófica Ɛ2. Onde Ɛ1 depende de T12 (dia) e Ɛ2 depende de T24 (dia + noite), que é geralmente mais baixo. Estes parâmetros são computados pelas equações 2.6 e 2.7, para T12 e T24, respectivamente.

(2.6)

$$T12 = Tmin + 0{,}75 \times (Tmax - Tmin)$$

(2.7)

$$T24 = 0{,}50 \times (Tmin + Tmax)$$

O fator 10000 [m^2 ha^{-1}] transforma o metro quadrado em hectares, que é uma unidade mais comum em estatísticas agrícolas.

É este, o modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972) que foi implementado e analisado durante este estudo quanto sua aplicação à estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar.

3. METODOLOGIA

3.1 Áreas de Estudo

Os experimentos propostos por este trabalho foram realizados em duas propriedades agrícolas, não contíguas e distantes uma da outra cerca de 45 km em linha reta, porém, com condições edafoclimáticas e de manejo da cultura similares. Ambas são atualmente exploradas comercialmente pela cultura canavieira, sendo fornecedoras de matéria-prima para a Usina Bonfim, unidade produtora e processadora de cana-de-açúcar localizada no município de Guariba, SP, distante cerca de 35 e 30 km, respectivamente das áreas de estudo denominadas "Área de Estudo nº 01" e "Área de Estudo nº 02".

A área de estudo nº 01 é uma gleba de terra localizada na coordenada 21º43'33" Sul e 48º13'35" Oeste, no município de Araraquara, próxima ao distrito de Bueno de Andrada. Já, a área de estudo nº 02, é uma gleba de terra localizada na coordenada 21º30'25" Sul e 48º34'24" Oeste, no município de Taquaritinga, próxima ao limite municipal deste com o município de Matão e ainda do distrito de São Lourenço do Turvo, ambas na região Centro-Oeste do Estado de São Paulo (Figura 5).

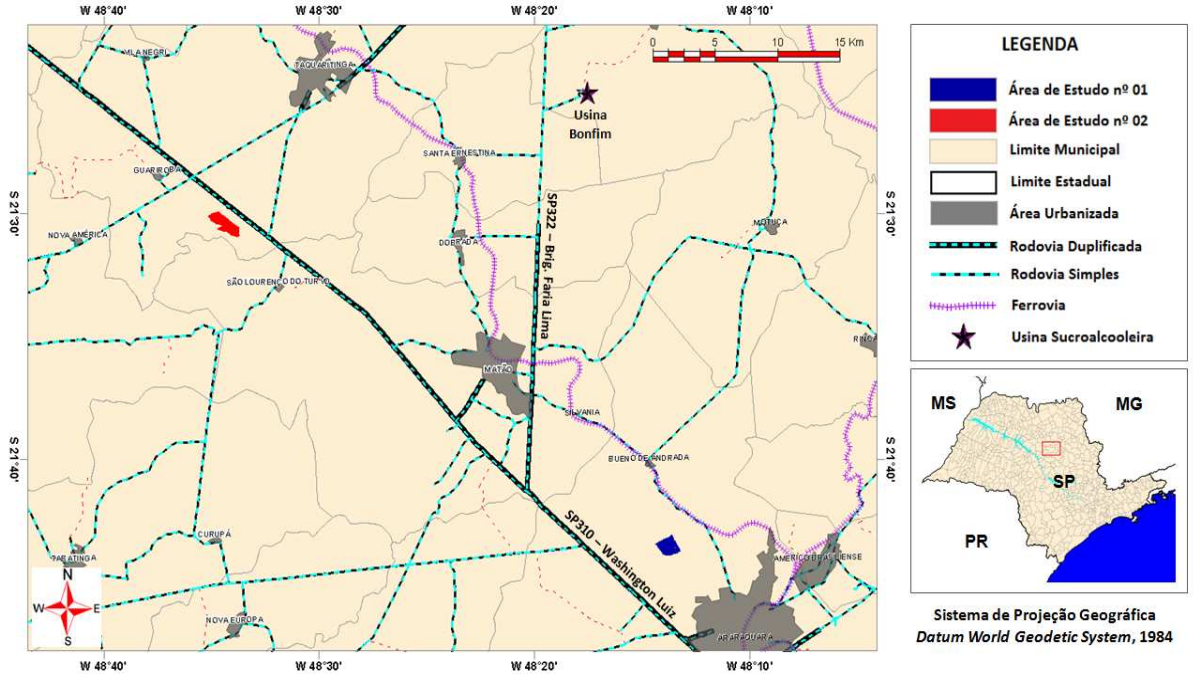


Figura 5. Localização das áreas de estudo nº 01 e nº 02.

As condições de homogeneidade das classes de solo e do manejo da cultura, as condições climáticas favoráveis (condições discutidas a seguir) para o cultivo da cana-de-açúcar, além da importância do cultivar plantado e da necessidade de áreas contíguas maiores que 150 hectares, necessária para a cobertura de cerca de 20 pixels do sensor MODIS por área de estudo contribuíram para a seleção destas áreas. Outro fato importante que contribuiu para a seleção das referidas áreas de estudo foi o fato da importância econômica do cultivar RB855156 tanto na região das áreas de estudo como nas demais regiões dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, conforme censo varietal elaborado e divulgado por UFSCAR (2011) e RAÍZEN (2011).

Com relação à produção da cana-de-açúcar nas áreas de estudo, cerca de 190 hectares da área de estudo nº 01 e cerca de 210 hectares da área de estudo nº 02 são cultivadas com o cultivar RB855156, com espaçamento de 1,50 m entre as linhas de plantio, seguindo manejo de colheita precoce, ou seja, colheita no início da Safra da cana-de-açúcar para a região Centro-Sul do país, entre os meses de abril e junho de cana ano. Os experimentos foram conduzidos durante as fases de desenvolvimento vegetativo do 3º ciclo de colheita, entre Maio/2011 e Junho/2012. Ambas foram colhidas mecanicamente sem o uso de fogo para despalhamento da cana-de-açúcar, tanto na Safra 2012/2013 (3º Corte), quando dos dois ciclos anteriores, Safra 2011/2012 (2º Corte) e Safra 2010/2011 (1º Corte). Nestas áreas, a adubação e controle de plantas daninhas, são realizadas quimicamente e não há uso de irrigação ou fertirrigação.

A área de estudo nº 01 possui duas classes de solos, tendo na parte mais elevada a presença de solos da classe dos Latossolos Vermelho-Amarelo, com textura média-argilosa (25 a 35% argila) e fertilidade subsuperficial distrófica (saturação de bases inferior a 50% em todo o perfil, porém, não álico) (LVA3-3) e na parte inferior, a presença de solos da classe dos Latossolos Vermelho-Amarelo, com textura média-arenosa (15 a 25% de argila) e fertilidade subsuperficial distrófica (LVA4-3).

Já a área de estudo nº 02 apresenta quase em sua totalidade, a presença de solos da classe dos Latossolos Vermelho-Amarelo, textura média-argilosa e fertilidade subsuperficial álica (saturação com alumínio superior a 50% em todo o perfil) associado aos solos da classe dos Latossolos Vermelho Amarelo, com textura média-arenosa e fertilidade subsuperficial distrófica (LVA3-4 + LVA3-3). Apenas em parte de dois dos pixels selecionados para estudo,

há a presença de solos da classe dos Latossolos Vermelho-Amarelo, textura média-arenosa e fertilidade subsuperficial álica (LVA4-4).

Apesar das diferenças dos padrões texturais dos solos (média-arenosa e média-argilosa) e das condições de fertilidade subsuperficial (distrófica e álica) encontrados tanto na área de estudo nº 01 quanto na área de estudo nº 02, os solos apresentam formação e coloração semelhantes, o que não deve interferir na resposta espectral das imagens de Satélite a serem utilizadas neste estudo.

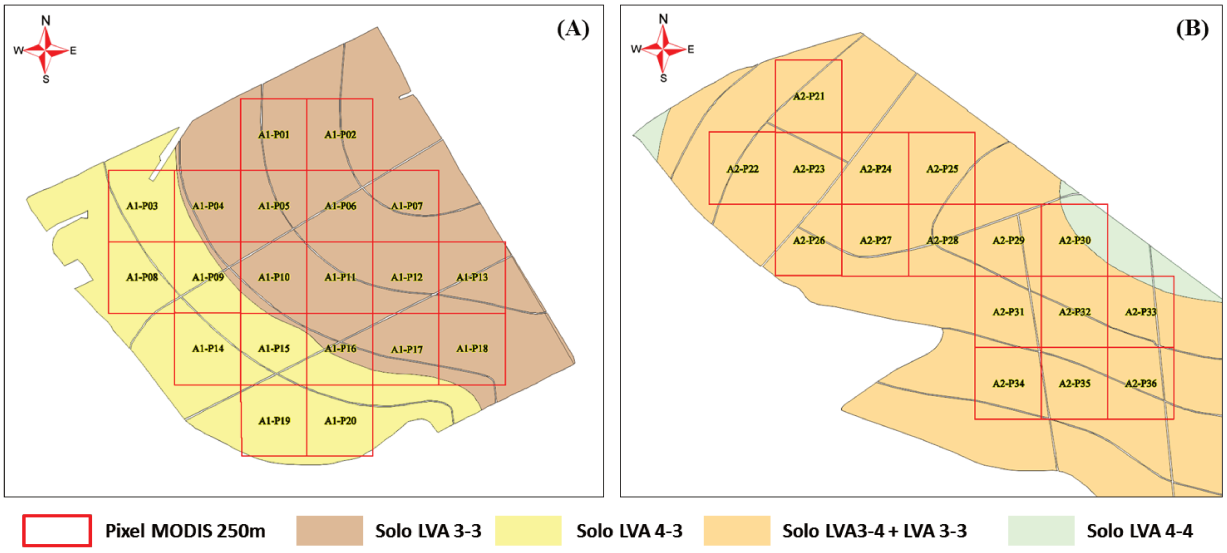


Figura 6. Mapa com a classificação de solos semi-detalhada para as áreas de estudo nº 01 (A) e área de estudo nº 02 (B).

Com relação à declividade e relevo, a área de estudo nº 01 é formada em 96% de sua área por declividades inferiores a 8%, apresentando declividade média de 4,75%, com mínima em 0,7% e máxima em 14%. O relevo predominante é o Suave Ondulado (3 a 8%), em 87% de sua área, além de 8,5% de relevo Plano (0 a 3%). Já a área de estudo nº 02 é formada em 98% de sua área por declividade inferior a 8%, apresentando declividade média de 3,65%, com mínima em 0,6% e máxima em 9,9%. O relevo predominante é o Suave Ondulado (3 a 8%), em 63% de sua área, além de 35% de relevo Plano (0 a 3%).

Os mapas de relevo, com resolução espacial de 20m, para as áreas de estudo nº 01 e área de estudo nº 02 (Figura 7), gerados a partir do modelo digital de terreno obtido pela digitalização das curvas de nível com equidistância de 5m, produzidas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC).

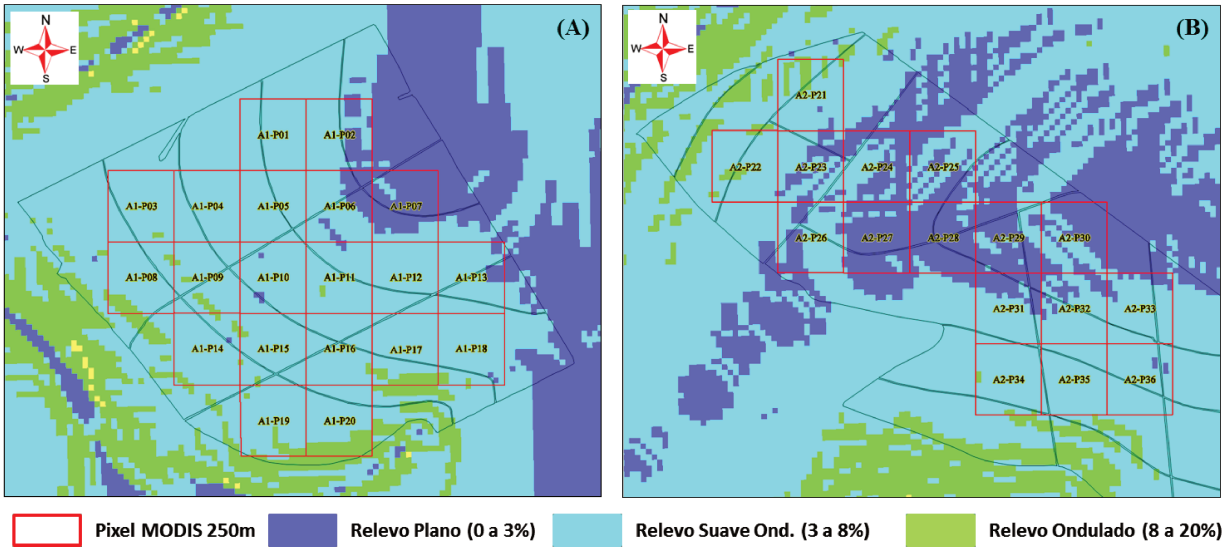


Figura 7. Mapa de relevo das áreas de estudo nº 01 (A) e área de estudo nº 02 (B)

As condições climáticas da região onde estão localizadas as áreas de estudo são representadas a partir dos dados coletados da estação meteorológica localizada no campus da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (FCAV-UNESP) em Jaboticabal, sendo que para a os valores médios anuais apresentados a seguir, utilizou-se o período de 1977 a 2007 para caracterização da normal climatológica.

A pluviometria para a região apresenta um regime de chuva bem característico, apresentando variação sazonal com verão chuvoso e inverno seco, com acúmulo pluviométrico médio anual de 1.418 mm, sendo que 74% deste são acumulados entre os meses de novembro e março. Durante o período dos experimentos (Maio/2011 a Junho/2012), a precipitação pluviométrica acumulada na região foi de 1.232 mm (18% menor que a média da normal climatológica para o mesmo período). O Gráfico 2 apresenta a distribuição pluviométrica mensal para a região segundo a média normal climatológica e a distribuição pluviométrica mensal ocorrida durante o período dos experimentos.

A umidade relativa do ar (UR) na região varia de 58% em agosto a 80% em janeiro, segundo a normal climatológica. Já para o período dos experimentos, a UR variou de 52% em agosto de 2011 a 90% em janeiro de 2012.

Em função de sua latitude média, a região não apresenta variações muito expressivas de seu fotoperíodo, com valores oscilando de 10,7 a 13,3 ao longo do ano.

A insolação não apresenta a mesma variação que o fotoperíodo, apresentando valores maiores no outono e inverno e menores primavera e verão, principalmente pela dependência das condições de nebulosidade em cada período. A variação média é em torno de 6,1 h em janeiro e 8,0 h em agosto.

A radiação solar global obedece ao padrão esperado para a região, com valores máximos na primavera e verão, em torno de 23 MJ m^{-2} d^{-1}, e valores mínimos no outono e inverno, em torno de 14,9 MJ m^{-2} d^{-1}.

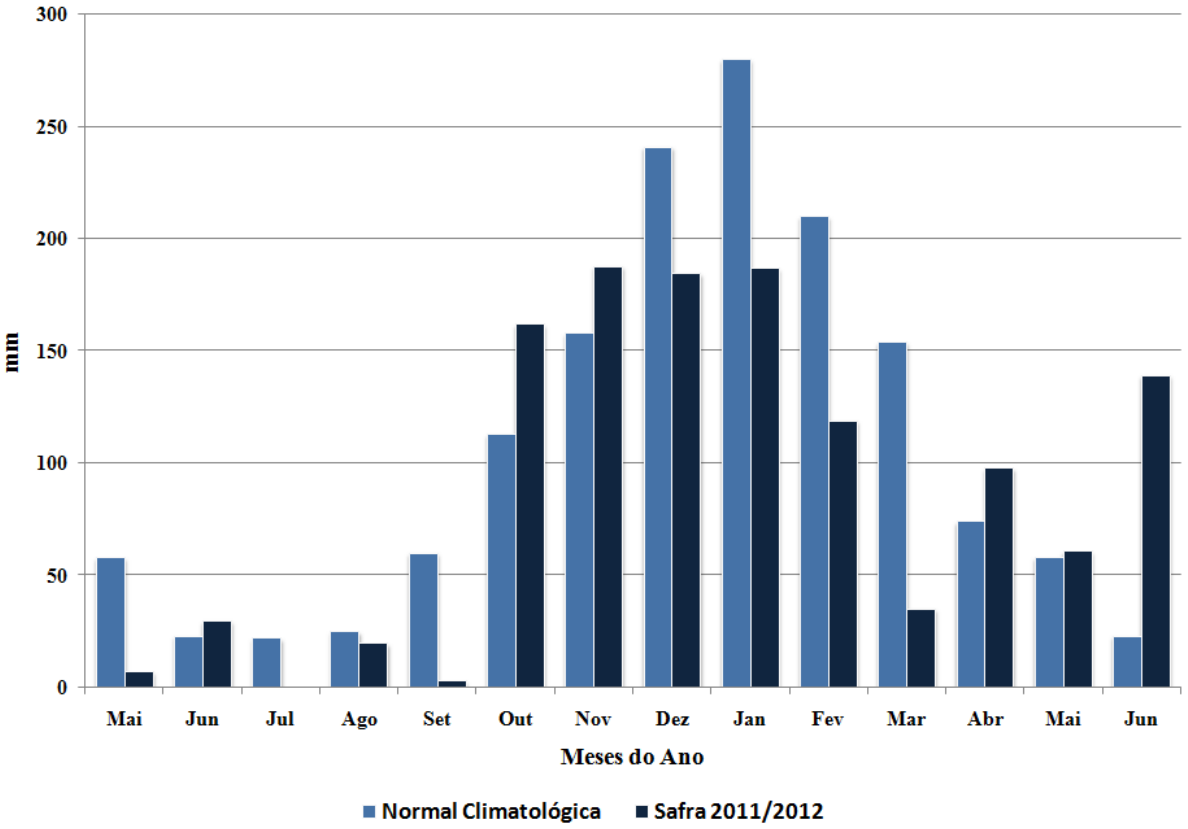


Gráfico 2. Distribuição pluviométrica para a região de Jaboticabal, SP.

As temperaturas na região apresentam variação sazonal durante o ano, com temperaturas maiores na primavera e verão e menores no outono e inverno. As temperaturas máximas variam de 26,3ºC e 30,7ºC, enquanto as médias variam de 19,6ºC e 25,3ºC e as mínimas entre 12,7ºC e 20,0ºC. Os meses mais quentes são entre outubro e março, com temperaturas médias superiores a 24ºC.

As tabelas 3 e 4, a seguir, apresentam os valores médios mensais para Pluviometria (mm mês^{-1}), Umidade Relativa do Ar (AR), Temperaturas Mínima, Média e Máxima, Insolação (n), Fotoperíodo (N) e Radiação Solar Global (Qg MJ m^{-2} d^{-1}), respectivamente para a normal climatológica (1977-2007) e para o período do experimento (Maio/2011 a Junho/2012) da região de Jaboticabal, SP.

Tabela 3. Dados climatológicos – Normal Climatológica para região de Jaboticabal, SP.

Mês	Chuva	UR	T Mín	T Méd	T Máx	n	N	Qg
	mm	%	º C	º C	º C	(h dia^{-1})	(h dia^{-1})	MJ m^{-2} d^{-1}
Jan	280	80	20,0	25,0	30,0	6,1	13,1	21,3
Fev	210	78	19,8	25,3	30,7	6,9	12,7	22,0
Mar	154	78	19,2	24,9	30,5	7,0	12,1	20,5
Abr	74	75	17,5	23,4	29,4	7,8	11,5	19,1
Mai	58	74	14,6	20,7	26,8	7,3	11,0	15,9
Jun	23	71	13,0	19,6	26,3	7,5	10,7	14,9
Jul	22	65	12,7	19,7	26,8	8,0	10,8	16,1
Ago	25	58	14,1	21,5	29,0	8,0	11,3	18,3
Set	60	61	16,2	23,0	29,8	6,9	11,9	19,4
Out	113	64	18,2	24,7	31,2	7,3	12,5	22,0
Nov	158	70	18,9	24,8	30,6	7,3	13,0	23,0
Dez	241	77	19,6	24,8	30,1	6,3	13,3	21,9

Tabela 4. Dados climatológicos – Safra 2011/2012 para região de Jaboticabal, SP.

Mês	Chuva	UR	T Mín	T Méd	T Máx	n	N	Qg
	mm	%	º C	º C	º C	(h dia^{-1})	(h dia^{-1})	MJ m^{-2} d^{-1}
Mai/11	7	67	13,6	19,6	27,1	8,0	11,0	15,0
Jun/11	30	64	11,7	18,0	25,8	8,5	10,7	14,2
Jul/11	0	57	13,8	20,4	28,0	8,2	10,9	14,5
Ago/11	20	52	14,5	21,8	29,8	8,2	11,3	16,4
Set/11	3	46	15,0	23,2	31,9	9,2	11,9	20,7
Out/11	162	67	17,9	23,1	29,4	7,2	12,5	18,4

Nov/11	188	64	17,1	23,0	29,5	7,3	13,0	21,8
Dez/11	185	72	18,8	23,8	30,2	7,0	13,3	21,6
Jan/12	187	80	18,7	22,4	28,5	5,3	13,1	18,6
Fev/12	119	69	19,3	24,7	31,3	6,6	12,7	20,4
Mar/12	35	70	18,8	24,0	30,7	6,9	12,1	19,2
Abr/12	98	72	18,0	23,1	29,7	6,4	11,5	15,6
Mai/12	61	73	14,2	19,2	25,6	7,2	11,0	13,2
Jun/12	139	76	14,9	19,5	25,5	5,9	10,7	11,6

O extrato de balanço hídrico histórico, calculado pelo método Thornthwaite e Mather (1955), utilizando o método de evapotranspiração por Thornthwaite (1948), e capacidade de campo de 62,5 mm, adequada aos Latossolos Vermelho-Amarelo, texturas média-arenosa e média-argilosa, conforme indicado por PRADO (2013), em escala decendial, mostra que os excedentes hídricos em média predominam de dezembro a março, totalizando 404 mm, enquanto que as deficiências hídricas têm maior predominância de abril a novembro, com 479 mm. Durante o período do experimento, foram registrados excedentes hídricos em 499 mm acumulados entre o 1º decêndio de outubro de 2011 e o 3º decêndio de janeiro de 2012 e déficits hídricos em 670 mm, acumulados entre o 3º decêndio de abril e o 3º decêndio de setembro de 2011, excedente hídrico este considerado normal para o período e região. Nota-se a ocorrência de um período de veranico iniciado em fevereiro e recorrente até o final de abril 2012 seguido por um período de excedente hídrico entre maio e junho do mesmo ano, o que é um evento incomum para esta época do ano na região.

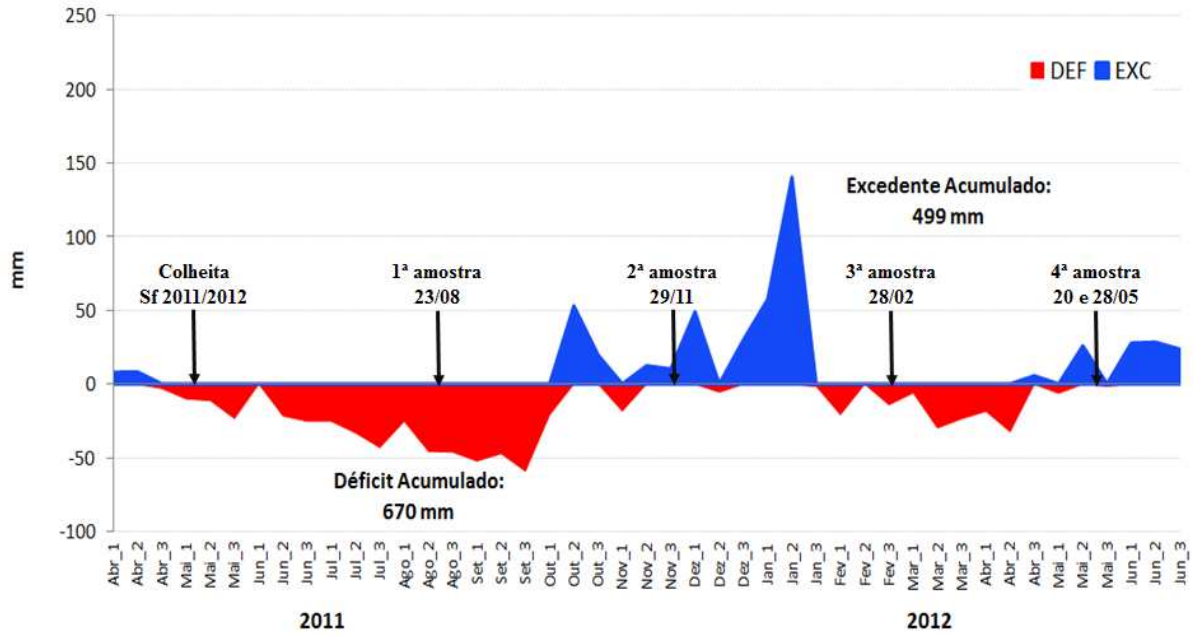


Figura 8. Extrato do balanço hídrico para as áreas de estudo na Safra 2011/2012.

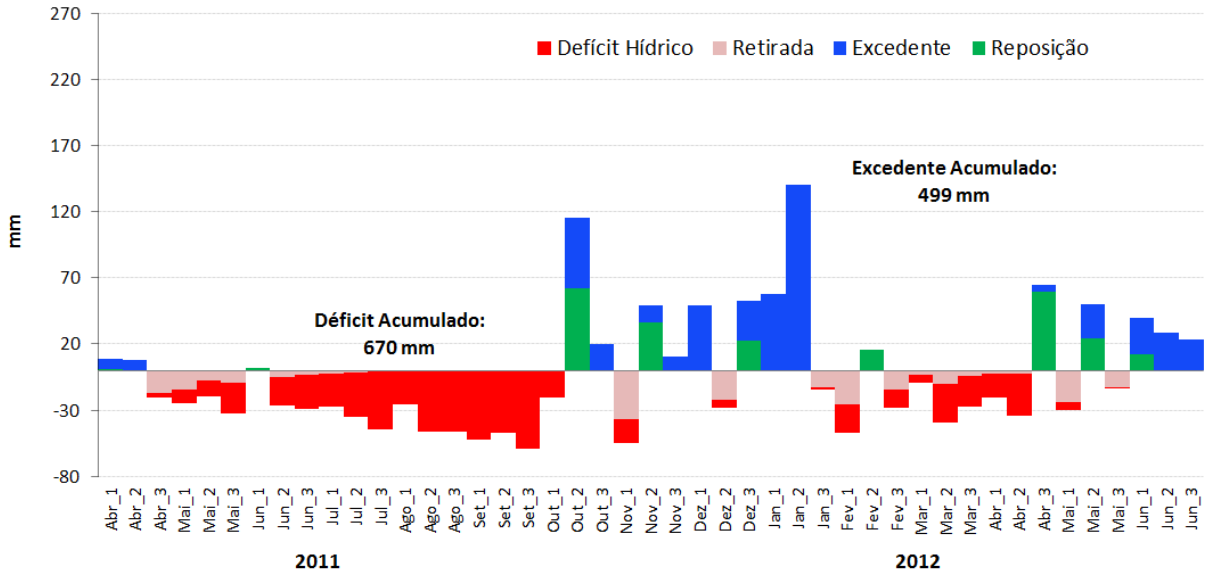


Figura 9. Balanço hídrico sequencial para as áreas de estudo na Safra 2011/2012.

3.2 Fluxograma do trabalho

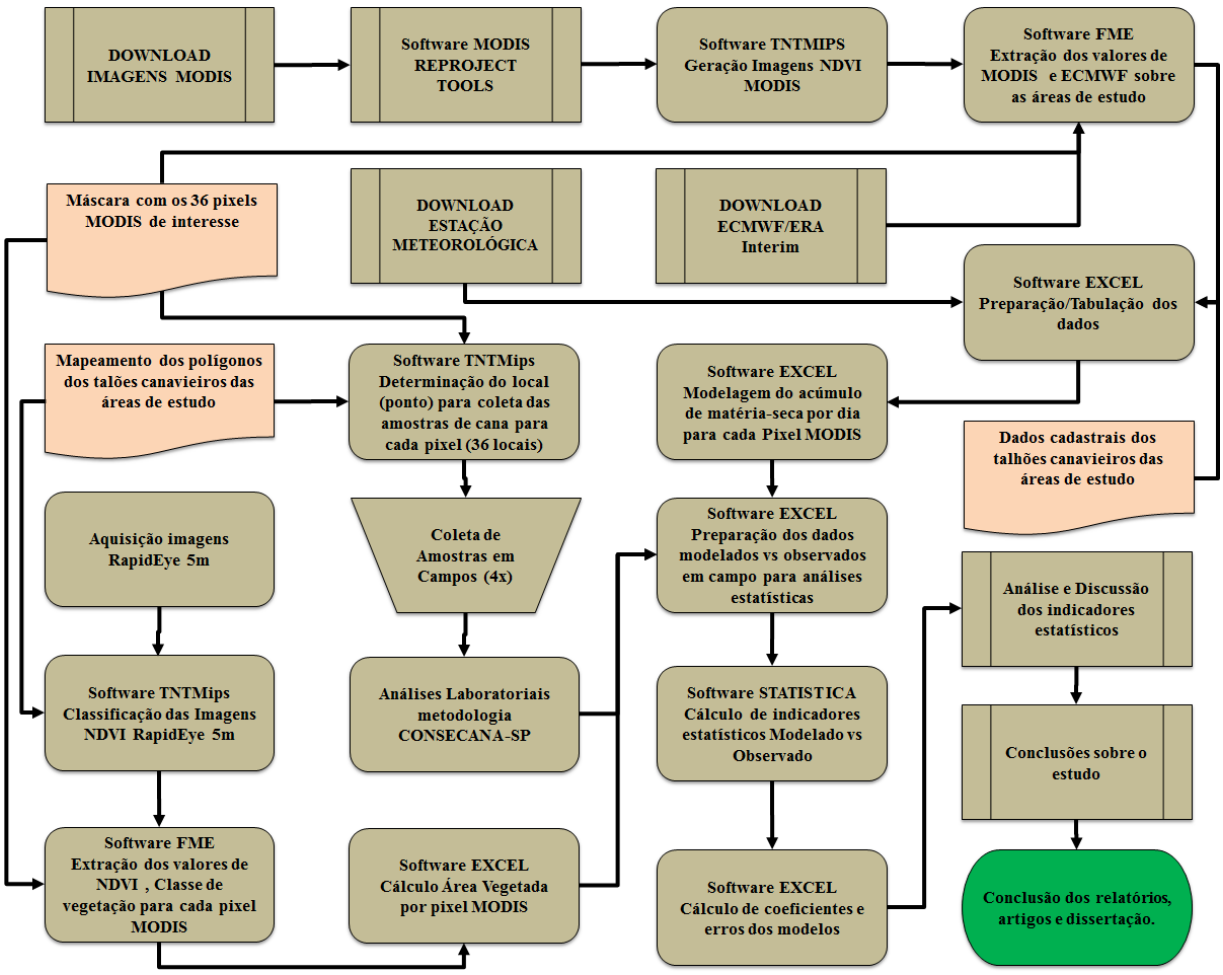


Figura 10. Fluxograma simplificado das entradas e processos necessários para a realização deste estudo.

No anexo 1, consta o fluxograma detalhado sobre as entradas e processos utilizados.

3.3 Delineamento amostral

O delineamento amostral é mais que testes ou série de testes, incluindo também o reconhecimento dos problemas, planejamento do experimento e seleção de fatores, no qual há mudanças nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, tal qual é possível observar e identificar razões para mudanças na variável resposta.

Os experimentos deste estudo foram desenvolvidos em uma área de plantio de cana-de-açúcar comercial, ou seja, áreas em condições normais de produção e manejo, onde não é possível controlar algumas das variáveis que podem alterar os resultados de produção da área, porém, podendo ser considerada como ideal para avaliação da eficácia do uso do modelo proposto neste estudo em condições de campo.

Para a condução do experimento foi selecionada a área de trinta e seis pixels de 250 m por 250 m das imagens de índice de vegetação obtidos pelo sensor MODIS, sendo vinte pixels sobre a área de estudo nº 01 e dezesseis pixels sobre a área de estudo nº 02, nas quais foram coletadas amostras pelo método destrutivo da cultura, ou seja, com retirada de matéria, em quatro períodos durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, aproximadamente aos 90, 180, 270 e 360 dias após o início do ciclo.

Foram considerados na seleção dos pixels, apenas aqueles puros, ou seja, pixels sem mistura espectral com outras espécies vegetais e apenas cultivado com o cultivar selecionado para este estudo, cuja distribuição sobre as áreas de estudo são ilustradas na Figura 11.

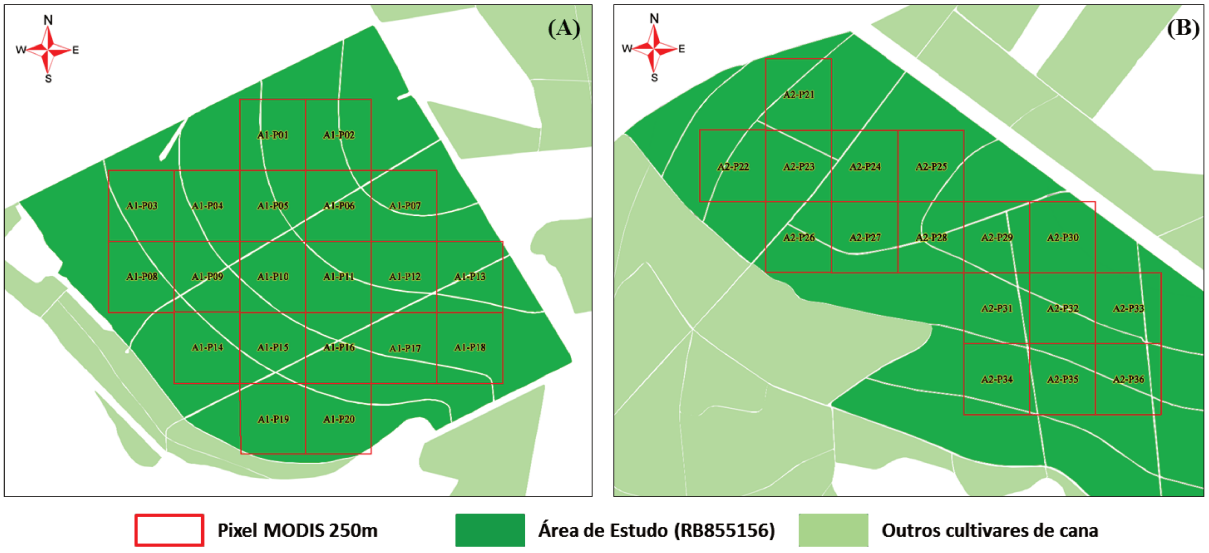


Figura 11. Localização dos pixels selecionados que recobrem as áreas de estudo nº 01 (A) e a área de estudo nº 02 (B).

A fim de facilitar a identificação e controle dos dados sobre as áreas de estudo, cada um dos trinta e seis pixels MODIS selecionados foram codificados sistematicamente. Desta forma, os dois algarismos iniciais dos códigos identificam se o pixel pertence à área de estudo nº 01 (A1) ou se pertence à área de estudo nº 02 (A2). Posteriormente, foram numerados

continuamente, de 01 a 36, sendo que os pixels de 01 a 20 pertencem à área de estudo nº 01 (A1-P01 a A1-P20) e os pixels de 21 a 36 pertencem à área de estudo nº 02 (A2-P21 a A2-P36).

3.4 Coleta de amostras em campo

Após a definição dos pixels a serem utilizados neste estudo, procedeu-se para a predefinição dos locais para coleta das amostras em campo.

Utilizando o software TNTMips Pro 2011, desenvolvido comercialmente pela empresa norte-americana MicroImages Inc, procedeu-se com o processamento digital de uma cena do Satélite Landsat 5, sensor *Thematic Mapping* (*TM*), do dia 19 de novembro de 2010, cena esta da Órbita 220 Ponto 075, a qual foi submetida ao processo de correção geométrica utilizando como referência para o georreferenciamento um mosaico de levantamentos diferenciais dos talhões de cana-de-açúcar na região das áreas de estudo. Posteriormente, foi gerada uma imagem de NDVI utilizando duas bandas da referida cena (bandas 3 – RED e 4 – NIR), a qual foi utilizada para verificar a variabilidade espacial do canavial sobre as áreas de estudo aproximadamente aos seis meses de idade do ciclo anterior.

A utilização de uma imagem de NDVI aproximadamente aos seis meses de idade do canavial no ciclo anterior (2010/2011) se deu em virtude do planejamento da coleta da primeira amostra nas áreas de estudo por volta dos noventa dias do ciclo analisado (2011/2012), momento em que não era possível verificar a variabilidade espacial do canavial devido à nova brotação ainda não estar fechada, ou seja, apresentando mais resposta do solo exposto e da palha proveniente da colheita mecanizada do que da própria cultura.

Ainda utilizando o software TNTMips Pro 2011 foram criados aleatoriamente em cada um dos trinta e seis pixels de interesse, um ponto (coordenada), a qual foi sobreposta a imagem de NDVI ora gerada e mediante análise visual, foram validados os pontos representativos da vegetação presente em cada um dos pixels.

Devido à imagem do Satélite Landsat5 ter sido utilizada apenas para análise visual da variabilidade do canavial na data da cena, não tendo sido extraído valores para comparação com outras imagens ou períodos, o NDVI foi gerado a partir da imagem em níveis de cinza, não tendo sido aplicado a esta nenhum tipo de processamento para correção atmosférica.

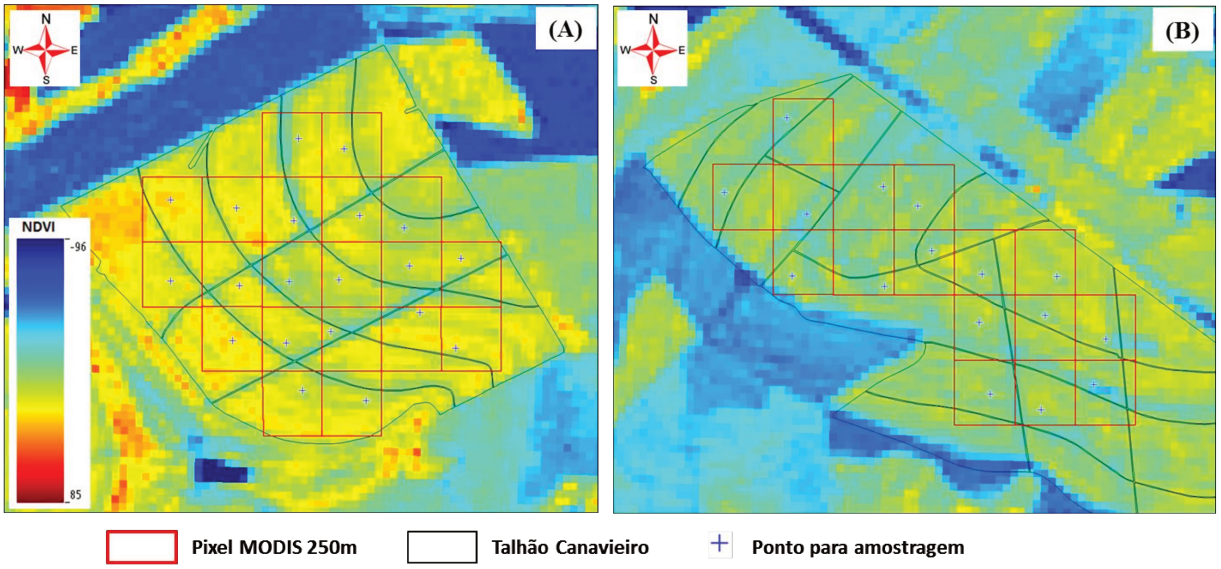


Figura 12. Distribuição dos pontos de coleta de amostra em campo sobre os pixels MODIS e a imagem de NDVI do Satélite Landsat5, cena de 19/11/2010.

Depois de predefinidos os locais para coleta das amostragens em campo, tanto os perímetros dos pixels a serem analisados quanto os pontos para coleta das amostragens foram exportados para arquivos em formato shapefile, os quais foram inseridos em um dispositivo GPS portátil da marca Trimble, modelo Juno SB, a fim de orientar a equipe na localização dos pontos predefinidos durante o processo de coleta das amostras. Os locais predefinidos apenas seriam alterados no ato das coletas caso as coordenadas estivessem próximas às curvas de nível plantadas, devendo ser coletadas dentro do mesmo perímetro distanciando cerca de 20 m das referidas curvas, caso houvesse necessidade. Este procedimento foi adotado durante as quatro amostragens realizadas em cada área, sendo que em todas elas, foram utilizadas o mesmo dispositivo GPS portátil para navegação até os pontos para coleta e também para o registro da exata localização dos locais onde foram coletadas as amostras.

As coletas das amostras em campo foram realizadas com apoio da equipe do departamento de desenvolvimento agronômico da Usina Bonfim, sendo que para cada uma das amostras e períodos, foram coletadas, por métodos destrutivos, ou seja, com corte do material vegetativo todas as plantas localizadas dentro de um metro próximo ao local predefinido, em média de dez canas por metro. Foram coletadas e submetidas à análise toda a cana existente

no espaço, incluindo colmos, palmitos, folhas secas, folhas em senescência e folhas verdes (cana integral).

Tabela 5. Períodos de coleta de amostras e idade do canavial em cada período.

Área de Estudo	1ª Amostragem		2ª Amostragem		3ª Amostragem		4ª Amostragem	
	Data da Coleta	Idade do Canavial	Data da Coleta	Idade do Canavial	Data da Coleta	Idade do Canavial	Data da Coleta	Idade do Canavial
Área 01	23/08/2011	101 dias	29/11/2011	199 dias	28/02/2012	290 dias	28/05/2012	380 dias
Área 02	23/08/2011	112 dias	29/11/2011	210 dias	29/02/2012	302 dias	10/05/2012	383 dias

3.5 Análises laboratoriais para mensuração da matéria-seca da cana-de-açúcar

Sob os aspectos tecnológicos da cana-de-açúcar, a planta é constituída pelos sólidos insolúveis em água, representado pela fibra da cana, e pelo caldo, que contém os sólidos solúveis totais, que correspondem aos açúcares e não-açúcares, representado pelo Brix, e a umidade, representada pela água, os quais somados devem sempre resultar em cem (FERNANDES, 2003).

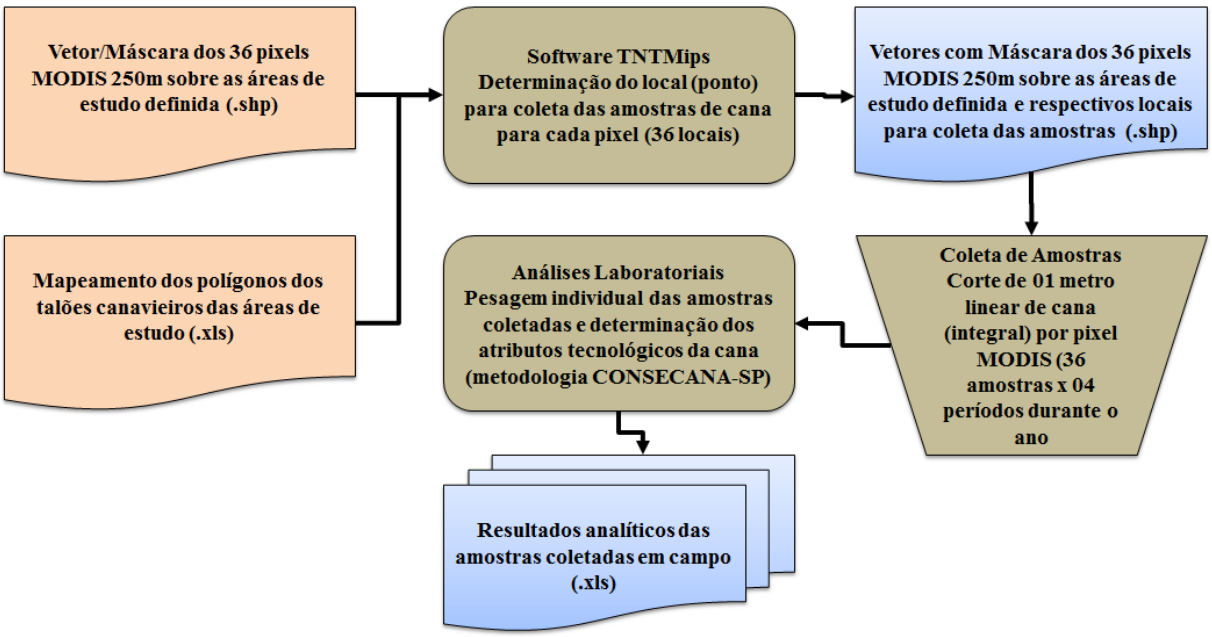


Figura 13. Fluxograma do processo de coleta e análise de amostras em campo.

Após a coleta das amostras em campo, as amostras foram imediatamente pesadas individualmente e seus respectivos pesos anotados como o peso total em quilogramas (kg).

Este posteriormente seria utilizado como referência para a extrapolação do peso total de cana-de-açúcar para a área de cada pixel analisado.

Após pesadas, as amostras foram enviadas ao laboratório industrial da Usina Bonfim, onde foram individualmente submetidas às analises tecnológicas laboratoriais segundo o método da prensa hidráulica, referenciado no Manual de Instruções do Sistema Consecana – SP (CONSECANA, 2006 e FERNANDES, 2003).

A quantidade de matéria seca (percentual) de cada amostra foi obtida por meio de equação linear em função do Peso do Bolo Úmido (PBU), conforme equação 3.1.

(3.1)

$$Fpcts = (0{,}08 \times PBU + 0{,}876)$$

Este fator percentual aplicado ao peso total da cana amostrada forneceu o peso em quilogramas de matéria seca por amostra.

3.6 Aquisição e processamento das imagens do sensor MODIS

Uma das variáveis de entrada necessárias para aplicação do modelo agrometeorológico-espectral, avaliado neste estudo é a fAPAR, a qual tem relação linear com os índices de vegetação, desta forma, podendo ser obtida por meio dos índices de vegetação calculados a partir de imagens de sensoriamento remoto. No caso deste estudo, a fAPAR foi obtida por meio dos índices de vegetação calculados a partir das imagens do sensor MODIS, presentes nos Satélites Aqua e Terra.

Para o cálculo dos índices de vegetação foram utilizadas as imagens de refletância de superfície para as bandas do vermelho (620-670 nm) e infravermelho próximo (841-876 nm), com resolução espacial de 250 m e resolução radiométrica de 16 bits, em composição de oito dias (valor do pixel correspondente terá melhor observação para aquele pixel no período de oito dias), com processamento nível 3 (correções atmosféricas, radiométricas e geométricas), correspondentes aos produtos MOD09Q1 (*MODIS Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250 m*) e MYD09Q1 (*MODIS Aqua Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250 m*), os quais são gratuitamente disponibilizados para download pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em raster no formato digital HDF e em projeção sinusoidal, a partir do site <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09q1>. Sendo que, para a

execução deste estudo foram feitos os downloads das imagens da quadrícula h13v11 (recobrindo o Estado de São Paulo) no período compreendido entre 27/12/2010 a 03/07/2012.

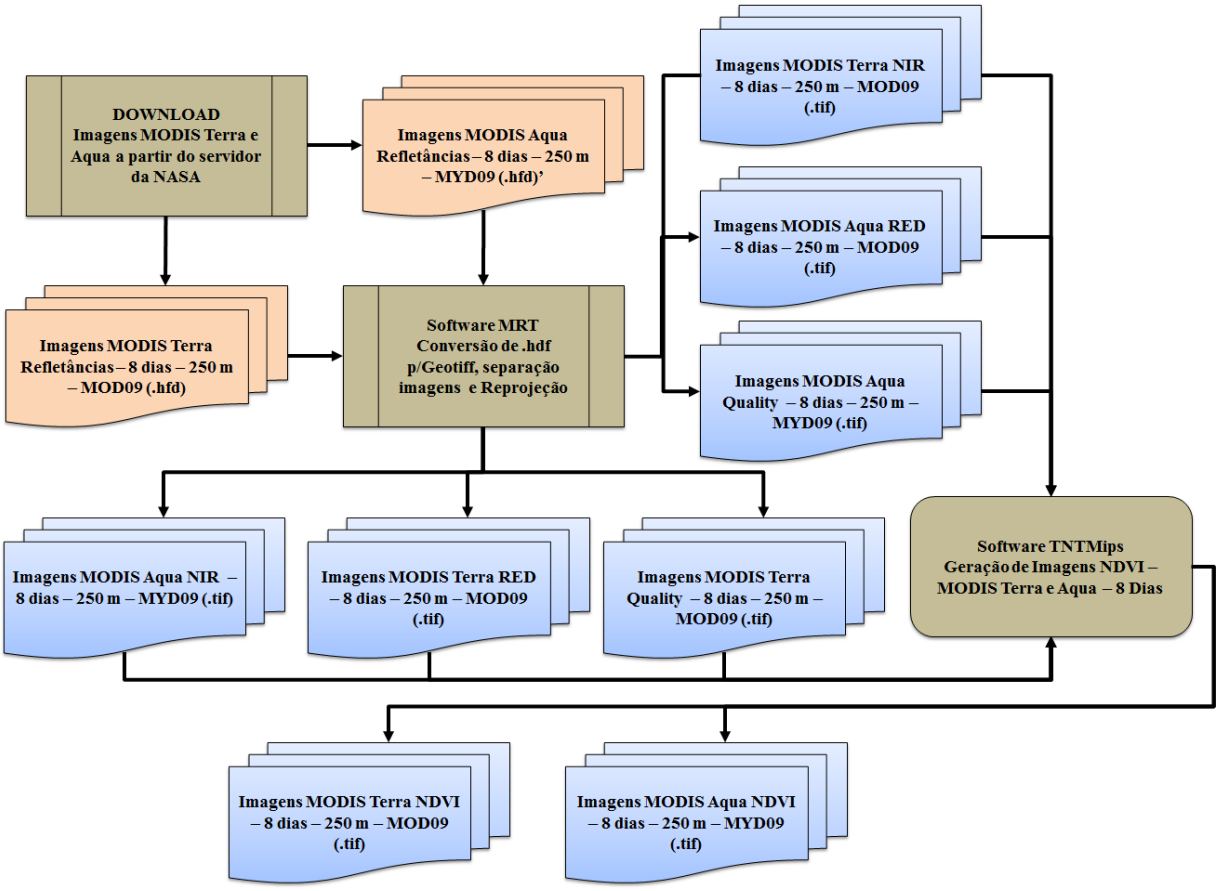


Figura 14 Fluxograma do processamento de imagens MODIS utilizando os softwares MRT e TNTMips para geração de imagens de NDVI.

A opção pela utilização dos dados tanto do Satélite Aqua quanto do Satélite Terra se fizeram necessários, uma vez que ambos circulam síncronos em suas órbitas, porém, com horários de revisita diferentes, sendo que o Satélite Aqua adquire suas imagens as 13:30h e o Satélite Terra às 10:30h, momentos em que a incidência de radiação são diferentes em cada período.

O primeiro passo para o processamento das imagens MODIS foi a conversão do formato digital HDF para o formato digital Geotiff (TIF), na sequencia realizou-se a reprojeção destas imagens, do sistema de projeção sinusoidal para o sistema de projeção geográfica, processamento este realizado a partir da utilização do aplicativo MODIS Reprojection Tools (MRT) versão 4.1 (Abril, 2011), também disponibilizado gratuitamente

pela NASA. Durante este processamento para cada uma das imagens HDF processadas a saída gerou três novas imagens em formato Geotiff, sendo uma da refletância de superfície da banda do vermelho, uma da refletância de superfície da banda do infravermelho próximo e a última com flags de controle de qualidade, sendo esta última utilizada para a eliminação de pixels considerados impróprios para uso (cobertura de nuvens, ruídos, baixa elevação do sensor, etc).

O passo seguinte foi a importação das imagens de refletância de superfície das bandas do vermelho e do infravermelho próximo no software TNTMips Pro 2011, onde uma a uma, foram geradas as imagens de NDVI, segundo a equação 2.1 proposta por ROUSE et al.(1973). Na sequência, cada uma das imagens de NDVI, tanto as do Satélite Aqua quanto do Satélite Terra, foram exportadas novamente para o formato Geotiff.

Posteriormente à geração das imagens de NDVI em formato Geotiff, utilizando o software FME Desktop 2012, produzido pela Safe Software, foi construído um algoritmo (fluxo) para extração dos valores de cada pixel das imagens de NDVI e também das imagens com os *flags* de controle de qualidade para cada um dos trinta e seis pixels de interesse deste estudo, por meio do cruzamento espacial com uma máscara vetorial, em formato *shapefile*, com os limites destes pixels. Como saída deste processo, obteve-se uma planilha em formato MS Excel, com os valores de NDVI e controle de qualidade de ambos os Satélites Aqua e Terra, ordenados por sua data de imageamento. Já utilizando o software Excel 2010, da Microsoft, foi construída uma fórmula para identificar os pixels que possuíam *flags* de controle de qualidade indesejados e substituir os valores de NDVI destes pelo valor médio de NDVI entre a data anterior e a data posterior a do pixel com má qualidade. Na sequência, foi calculado para cada data, o valor de NDVI médio entre o valor de NDVI do Satélite Aqua e o valor de NDVI do Satélite Terra, assim como outra coluna com o valor de NDVI máximo entre os valores de NDVI de ambos os Satélites. Ao final, obteve-se uma planilha com os valores de NDVI Aqua, NDVI Terra, NDVI Médio e NDVI Máximo para cada data (composição de oito dias).

O passo seguinte foi o cálculo do valor de fAPAR para cada data e valor de NDVI, utilizando-se da equação 2.2, proposta por ASRAR et al.(1984), acrescentando assim, na planilha, quatro novos campos, fAPAR Aqua, fAPAR Terra, fAPAR Médio e fAPAR

Máximo. Estes valores de fAPAR foram os produtos finais do processamento das imagens MODIS e foram os valores de entrada nas modelagens avaliadas neste estudo.

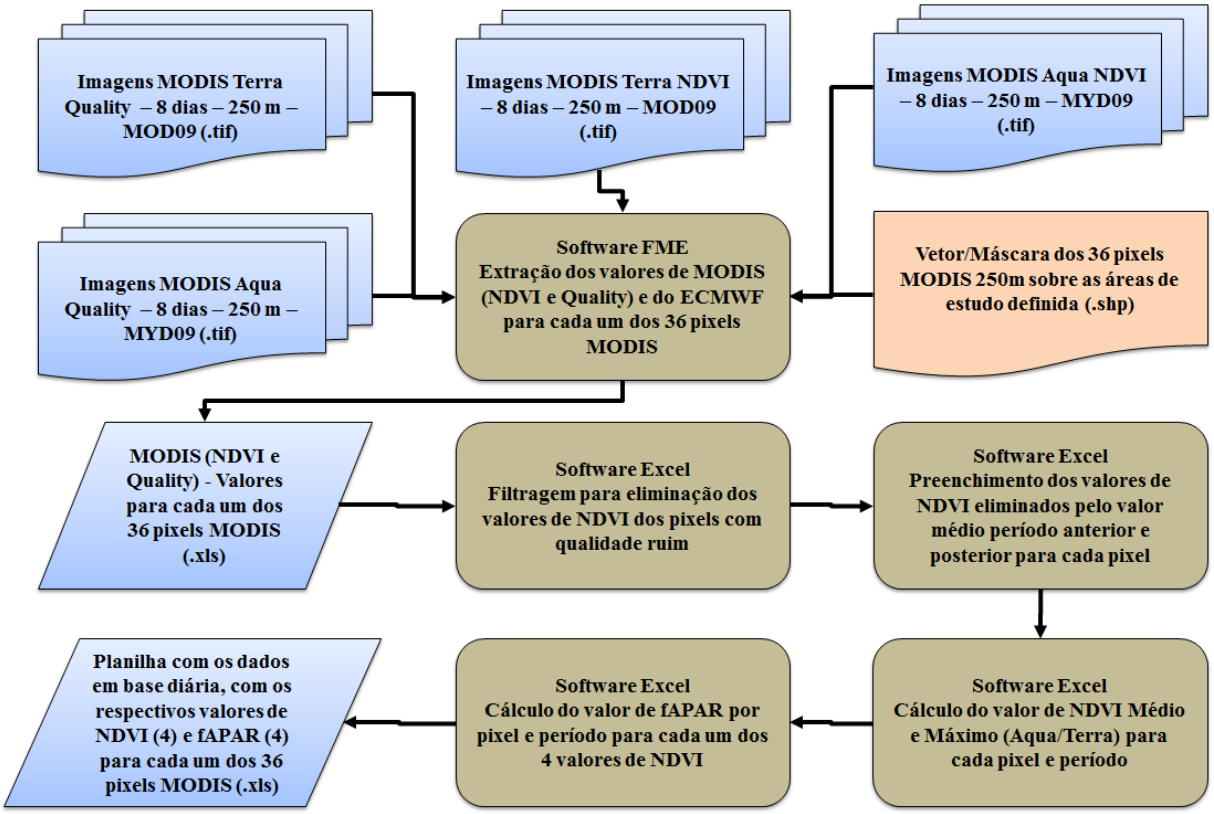


Figura 15. Fluxograma do processo de extração dos valores de NDVI por pixel até o calculo dos valores de fAPAR.

3.7 Aquisição e processamento dos dados ECMWF/ERA Interim

Outras importantes variáveis de entrada no modelo agrometeorológico-espectral avaliado são as medições meteorológicas de radiação solar global, ou radiação de ondas curtas, e as temperaturas de superfície mínima e máxima.

Estas e outras variáveis meteorológicas são sistematicamente geradas pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo (ECMWF, do inglês *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) dentro do projeto ERA-Interim e disponibilizados em médias decendiais e espacializados em arquivos vetoriais, no formato shapefile, em forma de grid de pontos, distantes um do outro em 0,25º de arco para todo o globo terrestre, sendo que neste estudo foram utilizados dois pontos, um para cada área de estudo.

A distribuição pública e gratuita destes dados é realizada pelo site <http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/datadownload/index.php>, a partir do qual podem ser realizados os downloads dos arquivos com os dados do ECMWF/ERA Interim, em formato shapefile, com os dados em médias decendiais.

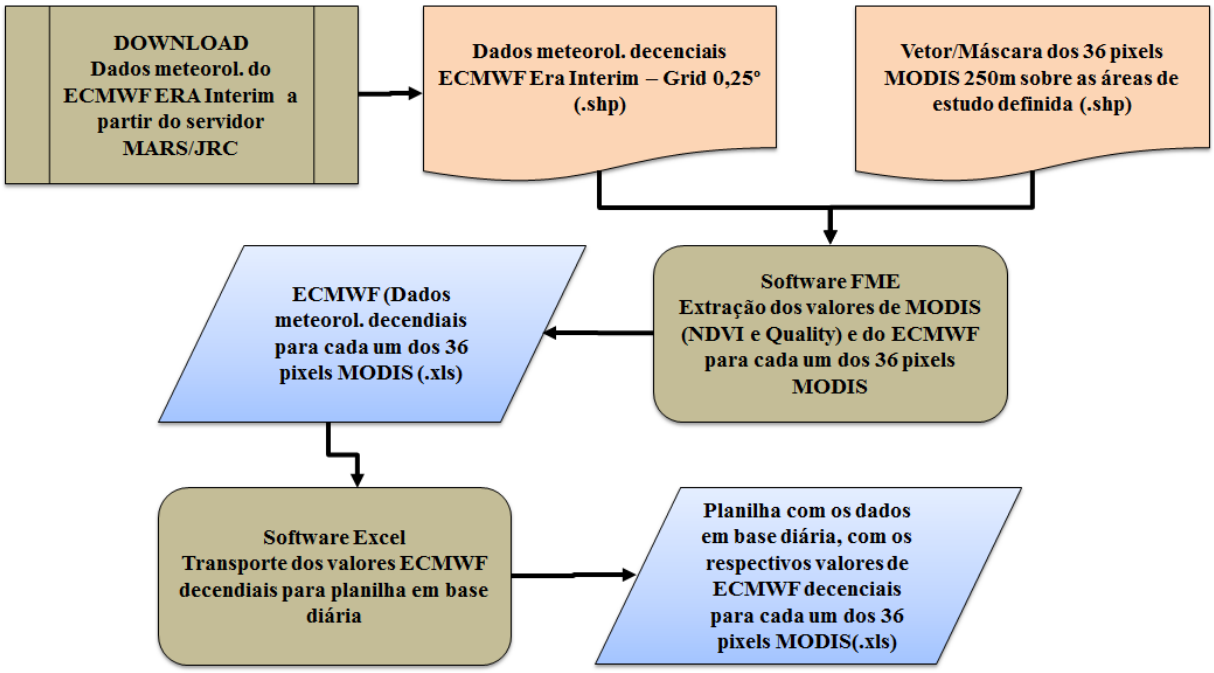


Figura 16. Fluxograma do processo da aquisição dos dados ECMWF/ERA Interim decendial em planilha com os dados em base de médias diárias

O uso e validação dos dados ECMWF/ERA Interim para este tipo de aplicação é de extrema importância, principalmente devido à carência de estações meteorológicas de superfície, o que dificultaria a aplicação do modelo agrometeorológico-espectral avaliado neste estudo em algumas regiões.

Diante da disponibilidade destes dados, foi feito o download dos dados ECMWF/ERA Interim para os anos de 2011 e 2012, sendo este último, realizado até o 1º decêndio de julho.

Concluído os downloads, com os dois arquivos shapefile (um com os dados para 2011 e outro para 2012), utilizou-se o software FME Desktop 2012, onde foi construído um algoritmo (fluxo) para extração dos valores meteorológicos de cada decêndio para cada um dos trinta e seis pixels de interesse deste estudo. Para a extração dos dados, utilizou-se o cruzamento espacial com uma máscara vetorial, em formato shapefile, com os limites destes

pixels, de forma que foram assumidos para cada pixel os valores do ponto do arquivo ECMWF/ERA Interim mais próximo do centro de cada pixel MODIS. Como saída deste processo, obteve-se uma planilha em formato MS Excel, com os valores meteorológicos decendiais para cada pixel de interesse e posteriormente, utilizando-se do software Excel, converteu-se os dados decendiais para dados médios diários.

3.8 Aquisição e processamento dos dados da estação meteorológica de superfície

Além dos dados meteorológicos provenientes do ECMWF/ERA Interim, foi utilizado neste estudo, os dados meteorológicos obtidos por meio da estação meteorológica automatizada localizada no campus da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (FCAV – UNESP), em Jaboticabal, localizada nas coordenadas geográficas 21º14'05" Sul e 48º17'09" Oeste, aos 615 m de altitude, os quais estão disponíveis gratuitamente em informações horárias no site da instituição <http://www.exatas.fcav.unesp.br/estacao>. A referida estação meteorológica está distante cerca de 55 e 45 km, respectivamente das áreas de estudo nº 01 e nº 02. A altitude desta está 65 m de altitude abaixo da altitude média da área de estudo nº 01 (680 m de altitude) e 55 m de altitude acima da altitude média da área de estudo nº 02 (560 m de altitude).

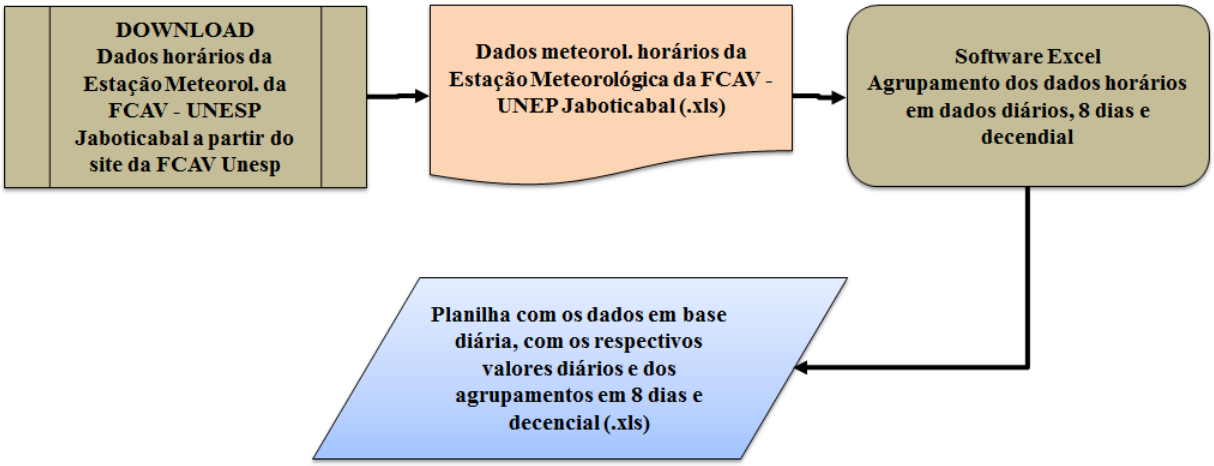


Figura 17. Fluxograma do processo da aquisição dos dados meteorológicos horários da FCAV – UNESP até o agrupamento destes em dados diários, médias de oito dias e médias decendiais.

O download dos dados da estação meteorológica da FCAV – UNESP foi realizado em planilha eletrônica no formato MS Excel e utilizando o mesmo software foram feitos os

agrupamentos dos dados em médias diárias, médias a cada oito dias (coincidentes com o período de oito dias das imagens MODIS) e médias decendiais. Ao final do processo, obteve-se uma planilha em base diária, com os dados diários, médias de oito dias e médias decendiais. Apesar das distâncias e diferenças de altitudes da estação meteorológica em relação às áreas de estudo, foram considerados os dados medidos na estação como os valores representativos para as áreas de estudo nº 01 e nº 02.

3.9 Aplicação do modelo para cálculo do acúmulo de matéria-seca

Depois de concluída a obtenção e processamento dos dados agrometeorológicos e espectrais tidos como variáveis de entrada no modelo agrometeorológico-espectral avaliado neste estudo, foi possível o início da aplicação do referido modelo para o cálculo do acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar em base diária.

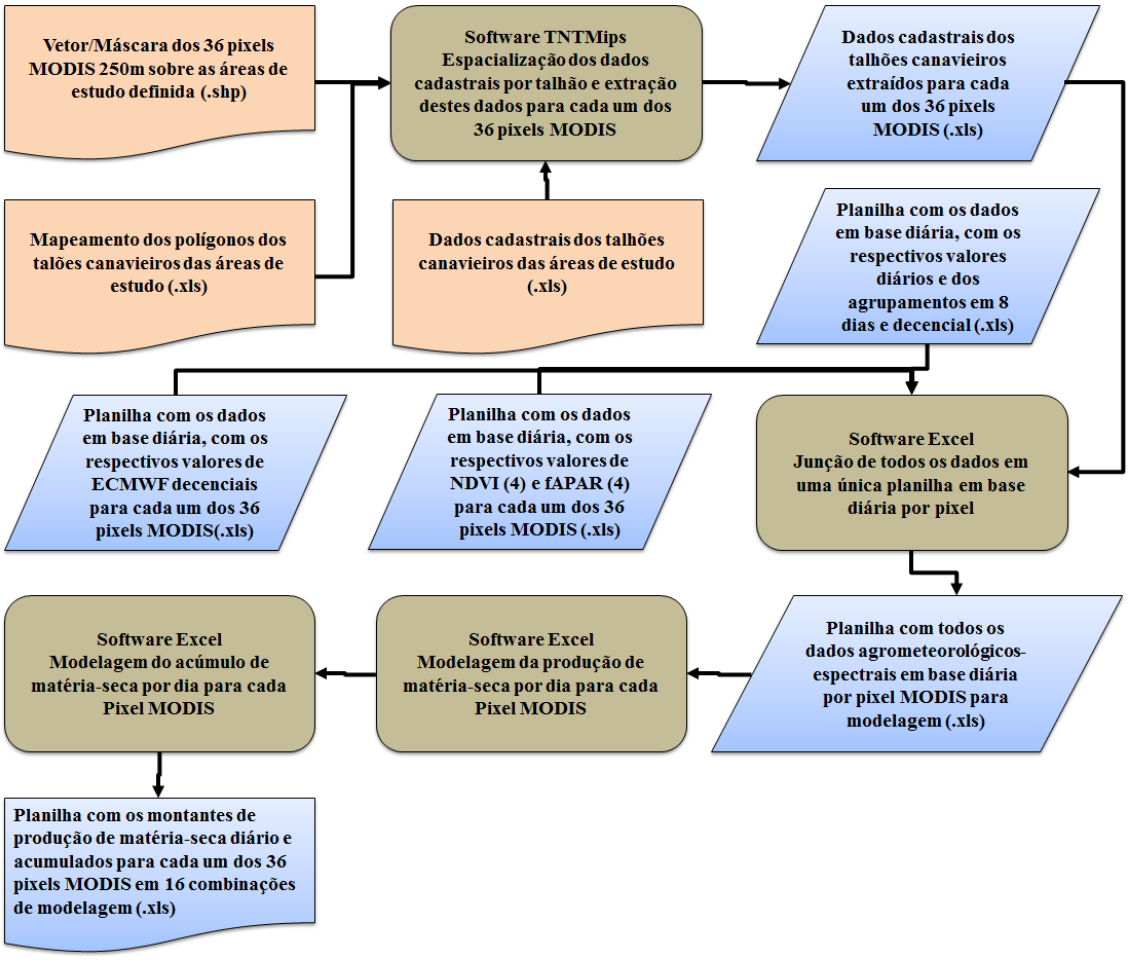


Figura 18. Fluxograma do processo necessário para o cálculo do acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar aplicado neste estudo.

O passo inicial para o processo foi a aquisição de uma base cadastral georreferenciada com os limites dos talhões canavieiros sobre as áreas de estudo e junto a esta as informações cadastrais referentes ao cultivo da cana-de-açúcar em cada talhão, tais como código da fazenda, nome da fazenda, zona, talhão, área em hectares, variedade plantada, espaçamento, data de plantio, data da colheita na Safra 2010/2011, etc., sendo que posteriormente, foi acrescido à esta a data de colheita na Safra 2011/2012. A correta informação das datas de colheita na Safra 2010/2011 e 2011/2012 são de extrema importância ao processo, pois serão elas que definirão a data de início e de final do acúmulo de matéria-seca para o período analisado. A base cadastral com os talhões canavieiros e respectivos dados cadastrais foi fornecida pela Usina Bonfim, a qual é arrendatária das áreas de estudo e responsável pela produção e manejo da cana-de-açúcar nestas áreas.

Obtida esta base cadastral georreferenciada, a mesma foi importada no software TNTMips Pro 2011 e sobreposta à máscara vetorial com os limites dos pixels MODIS selecionados para este estudo. Na sequência foram extraídos no mesmo software, os dados cadastrais pertinentes a cada pixel, sendo exportado para uma planilha eletrônica em formato MS Excel.

Com a planilha que contém as informações cadastrais, foi construída uma nova planilha, onde cada linha recebia a codificação do pixel e os dados cadastrais pertencentes a este. Cada linha da planilha recebeu um valor diário, iniciado no primeiro dia posterior a data da colheita na Safra 2010/2011 (início do acúmulo de matéria-seca para o período) e indo até a data da colheita na Safra 2011/2012 (final do acúmulo de matéria-seca para o período), tendo nas colunas, descritos cada um dos dados cadastrais.

O passo seguinte foi unir nesta planilha os dados agrometeorológicos obtidos tanto do ECMWF/ERA Interim quanto da estação meteorológica da FCAV – UNESP e os dados espectrais obtidos a partir das imagens do sensor MODIS. Cada um dos dados juntados foi trazido para esta planilha em colunas, com os valores equivalentes a cada dia. Ao final, obteve-se uma planilha com os dados em base diária para cada um dos trinta e seis pixels de interesse deste estudo com todas as informações cadastrais, agrometeorológicas e espectrais pertinentes a cada dia, possibilitando assim o passo seguinte, que era o cálculo do acúmulo diário de matéria-seca de cana-de-açúcar.

Foram obtidas para cada pixel quatro fontes de dados agrometeorológicos e quatro fontes de dados espectrais, os quais combinados possibilitaram a geração de dezesseis diferentes resultados das modelagens de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar para as áreas de estudo. A Tabela 6 demonstra as combinações (linhas *vs.* colunas) entre as diferentes fontes de variáveis agrometeorológicas e espectrais possíveis e os modelos gerados (resultados).

Definidas as combinações para as modelagens, foram calculados os valores diários de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar para cada um dos pixels de interesse, seguindo a equação 2.5, adaptada de MONTEITH (1972), sendo que para cada um destes houve dezesseis resultados (modelagens). Na sequência, foi adicionada na planilha uma nova coluna para cada resultado da modelagem, na qual foi calculado o montante de matéria-seca acumulada desde a data inicial do ciclo (1º dia posterior à data da colheita na Safra 2010/2011) até a referida data (linha). Desta forma, foi possível a construção de curvas de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar durante todo o ciclo de análise, inclusive possibilitando comparar a quantidade de matéria-seca acumulada pelo modelo com a quantidade de matéria-seca obtida por cada uma das coletas de amostras em campo, em suas referidas datas.

Tabela 6. Combinação de dados agrometeorológicos e espectrais para as modelagens de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar do estudo.

Combinação de variáveis para modelagem		**Dados Espectrais**			
		fAPAR MODIS Aqua	**fAPAR MODIS Terra**	**fAPAR MODIS Médio**	**fAPAR MODIS Máximo**
Dados Agrometeorológicos	**UNESP – Diário**	Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04
	UNESP – 8 dias	Modelo 05	Modelo 06	Modelo 07	Modelo 08
	UNESP – Decendial	Modelo 09	Modelo 10	Modelo 11	Modelo 12
	ECMWF - Decendial	Modelo 13	Modelo 14	Modelo 15	Modelo 16

Além das curvas de acúmulo de matéria-seca de cana-de-açúcar para as dezesseis combinações possíveis de dados (quatro dados agrometeorológicos *vs.* quatro dados espectrais), foi calculado também os valores potenciais de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar, obtidos pela mesma equação adaptada de MONTEITH (1972), porém, utilizando como variáveis apenas os dados agrometeorológicos e considerando a variável fAPAR como um valor constante de base 1, uma vez que não se conhece o valor máximo de fAPAR para a cultura. Este processo proporciona a construção de uma curva de acúmulo máximo potencial de matéria-seca pela cana-de-açúcar para o período, considerando que em condições ideais de desenvolvimento a planta absorveria toda a energia disponível e a converteria em matéria-seca. A diferença entre a curva potencial acumulada (considerando fAPAR como constante) e a curva acumulada (considerando fAPAR como variável) mostra as diferenças de produtividade de matéria-seca decorrentes das diferentes interações do manejo e produção da cana-de-açúcar.

3.10 Cálculo da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS

O passo seguinte neste estudo foi a determinação da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar existente em cada um dos trinta e seis pixels MODIS em cada um dos quatro períodos de coleta das amostras em campo. Estes foram os dados submetidos à análise estatística para responder às hipóteses deste estudo.

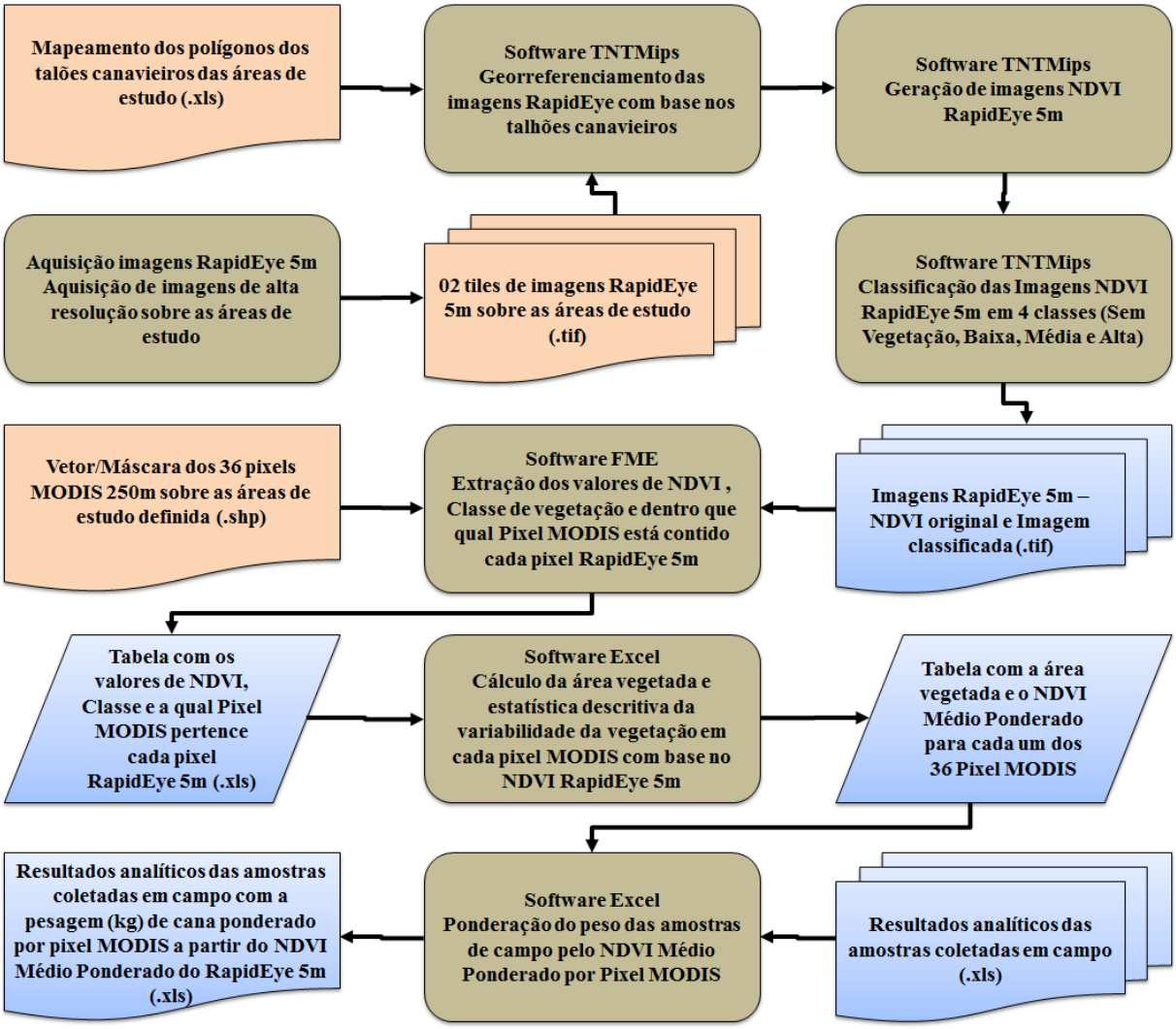


Figura 19. Fluxograma do processo para cálculo da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS

3.10.1 Determinação da área vegetada e análise da variabilidade do canavial

O primeiro passo para o cálculo da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar num pixel MODIS é a determinação da área vegetada dentro de um determinado pixel e também a análise da variabilidade do canavial existente dentro deste.

Como a resolução espacial dos pixels MODIS utilizados neste estudo é de 250 m, os valores de refletância de superfície obtidos por estas imagens representam uma média da resposta de todos os alvos encontrados dentro da área de cada pixel, e no caso deste estudo, podemos definir dois principais alvos, a cana-de-açúcar (possivelmente em diferentes níveis vegetativos) e o solo exposto (carreadores e áreas com falhas no plantio da cana-de-açúcar),

sendo necessária a utilização de imagens de outro sensor com melhor resolução espacial para podermos identificar as variações e quantidades destes alvos e assim, determinar as áreas que cada um ocupa dentro de cada pixel MODIS.

Para este processo foram utilizadas duas cenas obtidas pelos Satélites da constelação RapidEye, os quais possuem resolução espacial original de 6,5 m (obtidas no NADIR), porém, reamostrados para 5 m após submetidas ao processo de correção geométrica (ortorretificação), com resolução radiométrica de 12 bits e resolução espectral de 5 bandas (azul – 440 a 510 nm, verde – 520 a 590 nm, vermelha – 630 a 685 nm, borda do vermelho – 690 a 730 nm e infravermelho próximo – 760 a 850 nm) (RAPIDEYE, 2012).

As imagens utilizadas foram a cena 2229026, do dia 17/02/2012, obtida pelo Satélite RapidEye 2, recobrindo a área de estudo nº 01 e a cena 2299125, do dia 01/03/2012, obtida pelo Satélite RapidEye 1, recobrindo a área de estudo nº 02. Ambas as imagens foram cedidas gratuitamente pela empresa Santiago & Cintra Consultoria, distribuidora dos produtos RapidEye no Brasil como contribuição para este estudo.

Utilizando o software TNTMips Pro 2011, as imagens dos Satélites RapidEye foram registradas tendo como referência para o georreferenciamento um mosaico de levantamentos diferenciais dos talhões de cana-de-açúcar na região das áreas de estudo. Posteriormente, foram geradas as imagens de NDVI, segundo a equação 2.1 proposta por ROUSE et al.(1973), para cada uma das imagens.

Depois de geradas as imagens de NDVI para cada uma das áreas de estudo, ainda utilizando o software TNTMips Pro 2011, estas foram submetidas individualmente ao processo de classificação supervisionada pelo método *Stepwise Linear Classification*, existente no referido software, de forma a gerar uma nova imagem classificada, separando os valores de NDVI das imagens RapidEye em quatro classes, a) solo exposto, b) índice de vegetação baixo, c) índice de vegetação médio e d) índice de vegetação alto.

Este método de classificação aplica técnicas de análise discriminante linear para a classificação de imagens, onde a análise discriminante é uma técnica estatística que calcula um conjunto de variáveis derivadas que são combinações lineares das bandas nos conjuntos de imagens de entrada, procurando definir um novo conjunto de eixos mutuamente perpendiculares e coordenados no espaço espectral. O processo analisa o conjunto de

treinamento e escolhe o conjunto de funções discriminantes que produz a melhor separação possível entre as classes (MICROIMAGES INC, 2011).

Geradas as imagens de NDVI e a imagem NDVI classificada para cada uma das duas cenas do Satélite RapidEye, estas foram exportadas para o formato digital Geotiff, e na sequência, utilizando o software FME Desktop 2012, onde foi construído um algoritmo (fluxo) para o cruzamento espacial das imagens NDVI e NDVI classificada (quatro classes) com uma máscara vetorial, em formato *shapefil*e, com os limites de cada pixel MODIS de interesse neste estudo. Como saída deste processo, obteve-se uma planilha digital em formato .ASCII com os valores individuais de cada pixel RapidEye, contendo o valor de NDVI, a classe de NDVI a que pertence e o pixel MODIS no qual está contido. Com base nestes dados, utilizando o MS Excel, foi identificado o percentual de área com solo exposto e o percentual de área vegetada dentro de cada pixel MODIS de interesse, bem como a análise estatística (estatística descritiva e coeficiente de variação) para descrever a variabilidade da vegetação dentro da área vegetada em cada pixel MODIS de interesse.

A área vegetada em cada pixel MODIS de interesse foi obtida pela equação 3.2, a seguir.

(3.2)

$$\mathrm{AV} = \left(\frac{\sum(NDVIbaixo\ NDVImédio\ NDVIalto)}{\sum(NDVIexposto\ NDVIbaixo\ NDVImédio\ NDVIalto)}\right) * REmodis^2$$

Sendo:

AV → Área vegetada do pixel MODIS em metros quadrados

NDVIbaixo → Quantidade de pixels dentro da classe NDVI baixo

NDVImédio → Quantidade de pixels dentro da classe NDVI médio

NDVIalto → Quantidade de pixels dentro da classe de NDVI alto

NDVIexposto → Quantidade de pixels dentro da classe de NDVI Solo Exposto

REmodis → Resolução espacial do pixel MODIS (em metros)

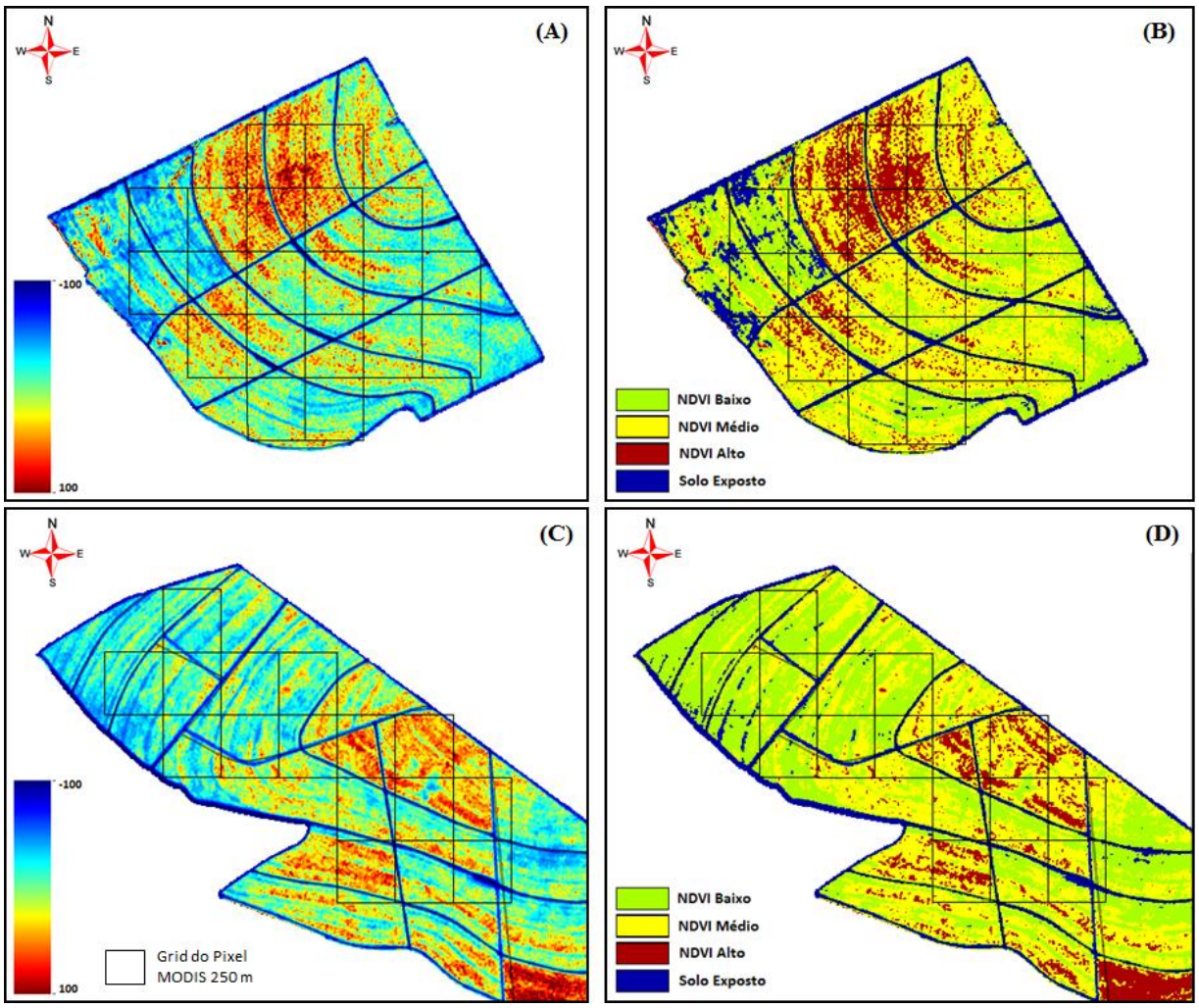


Figura 20. Imagens de NDVI e NDVI classificado em quatro níveis geradas a partir de imagens RapidEye para a área de estudo nº 01 (A – NDVI e B – NDVI Classificada) e área de estudo nº 02 (C – NDVI e D – NDVI Classificada).

A sequência de imagens que caracteriza o processo de cálculo da área vegetada e o NDVI médio ponderado em um determinado pixel MODIS (Figura 21). As imagens são: falsa cor (R3G4B2), NDVI e NDVI classificada, com a legenda descritiva do NDVI médio ponderado do pixel e o percentual de vegetação dentro de um dos pixels MODIS de interesse.

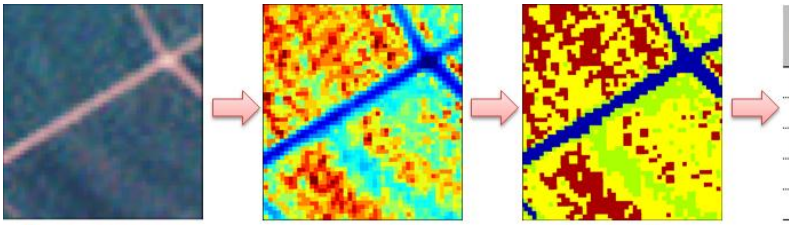


Imagem falsa cor (R3G4B2) | Imagem NDVI | NDVI Classificada

Legenda	Classes	% do Pixel	NDVI Médio da Classe
	Solo Exposto	24,7%	-
	NDVI Baixo	17,9%	77,32
	NDVI Médio	37,0%	79,17
	NDVI Alto	20,4%	80,74
	Área Vegetada	75,3%	79,08

Resumo da área vegetada e NDVI médio ponderado do pixel

Figura 21. Sequência demonstrando o processo de cálculo do percentual de área vegetada e o NDVI médio ponderado para o pixel A1-P06.

As cenas dos Satélites RapidEye ora utilizadas, 17/02/2012 e 01/03/2012, respectivamente para as áreas de estudo nº 01 e área de estudo nº 02, são adequadas para a determinação da área vegetada e da variabilidade no canavial no período equivalente à terceira coleta de amostras nas áreas de estudo, realizadas nos dias 28/02/2012 e 29/02/2012, respectivamente para as áreas de estudo nº 01 e área de estudo nº 02. O ideal é que este processo fosse realizado para estas determinações com imagens obtidas em períodos próximos a cada uma das demais datas de coletas de amostras em campo para cada área de estudo, porém, devido à dificuldade de obtenção de imagens RapidEye ou de outra resolução similar para cada um dos períodos, os resultados obtidos com as imagens de 17/02/2012 e 01/03/2012 foram assumidos como adequados para caracterizar a área vegetada e a variabilidade do canavial durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura nas áreas de estudo.

Ainda, como as imagens RapidEye foram utilizadas para a geração da imagem de NDVI individualmente para cada área de estudo, com o objetivo de analisar a variabilidade dos índiceS relativamente entre os pixels desta e não seriam extraídos valores físicos para comparação com outras imagens de outras datas, decidiu-se por não submeter nenhuma das imagens ao processo de correção atmosférica. Apenas foi realizada a transformação dos níveis de cinza das imagens para valores de refletância aparente, os quais foram utilizados nos cálculos da imagem de NDVI.

3.10.2 Determinação da quantidade de cana-de-açúcar dentro de um pixel MODIS

Inicialmente, a quantidade de cana-de-açúcar dentro de um pixel MODIS pode ser obtida diretamente pela equação 3.3.

(3.3)

$$\text{PCA} = \left(\frac{AV}{Espaçamento}\right) * (Peso\ Amostra)$$

Sendo:

PCA→ Produção de cana-de-açúcar total (em Kg) dentro do pixel MODIS

$AV \rightarrow$ Área vegetada do pixel MODIS em metros quadrados

$Espaçamento \rightarrow$ Espaçamento entre as linhas de plantio de cana-de-açúcar

$Peso\ Amostra \rightarrow$ Peso em Kg de um metro linear de cana-de-açúcar

Porém, devido à variabilidade espacial dos níveis de desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, já conhecidos e mencionados por MACHADO (2003) e PICOLLI (2007), entre outros e corroborado através dos dados de NDVI gerados a partir das imagens dos Satélites RapidEye para as áreas de estudo, houve a necessidade de uma correção dos valores dos pesos das amostras, anotados durante as coletas das amostras em campo, uma vez que, dependendo do nível de desenvolvimento vegetativo do local onde foi colhida a amostra, a extrapolação do valor de seu peso para a área vegetada do pixel poderia subestimar ou superestimar a quantidade de cana-de-açúcar produzida em cada pixel.

Para a correção dos valores dos pesos amostrais em função da variabilidade média do canavial dentro de cada pixel MODIS de interesse, utilizou-se da estratégia da ponderação do peso médio de todas as amostras coletadas e pesadas dentro de cada área de estudo e em cada período de amostragem pelo valor de NDVI médio ponderado pelas três classes de NDVI (baixo, médio e alto) obtidas pela imagem classificada no processo anterior. Desta forma, os valores dos pesos das amostras individuais foram ajustados para representar um peso médio de acordo com a variabilidade do nível de desenvolvimento vegetativo dentro de cada pixel MODIS de interesse e de cada área de estudo.

O NDVI médio ponderado foi calculado usando a equação 3.4.

(3.4)

$$NDVIpond. = \Sigma\,(\bar{X}NDVIbaixo; \bar{X}NDVImédio; \bar{X}NDVIalto)$$

Sendo:

$NDVIpond. \rightarrow$ Valor de NDVI médio ponderado pelas classes de NDVI

$\bar{X}NDVIbaixo$ → Média aritmética dos valores de NDVI dentro da classe de NDVI baixo

$\bar{X}NDVImédio$ → Média aritmética dos valores de NDVI dentro da classe de NDVI médio

$\bar{X}NDVIalto$ → Média aritmética dos valores de NDVI dentro da classe de NDVI baixo

A ponderação do valor do peso da amostrada coletada foi corrigida, ou ponderada pelo valor médio de NDVI ponderado pela classe de desenvolvimento, conforme equação 3.5.

(3.5)

$$\text{PAPP} = \frac{(\bar{X}PesoAmostras \times NDVIpond.pixel)}{\text{NDVIpond.area}}$$

Sendo:

PAPP → Peso da amostra do pixel (em Kg) ponderado pelo NDVI médio ponderado

$\bar{X}PesoAmostras$ → Média aritmética do peso de todas as amostras coletadas na área de estudo no período da coleta

$NDVIpond.pixel$ → Valor de NDVI médio ponderado pelas classes de NDVI de um determinado pixel

$NDVIpond.area$ → Valor de NDVI médio ponderado pelas classes de NDVI do conjunto de pixels dentro de uma área de estudo

Realizada as ponderações dos pesos das amostras coletadas pelo NDVI médio ponderado, foi possível o cálculo da quantidade de cana-de-açúcar dentro de cada um dos trinta e seis pixels MODIS de interesse utilizando a equação 3.6.

(3.6)

$$\text{PCA} = \left(\frac{AV}{Espaçamento}\right) * (PAPP)$$

Sendo:

PCA → Produção de cana-de-açúcar total (em Kg) dentro do pixel MODIS

AV → Área vegetada do pixel MODIS em metros quadrados

$Espaçamento$ → Espaçamento entre as linhas de plantio de cana-de-açúcar

PAPP → Peso da amostra do pixel (em Kg) ponderado pelo NDVI médio ponderado

Ao final deste processo, obteve-se o montante de cana-de-açúcar total produzida dentro da área de cada um dos trinta e seis pixels MODIS de interesse em cada um dos quatro períodos de coletas de amostras em campo.

3.10.3 Determinação da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS

O passo final para o cálculo da quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar por pixel MODIS em cada um dos períodos de coleta das amostras em campo foi a aplicação da equação 3.7 para cada um dos trinta e seis pixels MODIS em cada um dos períodos de coleta de amostras.

(3.7)

$$MSpixel = PCA \times Fpcts$$

Sendo:

$MSpixel$ → Quantidade de matéria-seca da cana-de-açúcar (em Kg) para determinado pixel MODIS

PCA → Produção de cana-de-açúcar total (em Kg) dentro de determinado pixel MODIS

$Fpcts$ → Percentual de fibra (matéria-seca) da cana-de-açúcar obtido pela análise tecnológica laboratorial – Método da Prensa Hidraúlica (CONSECANA-SP).

Como resultado final deste processo, obteve-se uma planilha em formato MS Excel, com os valores espectrais (NDVI) que caracterizam a variabilidade espacial dos níveis de desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar juntamente com a quantidade total de cana-de-açúcar e de matéria-seca da cana-de-açúcar produzida dentro da área de cada um dos trinta e seis pixels MODIS de interesse para cada um dos quatro períodos de coleta de amostras em campo. A tabela com os dados apurados neste processo consta do anexo 3.

3.11 Análises Estatísticas

A fim de descrever estatisticamente os resultados das modelagens de acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar avaliadas neste estudo, os conjuntos de dados modelados

foram submetidos a uma série de análises estatísticas visando a identificação de sua precisão e acurácia em relação aos dados medidos em campo, bem como a determinação do erro obtido pelas modelagens.

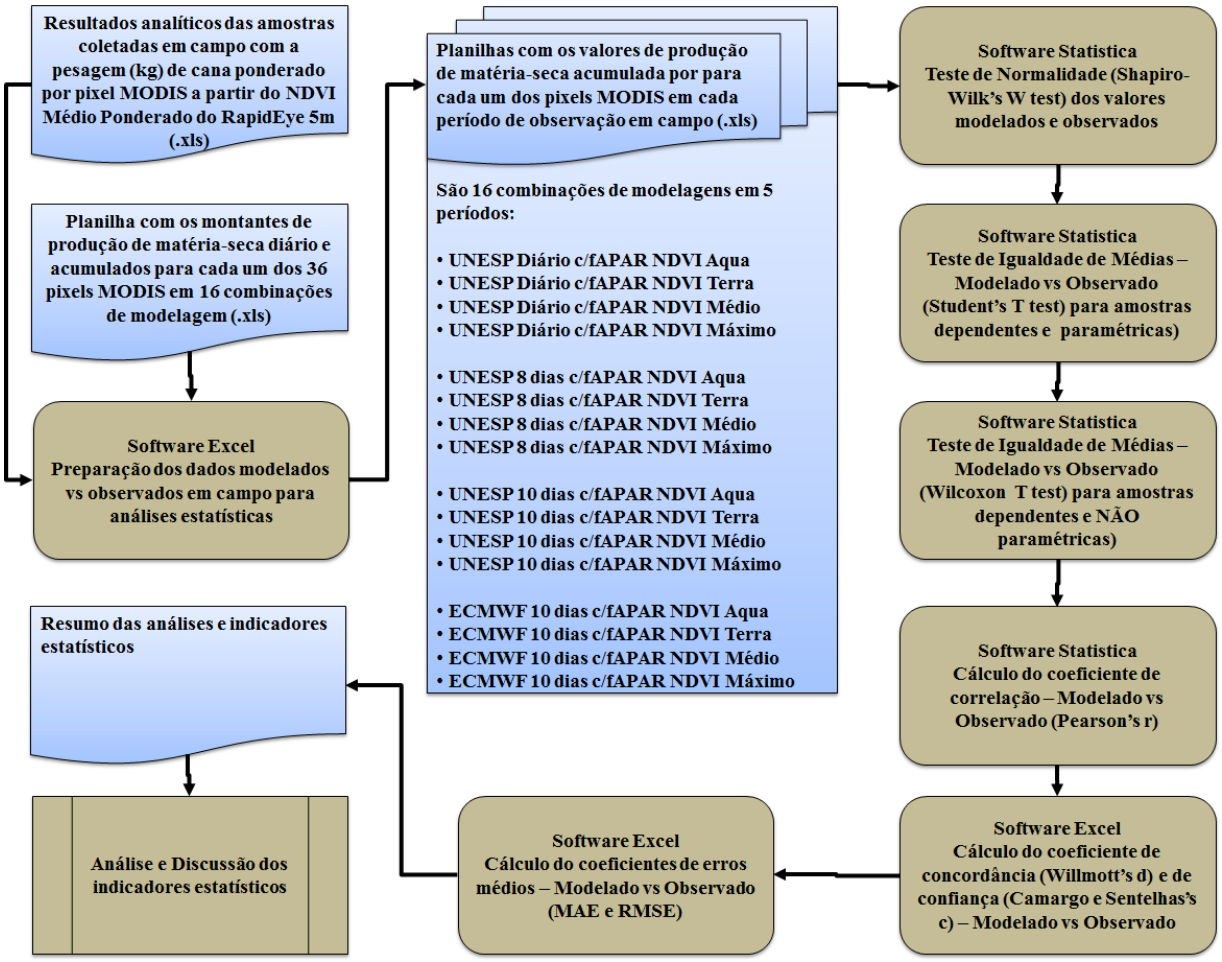


Figura 22. Fluxograma do processo de análise estatística submetida aos resultados das modelagens avaliadas neste estudo.

3.11.1 Teste de igualdade de médias

No caso deste estudo, os testes de igualdade de médias têm como objetivo verificar se a média do conjunto de dados modelados pode ser considerada ou não igual à média do conjunto de dados observados e/ou medidos em campo. Pela característica do experimento, todas as amostras são consideradas grandes ($n1 \geq 36$ e $n2 \geq 36$) e as amostras são consideradas dependentes, ou seja, a média do valor modelado para pixel MODIS A1-P01 deve ser comparado com o valor observado em campo para o mesmo pixel no período, e assim por diante para cada um dos trinta e seis pixels MODIS de interesse em cada um dos períodos de

coleta de amostras em campo, bem como na análise dos resultados dos quatro períodos em conjunto.

Para os conjuntos de dados com distribuição normal e cujas amostras são dependentes (pareadas) foi aplicado o teste de igualdade de média pela distribuição de Student (teste t). Já para os conjuntos de dados com distribuição não normal e cujas amostras são dependentes (pareadas) foi aplicação o teste de igualdade de média pela distribuição de Wilcoxon (teste t). Ambos os modelos foram verificados à significância de 95%.

Para a verificação de ambos os testes de comparação de médias (Student e Wilcoxon) à significância de 95% os conjuntos de dados foram submetidos a um teste de hipótese, onde a hipótese nula (H0) indica que as médias dos conjuntos de dados são iguais (H0: $\mu = \mu_0$) e a hipótese alternativa (H1) indica que as médias dos conjuntos de dados não são iguais (H1: $\mu \neq \mu_0$), sendo analisada como relação bicaudal. Desta forma, se p-valor < 0,05, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, as médias dos conjuntos de dados não são iguais à significância de 95%, já se p-valor > 0,05, a hipótese nula não é rejeitada, ou seja, pode-se afirmar que as médias dos conjuntos de dados são significantes a 95%.

Os testes de igualdade de médias foram aplicados comparando a média de cada um dos conjuntos de dados modelados com a média do conjunto de dados observados e/ou medidos em campo, sendo aplicados individualmente a cada um dos quatro períodos de coleta de amostras em campo e também no conjunto de valores de todo o período. Desta forma, temos dezesseis conjuntos de dados modelados por período comparados um a um com o conjunto de dados observados e/ou medidos em campo em cada período, mais um com o acumulado dos quatro períodos, ocasionando ao final, a análise do conjunto de dados como um todo e sua validação estatística para cada fase de desenvolvimento da cultura..

Os testes de normalidade foram aplicados individualmente a cada conjunto de dados modelados e ao conjunto de dados observados e/ou medidos em campo, sendo que foram aplicados individual a cada um dos quatro períodos de coleta de amostras em campo e também no conjunto com os valores de todo o período. Desta forma, temos dezesseis conjuntos de dados modelados por período e mais um conjunto de dados observados e/ou medidos em campo por período, num total de dezessete conjuntos de dados a cada período de amostragem e mais um com o acumulado dos quatro períodos, ocasionando ao final, a análise de oitenta pares de conjuntos de dados submetidos aos testes de igualdade de médias.

3.11.2 Coeficiente de correlação linear de Pearson

O coeficiente de correlação linear de Pearson (r) definido pela equação 3.8, é um índice que expressa a força relativa da associação entre as variáveis e é independente do sistema de unidades usado (CALADO, 2010).

É importante observar que a correlação não é o mesmo que causa-e-efeito, ou seja, duas variáveis podem estar correlacionadas e, no entanto, não haver entre elas relação de causa-e-efeito (COSTA, 2005).

(3.8)

$$\rho = \frac{\sigma xy}{\sigma x\, \sigma y} = \frac{E(xy) - E(x)E(y)}{\sigma x\, \sigma y}$$

O coeficiente de correlação linear é um número puro, ou seja, não vem acompanhado de nenhuma unidade de medida. Pode assumir valores entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 esse índice estiver, mais correlacionadas estão as variáveis (COSTA, 2005).

Os coeficientes de correlação podem ser classificados conforme estejam próximos ou distantes de zero (Tabela 7).

Tabela 7. Classificação dos coeficientes de correlação adaptada COSTA (2005).

Valores de ρ	**Classificação**
-1,00	Correlação Negativa Perfeita
-0,99 a -0,76	Correlação Negativa Forte
-0,75 a -0,51	Correlação Negativa Média
-0,50 a -0,26	Correlação Negativa Fraca
-0,25 a -0,01	Correlação Negativa Bem Fraca
0,00	Correlação Linear Inexistente
0,01 a 0,25	Correlação Positiva Bem Fraca
0,26 a 0,50	Correlação Positiva Fraca
0,51 a 0,75	Correlação Positiva Média
0,76 a 0,99	Correlação Positiva Forte
1,00	Correlação Positiva Perfeita

Como o coeficiente de correlação de Pearson é aplicado a um universo amostral definido, pode ocorrer que os dados selecionados possam, por puro acaso, estar simulando uma disposição retilínea, quando na verdade, essa configuração se quer existia (COSTA, 2005).

Com base nesta suposição, foi aplicado aos conjuntos de dados submetidos ao cálculo do coeficiente de correlação de Pearson um teste de hipótese, com o objetivo de verificar a aleatoriedade dos dados numa significância de 95%, ou seja, certificar que haja pelo menos 95% de chance do resultado do coeficiente de correlação não ter ocorrido ao acaso. Desta forma, foi formulada a hipótese nula (H0: ρ xy $= 0$) indica que não existe correlação linear na população e a hipótese alternativa (H1: ρ xy $\neq 0$) indica que existe correlação linear na população. Desta forma, se p-valor< 0,05 a hipótese nula é rejeitada, ou seja, pode-se afirmar com 95% de certeza que há correlação linear na população.

Foram submetidos ao cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson, oitenta pares de conjuntos de dados, os mesmos submetidos aos testes de igualdade de média.

3.11.3 Coeficiente de concordância de Willmott

O coeficiente de concordância ou desempenho de Willmott (d), proposto por WILLMOTT et al.(1985) tem como objetivo avaliar a performance dos modelos medindo as distâncias dos valores da nuvem de dispersão de dados correlacionados em relação à reta ajustada e em torno da reta 1:1, ou seja, expressando a acurácia dos dados modelados em relação aos dados observados.

Este índice varia de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita, de forma que quanto mais próximo de um, maior acurácia tem os dados modelados.

O índice de concordância de Willmott deve ser utilizado em conjunto com o coeficiente de correlação de Pearson, onde o primeiro indica a acurácia dos dados observados quanto comparados aos observados, enquanto que o segundo indica a precisão entre os dados.

O coeficiente de concordância de Willmott é aplicação pela equação 3.9.

(3.9)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|Pi - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2}$$

Sendo:

d → Índice de concordância de Willmott (variando de 0 a 1)

Pi → Valor estimado (kg matéria-seca de cana-de-açúcar estimado pelo modelo)

Oi → Valor observado (kg matéria-seca de cana-de-açúcar medido em campo)

$\bar{O}$ → Média aritmética dos valores observados

3.11.4 Outros indicadores estatísticos

Além dos testes e indicadores estatísticos discutidos nos itens 3.11.1 a 3.11.4, foram aplicados ainda aos conjuntos de dados, o coeficiente de confiança (c), adotado por Camargo e Sentelhas (1997), expresso pela equação 3.10, o qual reúne o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de concordância de Willmott (d) para expressar a confiança global do modelo avaliado.

O coeficiente de confiança (c) pode ser interpretado pela Tabela 8.

(3.10)

$$c = r \times d$$

Sendo:

c → Coeficiente de confiança (CAMARGO & SENTELHAS, 1997)

r → Coeficiente de correlação de Pearson

d → Coeficiente de concordância (WILLMOTT et al, 1985)

Tabela 8. Critério para interpretação do coeficiente de confiança (c) proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997).

Valores de c	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Foram calculados ainda a Raíz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e o Erro Absoluto Médio (MAE), expressos pelas equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

A Raíz do Erro Médio Quadrático (RMSE) mede a amplitude dos erros entre os valores modelados e os observados, enquanto que o Erro Absoluto Médio (MAE) mede o afastamento médio dos valores modelados em relação aos valores observados, constituindo na média dos erros da previsão. Assim o erro médio tende a ser pequeno na medida em que os erros negativos e positivos se compensem.

(3.11)

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} (Oi - Pi)^2\right)}$$

(3.12)

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{\mathrm{n}} \times \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} |\mathrm{Oi} - \mathrm{Pi}|$$

Sendo:

$n \rightarrow$ número de amostras

Pi → Valor estimado (Kg matéria-seca de cana-de-açúcar estimado pelo modelo)

Oi → Valor observado (Kg matéria-seca de cana-de-açúcar medido em campo)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Determinação da área vegetada e análise da variabilidade do canavial

Para este estudo foi analisada a produção de cana-de-açúcar dentro da área de trinta e seis pixels do sensor MODIS, os quais têm resolução espacial de 250 m (62.500 m^2), onde cada valor de NDVI obtido e utilizado na modelagem proposta neste estudo representa a média da resposta espectral dos alvos contidos dentro de cada área. Devido a este tamanho e a variabilidade conhecida da cana-de-açúcar, utilizou-se de imagens de NDVI geradas a partir de duas cenas dos Satélites RapidEye, sendo uma para cada uma das áreas de estudo, conforme materiais e métodos já descritos, a fim de mensurar a área vegetada por cana-de-açúcar em cada um dos pixels (excluindo da área total as proporções de carreadores e áreas com falhas de plantio de cada um dos pixels MODIS) e também descrever a variabilidade do nível de desenvolvimento das plantas em cada pixel MODIS, expresso pelo vigor de biomassa.

Como resultado desta metodologia, ao final do processo foi possível obter para cada um dos trinta e seis pixels MODIS, o percentual de sua área coberta por vegetação, bem como a variabilidade média do NDVI dentro de cada pixel.

Na área de estudo nº 01 foram analisados a área correspondente a vinte pixels MODIS, representando uma área total de 125 hectares. Para os quais foi constatado que 79,6% da área total eram ocupadas por cana-de-açúcar e os 20,4% restantes eram de áreas com solo exposto (carreadores e áreas sem vegetação devido às falhas de plantio e/ou arranquio de soqueiras). Já na área de estudo nº 02 foram analisados a área correspondente a dezesseis pixels MODIS, representando uma área total de 100 hectares, sendo constatado que 78,1% da área total eram ocupadas por cana-de-açúcar, e 21,9% eram de áreas com solo exposto.

Tabela 9. Variabilidade do canavial em cada área de estudo, segundo classificação do NDVI.

Classe de NDVI	Característica	Área de Estudo nº 01	Área de Estudo nº 02
Solo Exposto	**% da área**	20,4%	21,9%
	NDVI médio	74,8	70,2
	Desvio Padrão	8,5	7,2
	Coefic. Variação	11,4	10,2
Vigor de	**% da área**	24,2%	33,9%

Biomassa Baixo	**NDVI médio**	75,6	70,6
	Desvio Padrão	6,3	5,1
	Coefic. Variação	7,3	7,2
Vigor de Biomassa Médio	**% da área**	42,5%	36,7%
	NDVI médio	77,8	72,6
	Desvio Padrão	5,5	5,0
	Coefic. Variação	7,0	6,9
Vigor de Biomassa Alto	**% da área**	12,8%	7,5%
	NDVI médio	81,1	75,9
	Desvio Padrão	3,2	3,7
	Coefic. Variação	3,9	4,8
Vigor de Biomassa Alto	**% da área**	100%	100%
	NDVI médio	77,1	71,6
	Desvio Padrão	6,3	5,7
	Coefic. Variação	8,2	8,0

A tabela detalhada com a estatística descritiva da variabilidade do canavial para cada um dos pixels MODIS sobre as áreas de estudo segundo análise do NDVI das imagens RapidEye é apresentada no anexo 2.

4.2 Coleta de amostras em campo

Ao todo foram coletadas cento e quarenta e quatro amostras em campo, sendo trinta e seis amostras coletadas em quatro períodos distintos, de forma a serem representativas na mensuração das quantidades e características tecnológicas da cana-de-açúcar em cada uma das etapas de seu ciclo de desenvolvimento. Devido, porém, a questões operacionais e climáticas, as amostras planejadas inicialmente para coleta aos 90, 180, 270 e 360 dias em cada uma das áreas de estudo, foram realizadas aos 101, 199, 290 e 380 dias para a área de estudo nº 01 e aos 112, 210, 302 e 380 dias para a área de estudo nº 02 (Figura 23).

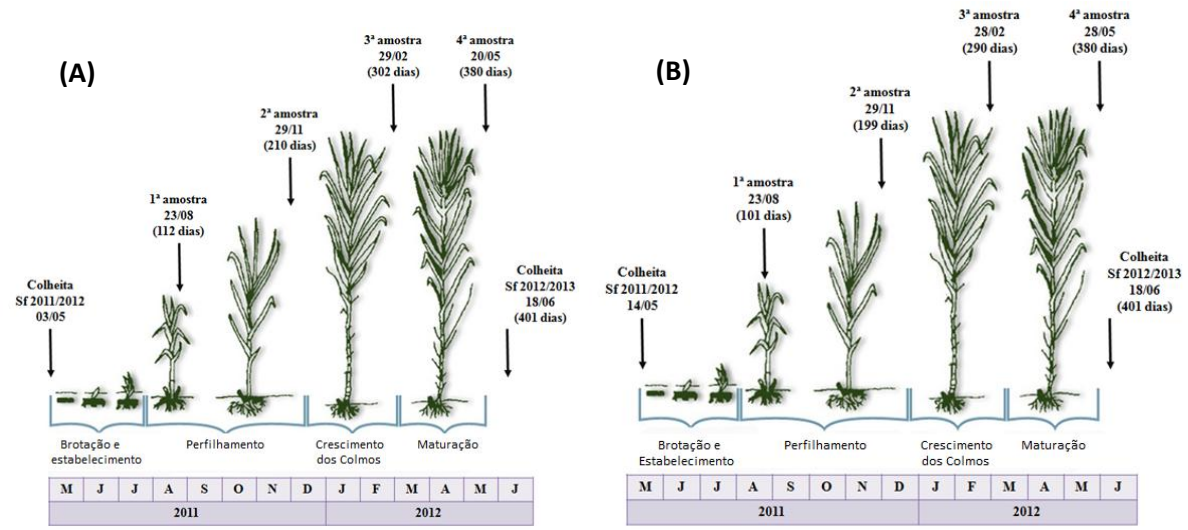


Figura 23. Distribuição das coletas de amostra em campo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura na área de estudo nº 01 (A) e nº 02 (B).

Durante a primeira coleta de amostras em campo, realizada na fase de perfilhamento da cultura, aos 101 e 112 dias de ciclo, respectivamente para as áreas de estudo nº 01 e nº 02, as amostras coletadas eram caracterizadas pela quantidade de perfilhos por metro linear (em torno de 15 a 20 perfilhos por metro) e também pela planta ainda não possuir colmos. Nesta ocasião, as amostras eram compostas praticamente por folhas verdes, palmito e brotos. Esta situação ocasionou a impossibilidade de obtenção dos valores de leitura sacarimétrica do caldo em todas as trinta e seis amostras coletadas neste período. A leitura sacarimétrica do caldo clarificado em tubo de 200 mm é um dos fatores iniciais extraídos durante as análises laboratoriais tecnológicas da cana-de-açúcar, a partir da qual são determinadas indiretamente outras características tecnológicas da planta. Como não houve a clarificação do caldo destas amostras, a leitura sacarimétrica foi obtida por meio de uma equação de regressão em função do brix do caldo (Bj) (equação 4.1), descrita por FERNANDES (2003) e denominada de leitura sacarimétrica esperada. O fato da não clarificação do caldo e a utilização da leitura sacarimétrica esperada não ocasionaram riscos às mensurações de quantidade de matéria total (cana integral) e o teor de fibra das amostras. Características determinantes das análises deste estudo.

(4.1)

$$LCesp = -0{,}1246 \times Bj^2 + 10{,}001 \times Bj - 75{,}973$$

Outra característica notada durante a primeira coleta de amostras em campo foi a não cobertura total do solo pelo dossel da planta devido à sua fase de desenvolvimento, sendo que a palha da cana-de-açúcar remanescente da colheita realizada meses antes ainda estava toda depositada sobre o solo. Este fator pode ter influenciado os valores de NDVI obtidos durante as primeiras semanas da fase de desenvolvimento da cultura no período deste estudo. A colheita da cana-de-açúcar tanto na área de estudo nº 01 quanto na área de estudo nº 02 foi realizada mecanicamente, sem uso de fogo para o despalhamento da planta.

Já durante a segunda coleta de amostras em campo, realizada ao final da fase de perfilhamento e início da fase de crescimento dos colmos, já era visível a presença de colmos na planta e também a redução da quantidade de perfilhos por metro linear da cultura (em torno de 9 a 12 perfilhos por metro) e houve a clarificação do caldo em todas as amostras coletadas. O mesmo ocorreu durante os demais períodos de amostragem (3º e 4º períodos).

Devido ao tamanho das plantas e a dificuldade de acesso aos locais predefinidos para amostragem, a operacionalização das coletas das amostras em campo foi dificultada no 3º período de coletas (nos dias 28 e 29/02/2012). Esta dificuldade foi ainda maior na última amostragem, principalmente pelo fato do tombamento da cana durante os meses de março e abril daquele ano, o que fez com que os tempos para coleta de amostras aumentassem consideravelmente de uma amostragem para outra. Outro fato foi a quantidade de chuvas registradas nas áreas de estudo no mês de maio/2012, as quais ocasionaram um atraso nas coletas de amostras em campo e posteriormente, um atraso na colheita comercial da cana-de-açúcar produzida nas áreas de estudo. Devido às chuvas, as amostras previstas para coleta no primeiro decêndio de maio/2012, acabaram sendo postergadas para os dias 28 e 20 de maio, respectivamente para as áreas de estudo nº 01 e nº 02, bem como a colheita total da cana-de-açúcar foi realizada cerca de um mês além do previsto para o ciclo.

4.3 Resultados das análises laboratoriais das amostras coletadas em campo

As cento e quarenta e quatro amostras coletadas em campo foram submetidas às análises laboratoriais para determinação das características tecnológicas de cada amostra.

O passo inicial nas análises foi a pesagem de cada amostra individualmente, onde foram obtidos o peso total (em Kg) para um metro linear de cana-de-açúcar produzida em cada pixel MODIS. Estes pesos seriam os mesmos utilizados para a determinação da quantidade de

cana integral produzida em cada pixel MODIS em cada período de coleta das amostras, segundo equação 3.3.

Tabela 10. Estatística descritiva das mensurações de quantidade de biomassa (cana integral) nas áreas de estudo, considerando o peso original (1 metro linear de cana-de-açúcar coletado) e o peso ponderado pelo valor médio de NDVI de cada área de estudo.

	Amostra	**N**	**Peso original da amostra (Kg biomassa/m linear)**					**Peso ponderado da amostra (Kg biomassa/m linear)**				
			mín	**máx**	**μ**	**σ**	***Cv***	**mín**	**Máx**	**μ**	**σ**	***Cv***
Área de Estudo nº 01	1ª	20	0,340	1,340	0,682	0,262	38,481	0,670	0,690	0,684	0,006	0,837
	2ª	20	2,455	5,125	3,600	0,727	20,204	3,530	3,670	3,607	0,034	0,941
	3ª	20	8,280	13,400	11,105	1,600	14,406	10,900	11,310	11,126	0,105	0,941
	4ª	20	11,250	25,650	17,085	3,953	23,137	16,770	17,400	17,117	0,160	0,937
Área de Estudo nº 02	1ª	16	0,500	1,840	0,951	0,386	40,599	0,620	0,970	0,934	0,081	8,716
	2ª	16	2,665	6,060	4,298	0,996	23,184	2,780	4,370	4,213	0,371	8,811
	3ª	16	6,525	12,105	9,301	1,505	16,179	6,030	9,450	9,118	0,800	8,771
	4ª	16	10,700	21,600	15,281	2,735	17,900	14,850	15,530	15,289	0,154	1,009
Geral	1ª	36	0,340	1,840	0,802	0,350	43,651	0,620	0,970	0,795	0,136	17,080
	2ª	36	2,455	6,060	3,910	0,925	23,655	2,780	4,370	3,876	0,391	10,083
	3ª	36	6,525	13,400	10,303	1,798	17,448	6,030	11,310	10,233	1,134	11,082
	4ª	36	10,700	25,650	16,283	3,579	21,980	14,850	17,400	16,304	0,922	5,655

Sendo:

N → número de observações/amostras

mín → valor mínimo observado

máx → valor máximo observado

μ → média dos valores observados

σ → desvio padrão entre os valores observados

Cv → Coeficiente de variação dos valores observados

A análise estatística dos valores obtidos pela pesagem das amostras mostra uma grande variação entre os valores mensurados para cada amostra. As pesagens para a área de estudo nº 01 mostram que na 1ª amostragem, o peso médio das amostras foi de 0,682 kg, porém, com medições variando entre 0,340 kg e 1,340 kg (σ 0,262 kg), para a 2ª amostragem, o peso médio foi de 3,600 kg, com variação entre 2,455 kg e 5,125 kg (σ 0,727 kg), para a 3ª amostra o peso médio foi de 11,105 kg, com variação entre 8,280 kg e 13,400 kg (σ 1,600 kg) e por fim, a 4ª amostragem teve peso médio de 17,085 kg, com variação entre 11,250 kg e 25,650 kg (σ 3,953 kg). Da mesma forma, as pesagens para a área de estudo nº 02 apresentaram grande variação em todas as amostragens. Na 1ª amostragem o peso médio foi de 0,951 Kg, com variação entre 0,500 kg e 1,840 kg (σ 0,386 kg), na 2ª amostragem foi de 4,298 kg, com variação entre 2,665 kg e 6,060 kg (σ 0,996 kg), enquanto que na 3ª amostragem o peso médio foi de 9,301 Kg, variando entre 6,525 kg e 12,105 kg (σ 1,505 kg) e por fim, a 4ª amostragem apresentou peso médio de 15,281 kg, com variação entre 10,700 kg e 21,600 kg (σ 2,735 kg).

Houve a necessidade de realizar uma equalização dos pesos de cada amostra para cada período levando em conta a variabilidade do canavial existente em cada pixel MODIS. Obtendo-se assim, um peso médio ponderado para representar cada metro linear de cada área de estudo e ai aplicar-se da equação 3.6 para mensurar a quantidade de cana-de-açúcar dentro de cada pixel MODIS em cada período de amostragem.

Essa ponderação foi realizada aplicando-se a equação 3.5 para cada uma das amostragens, utilizando-se do NDVI médio ponderado da área de estudo e também do NDVI médio ponderado de cada pixel MODIS para criar um mapa de produtividade médio para cada pixel, desta forma reduzindo os coeficientes de variação entre os pesos das diferentes amostras para cada período e área de estudo.

Com base neste processo, obteve-se uma melhora significativa no coeficiente de variação entre cada amostra, onde o coeficiente de variação do peso ponderado das amostras para a área de estudo nº 01 ficaram em torno de 0,83 e 0,94 para os quatro períodos de amostragem, onde anteriormente variavam entre 14,4 e 38,5 nos pesos medidos originalmente.

Melhora também foi observada nos coeficientes de variação do peso das amostras ponderadas para a área de estudo nº 02, onde os coeficientes ficaram entre 8,7 e 8,8 para os

três primeiros períodos de amostragem e em torno de 1,0 para o quarto período de amostragem.

Outra variável importante obtida pelas análises laboratoriais foi o teor de fibra (%) obtido em cada amostra coletada por meio da equação 3.1. Esta variável é a que fornecerá o percentual de matéria seca da cana-de-açúcar existente em cada pixel MODIS em cada período de amostragem.

Para a área de estudo nº 01, os teores médio de fibra (%) obtidos na 1ª amostragem foi de 23,3%, com variação entre 13,9% e 26,1% (σ 3,7% e Cv 15,713), já para a 2ª amostragem o teor foi de 18,3%, com variação entre 16,7% e 20,5% (σ 0,9% e Cv 4,925), enquanto que para a 3ª amostragem o teor foi de 15,3%, com variação entre 14,1% e 16,2% (σ 0,6% e Cv 3,822) e por fim, para a 4ª amostragem o teor foi de 14,7%, com variação entre 10,7% e 16,5% (σ 1,3% e Cv 8,945).

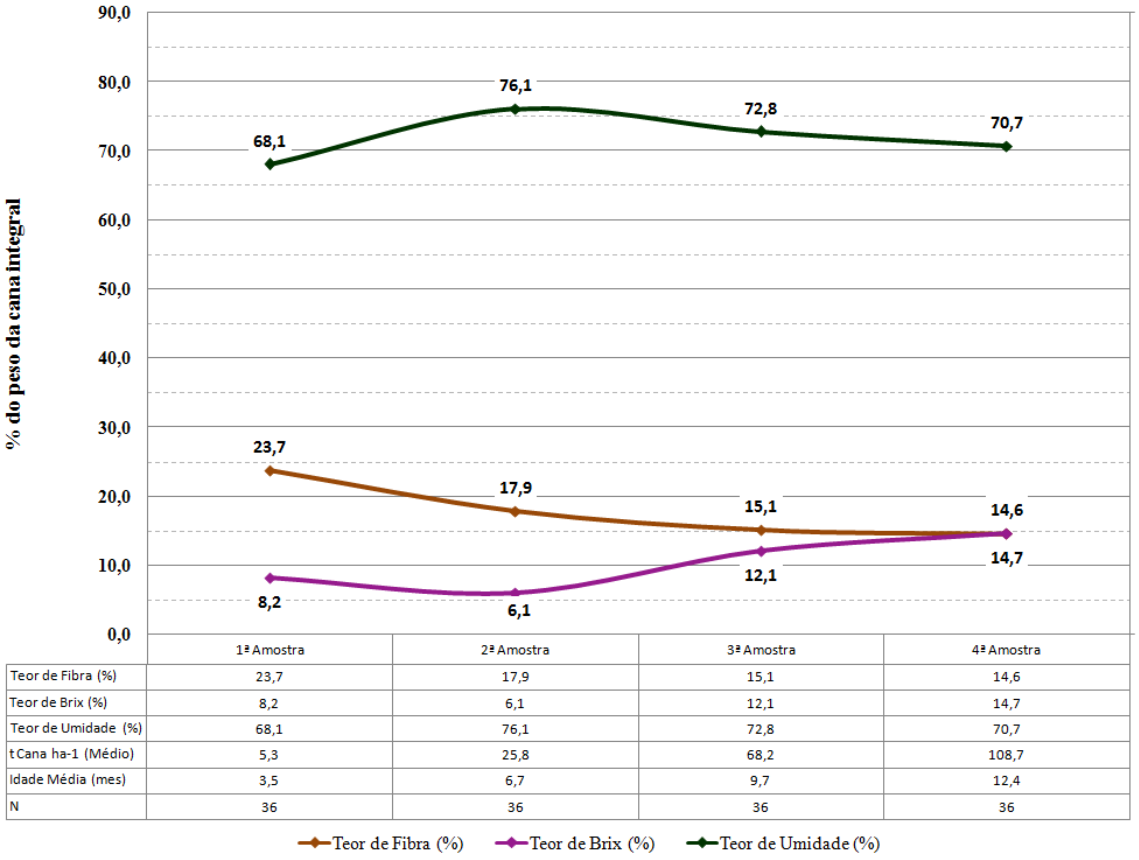
Já para a área de estudo nº 02, os teores médio de fibra (%) obtidos na 1ª amostragem foi de 24,3%, com variação entre 20,8% e 26,5% (σ 1,6% e Cv 6,370), para a 2ª amostragem o teor foi de 17,4%, com variação entre 15,8% e 19,7% (σ 1,2% e Cv 6,660), enquanto que para a 3º amostragem foi de 14,9%, com variação entre 13,3% e 17,9% (σ 1,1% e Cv 7,630) e por fim, na 4ª amostragem o teor foi de 14,6%, com valores entre 13,0% e 17,9% (σ 1,1% e Cv 7,736).

Os coeficientes de variação nos teores de fibra (%) apurados tanto para a área de estudo nº 01 quanto para a área de estudo nº 02 são baixos, apresentando baixa variabilidade em todos os períodos.

O Gráfico 3 apresenta a evolução nos teores de fibra (%), brix (%) e umidade (%) da cana-de-açúcar integral, obtidos a partir das análises das amostras coletadas neste estudo. Nota-se que o teor de fibra (%) na fase de perfilhamento é correspondente à cerca de 24% do peso da cana-de-açúcar e vai decrescendo até chegar em torno de 15% na fase de maturação. Inversamente ocorre com o teor de brix (%) que vai aumentando com o avanço no ciclo de desenvolvimento da cultura, chegando em torno de 15% na fase de maturação.

Tabela 11. Estatística descritiva das mensurações de quantidade e teor (%) de matéria seca na quantidade de cana-de-açúcar coletadas em campo.

	Amostra	N	Peso ponderado da amostra (Kg MS/m linear de Cana integral)					Teor de matéria seca (% Fibra/Kg Cana integral)				
			mín	máx	μ	σ	*Cv*	mín	Máx	μ	σ	*Cv*
Área de Estudo nº 01	1ª	20	0,096	0,180	0,159	0,025	15,717	13,860	26,143	23,271	3,657	15,713
	2ª	20	0,595	0,751	0,659	0,034	5,213	16,665	20,518	18,272	0,900	4,925
	3ª	20	1,548	1,795	1,702	0,066	3,859	14,074	16,209	15,294	0,585	3,822
	4ª	20	1,817	2,767	2,505	0,223	8,898	10,729	16,499	14,636	1,309	8,945
Área de Estudo nº 02	1ª	16	0,153	0,252	0,227	0,024	10,652	20,750	26,491	24,316	1,549	6,370
	2ª	16	0,546	0,838	0,730	0,064	8,701	15,774	19,649	17,388	1,158	6,660
	3ª	16	0,881	1,665	1,361	0,164	12,040	13,246	17,982	14,920	1,138	7,630
	4ª	16	1,967	2,729	2,239	0,174	7,789	13,020	17,933	14,643	1,133	7,736
Geral	1ª	36	0,096	0,252	0,189	0,042	22,081	13,860	26,491	23,736	2,960	12,472
	2ª	36	0,546	0,838	0,691	0,061	8,813	15,774	20,518	17,879	1,113	6,225
	3ª	36	0,881	1,795	1,550	0,207	13,371	13,246	17,982	15,128	0,895	5,915
	4ª	36	1,817	2,767	2,387	0,242	10,146	10,729	17,933	14,639	1,234	8,429



	1ª Amostra	2ª Amostra	3ª Amostra	4ª Amostra
Teor de Fibra (%)	23,7	17,9	15,1	14,6
Teor de Brix (%)	8,2	6,1	12,1	14,7
Teor de Umidade (%)	68,1	76,1	72,8	70,7
t Cana ha-1 (Médio)	5,3	25,8	68,2	108,7
Idade Média (mes)	3,5	6,7	9,7	12,4
N	36	36	36	36

Gráfico 3. Evolução dos teores de fibra (%), brix (%) e umidade (%) da cana-de-açúcar integral, considerando as análises realizadas neste estudo.

Os demais resultados das análises laboratoriais tecnológicas de cada amostra são apresentados no anexo 3.

4.4 Desempenho do modelo agrometeorológico-espectral avaliado na estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar.

Diante dos objetivos principais e secundários deste trabalho, o modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972) foi implementado, neste estudo, utilizando-se da combinação de quatro diferentes variáveis de entrada meteorológicas e quatro diferentes variáveis de entrada espectral, gerando assim, dezesseis diferentes resultados de acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar para as áreas de estudo, conforme descritos na Tabela 6.

Esses dezesseis conjuntos de dados das modelagens, descritos na Tabela 6, foram comparados estatisticamente aos resultados da avaliação de matéria seca da cana-de-açúcar observados pelas amostras coletadas em campo, em quatro diferentes períodos. Desta forma, pode-se avaliar o desempenho da utilização dos modelos ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. Além destes quatro períodos, foram analisados ainda, os resultados gerais, no acumulado de todo o ciclo de desenvolvimento.

Em relação ao resultado acumulado, tivemos os dezesseis diferentes conjuntos de dados provenientes das modelagens de acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar, os quais foram individualmente comparados com o conjunto de dados provenientes da quantificação de matéria seca da cana-de-açúcar observados em campo. Cada um destes conjuntos foi composto por cento e quarenta e quatro amostras.

O primeiro passo na análise estatística foi à submissão de todos os conjuntos de dados aos testes de distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk à significância de 95%, onde todos os dezessete conjuntos de dados tiveram a hipótese nula rejeitada, ou seja, p-valor < 0,05, comprovando que os conjuntos de dados não possuíam distribuição normal.

Na sequência, os dezesseis conjuntos de dados provenientes das modelagens foram submetidos um a um, ao teste de igualdade de médias com o conjunto de dados observados em campo pelo teste t de Wilcoxon, destinado à comparação de médias entre conjuntos de amostras pareadas e não paramétricas. O teste de igualdade de média foi submetido à análise da hipótese nula (H0: $\mu = \mu_0$) à significância de 95%.

Nestes testes, sete conjuntos de dados não tiveram a hipótese nula rejeitada à significância de 95%, ou seja, tiveram p-valor > 0,05. Os conjuntos que não tiveram a hipótese nula rejeitada foram os modelos 01 (p-valor: 0,3324), modelo 05 (p-valor: 0,9952), modelo 07 (p-valor: 0,1539), modelo 09 (p-valor: 0,8638), modelo 11 (p-valor: 0,1789), modelo 13 (p-valor: 0,8341) e o modelo 15 (p-valor: 0,1935). Todos os demais modelos tiveram a hipótese nula rejeitada.

Na sequência, os conjuntos de dados foram submetidos ao cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r), onde novamente, cada um dos dezesseis conjuntos de dados modelados foi analisado em comparação com o conjunto de dados observados em campo. Neste item, todos os dezesseis modelos apresentaram correlação positiva forte, segundo a tabela de classificação de COSTA (2005), com valores de r entre 0,9586 e 0,9708. Da mesma

forma, todos os dezesseis conjuntos de dados tiveram p-valor < 0,05, de forma que a hipótese nula (H0: ρ xy = 0) foi rejeitada em todos eles, sendo assim, possível afirmar com 95% de certeza que há correlação linear na população.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) indica o nível de precisão do conjunto de resultados modelados em relação ao conjunto de resultados observados em campo. Na sequência do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, os conjuntos de dados foram submetidos ao cálculo do coeficiente de concordância ou de desempenho (d) proposto por WILLMOTT et al. (1985), o qual varia de 0 a 1, indicando que quanto mais próximo de 1, maior é a acurácia do conjunto de dados modelado em relação ao conjunto de dados observado em campo. Neste cálculo, novamente todos os dezesseis conjuntos de dados tiveram ótimo desempenho, com valor de d entre 0,9753 e 0,9824. Com o cálculo dos coeficientes de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de concordância de Willmott (d), foi possível calcular o coeficiente de confiança (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), que une os dois coeficientes r e d, de forma a fornecer um coeficiente único que indique a precisão e acurácia dos conjuntos de dados.

Segundo a tabela de classificação do coeficiente de confiança (c), todos os dezesseis conjuntos de dados modelados podem ser considerados como Ótimo (c > 0,85), uma vez que os valores de c para os conjuntos de dados apresentaram valores entre 0,9352 e 0,9534.

Para concluir as análises estatísticas destes modelos, foram calculados para cada conjunto de dados, dois indicadores de erros médios entre os conjuntos de dados modelados e o conjunto de dados observados em campo, a Raíz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e o Erro Absoluto Médio (MAE), onde os conjuntos de dados com valores mais representativos (menores erros médios) foram os modelos 01 (RMSE: 1.458,6952 kg – MAE: 2,0219 Kg), modelo 07 (RMSE: 1.437,5040 Kg – MAE: -48,8933 Kg), o modelo 11 (RMSE: 1.424,1773 – MAE: -37,4254 Kg) e o modelo 15 (RMSE: 1.619,1272 Kg – MAE: -18,5063 Kg).

De maneira geral, podemos concluir que o modelo com melhor desempenho foi o modelo 11, com coeficiente de confiança (c) de 0,9534 e RMSE: 1.424,1773 Kg e MAE: -37,4254 Kg, seguido pelo modelo 07, com coeficiente de confiança (c) de 0,9530 e RMSE: 1,437,5040 e MAE: -48,8933, e do modelo 01, com coeficiente de confiança (c) de 0,9521 e RMSE: 1.458,6952 e MAE: 2,0219.

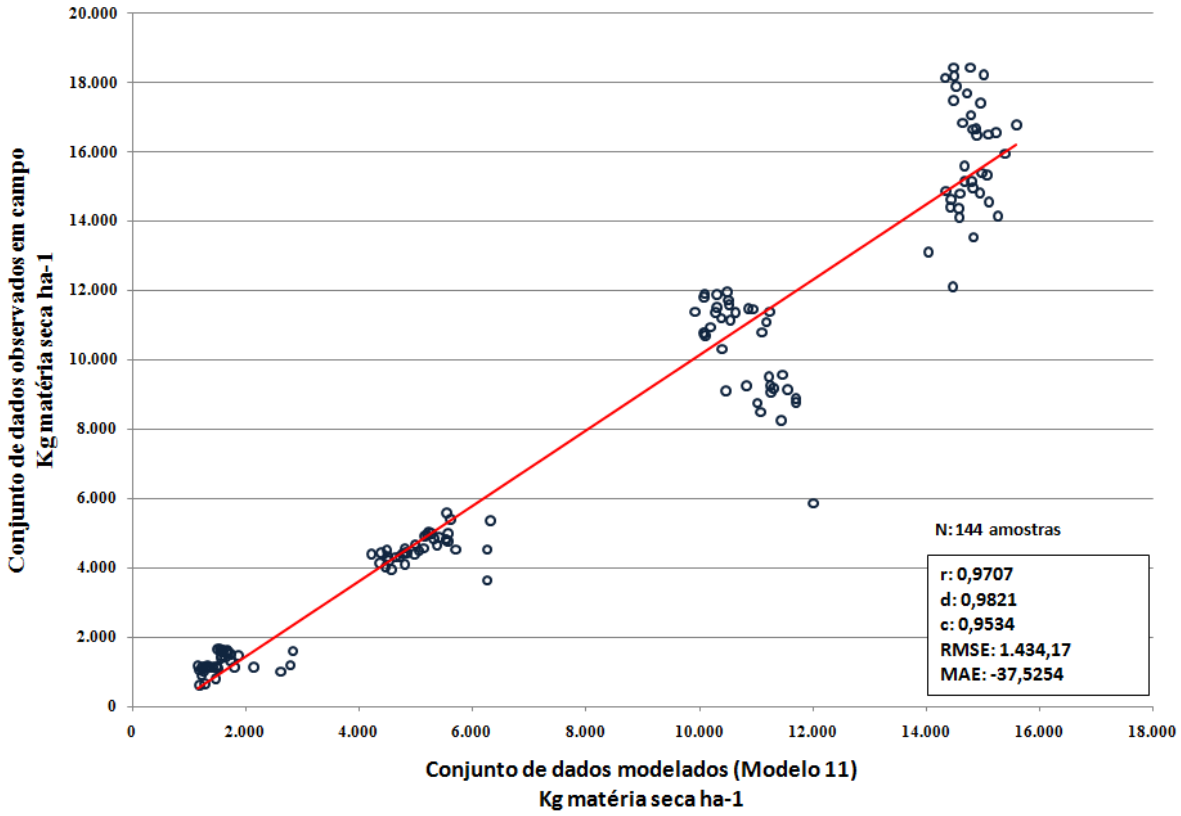


Figura 24. Curva de correlação de Pearson obtida entre o conjunto de dados do modelo 11 comparado ao conjunto de dados observados em campo para o período acumulado de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A Tabela com o resumo dos resultados estatísticos para todos os dezesseis conjuntos de dados analisados com relação ao resultado acumulado da produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento consta do anexo 4.

As análises estatísticas para os dados modelados *versus* os dados observados durante o 1º período de coleta de amostras em campo, realizados no início da fase de perfilhamento da cultura (entre 100 e 110 dias de ciclo) foram as mesmas aplicadas aos conjuntos de dados de todo o ciclo. Inicialmente, os dezesseis conjuntos de dados modelados e o conjunto de dados observados em campo, cada um deles com trinta e seis amostras, foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk à significância de 95%. Como resultado destes testes, apenas o conjunto de dados observados em campo (p-valor: 0,2066) não rejeitou a hipótese nula, podendo ser considerado como conjunto de dados de distribuição normal. Todos os dezesseis conjuntos de dados modelados produziram p-valor < 0,05 e rejeitaram a hipótese nula.

Na sequência, os mesmos conjuntos de dados modelados foram submetidos um a um, ao teste de igualdade de média (t) de Wilcoxon à significância 95% em comparação com o conjunto de dados observados em campo. Nestes testes, todos os dezesseis conjuntos de dados tiveram a hipótese nula não rejeitada (p-valor < 0,05), ou seja, a média do conjunto de dados modelados é diferente da média do conjunto de dados observados em campo.

No cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r), os modelos 08 (r: 0,2445) e modelo 12 (r: 0,2479) foram classificados como conjunto de dados com correlação positiva bem fraca (0,01 a 0,25), ambos com p-valor > 0,05. Já o restante (quatorze outros) dos conjuntos de dados foram classificados como correlação positiva fraca (0,26 a 0,50), pois apresentaram valores de r entre 0,2532 e 0,3831. A maior correlação foi o modelo 14 com r: 0,3831, porém, este com p-valor < 0,05.

Submetidos ao cálculo do coeficiente de concordância ou desempenho (d) de Willmott, os conjuntos de dados modelados apresentaram valores de c entre 0,3904 e 0,4865, apresentando acurácia mediana. E de acordo com o coeficiente de desempenho (c), todos dezesseis conjuntos de dados modelados para o 1º período de amostragem em campo (início da fase de perfilhamento) são considerados com desempenho péssimo (c $\leq$ 0,40), já que apresentaram valores de c entre 0,0958 e 0,1861.

Na análise dos conjuntos de dados modelados para o 2º período de amostragem em campo, realizado entre o final da fase de perfilhamento e início da fase de crescimento dos colmos (entre os 200 e 210 dias de ciclo), o conjunto de dados observados em campo teve a hipótese nula não rejeitada, apresentando distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk, com p-valor de 0,8066. Da mesma forma, tiveram a hipótese nula não rejeitada e foram considerados de distribuição normal, os conjuntos de dados dos modelos 01 (p-valor: 0,6505), modelo 03 (p-valor: 0,1258), modelo 04 (p-valor: 0,3729); modelo 05 (p-valor: 0,6119), modelo 07 (p-valor: 0,1077), modelo 09 (p-valor: 0,6755), modelo 11 (p-valor: 0,1331) e modelo 13 (p-valor: 0,3184). Os demais conjuntos de dados tiveram a hipótese nula rejeitada e não apresentam distribuição normal.

Todos os dezesseis conjuntos de dados foram submetidos um a um ao teste de igualdade de médias com o conjunto de dados observados em campo, porém, os conjuntos de dados que tiveram a hipótese nula não rejeitada no teste de normalidade de Shapiro-Wilk foram submetidos ao teste de igualdade de média (t) de Student, destinado a conjuntos de

amostras pareadas e paramétricas, já os conjuntos de dados que tiveram a hipótese nula rejeita no teste de normalidade de Shapiro-Wilk, foram submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Wilcoxon, destinado à conjunto de amostras pareadas e não paramétricas.

Tanto os conjuntos de dados modelados submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Student quanto os submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Wilcoxon, tiveram a hipótese nula rejeitada (H0: $\mu = \mu_0$) à significância de 95%, pois apresentaram p-valor < 0,05, indicando que a média do conjunto de dados modelados é diferente da média do conjunto de dados observados em campo.

De acordo com o cálculo de correlação de Pearson (r) os conjuntos de dados dos modelos 14 (r: 0,5221), modelo 15 (r: 0,5180) e modelo 16 (r: 0,5173) são considerados de correlação positiva média (r entre 0,51 e 0,75) com o conjunto de dados observados em campo. Já os demais conjuntos de dados são considerados de correlação positiva fraca (r entre 0,26 e 0,50), pois apresentaram valores de r entre 0,4270 e 0,4979.

No cálculo do coeficiente de concordância ou desempenho (d) de Willmott, os conjuntos de dados modelados apresentaram valores de d entre 0,4217 e 0,5813, com destaque para modelo 05 que apresentou o maior valor de d.

De acordo com a tabela de interpretação do coeficiente de confiança (c), os conjuntos de dados modelados em comparação com o conjunto de dados observados em campo para o 2º período de amostragem, entre o final da fase de perfilhamento e início da fase de crescimento dos colmos, são considerados de desempenho péssimo, pois apresentam valores de c entre 0,1953 e 0,2853.

Na análise dos conjuntos de dados modelados em comparação ao conjunto de dados observados em campo durante o 3º período de amostragem, realizada no final da fase de crescimento dos colmos (entre 290 e 300 dias de ciclo), os conjuntos de dados dos modelos 02 (p-valor: 0,4181), modelo 03 (p-valor: 0,0861), modelo 04 (p-valor: 0,3309), modelo 06 (p-valor: 0,4444), modelo 07 (p-valor: 0,0868), modelo 08 (p-valor: 0,3281), modelo 10 (p-valor: 0,4901), modelo 11 (p-valor: 0,0975) e modelo 12 (p-valor: 0,3593) tiveram a hipótese nula não rejeitada para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk à significância de 95%, e são considerados conjuntos de dados com distribuição normal. Os demais conjuntos de dados modelados, bem como o conjunto de dados observados em campo tiveram a hipótese nula rejeita, pois apresentam p-valor < 0,05.

Na sequência os conjuntos de dados modelados foram submetidos um a um ao teste de igualdade de médias com o conjunto de dados observados em campo, sendo que os conjuntos de dados modelados que tiveram a hipótese nula não rejeitada no teste de normalidade de Shapiro-Wilk foram submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Student, já os que tiveram a hipótese nula rejeitada foram submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Wilcoxon. De acordo com os resultados destes testes, os conjuntos de dados dos modelos 07 (p-valor: 0,1210) e modelo 11 (p-valor: 0,1473) submetidos ao teste t de Student e os conjuntos de dados dos modelos 01 (p-valor: 0,4050), modelo 05 (p-valor: 0,6487), modelo 09 (p-valor: 0,7415), modelo 13 (p-valor: 0,5824), modelo 14 (p-valor: 0,1275) e o modelo 15 (p-valor: 0,2088), submetidos ao teste t de Wilcoxon tiveram a hipótese nula não rejeitada, indicando que a média do conjunto de dados modelados é igual à média do conjunto de dados observados em campo, à significância de 95%.

De acordo com a tabela de interpretação do coeficiente de correlação de Pearson (r), proposta por COSTA (2005), os conjuntos de dados dos modelos 13 (r: -0,7624), modelo 14 (r: -0,7917), modelo 15 (r: -0,8054) e modelo 16 (r: -0,8108) são considerados de correlação negativa forte como conjunto de dados observados em campo. Já os demais conjuntos de dados modelados são considerados de correlação negativa média em relação ao conjunto de dados observados em campo, pois apresentaram valores de r entre -0,7463 e -0,6574. Todos os conjuntos de dados tiveram p-valor < 0,05.

No cálculo do coeficiente de concordância e desempenho (d) de Willmott, os valores de c foram entre 0,0587 e 0,3123, com destaque para o modelo 04, o qual apresentou o maior valor de d (0,3123). E segundo a tabela de interpretação do coeficiente de desempenho (c), todos os conjuntos de dados modelados para o 3º período de amostragem (final da fase de crescimento dos colmos) são considerados de desempenho péssimo, pois apresentaram valores de c entre 0,0447 e 0,2329.

Na análise do conjunto de dados modelados para o 4º período de amostragem, realizado ao final da fase de maturação (aos 380 dias de ciclo), em comparação com o conjunto de dados observados em campo para o período, apenas os conjuntos de dados dos modelos 01 (p-valor: 0,0096),modelo 05 (p-valor: 0,0159) e modelo 09 (p-valor: 0,0073) tiveram a hipótese nula rejeitada para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk à significância de 95%. Todos os demais conjuntos de dados modelados, bem como o conjunto de dados

observados em campo tiveram a hipótese nula não rejeitada à significância de 95% (p-valor > 0,05), desta forma, sendo considerados como conjuntos de dados com distribuição normal.

Na sequência, os conjuntos de dados modelados foram submetidos um a um ao teste de igualdade de médias com o conjunto de dados observados em campo, sendo que os modelos 01, modelo 05 e modelo 09 foram submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Wilcoxon, pois tiveram a hipótese nula rejeitada no teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Estes três conjuntos de dados também tiveram a hipótese nula rejeitada no teste de igualdade de médias, com p-valor de < 0,05.

Os demais conjuntos de dados modelados foram submetidos ao teste de igualdade de médias (t) de Student, onde os modelos 02 (p-valor: 0,0629), modelo 04 (p-valor: 0,8282), modelo 08 (p-valor: 0,4855), modelo 12 (p-valor: 0,4893) e modelo 16 (p-valor: 0,2057) tiveram a hipótese nula não rejeitada do teste de igualdade de médias, podendo ser considerado que a média dos conjuntos de dados modelados é igual à média dos conjuntos de dados observados em campo, à significância de 95%.

De acordo com a tabela de interpretação do coeficiente de correlação de Pearson (r), os modelos 02 (r: -0,0503), modelo 04 (r: -0,1869), modelo 06 (r: -0,0287), modelo 08 (r: -0,1671), modelo 10 (r: -0,0158) e modelo 11 (r: -0,1536) são classificados como de correlação negativa bem fraca, enquanto que os modelos 13 (r: -0,2526), modelo 14 (r: -0,3817), modelo 15 (r: -0,3590) e modelo 16 (r: -0,4657) são classificados como de correlação negativa fraca e os modelos 01 (r: 0,1694), modelo 03 (r: 0,0794), modelo 05 (r: 0,1656), modelo 07 (r: 0,0900), modelo 09 (r: 0,2033) e modelo 11 (r: 0,1236) são classificados como de correlação positiva bem fraca com o conjunto de dados observados em campo.

O cálculo do coeficiente de concordância ou desempenho (d) de Willmot para os conjuntos de dados modelados teve os valores de d entre 0,1625 e 0,4999, com destaque para os modelos 01 (d: 0,4928), modelo 05 (d: 0,4949) e o modelo 09 (d: 0,4999). De acordo com a tabela de interpretação do coeficiente de confiança (c), os conjuntos de dados modelados em comparação ao conjunto de dados observados em campo, para o 4º período de amostragem, realizado na fase de maturação da cultura, são classificamos como de desempenho ruim, pois apresentaram valores de c entre 0,0066 e 0,1457.

A Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados dos indicadores estatísticos t (teste de igualdade de médias) e c (coeficiente de confiança) para os conjuntos de dados modelados em

comparação ao conjunto de dados observados em campo para cada um dos quatro períodos de amostragem e também para o resultado de todo o ciclo.

Tabela 12. Indicadores estatísticos de precisão e acurácia dos conjuntos de dados modelados em comparação com o conjunto de dados observados em campo em cada período de amostragem e no acumulado de todo o ciclo.

Modelo	1ª Amostragem		2ª Amostragem		3ª Amostragem		4ª Amostragem		Acumulado	
	r	d	r	d	r	d	r	d	r	d
Mod. 01	0,292	0,438	0,435	0,545	-0,669	0,114	0,169	0,493	0,9702	0,9813
Mod. 02	0,311	0,434	0,473	0,500	-0,711	0,260	-0,050	0,361	0,9688	0,9819
Mod. 03	0,299	0,435	0,464	0,525	-0,742	0,180	0,079	0,453	0,9701	0,9824
Mod. 04	0,253	0,390	0,463	0,422	-0,746	0,312	-0,187	0,163	0,9673	0,9788
Mod. 05	0,281	0,439	0,427	0,581	-0,675	0,097	0,166	0,495	0,9704	0,9804
Mod. 06	0,303	0,437	0,471	0,538	-0,711	0,224	-0,029	0,417	0,9694	0,9823
Mod. 07	0,293	0,438	0,460	0,566	-0,745	0,130	0,090	0,474	0,9705	0,9821
Mod. 08	0,245	0,392	0,460	0,450	-0,746	0,297	-0,167	0,222	0,9679	0,9804
Mod. 09	0,287	0,443	0,433	0,579	-0,657	0,099	0,203	0,500	0,9708	0,9804
Mod. 10	0,305	0,440	0,472	0,534	-0,706	0,218	-0,016	0,419	0,9694	0,9824
Mod. 11	0,297	0,441	0,464	0,563	-0,736	0,124	0,124	0,479	0,9707	0,9821
Mod. 12	0,248	0,394	0,462	0,447	-0,741	0,294	-0,154	0,225	0,9680	0,9805
Mod. 13	0,361	0,487	0,498	0,573	-0,762	0,059	-0,253	0,435	0,9622	0,9753
Mod. 14	0,383	0,486	0,522	0,519	-0,792	0,129	-0,382	0,349	0,9603	0,9772
Mod. 15	0,374	0,486	0,518	0,550	-0,805	0,070	-0,359	0,406	0,9617	0,9769
Mod. 16	0,326	0,434	0,517	0,436	-0,811	0,210	-0,466	0,182	0,9586	0,9756

r: Coeficiente de correlação de Pearson; **d:** Coeficiente de concordância ou desempenho de Willmott

A Tabela 13 apresenta os valores de produtividade média de matéria seca da cana-de-açúcar (Kg MS ha-1) para as áreas de estudo nº 01 e nº 02, obtidos pelos modelos avaliados durante os quatro períodos de coleta de amostras em campo, bem como a variação percentual dos valores modelados em comparação aos valores observados em cada período.

Tabela 13. Valores de produtividade média de matéria seca da cana-de-açúcar (Kg MS ha-1) obtidos pelos modelos avaliados durante os quatro períodos de coleta de amostras em campo e sua variação percentual em relação a produtividade média observada em campo em cada período.

Modelagem	1ª Amostragem		2ª Amostragem		3ª Amostragem		4ª Amostragem	
	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)
Mod. 01	**1.607,5**	**27,4%**	**5.117,0**	**11,1%**	**10.695,9**	**3,5%**	**14.684,7**	**-7,7%**
Mod. 02	1.629,3	29,1%	5.302,4	15,1%	11.336,7	9,7%	15.366,9	-3,4%
Mod. 03	1.618,6	28,3%	5.209,9	13,1%	11.016,5	6,6%	15.026,0	-5,6%
Mod. 04	1.686,9	33,7%	5.614,1	21,9%	11.823,9	14,4%	15.975,9	0,4%
Mod. 05	**1.589,2**	**26,0%**	**4.998,7**	**8,5%**	**10.525,7**	**1,8%**	**14.472,0**	**-9,0%**
Mod. 06	1.610,9	27,7%	5.183,3	12,6%	11.130,1	7,7%	15.107,4	-5,1%
Mod. 07	**1.600,0**	**26,8%**	**5.091,0**	**10,6%**	**10.827,9**	**4,8%**	**14.789,7**	**-7,1%**
Mod. 08	1.667,9	32,2%	5.484,6	19,1%	11.607,9	12,3%	15.707,0	-1,3%
Mod. 09	**1.581,2**	**25,3%**	**5.011,1**	**8,8%**	**10.476,8**	**1,4%**	**14.436,5**	**-9,3%**
Mod. 10	1.603,8	27,1%	5.195,2	12,8%	11.110,3	7,5%	15.111,5	-5,0%
Mod. 11	**1.592,5**	**26,2%**	**5.103,2**	**10,8%**	**10.793,5**	**4,4%**	**14.774,0**	**-7,2%**
Mod. 12	1.660,2	31,6%	5.500,7	19,5%	11.587,0	12,1%	15.709,2	-1,3%
Mod. 13	**1.571,0**	**24,5%**	**5.102,6**	**10,8%**	**10.537,4**	**2,0%**	**14.286,7**	**-10,2%**
Mod. 14	1.593,5	26,3%	5.287,0	14,8%	11.105,4	7,5%	14.890,6	-6,4%
Mod. 15	**1.582,3**	**25,4%**	**5.194,8**	**12,8%**	**10.821,4**	**4,7%**	**14.588,6**	**-8,3%**
Mod. 16	1.648,8	30,7%	5.597,8	21,6%	11.588,9	12,1%	15.488,7	-2,7%
Obs. Campo	1.261,6	0,0%	4.605,0	0,0%	10.334,6	0,0%	15.911,9	0,0%

Com relação às variações percentuais entre as produtividades médias modeladas e a produtividade média observada em campo, e levando em consideração nesta análise apenas os modelos que tiveram a hipótese nula não rejeitada nos testes de igualdades de médias (modelos 01, 05, 07, 09, 11, 13 e 15), notamos que inicialmente, no 1º período de amostragem, os modelos superestimavam as produtividades médias, apresentando variações entre 24,5% e 27,4% sobre a produtividade média observada em campo. Já no 2º período de amostragem, os modelos ainda superestimavam as produtividades médias, porém, reduzindo as variações valores entre 8,5% e 12,8%, redução esta notada também no 3º período de amostragem, onde

as variações entre as produtividades médias modeladas e a observada em campo foram entre 1,4% e 4,8%. Já ao final do 4º período de amostragem, a tendência de redução da variação entre as produtividades modeladas e a observada em campo, continuaram a ocorrer, porém, nesta ocasião, o modelo já iniciava a apresentar uma subestimativa das produtividades médias modeladas, apresentando variações entre -7,1% e -10,2% em relação a produtividade média observada em campo. Vale ressaltar que, entre o 3º e o 4º períodos de amostragem em campo, notou-se o tombamento do canavial, principalmente na área de estudo nº 01, conforme já mencionado nas discussões sobre as coletas de amostras em campo. Este fator pode ter influenciado neste resultado, principalmente, devido à maior exposição dos colmos e da palha da cana-de-açúcar em relação ao dossel em função deste tombamento, influenciando assim os valores de NDVI obtidos pelas imagens MODIS sobre as áreas de estudo.

A tabela com as produtividades médias modeladas e as variações percentuais em relação as produtividades médias observadas para cada área de estudo em cada período de amostragem constam do anexo 6.

A Figura 25 apresenta graficamente os resultados obtidos pela implementação dos Modelos 11 e 15 para o acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar (em Kg MS ha-1) para as áreas de estudo nº 01 e nº 02, expresso pela curva denominada "Produtividade Modelada", onde é possível obter a cada período a produtividade média acumulada de matéria seca da cana-de-açúcar durante cada período de desenvolvimento da cultura. Nesta mesma curva, é plotada a barra de erros com os desvios-padrão calculados para cada período. A curva denominada "Produtividade Potencial" é calculada pela mesma equação 2.5, porém, considerando a variável fAPAR como uma constante 1, representando assim, a produtividade potencial para as áreas de estudo, caso a planta tivesse em condições de absorver toda a radiação disponível para o acúmulo da matéria-seca.

Nesta Figura, é possível, visualizar os desvios da produtividade média modelada em relação a produtividade média observada em campo durante os quatro períodos de coletas de amostras em campo.

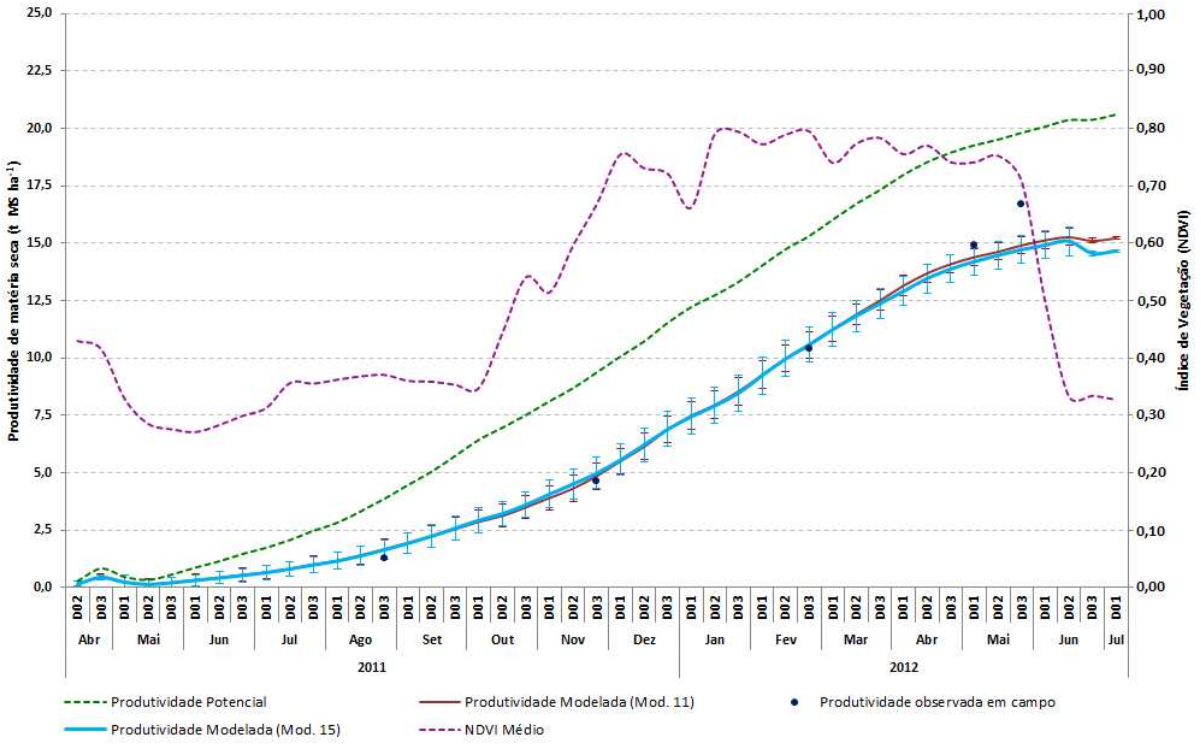


Figura 25. Gráfico com as curvas de produtividade média acumulada e produtividade média potencial de matéria seca da cana-de-açúcar para as áreas de estudo nº 01 e nº 02 obtidas pelos Modelos 11 e 15.

Ao avaliarmos a utilização das diferentes variáveis espectrais no desempenho dos modelos avaliados neste estudo, ficam evidentes que os quatro modelos que utilizaram do NDVI obtido a partir das imagens do Satélite Aqua foram os que obtiveram melhor desempenho, sendo que todos tiveram a hipótese nula não rejeita nos testes de igualdades de média com o conjunto de dados observados em campo. Os valores de coeficiente de correlação para os quatro modelos que utilizaram o NDVI do Satélite Aqua e as três variações de agrupamento dos dados agrometeorológicos obtidos da estação meteorológica de superfície apresentaram coeficientes de confiança em torno de 0,952, com baixos valores de RMSE e MAE. Já o modelo que utilizou o NDVI do Satélite Aqua em conjunto com os dados agrometeorológicos decendiais do ECMWF, apresentou coeficiente de confiança de 0,9384, valores de RMSE e MAE próximos dos obtidos pelos outros três modelos.

Também apresentaram bons desempenhos os modelos que utilizaram do NDVI médio entre as imagens dos Satélites Aqua e Terra, em combinação com os dados

agrometeorológicos decendiais e em composição de 8 dias obtidos pela estação meteorológica de superfície e dos dados decendiais do ECMWF, com valores de coeficientes de confiança e erros médios muito próximo dos modelos que utilizaram o NDVI do Satélite Aqua.

Ambos os modelos que utilizaram os valores de NDVI do Satélite Terra e os valores de NDVI máximo entre as imagens dos Satélites Terra e Aqua, apesar de terem valores de coeficientes de confiança próximo aos valores dos demais conjuntos de dados, tiveram valores de erros médios (RMSE e MAE) superiores aos outros modelos e ainda assim, todos eles tiveram a hipótese nula rejeitada no teste de igualdade de médias com os conjuntos de dados observados em campo, desta forma apresentando desempenho inferior aos demais modelos avaliados.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram comprovar que a utilização do modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972) é viável para a estimativa de produção de matéria seca da cana-de-açúcar, em escala local, apresentando altos valores de precisão e acurácia entre as produtividades modeladas e as observadas em campo ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Sob a análise de desempenho dos modelos em cada uma das fases de desenvolvimento da cultura, ficou evidenciada que quanto mais desenvolvida a cultura, melhor o desempenho e correlação da modelagem e que a construção e análise da curva de acúmulo de matéria seca ao longo de todo o período de desenvolvimento da cultura nos fornece resultados quantitativos muito favoráveis para a estimativa de produção de matéria seca da cana-de-açúcar a partir destes modelos, comprovando assim a hipótese de que a utilização dos modelos agrometeorológicos-espectrais avaliados neste estudo podem fornecer uma boa estimativa de produtividade de matéria seca da cana-de-açúcar durante todo o ciclo de desenvolvimento anual da cultura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização dos dados meteorológicos de estação de superfície em conjunto com os dados das imagens do sensor MODIS, a bordo do Satélite Aqua, demonstraram os melhores desempenhos em relação às demais combinações de variáveis de entrada das modelagens avaliadas (modelos 01, 05 e 09), sendo que quanto mais coerentes os agrupamentos dos dados meteorológicos com os espectrais (períodos de obtenção ou agrupamento dos dados) melhor foi seu desempenho em relação à produtividade observada em campo.

Deve-se apenas atentar ao fato, que a análise dos pixels individualmente pode apresentar maiores variações no desempenho, devido à dispersão dos dados e variabilidade da cultura, porém, quando analisado em conjuntos de pixels, as estimativas são muito próximas das observadas em campo (dentro do valor médio da produtividade modelada mais ou menos um desvio padrão).

Os modelos que utilizaram dos dados espectrais do sensor MODIS, a bordo do Satélite Terra (modelos 02, 06, 10 e 14) apresentaram valores de precisão e acurácia altos tanto quanto os que utilizaram dos dados do Satélite Aqua, porém, com variações de erros superiores e conjuntos de dados reprovados nos testes estatísticos submetidos, impossibilitando a afirmação de que os resultados não ocorreram ao acaso. O mesmo aconteceu quando analisado os modelos que utilizaram do valor máximo de NDVI dos dois Satélites como variável de entrada espectral.

Porém, a utilização de ambos os dados dos Satélites Aqua e Terra, em complemento um ao outro, por meio do valor médio entre as duas observações (modelos 03, 07, 11 e 15), demonstrou ótimos resultados, muito próximos dos resultados obtidos com a utilização dos dados do Satélite Aqua. A utilização de ambos os dados em conjunto, apesar de aumentar a necessidade de aquisição e processamento de dados, possibilita uma melhor cobertura sobre as áreas de interesse, preenchendo lacunas na aquisição de dados, que seriam cobertas por algum tipo de filtragem.

De acordo com os resultados obtidos, é possível ainda afirmar que a utilização dos dados meteorológicos provenientes dos modelos do ERA Interim, disponibilizados pelo ECMWF, podem ser utilizados em conjunto com os dados espectrais do Satélite Aqua ou do valor médio de ambos os Satélites, para a estimativa de produtividade de matéria seca da cana-

de-açúcar, sem grandes perdas em relação às produtividades modeladas pelos modelos 01, 05 e 09 e as observadas em campo. Sendo assim, uma alternativa viável para utilização na modelagem em locais onde não haja a cobertura por estações meteorológicas de superfície.

Apesar dos bons resultados obtidos a partir da implementação do modelo agrometeorológico-espectral baseado na abordagem clássica de MONTEITH (1972) tanto com os dados de estação meteorológica de superfície quanto com os dados meteorológicos dos modelos ERA Interim e os dados espectrais dos sensores MODIS, vale ressaltar a limitação do modelo quanto a determinação do período de acúmulo de matéria seca no campo, ou seja, a data inicial e a final consideradas para o calculo da produtividade acumulada no período, uma vez que, nas condições de colheita mecanizada sem uso de fogo para o despalhamento da cana-de-açúcar no ciclo anterior, o ciclo inicia-se com respostas espectrais médias (NDVI em torno de 0,10) devido à cobertura do solo por palha da cana-de-açúcar, durante o período em que ainda não houve a brotação da nova planta. Desta forma, é ideal, utilizar-se de outras fontes para o acompanhamento das datas de início e fim do ciclo de acúmulo de matéria seca, além, da determinação pela análise das curvas dos índices de vegetação.

Como oportunidade de melhoria neste estudo, vale sugerir a continuidade nas pesquisas que visem o melhor entendimento da interação da variável fAPAR na cana-de-açúcar, bem como o desenvolvimento de outras metodologias para a obtenção dos valores desta variável mais específicas para a cultura. Outro ponto seria o desenvolvimento de pesquisas que visem analisar a possibilidade de utilização da modelagem aqui estudada para a previsão de produtividade de matéria total da cana-de-açúcar, uma vez que esta condição é a mais usualmente procurada pelas entidades produtoras e avaliadoras de produção do mercado sucroenergético.

REFERÊNCIAS

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

ALFONSI, R. R.; PEDRO JR. M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. **Condições climáticas para a cana-de-açúcar.** In: PARANHOS, S.B. et al. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987.

ALMEIDA, E. S. de; VINHAS, L.; CORREA; P. C. do P. **Extração e Manipulação dos dados de reanálise do ECMWF utilizando MetView.** <http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/07.07.13.02/doc/Almeida_Extracao%20e%20manipulacao%20do%20dados%20de%20reanalise%20.pdf>, acesso em 17 de janeiro de 2012.

ALMEIDA, T. S. de; FONTANA, D. C.; MARTORANO, L. G.; BERGAMASCH, H. **Índices de vegetação para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p.17-24.

ANDRADE, A. L. B.; CARDOSO, M. B. **Cultura da cana-de-açúcar.** Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J. L. **Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat.** Agronomy Journal, v. 76, p. 300-306, 1984.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (Saccharumspp): um modelo matemático-fisiológico de estimativa.** 112p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BELL, R.W. et al. **Growth and nodulation of tropical food legumes in dilute solution culture.** Plant Soil, v.122, p.249- 258, 1990.

BENVENUTI, F. A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos.** 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Concentração em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. **Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS.** Scientia Agricola, v. 60, n. 3, p. 433-440, Jul.-Sept. 2003.

BEURS, K. M., HENEBRY, G. M., 2005, **A statistical framework for the analysis of long image time series.** International Journal of Remote Sensing, v. 26, n. 8, pp. 1551-1573.

BERDING, N. et al. **Tropical, managed initiation of sugarcane flowering: optimization of nonphotoperiodic variables.** Proc Aust Soc Sugar Cane Technol, v.26, p.1-12, 2004.

BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta.** 112 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BORGES, G. G.; MOREIRA, H. R.; SILVA, E. da. **Co-geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro: cadastro das usinas em São Paulo.** <http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2008/Artigos/68.pdf>, Acesso em 05 de agosto de 2010.

BRINHOLI, O. **Resistência ao frio de diferentes variedades de cana-de-açúcar (Saccharum spp).** 88 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Fitotecnia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1972.

CALADO, V. **Estatística Básica.**8ª Ed. Rio de Janeiro: Statfost South America, 2010.

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

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

CARREIRAS, J. M. B.; PEREIRA, J. M. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; STROPPIANA, D. **Evaluation of compositing algorithms over the Brazilian Amazon using SPOT-4 VEGETATION data.** International Journal of Remote Sensing, v. 24, n. 17, p. 3427-3440, September 2003.

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

CASTRO, P. R. de C.; CÂMARA, G. M. S.; CESAR, M. A. A.; NOGUEIRA, M. C. S. **Ação comparada de maturadores em dois cultivares de cana-de-açúcar.** Álcool & Açúcar, São Paulo, n.73, p.36-39, 1994

CASTRO, P. R. de C. **Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar.** In: Simpósio Internacional de Fisiologia da cana-de-açúcar, Anais... Piracicaba: STAB, 9p, 2000.

CASTRO, P. R. de C.; KLUGE, R. A. **Ecofisiologia de Culturas Extrativas: Cana-de-açúcar, Seringueira, Coqueiro, Dendezeiro e Oliveira.** Cosmópolis: STAB, 138 p., 2001.

CHEN, J. C. P.; CHOU, C. **Cane Sugar Handbook. A manual for cane sugar manufacturers and their chemists.** 12nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

COLL, J. B.; RODRIGO, G. N.; GARCIA, B. S.; TAMÉS, R. S. **Fisiologia vegetal.** 6ª ed. Madri: Ediciones Pirâmide, 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de Safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, abril/2013 - Companhia Nacional de Abastecimento.** Brasília: Conab 2013.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Instruções.** 5ª ed. Piracicaba: Consecana-SP, 2006.

COSTA, S. F. **Introdução ilustrada à estatística**. 4ª Ed. São Paulo: HARBRA, 2005.

CRÓSTA, Á. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Ed. Revisada. Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 1993. 170p.

CURRAN, P. J. **Principles of Remote Sensing.** New York: Longman, 1986.

DEE, D. P.; UPPALA; S. M. SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G. BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIFLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACK, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; McNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P. de; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J. N.; VITART, F. **The Era-Interim reanalysis: configuration and performance of data assimilation system.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v.n. 137, p. 553-597, April, 2011.

DELGADO-ROJAS, J. S.; BARBIERI, V. **Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.

DILLEWIJN, C. Van. **Botany of sugarcane.** Waltham: The Chronica Botanica, p. 97-161, 1952.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33).

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis.** New York: John Wiley & Sons. 1966. 407 p.

EERENS, H.; KEMPENEERS, P.; PICCARD, I.; VERHEIJEN, Y. **Crop Monitoring and Yield Forecasting with NOAA-AVHRR or SPOT-VEGETATION.** Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, Belgium, Expertise centrum voor Teledetectie & Atmosferische Processen, 2000.

EUROPEAN CENTRE OF MEDIUM-RANDE WEATHER FORECAST. **Era Interim.** <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>, acesso em 18 de janeiro de 2012.

FAUCCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar: técnicas agrícolas y producciones tropicales.** Barcelona: Editoral Bleme, 1975.
FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar.** 2ª ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.

FRANÇA, B. H. C.; JASINSKI, M. **Cultivo de cana de açúcar.** Dossiê Técnico, Rio de Janeiro: 19 p. Novembro, 2007.

GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T.; WIEGAND, C. L. **Errors in measuring absorbed radiation and computing canopy crop radiation use efficiency.** Agronomy Journal, v. 85, p. 1222-1228, 1993.

GARCIA, G. J. **Sensoriamento remoto: princípios e interpretação de imagens.** Rio Claro: Nobel, UNESP Campus de Rio Claro, 1982. 357p.

GASCHO, G. J. & SHIH, S. F. **Sugarcane.** In: TEARE, I.D. & PEET, M.M., ed. Crop-water relations. New York: JohnWiley, 1983, 547p.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. **Spectral properties of plants.** Applied Optics, v. 4, p. 11-20, 1965.

GOBRON, N.; PINTY, B.; AUSSEDAT, O.; CHEN, J. M.; COHEN, W. B.; FENSHOLT, R.; GOND, V.; HUEMMRICH, K.F.; LAVERGNE, T.; MÉLIN, F.; PRIVETTE, J.L.; SANDHOLT, I.; TABERNER, M.; TURNER, D. P.; VERSTRAETE, M. M.; WIDLOWSKI, J. L. **Evaluation of fraction of absorbed photosynthetically Active radiation products for different canopy radiation transfer regimes: Methodology and results using Joint Research Center products derived from SeaWiFS against ground-based estimations.** Journal of Geophysical Research, v.111, p. 1-15, 2006.

GOBRON, N.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M., WIDLOWSKI, J. L. **Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: design, performance, and applications.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, n.06, v.38. 2000.

GOBRON, N.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M.; GOVAERTS, Y. **The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): Description and preliminary application.** International Journal of Remote Sensing, v. 20, p. 1917-1927, 1999.

GOWARD, S. N., HUEMMRICH, K. F. **Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model**, Remote Sensing of Environment, v. 39, p. 119–140, 1992.

GOWER, S. T., KUCHARIK, C. J., NORMAN, J. M. **Direct and indirect estimation of leaf area index, fapar, and net primary production of terrestrial ecosystems.** Remote Sensing of the Environment. v. 70, p.29–51. 1999.

GUTMAN, G.; TARPLEY, D.; IGNATOV, A. **The enhanced NOAA global land dataset from the Advanced Very High Resolution Radiometer.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 76, n. 7, p. 1141-1156, July 1995.

HARTKAMP, A. D.; White, J. W.; Hoogenboom, G. **Interfacing geographic information systems with agronomic modeling: A review.** Agronomy Journal, v. 91, n. 5, p. 761- 722, 1999.

HOFFMANN, H. P. et al. **Variedades RB de cana-de-açúcar.** Boletim técnico - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2008, 30 p.

HOFFMANN, H. P. **Evolução do potencial produtivo das principais variedades de cana-de-açúcar cultivadas no Estado de São Paulo nos últimos cinqüenta anos.** 97 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

HUMBERT, R. P. **El cultivo de lacaña de azúcar.** México: Compañia Editorial Continental, 1974.

JOHAAN, J. A.; ROCHA, J. V.; ROLIM, G. de S.; LAMPARELLI, R. A. C.; DUFT, D. G. **Comparação entre dados de temperaruta média de estações meteorológicos com dados do modelo ECMWF entre 2000 e 2009 no Estado do Paraná.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba: INPE, p. 5817-5824, 2011.

JUNGES, Amanda Hermann; e FONTANA, Denise Cybis. **Modelo agrometeorológico-espectral de Estimativa de produtividade de grãos de trigo no Rio Grande do Sul.** Rev. Ceres, Viçosa, v. 58, n.1, p. 9-16, jan/fev, 2011.

KLUGE, R. A. (coordenador). **Ecofisiologia de culturas estrativistas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira.** Cosmópolis: Stoller do Brasil, p. 13-45, 2001.

KOGAN, F. N., ZHU, X., **Evolution of long-term errors in NDVI time series: 1985 - 1999**, Advances Space Research, v. 28, n. 1, p. 149-153, 2001.

KRUTMAN, S. **Do crescimento da cana sob condições naturais.** Boletim Técnico Instituto Agronômico do Nordeste. Recife, p. 4-29, 1962.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal.** 2ª ed. São Carlos: RiMa, 2000.

LIOU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation.** 1ª ed, London: Academic Press, 392 p, 1980.

LIU, J.; PATTEY, E.; MILLER, J. R.; McNAIRN, H.; SMITH, A.; HU, B. **Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model.** Remote Sensing of Environment, n. 114, p. 1167-1177, 2010.

LOS, S. O.; COLLATZ, G. J.; SELLERS, P. J.; MALMSTROM, C. M.; POLLACK, N. H.; DEFRIES, R. S.; BOUNOUA, L.; PARRIS, M. T.; TUCKER, C. J.; DAZLICH, D. A. **A global 9-year biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data.** Journal of Hydrometeorology, v. 1, p. 183-199, 2000.

LUCCHESI, A. A. **Fatores da produção vegetal.** In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção Agrícola.** Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 1-11, 1987.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R. P.; CAMARGO, M. B. P. de; FAHL, J. I. **Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar.** Campinas: Bragantia, v. 44 (1), p. 229-238, 1985.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar (Saccharum spp).** 115p. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.

MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa da cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do Satélite Landsat 7 - ETM+.** 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Concentração em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MANTELATTO, P. E. **Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento.** 272 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

MANZATTO, C. V. et al. (organizadores). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.** 55p. Documentos/Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 110 - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

MARIN, F. R. **Fenologia da cana-de-açúcar.** <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html>, acesso em 15 de janeiro de 2012.

MARISCAL, M. J.; ORGAZA, F.; VILLALOBOS, F. J. **Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies.** Agricultural and Forest Meteorology. v. 100, p. 183-197, doi: 10.1016/S0168-1923(99)00137-9, 2000.

MARQUES, M. O.; MARQUES, T. A.; TASSO JÚNIOR, L. C. **Tecnologia do açúcar.** Produção e industrialização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: Funep, 2001.

MELO, R. W. de; FONTANA, D. C. **Avaliação de dados meteorológicos disponíveis no Web Site do Joint Research Centre.** <http://www.ufrgs.br/srm/novo/publicacoes/ISPRA%202006_Ricardo%20Melo_artigo_website.pdf>, acesso em 18 de agosto de 2011.

MICROIMAGES INC. Image classification with TNTMips. Lincoln: Micromages Inc, 2011, 35 p.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEM, B. N. **An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction.** Remote Sensing of Environment, n. 78, p. 284-298, November 2001.

MONTE, A. J. **Produtor de cana-de-açúcar**. Instituto Centro de ensino Tecnológico 2ª Ed. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha; Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004. 64 p.

MONTEITH, J. L. **Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems.** The Journal of Applied Ecology, v.9, n. 2, p. 747-766, december 1972.

MOREIRA, R. da C. **Influência do posicionamento e largura das bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação.** 179 p., Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINSTRATION. **About MODIS.** <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>, acesso em 17 de janeiro de 2012.

NAVES-BARBIERO, C. C. et al. **Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerradão.** Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, v. 12, n. 2, p. 119-134, 2000.

OLIVEIRA, L. M. T. de. **Estudo das regiões fitoecológicas brasileiras pela fAPAR/NDVI e relações com séries temporais de dados pluviométricos.** 208 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PASSIOURA, J. M. **Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering?** Agronomy Journal, v. 88, n. 5, p. 690-694, Sept.-Oct. 1996.

PICOLLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva.** 90 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação.** In: Paulo Roberto Meneses; José da Silva Madeira Netto (Organizadores). **Sensoriamento remoto: refletância de alvos naturais.** 1ª ed. Brasília: Editora UNB, v. 1, p. 157-199, 2002.

PRADO, H. do. Pedologia Fácil: aplicações em solos tropicais. 4 ed. Piracicaba: H. do Prado, 2013, 284 p.

RAÍZEN ENERGIA S.A. **A participação das variedades RB e seu manejo nas empresas da Raízen.** <http://www.ridesa.com.br/ckfinder/userfiles/files/A%20Participacao%20das%20RBs%20na%20RAIZEN.pdf>, acesso em 07 de janeiro de 2012.

RAPIDEYE AG. **Satellite Imagery Product Specifications.** V. 4.1 Brandenburg an der Havel: RapidEye AG, 2012, 44 p.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul.** 212p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar.** Botucatu, 1995, <http://www.malavolta.com.br/pdf/1071.pdf>, acesso em 15 de janeiro de 2012.

ROSA, V. G. C. da. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do Estado de Minas Gerais.** 142p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring **vegetation system in the great plains with ERTS.** In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 2. Washington, D.C., 1973. Proceeding. Washington, D.C.: NASA. Goddart Space Flight Center, 1973, v. 1, p. 309-317.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil.** 1ª ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2007, 423p.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G. T.; LEE, D. **The contribution of qualitative variables to a sugarcane yield model based on spectral vegetation index.** In: Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 7, 1995. Puerto Vallarta. Memorias Del Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 7., SELPER e SIE, 1995. Anais… v.1.p.705 – 708.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. **Resposta Espectral da Cana-de-açúcar Através de Dados Multiespectrais do MSS do Landsat-4.** In: Reunião da Sociedade de Especialistas Latinoamericanos em Sensoriamento Remoto – Selper, 4, 1984. Chile. Anais... São José dos Campos: INPE, 1985. 12p.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. **Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models.** Remote Sensing of Environment, v. 33, n. 3, p. 183-192, September 1990.

RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PONZONI, F. J.; CAMARGO JÚNIOR, H.; CONFORTE, J. C.; MOREIRA, J. C.; EPIPHANIO, J. C. N.; MOREIRA, M. A.; KAMPEL, M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. de; MARTINI, P. R.; FERREIRA, S. H.; TAVARES JÚNIOR, S. S.; SANTOS, V. M. N. dos (Ed.). **Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente.** São José dos Campos: INPE, 2002. (INPE-8984-PUD/62).

Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18>. Acesso em: 26 mar. 2011.

SCARPARI, M. S. **Crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar.** 14 p. Apostila do XI curso à distância: Tópicos da cultura da cana-de-açúcar - Capítulo 4, Instituto Agronômico de Campinas, Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio, 2011.

SELLERS, P. J.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C. B.; HENDERSON-SELLERS, A. **Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere.** Science, v. 275, p. 502-509, 1997.

SMETS, B.; EERENS, H.; JACOBS, T.; ROYER, A. **BioPar Product User Manual Dry Matter Productivity (DMP) Version 0 from SPOT/VEGETATION data.** 26 p. Relatório técnico – Vlaamse Instelling voor Technologisch Onder zoek, Belgium, 2010.

SPOLADOR, J.; SANCHES, L.; COSTA, M. H. **Radiação fotossinteticamente ativa em uma floresta de transição.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 21, n. 2, p. 301-307, 2006.

SUGAWARA, L. M. **Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio de um modelo agronômico.** 92 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

SWAIN, P.H.; DAVIS, S. M. **Remote sensing: the quantitative approach.** New York: McGraw-Hill, 1978, 396 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology.** Sunderland: Sinauer, 2006, 705 p.

TUCKER, C. J.; ELGIN Jr, J. H.; MACMURTREY III, J. E.; FAN, C. J. M. **Monitoring corn and soybean crop development with ahnd-held radiometer spectral data.** Remote Sensing of Environment, v. 8, n. 3, p. 237-248, august 1979.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, Centro de Ciências Agrárias. **Censo varietal e clones potenciais para São Paulo e Mato Grosso do Sul.** <http://www.ridesa.com.br/ckfinder/userfiles/files/Censo%20Varietal%20e%20Clons%20Potenciais%20para%20o%20Estado%20de%20S%20Paulo.pdf>, acesso em 07 de janeiro de 2012.

VALERIANO, D. de M. **Interações da radiação solar com a vegetação.** Publicações técnicas, INPE, São José dos Campos, 1988, 34 p.

VALERIANO, M. de M. **Refletância espectral de culturas agrícolas anuais: espectroradiometria**. Espaço e Geografia, v.6, n.1, p.7-27, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M. de. **Brotação.** 11 p. Apostila do XI curso à distância: Tópicos da cultura da cana-de-açúcar - Capítulo 2, Instituto Agronômico de Campinas, Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio, 2011.

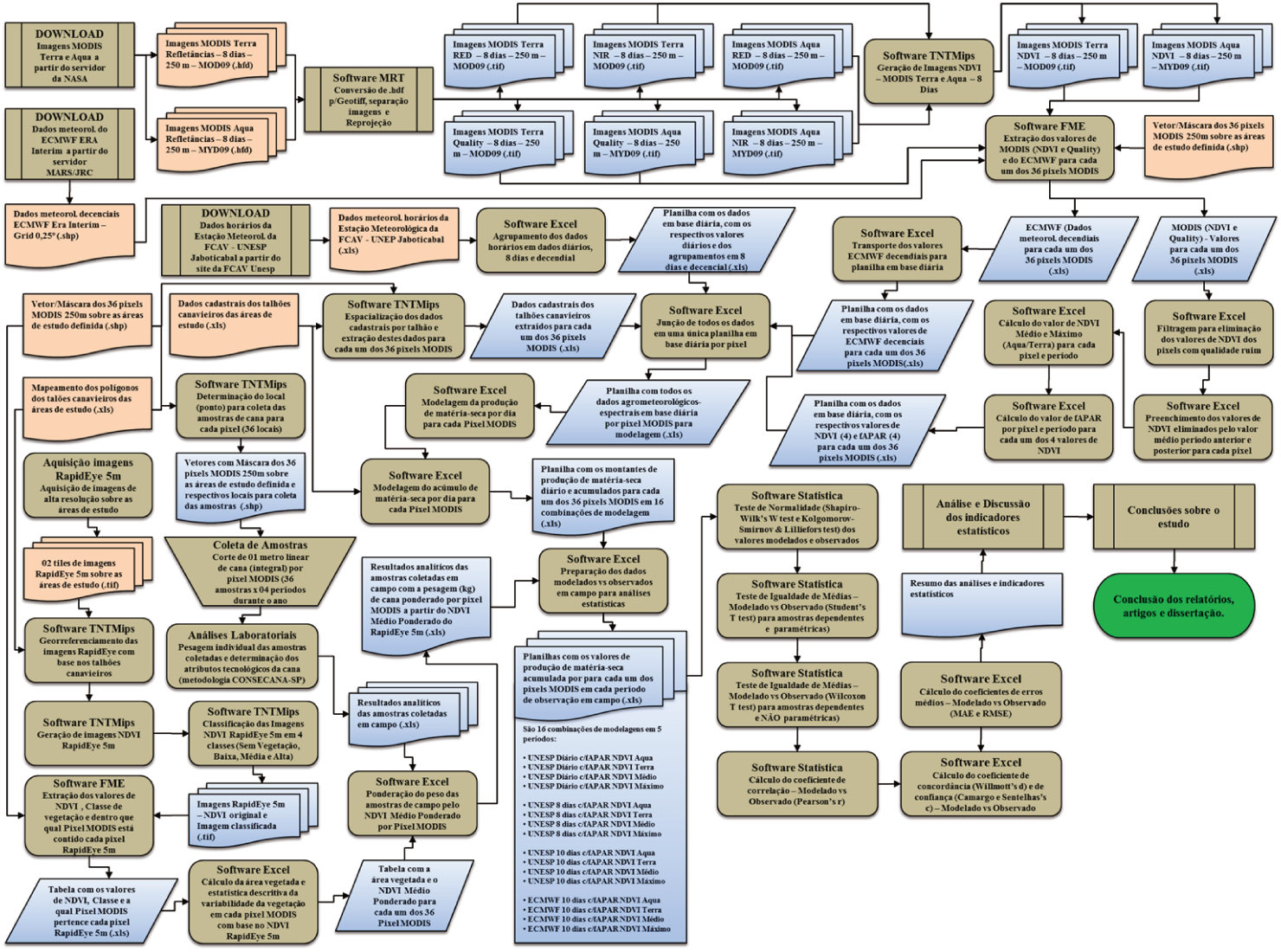
VASCONCELOS, J. N. **Derivados da cana-de-açúcar.** STAB: açúcar, álcool e subprodutos, v. 20, n. 3, p. 16-18, 2002

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. **Statistics for the evaluation and comparison of models.** Journal of Geophysical Research, v.90, p.8995-9005, 1985.

ZHANG, Y., TIAN Y., KNYAZIKHIN Y., MARTONCHIK J. V., DINER D. J., LEROY M., MYNENI, R.B. **Prototyping of MISR LAI and FPAR Algorithm with POLDER Data over Africa**. IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, v. 38, n. 5, p. 2402-2418, 2000.

ANEXOS

Anexo 1. Fluxograma das entradas, processos e saídas necessários para a modelagem da produtividade e acúmulo de matéria-seca da cana-de-açúcar apresentada neste estudo.



Anexo 2. Estatística descritiva da variabilidade do canavial em cada um dos pixels MODIS sobre as áreas de estudo segundo análise do NDVI das imagens RapidEye.

Pixel MODIS	N	NDVI Geral					NDVI classificado em faixas de Vigor de Biomassa dentro de cada pixel MODIS																	
							Solo Exposto				Vigor Baixo				Vigor Médio				Vigor Alto				Área Vegetada	
		Mín	máx	μ	σ	*Cv*	N	μ	σ	*Cv*	N	μ	σ	*Cv*	N	μ	σ	*Cv*	N	μ	σ	*Cv*	%	NDVI Veget
A1-P01	4733	59,0	87,0	80,7	3,6	4,5	255	74,1	7,0	9,5	89	76,5	2,5	3,2	1779	81,1	1,8	2,3	2610	81,3	3,4	4,1	94,6	79,6
A1-P02	4642	52,0	86,0	79,8	4,4	5,5	345	74,3	7,6	10,2	260	77,1	2,1	2,8	2688	79,8	4,2	5,2	1349	81,8	1,5	1,8	92,6	79,5
A1-P03	5466	50,0	83,0	73,2	5,4	7,3	1524	71,2	5,3	7,5	3145	73,2	5,3	7,3	785	77,0	2,8	3,7	12	82,3	0,5	0,6	72,1	77,5
A1-P04	6695	55,0	86,0	78,5	4,9	6,2	1257	75,7	5,8	7,7	747	74,3	4,5	6,1	2437	79,3	4,3	5,4	2254	80,6	3,4	4,2	81,2	78,1
A1-P05	5959	18,0	87,0	79,6	7,2	9,1	1532	77,7	10,4	13,3	190	68,8	13,8	20,1	1746	80,3	4,3	5,3	2491	81,0	4,3	5,3	74,3	76,7
A1-P06	7434	20,0	87,0	78,7	5,7	7,3	1839	77,2	7,9	10,2	1328	77,3	5,7	7,3	2748	79,2	4,5	5,7	1519	80,7	3,2	4,0	75,3	79,1
A1-P07	5183	49,0	84,0	77,2	5,2	6,7	960	74,7	7,7	10,4	1536	77,2	3,0	3,9	2409	77,7	4,7	6,1	278	81,7	1,4	1,7	81,5	78,8
A1-P08	7929	45,0	85,0	75,1	5,3	7,1	1639	73,7	6,1	8,2	3679	74,8	5,2	7,0	2483	76,0	4,6	6,0	128	81,8	1,4	1,7	79,3	77,5
A1-P09	6560	21,0	87,0	76,2	6,9	9,0	2620	75,0	7,7	10,3	1474	73,7	5,5	7,5	1592	78,2	6,2	7,9	874	80,4	4,2	5,3	60,1	77,5
A1-P10	5745	18,0	86,0	77,0	7,1	9,2	1202	75,5	9,3	12,4	954	77,3	2,3	3,0	3237	77,0	7,2	9,3	352	81,9	1,6	2,0	79,1	78,7
A1-P11	6488	26,0	86,0	77,8	6,3	8,1	1601	76,9	8,2	10,7	931	76,1	5,7	7,4	3273	77,9	5,6	7,2	683	81,3	1,5	1,9	75,3	78,4
A1-P12	5507	24,0	86,0	76,2	6,4	8,4	1050	72,6	10,1	13,9	1753	76,4	4,4	5,8	2454	77,2	5,0	6,5	250	81,5	1,5	1,8	80,9	78,4
A1-P13	6613	46,0	87,0	76,1	5,6	7,3	1853	75,4	6,4	8,5	1792	75,8	4,7	6,1	2911	76,5	5,5	7,1	57	82,3	1,5	1,8	72,0	78,2
A1-P14	5906	58,0	87,0	79,3	4,4	5,6	1020	78,5	5,5	7,0	327	77,0	2,8	3,6	3447	79,2	4,4	5,5	1112	81,1	2,8	3,5	82,7	79,1
A1-P15	5765	14,0	85,0	75,2	10,2	13,6	1474	72,7	12,5	17,2	1123	75,4	8,2	10,9	2785	75,5	9,8	13,0	383	81,6	1,1	1,4	74,4	77,5
A1-P16	5133	20,0	85,0	75,6	9,0	11,9	1253	72,1	12,1	16,8	1144	73,8	9,8	13,2	2408	77,4	5,9	7,6	328	81,7	1,2	1,5	75,6	77,7
A1-P17	4676	39,0	84,0	76,9	5,4	7,0	774	74,6	7,6	10,1	878	76,7	3,3	4,4	2835	77,3	5,1	6,6	189	81,9	1,1	1,3	83,4	78,6
A1-P18	5854	49,0	84,0	76,6	4,5	5,8	626	74,4	6,5	8,7	2353	76,4	4,1	5,4	2837	77,0	4,0	5,2	38	82,0	0,6	0,8	89,3	78,5
A1-P19	6161	47,0	84,0	77,0	3,7	4,8	268	71,3	7,0	9,8	2647	77,3	2,8	3,7	3159	77,2	3,5	4,5	87	81,9	1,0	1,3	95,7	78,8
A1-P20	4943	0,0	84,0	76,1	5,6	7,4	848	73,8	7,9	10,7	2109	75,6	4,4	5,8	1900	77,3	5,1	6,7	86	81,9	0,8	1,0	82,8	78,3
ÁREA 01	117392	0,0	87,0	77,1	6,3	8,2	23940	74,8	8,5	11,4	28459	75,6	5,3	7,1	49913	77,8	5,5	7,0	15080	81,1	3,2	3,9	79,6	78,2

A2-P21	7069	43,0	77,0	70,5	3,8	5,4	1266	69,1	4,6	6,7	4146	70,4	3,7	5,2	1652	71,7	2,8	3,8	5	76,8	0,4	0,6	82,1	73,0
A2-P22	4014	56,0	76,0	69,7	3,3	4,7	707	66,9	3,4	5,1	2520	69,8	2,9	4,2	787	72,1	1,8	2,5	0	0,0	-	-	82,4	47,3
A2-P23	6529	41,0	77,0	70,6	4,8	6,8	1648	70,0	5,4	7,8	2860	70,5	4,5	6,4	2009	71,3	4,5	6,4	12	76,8	0,4	0,5	74,8	72,9
A2-P24	6747	34,0	78,0	70,8	5,1	7,3	656	68,9	7,5	10,9	3008	70,8	4,8	6,8	3067	71,2	4,7	6,6	16	76,9	0,4	0,6	90,3	73,0
A2-P25	5582	54,0	78,0	71,7	3,4	4,8	668	70,8	4,8	6,8	2596	71,5	3,2	4,5	2263	72,0	3,1	4,3	55	76,9	0,8	1,0	88,0	73,5
A2-P26	6191	33,0	77,0	69,9	5,6	8,0	1675	68,7	6,4	9,3	3050	69,5	5,7	8,3	1438	72,0	3,3	4,6	28	76,7	0,6	0,8	72,9	72,8
A2-P27	5133	50,0	79,0	71,1	4,6	6,5	821	69,5	6,1	8,8	2146	70,9	3,8	5,3	2046	71,7	4,5	6,2	120	76,4	1,3	1,7	84,0	73,0
A2-P28	5690	37,0	79,0	71,5	5,1	7,2	1907	70,8	5,6	7,9	1470	69,9	4,8	6,9	2022	72,6	4,5	6,3	291	75,7	3,1	4,1	66,5	72,7
A2-P29	6849	40,0	81,0	73,6	5,2	7,0	2641	73,1	5,6	7,7	559	70,7	4,2	6,0	2503	73,9	5,0	6,7	1146	75,8	3,8	5,0	61,4	73,4
A2-P30	5127	0,0	80,0	74,6	8,7	11,6	84	51,8	29,4	56,8	131	71,9	1,6	2,2	3081	74,7	8,3	11,1	1831	75,7	5,4	7,2	98,4	74,1
A2-P31	6107	37,0	80,0	71,2	5,4	7,6	1275	69,9	6,7	9,6	2231	71,0	4,8	6,8	2402	71,5	5,0	6,9	199	76,5	2,7	3,6	79,1	73,0
A2-P32	6847	51,0	79,0	72,7	4,4	6,0	1155	71,4	5,2	7,2	2344	72,1	4,3	6,0	2704	72,8	4,1	5,6	644	76,4	1,6	2,1	83,1	73,8
A2-P33	5362	31,0	80,0	73,3	4,7	6,4	1282	71,6	6,6	9,1	772	70,3	4,0	5,6	2242	74,4	3,0	4,0	1066	75,3	3,5	4,7	76,1	73,3
A2-P34	5678	28,0	81,0	74,1	4,5	6,1	562	70,8	7,2	10,2	871	72,3	3,7	5,1	2770	74,2	4,3	5,8	1475	76,2	2,0	2,6	90,1	74,2
A2-P35	7411	36,0	79,0	71,7	5,4	7,5	2360	71,2	5,9	8,2	2157	71,0	5,4	7,6	2604	72,1	4,8	6,7	290	76,1	2,5	3,2	68,2	73,1
A2-P36	6379	12,0	78,0	69,5	10,1	14,5	2452	68,5	11,2	16,4	1912	68,4	10,9	16,0	1899	71,6	7,1	9,9	116	76,6	0,9	1,2	61,6 %	72,2
ÁREA 02	96715	0,0	81,0	71,6	5,7	8,0	21159	70,2	7,2	10,2	32773	70,6	5,1	7,2	35489	72,6	5,0	6,9	7294	75,9	3,7	4,8	78,1	73,0

Anexo 3. Resultados das análises tecnológicas de cana-de-açúcar

Pixel MODIS	Data da Coleta	Período de coleta	Idade cana (dias)	Peso (kg)	PBU	LPol	Bj	BC	Sj	Fpcts	PUR	ARC	PC	ART	ARTje	U%C
A1-P01	23/08/11	1ª	104	1,340	315,84	29,57	12,50	8,13	7,34	26,14	58,70	1,06	4,77	53,54	6,08	65,72
A1-P02	23/08/11	1ª	104	0,740	301,61	30,26	12,60	8,39	7,51	25,00	59,57	1,06	5,00	55,63	6,32	66,61
A1-P03	23/08/11	1ª	99	0,620	304,26	14,56	10,40	6,89	3,64	25,22	35,03	1,62	2,41	36,60	4,16	67,89
A1-P04	23/08/11	1ª	102	0,780	294,19	30,26	12,60	8,49	7,51	24,41	59,57	1,08	5,05	56,29	6,40	67,10
A1-P05	23/08/11	1ª	102	1,220	310,49	18,96	11,00	7,22	4,73	25,72	43,03	1,42	3,11	41,28	4,69	67,07
A1-P06	23/08/11	1ª	105	0,780	304,23	24,69	11,80	7,82	6,14	25,21	52,07	1,23	4,07	48,54	5,52	66,96
A1-P07	23/08/11	1ª	105	0,360	299,80	32,98	13,00	8,68	8,17	24,86	62,83	0,99	5,45	59,23	6,73	66,46
A1-P08	23/08/11	1ª	96	0,340	173,17	12,33	10,10	8,15	3,09	14,73	30,57	2,09	2,49	41,50	4,72	77,12
A1-P09	23/08/11	1ª	99	0,640	310,02	26,80	12,10	7,95	6,66	25,68	55,04	1,15	4,37	50,65	5,76	66,38
A1-P10	23/08/11	1ª	102	0,640	302,29	24,69	11,80	7,85	6,14	25,06	52,07	1,23	4,08	48,69	5,53	67,10
A1-P11	23/08/11	1ª	102	0,860	315,00	33,39	13,06	8,51	8,27	26,08	63,30	0,96	5,39	58,32	6,63	65,41
A1-P12	23/08/11	1ª	105	0,900	298,00	13,89	10,31	6,90	3,48	24,72	33,73	1,66	2,33	36,20	4,11	68,38
A1-P13	23/08/11	1ª	105	0,420	209,27	28,19	12,30	9,42	7,00	17,62	56,91	1,29	5,36	61,07	6,94	72,96
A1-P14	23/08/11	1ª	97	0,840	266,98	32,31	12,90	9,06	8,00	22,23	62,04	1,06	5,62	61,44	6,98	68,70
A1-P15	23/08/11	1ª	99	0,440	236,65	34,33	13,20	9,71	8,50	19,81	64,36	1,05	6,25	67,17	7,63	70,48
A1-P16	23/08/11	1ª	99	0,620	278,30	24,69	11,80	8,15	6,14	23,14	52,07	1,28	4,24	50,56	5,75	68,71
A1-P17	23/08/11	1ª	100	0,360	162,30	26,80	12,10	9,92	6,66	13,86	55,04	1,44	5,46	63,21	7,18	76,22
A1-P18	23/08/11	1ª	100	0,440	306,12	26,80	12,10	8,00	6,66	25,37	55,04	1,16	4,40	50,96	5,79	66,64
A1-P19	23/08/11	1ª	95	0,600	297,44	32,98	13,00	8,71	8,17	24,67	62,83	1,00	5,47	59,45	6,76	66,62
A1-P20	23/08/11	1ª	95	0,700	312,84	31,63	12,80	8,37	7,84	25,90	61,24	1,01	5,12	56,33	6,40	65,73
A1-Média	23/08/11	1ª	101	0,682	279,94	26,50	12,07	8,32	6,58	23,27	53,75	1,24	4,52	53,05	6,00	68,41
A2-P21	23/08/11	1ª	135	1,040	306,89	18,23	10,90	7,19	4,55	25,43	41,78	1,46	3,01	40,67	4,62	67,38

A2-P22	23/08/11	1ª	135	1,700	296,96	37,65	13,70	9,19	9,30	24,63	67,88	0,88	6,24	65,50	7,44	66,18
A2-P23	23/08/11	1ª	103	0,640	280,96	29,85	12,54	8,62	7,41	23,35	59,05	1,11	5,09	56,93	6,47	68,03
A2-P24	23/08/11	1ª	106	0,680	301,72	34,33	13,20	8,78	8,50	25,01	64,36	0,95	5,65	60,76	6,90	66,20
A2-P25	23/08/11	1ª	106	0,860	265,15	25,39	11,90	8,38	6,32	22,09	53,08	1,28	4,45	52,51	5,97	69,53
A2-P26	23/08/11	1ª	106	0,640	308,19	20,48	11,21	7,38	5,11	25,53	45,57	1,37	3,36	43,21	4,91	67,09
A2-P27	23/08/11	1ª	106	0,800	314,45	18,96	11,00	7,17	4,73	26,03	43,03	1,41	3,09	41,02	4,66	66,79
A2-P28	23/08/11	1ª	106	0,720	277,76	36,99	13,60	9,40	9,14	23,10	67,21	0,92	6,32	66,62	7,57	67,51
A2-P29	23/08/11	1ª	112	0,700	305,96	28,88	12,40	8,20	7,17	25,35	57,82	1,10	4,74	53,54	6,08	66,45
A2-P30	23/08/11	1ª	112	0,680	279,77	35,67	13,40	9,23	8,82	23,26	65,81	0,95	6,07	64,66	7,35	67,51
A2-P31	23/08/11	1ª	106	1,840	320,19	17,50	10,80	6,98	4,37	26,49	40,49	1,46	2,83	38,98	4,43	66,53
A2-P32	23/08/11	1ª	112	0,700	300,04	25,39	11,90	7,94	6,32	24,88	53,08	1,21	4,21	49,73	5,65	67,18
A2-P33	23/08/11	1ª	112	1,120	248,42	16,77	10,70	7,73	4,19	20,75	39,18	1,66	3,03	42,67	4,85	71,52
A2-P34	23/08/11	1ª	106	1,280	310,19	32,98	13,00	8,54	8,17	25,69	62,83	0,98	5,36	58,26	6,62	65,77
A2-P35	23/08/11	1ª	109	0,500	298,86	18,23	10,90	7,29	4,55	24,78	41,78	1,48	3,04	41,19	4,68	67,93
A2-P36	23/08/11	1ª	111	1,320	272,49	12,33	10,10	7,04	3,09	22,68	30,57	1,81	2,15	35,82	4,07	70,29
A2-Média	23/08/11	1ª	111	0,951	293,00	25,60	11,95	8,07	6,36	24,32	52,09	1,25	4,29	50,94	5,77	67,62

A1-P01	29/11/11	2ª	202	2,815	221,08	12,82	8,68	6,54	3,23	18,56	37,21	1,78	2,43	38,19	4,34	74,90
A1-P02	29/11/11	2ª	202	4,405	245,52	9,00	7,96	5,78	2,27	20,52	28,56	1,93	1,65	32,29	3,67	73,70
A1-P03	29/11/11	2ª	197	2,965	220,23	5,20	7,33	5,53	1,32	18,49	17,97	2,28	0,99	29,26	3,33	75,98
A1-P04	29/11/11	2ª	200	3,500	219,97	9,32	7,96	6,00	2,35	18,47	29,58	1,98	1,78	33,88	3,85	75,52
A1-P05	29/11/11	2ª	200	3,815	232,21	10,60	8,26	6,12	2,67	19,45	32,38	1,87	1,98	34,84	3,96	74,43
A1-P06	29/11/11	2ª	203	5,020	230,40	12,70	8,84	6,56	3,20	19,31	36,17	1,78	2,37	37,68	4,28	74,13
A1-P07	29/11/11	2ª	203	3,685	221,22	9,50	8,12	6,11	2,40	18,57	29,54	1,98	1,81	34,13	3,88	75,31
A1-P08	29/11/11	2ª	194	2,840	206,51	6,81	7,51	5,78	1,72	17,40	22,95	2,20	1,33	31,60	3,59	76,83

A1-P09	29/11/11	2ª	197	4,320	197,36	8,74	7,75	6,04	2,21	16,66	28,51	2,08	1,72	34,23	3,89	77,29
A1-P10	29/11/11	2ª	200	5,125	214,07	9,89	8,50	6,47	2,49	18,00	29,33	2,00	1,90	35,21	4,00	75,53
A1-P11	29/11/11	2ª	200	3,565	220,09	8,34	7,48	5,64	2,11	18,48	28,22	2,02	1,59	32,48	3,69	75,88
A1-P12	29/11/11	2ª	203	4,000	202,68	10,43	8,42	6,51	2,63	17,09	31,24	1,99	2,03	36,34	4,13	76,40
A1-P13	29/11/11	2ª	203	2,455	220,62	4,51	7,00	5,27	1,14	18,53	16,34	2,32	0,86	28,41	3,23	76,20
A1-P14	29/11/11	2ª	195	3,655	212,84	11,11	8,95	6,82	2,80	17,90	31,24	1,96	2,13	36,97	4,20	75,28
A1-P15	29/11/11	2ª	197	3,050	210,68	9,08	7,95	6,08	2,30	17,73	28,87	2,03	1,75	34,09	3,87	76,19
A1-P16	29/11/11	2ª	197	2,850	226,27	8,68	7,67	5,73	2,20	18,98	28,62	1,99	1,64	32,68	3,71	75,29
A1-P17	29/11/11	2ª	198	4,095	198,13	8,51	7,73	6,02	2,15	16,73	27,84	2,09	1,68	33,93	3,86	77,25
A1-P18	29/11/11	2ª	198	3,420	212,38	12,26	8,73	6,66	3,09	17,87	35,37	1,85	2,36	38,11	4,33	75,48
A1-P19	29/11/11	2ª	193	2,715	218,82	8,89	7,78	5,88	2,25	18,38	28,89	2,00	1,70	33,35	3,79	75,74
A1-P20	29/11/11	2ª	193	3,705	218,00	9,28	8,19	6,19	2,34	18,32	28,60	2,01	1,77	34,12	3,88	75,49
A1-Média	29/11/11	2ª	199	3,600	217,45	9,28	8,04	6,09	2,34	18,27	28,87	2,01	1,77	34,19	3,87	75,64
A2-P21	29/11/11	2ª	233	5,770	223,00	10,75	8,66	6,50	2,71	18,72	31,27	1,93	2,03	35,80	4,07	74,78
A2-P22	29/11/11	2ª	233	3,745	234,66	11,84	8,43	6,22	2,99	19,65	35,42	1,79	2,20	36,16	4,11	74,13
A2-P23	29/11/11	2ª	201	3,720	233,18	8,12	7,96	5,89	2,05	19,53	25,77	2,04	1,52	31,99	3,64	74,58
A2-P24	29/11/11	2ª	204	6,060	199,74	9,86	8,21	6,38	2,49	16,86	30,31	2,02	1,93	35,69	4,06	76,77
A2-P25	29/11/11	2ª	204	5,540	201,15	12,95	8,76	6,79	3,26	16,97	37,23	1,83	2,53	39,55	4,49	76,24
A2-P26	29/11/11	2ª	204	5,080	210,00	8,00	7,77	5,95	2,02	17,68	26,03	2,10	1,55	32,85	3,73	76,38
A2-P27	29/11/11	2ª	204	2,860	205,45	7,61	7,41	5,71	1,93	17,31	26,00	2,12	1,48	32,39	3,68	76,98
A2-P28	29/11/11	2ª	204	5,630	207,74	11,88	8,62	6,62	2,99	17,50	34,73	1,88	2,30	37,85	4,30	75,89
A2-P29	29/11/11	2ª	210	3,630	198,61	6,67	7,41	5,77	1,69	16,76	22,79	2,23	1,31	31,75	3,61	77,47
A2-P30	29/11/11	2ª	210	2,665	221,95	6,56	7,58	5,70	1,66	18,63	21,90	2,17	1,25	30,68	3,49	75,67
A2-P31	29/11/11	2ª	204	4,000	201,03	8,89	8,05	6,24	2,25	16,96	27,89	2,08	1,74	34,44	3,91	76,80
A2-P32	29/11/11	2ª	210	3,740	195,87	7,20	7,30	5,70	1,82	16,55	24,98	2,18	1,42	32,34	3,67	77,75

A2-P33	29/11/11	2ª	210	3,710	186,22	7,61	7,64	6,05	1,92	15,77	25,20	2,20	1,53	33,48	3,81	78,17
A2-P34	29/11/11	2ª	204	4,065	188,96	6,72	6,84	5,40	1,71	15,99	24,93	2,20	1,35	31,81	3,61	78,61
A2-P35	29/11/11	2ª	207	4,460	188,51	8,08	7,26	5,73	2,05	15,96	28,19	2,11	1,62	33,55	3,81	78,31
A2-P36	29/11/11	2ª	209	4,095	206,40	8,34	7,73	5,95	2,11	17,39	27,28	2,08	1,62	33,35	3,79	76,66
A2-Média	29/11/11	2ª	209	4,298	206,40	8,82	7,85	6,04	2,23	17,39	28,12	2,06	1,71	33,93	3,86	76,57

A1-P01	28/02/12	3ª	293	8,280	178,00	42,77	14,50	11,62	10,53	15,12	72,61	0,92	8,44	86,30	9,81	73,26
A1-P02	28/02/12	3ª	293	8,560	179,65	38,92	13,80	11,04	9,61	15,25	69,62	1,00	7,68	79,99	9,09	73,72
A1-P03	28/02/12	3ª	288	12,975	172,83	33,49	12,50	10,09	8,31	14,70	66,48	1,10	6,71	71,83	8,16	75,20
A1-P04	28/02/12	3ª	291	10,720	169,97	46,37	15,20	12,33	11,38	14,47	74,89	0,87	9,23	93,15	10,59	73,20
A1-P05	28/02/12	3ª	291	10,105	187,31	45,64	15,30	12,10	11,20	15,86	73,20	0,89	8,86	89,92	10,22	72,04
A1-P06	28/02/12	3ª	294	12,155	175,30	39,36	14,10	11,35	9,70	14,90	68,83	1,03	7,81	81,41	9,25	73,75
A1-P07	28/02/12	3ª	294	10,090	181,05	52,92	16,70	13,33	12,91	15,36	77,32	0,79	10,31	102,41	11,64	71,31
A1-P08	28/02/12	3ª	285	10,250	190,40	46,69	15,40	12,13	11,45	16,11	74,36	0,86	9,02	91,09	10,35	71,76
A1-P09	28/02/12	3ª	288	12,000	164,98	44,32	14,80	12,09	10,90	14,07	73,63	0,91	8,90	90,44	10,28	73,84
A1-P10	28/02/12	3ª	291	13,400	189,76	37,61	13,40	10,56	9,30	16,06	69,40	0,99	7,33	76,64	8,71	73,38
A1-P11	28/02/12	3ª	291	13,025	180,44	43,37	14,70	11,74	10,67	15,31	72,57	0,92	8,52	87,03	9,89	72,95
A1-P12	28/02/12	3ª	294	8,510	184,45	53,01	16,80	13,34	12,93	15,63	76,96	0,80	10,27	102,12	11,60	71,02
A1-P13	28/02/12	3ª	294	11,100	187,05	47,37	15,80	12,50	11,60	15,84	73,42	0,89	9,18	92,84	10,55	71,66
A1-P14	28/02/12	3ª	286	12,815	176,18	43,29	15,00	12,06	10,64	14,97	70,90	0,97	8,55	87,73	9,97	72,97
A1-P15	28/02/12	3ª	288	9,700	191,66	48,52	15,90	12,50	11,88	16,21	74,70	0,85	9,34	93,94	10,68	71,29
A1-P16	28/02/12	3ª	288	12,420	172,42	40,05	13,90	11,23	9,88	14,67	71,10	0,97	7,99	82,52	9,38	74,10
A1-P17	28/02/12	3ª	289	12,465	172,88	39,67	14,20	11,47	9,78	14,71	68,85	1,03	7,90	82,22	9,34	73,83
A1-P18	28/02/12	3ª	289	12,000	180,34	47,58	15,70	12,54	11,66	15,30	74,24	0,87	9,31	93,96	10,68	72,15
A1-P19	28/02/12	3ª	284	9,495	188,80	30,78	12,40	9,79	7,64	15,98	61,62	1,21	6,03	66,47	7,55	74,23

A1-P20	28/02/12	3ª	284	12,030	181,15	49,07	15,80	12,61	12,02	15,37	76,05	0,82	9,59	96,08	10,92	72,02
A1-Média	28/02/12	3ª	290	11,105	180,23	43,54	14,80	11,82	10,70	15,29	72,04	0,94	8,55	87,20	9,93	72,88
A2-P21	29/02/12	3ª	325	8,520	166,12	48,79	15,20	12,39	11,98	14,17	78,80	0,77	9,76	97,18	11,04	73,44
A2-P22	29/02/12	3ª	325	11,025	171,71	46,98	15,50	12,54	11,52	14,61	74,31	0,88	9,32	94,07	10,69	72,85
A2-P23	29/02/12	3ª	293	9,040	172,68	45,73	15,00	12,12	11,23	14,69	74,90	0,87	9,07	91,68	10,42	73,19
A2-P24	29/02/12	3ª	296	11,610	174,47	51,30	15,80	12,73	12,56	14,83	79,51	0,74	10,12	100,23	11,39	72,44
A2-P25	29/02/12	3ª	296	8,705	174,75	45,03	15,00	12,08	11,06	14,86	73,75	0,89	8,91	90,40	10,27	73,06
A2-P26	29/02/12	3ª	296	8,540	166,32	49,24	15,60	12,72	12,07	14,18	77,36	0,80	9,84	98,19	11,16	73,10
A2-P27	29/02/12	3ª	296	11,120	160,61	46,87	16,00	13,15	11,47	13,72	71,68	0,97	9,42	95,84	10,89	73,13
A2-P28	29/02/12	3ª	296	6,525	213,83	45,23	16,00	12,18	11,07	17,98	69,17	0,97	8,42	86,51	9,83	69,84
A2-P29	29/02/12	3ª	302	9,600	154,62	48,49	15,40	12,76	11,89	13,25	77,23	0,82	9,86	98,52	11,20	73,99
A2-P30	29/02/12	3ª	302	12,105	170,67	50,04	15,70	12,72	12,26	14,53	78,08	0,78	9,93	98,85	11,23	72,75
A2-P31	29/02/12	3ª	296	8,015	180,97	45,38	15,00	11,97	11,15	15,35	74,33	0,87	8,90	90,10	10,24	72,67
A2-P32	29/02/12	3ª	302	8,810	180,14	47,32	15,40	12,31	11,61	15,29	75,37	0,84	9,28	93,35	10,61	72,41
A2-P33	29/02/12	3ª	302	10,030	167,84	45,29	15,10	12,28	11,12	14,30	73,66	0,91	9,05	91,77	10,43	73,42
A2-P34	29/02/12	3ª	296	8,810	203,49	43,22	14,70	11,36	10,63	17,16	72,32	0,90	8,21	83,98	9,54	71,49
A2-P35	29/02/12	3ª	299	7,140	175,44	50,79	16,00	12,87	12,43	14,91	77,67	0,79	10,00	99,53	11,31	72,22
A2-P36	29/02/12	3ª	301	9,215	175,08	46,34	15,00	12,07	11,38	14,88	75,90	0,84	9,16	92,24	10,48	73,04
A2-Média	29/02/12	3ª	301	9,301	175,55	47,25	15,40	12,39	11,59	14,92	75,25	0,85	9,33	93,90	10,67	72,69

A1-P01	28/05/12	4ª	383	16,800	169,91	67,09	18,40	14,92	16,26	14,47	88,35	0,50	13,18	126,47	14,37	70,61
A1-P02	28/05/12	4ª	383	11,250	167,83	61,41	17,30	14,07	14,95	14,30	86,40	0,55	12,16	117,46	13,35	71,63
A1-P03	28/05/12	4ª	378	17,850	123,16	73,91	19,40	16,79	17,84	10,73	91,94	0,42	15,44	146,72	16,67	72,48
A1-P04	28/05/12	4ª	381	25,650	191,71	65,42	18,20	14,30	15,87	16,21	87,17	0,51	12,47	120,01	13,64	69,48
A1-P05	28/05/12	4ª	381	23,100	195,29	59,18	16,90	13,21	14,43	16,50	85,37	0,56	11,28	109,40	12,43	70,29

A1-P06	28/05/12	4ª	384	14,850	186,94	68,64	18,90	14,96	16,60	15,83	87,82	0,50	13,14	126,06	14,33	69,21
A1-P07	28/05/12	4ª	384	18,000	162,73	70,13	19,00	15,57	16,95	13,89	89,22	0,48	13,89	132,82	15,09	70,54
A1-P08	28/05/12	4ª	375	12,300	151,19	68,97	18,60	15,49	16,70	12,97	89,78	0,47	13,90	132,90	15,10	71,54
A1-P09	28/05/12	4ª	378	11,550	173,64	65,24	18,40	14,84	15,81	14,77	85,92	0,56	12,75	123,05	13,98	70,39
A1-P10	28/05/12	4ª	381	24,300	178,94	53,90	15,90	12,73	13,19	15,19	82,98	0,64	10,56	103,44	11,75	72,08
A1-P11	28/05/12	4ª	381	15,300	169,76	67,13	16,90	13,71	16,37	14,46	96,84	0,26	13,27	125,24	14,23	71,84
A1-P12	28/05/12	4ª	384	14,100	157,77	65,38	18,10	14,93	15,86	13,50	87,64	0,52	13,09	125,82	14,30	71,57
A1-P13	28/05/12	4ª	384	17,250	169,96	67,05	18,50	15,00	16,24	14,47	87,79	0,51	13,17	126,48	14,37	70,53
A1-P14	28/05/12	4ª	376	19,350	153,60	73,52	19,30	16,02	17,75	13,16	91,97	0,40	14,73	139,99	15,91	70,82
A1-P15	28/05/12	4ª	378	20,250	177,94	65,99	18,30	14,67	16,00	15,11	87,42	0,52	12,82	123,33	14,01	70,22
A1-P16	28/05/12	4ª	378	18,300	186,94	64,04	18,00	14,25	15,54	15,83	86,35	0,54	12,30	118,67	13,49	69,92
A1-P17	28/05/12	4ª	379	14,250	172,92	65,25	18,20	14,70	15,82	14,71	86,95	0,53	12,78	123,04	13,98	70,59
A1-P18	28/05/12	4ª	379	15,450	182,43	62,57	17,80	14,18	15,20	15,47	85,39	0,57	12,11	117,14	13,31	70,35
A1-P19	28/05/12	4ª	374	13,200	179,47	65,97	18,20	14,56	16,00	15,23	87,90	0,50	12,80	122,95	13,97	70,21
A1-P20	28/05/12	4ª	374	18,600	187,86	61,95	17,40	13,75	15,07	15,90	86,63	0,53	11,91	115,01	13,07	70,34
A1-Média	28/05/12	4ª	380	17,085	172,00	65,64	18,09	14,63	15,92	14,64	87,99	0,50	12,89	123,70	14,07	70,73
A2-P21	10/05/12	4ª	396	13,050	177,48	69,22	18,50	14,84	16,77	15,07	90,63	0,43	13,45	128,35	14,59	70,08
A2-P22	10/05/12	4ª	396	10,700	167,72	67,52	18,70	15,21	16,34	14,29	87,39	0,52	13,29	127,74	14,52	70,49
A2-P23	10/05/12	4ª	364	13,700	173,19	60,91	17,70	14,29	14,80	14,73	83,63	0,62	11,95	116,15	13,20	70,98
A2-P24	10/05/12	4ª	367	17,100	175,34	58,29	16,90	13,60	14,21	14,90	84,09	0,61	11,44	111,28	12,65	71,50
A2-P25	10/05/12	4ª	367	19,100	164,32	56,09	16,90	13,81	13,67	14,02	80,92	0,71	11,18	109,76	12,47	72,16
A2-P26	10/05/12	4ª	367	11,700	213,21	64,08	18,00	13,71	15,55	17,93	86,41	0,52	11,85	114,28	12,99	68,36
A2-P27	10/05/12	4ª	367	13,400	180,68	66,18	18,70	14,93	16,02	15,33	85,65	0,56	12,79	123,42	14,03	69,74
A2-P28	10/05/12	4ª	367	15,450	171,46	65,65	18,50	14,97	15,90	14,59	85,95	0,56	12,87	124,11	14,10	70,44
A2-P29	10/05/12	4ª	373	16,000	154,25	63,02	18,10	15,01	15,29	13,22	84,47	0,62	12,68	122,84	13,96	71,78

A2-P30	10/05/12	4ª	373	15,300	168,52	65,97	18,50	15,03	15,98	14,36	86,37	0,55	12,98	125,12	14,22	70,61
A2-P31	10/05/12	4ª	367	21,600	162,27	66,68	18,80	15,41	16,13	13,86	85,81	0,57	13,22	127,52	14,49	70,73
A2-P32	10/05/12	4ª	373	16,450	191,55	61,81	18,00	14,15	15,00	16,20	83,34	0,62	11,79	114,66	13,03	69,65
A2-P33	10/05/12	4ª	373	15,850	167,13	64,50	18,10	14,74	15,65	14,25	86,46	0,55	12,74	122,85	13,96	71,02
A2-P34	10/05/12	4ª	367	18,000	163,13	65,44	18,80	15,39	15,83	13,93	84,21	0,62	12,96	125,49	14,26	70,68
A2-P35	10/05/12	4ª	370	12,700	171,44	63,98	17,90	14,48	15,54	14,59	86,79	0,54	12,57	121,17	13,77	70,92
A2-P36	10/05/12	4ª	372	14,400	151,80	64,23	18,50	15,39	15,56	13,02	84,10	0,63	12,94	125,42	14,25	71,59
A2-Média	10/05/12	4ª	372	15,281	172,09	63,97	18,16	14,69	15,52	14,64	85,39	0,58	12,54	121,13	13,78	70,67

Peso (Kg): Peso de um metro linear de cana integral

PBU: Peso do Bolo Úmido

LPol: (Leitura Sacarimétrica do caldo clarificado)

Bj: Brixrefratométrico do caldo extraído

BC: Brix (%) Cana

Sj: Pol (%) no caldo

Fpcts: Fibra (%) Cana

PUR: Pureza (%) no caldo

ARC: Açúcares Redutores (%) Cana

PC: Pol (%) cana

ART: Açúcares totais recuperáveis (Kg/t cana)

ARTje: Açúcares redutores totais (%) cana estimados

U%C: Umidade (%) cana

Anexo 4. Resumo estatístico dos conjuntos de dados modelados comparado ao conjunto de dados observados em campo para o período acumulado durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Indicador	Conjunto de dados/Modelo															
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
Shapiro-Wilk (w)	0,8815	0,8779	0,8773	0,8791	0,8805	0,8768	0,8763	0,8780	0,8819	0,8778	0,8774	0,8790	0,8871	0,8871	0,8853	0,8885
Shapiro-Wilk(p-valor)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Wilcoxon (T)	4734	3084	3886	1921	5217	3700	4505	2392	5134	3705	4546	2420	5115	4024	4568	2850
Wilcoxon(p-valor)	0,3324	0,0000	0,0078	0,0000	0,9952	0,0024	0,1539	0,0000	0,8638	0,0025	0,1789	0,0000	0,8341	0,0171	0,1935	0,0000
Pearson (r)	0,9702	0,9688	0,9701	0,9673	0,9704	0,9694	0,9705	0,9679	0,9708	0,9694	0,9707	0,9680	0,9622	0,9603	0,9617	0,9586
Pearson (p-valor)	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500	< 0,0500
Índice de concordância ou exatidão (d)	0,9813	0,9819	0,9824	0,9788	0,9804	0,9823	0,9821	0,9804	0,9804	0,9824	0,9821	0,9805	0,9753	0,9772	0,9769	0,9756
Coeficiente de confiança (c)	0,9521	0,9513	0,9530	0,9468	0,9514	0,9522	0,9530	0,9489	0,9518	0,9523	0,9534	0,9491	0,9384	0,9384	0,9395	0,9352
Raíz do Erro Médio Quadrático (RMSE)	1.458,6	1.473,8	1.435,4	1.626,5	1.484,4	1.445,0	1.437,5	1.550,1	1.484,8	1.443,2	1.434,1	1.546,9	1.654,7	1.627,8	1.619,1	1.715,4
Erro Absoluto Médio (MAE)	2,022	380,562	189,472	746,951	131,871	229,657	48,893	588,565	151,898	226,949	37,525	585,997	153,834	190,847	18,506	552,786

Anexo 5. Tabela com os valores acumulados de matéria seca (Kg).hectare-1 provenientes das modelagens e observações de campo

Pixel MODIS	Período Amostrag.	Modelos																Observ. Campo
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	
A1-P01	1ª	2.666	2.967	2.819	3.003	2.657	2.948	2.802	2.984	2.627	2.933	2.780	2.965	2.542	2.822	2.682	2.858	1.203
A1-P02	1ª	2.107	2.206	2.162	2.365	2.085	2.186	2.136	2.343	2.077	2.180	2.129	2.335	2.002	2.089	2.045	2.244	1.150
A1-P03	1ª	1.920	1.687	1.811	2.041	1.885	1.686	1.785	2.006	1.904	1.670	1.787	2.024	1.803	1.607	1.705	1.921	1.143
A1-P04	1ª	1.573	1.464	1.517	1.621	1.563	1.464	1.514	1.615	1.555	1.447	1.501	1.601	1.498	1.398	1.448	1.546	1.107
A1-P05	1ª	1.423	1.451	1.437	1.498	1.419	1.440	1.429	1.490	1.403	1.433	1.418	1.478	1.358	1.378	1.368	1.426	1.149
A1-P06	1ª	1.496	1.505	1.500	1.549	1.487	1.489	1.488	1.536	1.472	1.484	1.478	1.526	1.425	1.428	1.426	1.473	1.160
A1-P07	1ª	1.504	1.520	1.511	1.571	1.496	1.504	1.500	1.559	1.480	1.499	1.489	1.548	1.434	1.444	1.439	1.496	1.144
A1-P08	1ª	1.352	1.250	1.303	1.380	1.340	1.239	1.289	1.369	1.325	1.227	1.276	1.352	1.286	1.185	1.235	1.314	668
A1-P09	1ª	1.265	1.282	1.276	1.320	1.254	1.277	1.266	1.312	1.248	1.265	1.257	1.303	1.203	1.221	1.212	1.256	1.164
A1-P10	1ª	1.288	1.341	1.314	1.348	1.280	1.331	1.305	1.339	1.272	1.325	1.298	1.332	1.226	1.277	1.251	1.283	1.153
A1-P11	1ª	1.321	1.353	1.337	1.389	1.312	1.343	1.328	1.381	1.305	1.336	1.321	1.373	1.255	1.289	1.272	1.322	1.182
A1-P12	1ª	1.359	1.410	1.384	1.436	1.344	1.394	1.369	1.422	1.340	1.389	1.365	1.416	1.284	1.340	1.312	1.362	1.120
A1-P13	1ª	1.443	1.518	1.482	1.572	1.434	1.497	1.466	1.555	1.421	1.499	1.460	1.551	1.373	1.433	1.403	1.488	799
A1-P14	1ª	1.236	1.309	1.275	1.327	1.230	1.301	1.265	1.319	1.214	1.288	1.251	1.306	1.174	1.246	1.210	1.262	1.023
A1-P15	1ª	1.213	1.250	1.234	1.263	1.206	1.241	1.224	1.255	1.196	1.234	1.215	1.246	1.154	1.189	1.172	1.202	898
A1-P16	1ª	1.185	1.216	1.203	1.235	1.174	1.211	1.193	1.227	1.169	1.200	1.184	1.219	1.124	1.160	1.142	1.175	1.049
A1-P17	1ª	1.189	1.208	1.201	1.233	1.186	1.201	1.193	1.228	1.175	1.195	1.185	1.220	1.134	1.152	1.143	1.176	638
A1-P18	1ª	1.355	1.350	1.356	1.418	1.354	1.343	1.349	1.414	1.338	1.336	1.337	1.402	1.298	1.280	1.289	1.350	1.150
A1-P19	1ª	1.259	1.222	1.241	1.310	1.247	1.208	1.227	1.298	1.234	1.197	1.216	1.283	1.191	1.156	1.173	1.240	1.135
A1-P20	1ª	1.166	1.176	1.171	1.230	1.156	1.163	1.160	1.220	1.142	1.152	1.147	1.205	1.108	1.112	1.110	1.169	1.174
A2-P21	1ª	2.893	2.841	2.863	3.031	2.813	2.782	2.797	2.959	2.847	2.797	2.822	2.984	2.863	2.830	2.847	3.011	1.610
A2-P22	1ª	2.691	2.627	2.661	2.812	2.662	2.587	2.624	2.777	2.646	2.583	2.614	2.765	2.704	2.637	2.671	2.822	1.018
A2-P23	1ª	1.891	1.886	1.886	1.925	1.874	1.869	1.872	1.908	1.865	1.862	1.864	1.900	1.914	1.910	1.912	1.949	1.479
A2-P24	1ª	1.700	1.700	1.700	1.768	1.682	1.684	1.683	1.753	1.676	1.675	1.676	1.743	1.715	1.723	1.719	1.790	1.584
A2-P25	1ª	1.570	1.585	1.578	1.628	1.557	1.568	1.562	1.612	1.548	1.562	1.555	1.605	1.590	1.605	1.598	1.648	1.414
A2-P26	1ª	1.599	1.643	1.620	1.669	1.587	1.628	1.608	1.655	1.575	1.619	1.597	1.645	1.620	1.664	1.642	1.689	1.617

A2-P27	1ª	1.565	1.596	1.580	1.622	1.550	1.579	1.565	1.606	1.543	1.573	1.558	1.599	1.582	1.615	1.598	1.641	1.649
A2-P28	1ª	1.560	1.607	1.583	1.611	1.546	1.591	1.568	1.595	1.537	1.585	1.561	1.588	1.579	1.627	1.603	1.630	1.463
A2-P29	1ª	1.697	1.729	1.711	1.737	1.658	1.690	1.674	1.697	1.653	1.686	1.669	1.692	1.696	1.731	1.713	1.737	1.623
A2-P30	1ª	1.748	1.787	1.767	1.810	1.707	1.747	1.727	1.768	1.701	1.742	1.722	1.763	1.747	1.789	1.768	1.809	1.504
A2-P31	1ª	1.535	1.567	1.550	1.582	1.518	1.552	1.535	1.567	1.512	1.545	1.529	1.560	1.550	1.586	1.568	1.602	1.678
A2-P32	1ª	1.674	1.726	1.698	1.737	1.637	1.688	1.662	1.699	1.630	1.683	1.657	1.693	1.674	1.727	1.700	1.738	1.592
A2-P33	1ª	1.727	1.806	1.765	1.813	1.688	1.767	1.728	1.775	1.684	1.759	1.722	1.767	1.727	1.811	1.769	1.818	1.328
A2-P34	1ª	1.484	1.538	1.510	1.538	1.469	1.525	1.497	1.525	1.462	1.517	1.490	1.517	1.500	1.558	1.529	1.558	1.661
A2-P35	1ª	1.572	1.632	1.599	1.632	1.547	1.607	1.577	1.607	1.542	1.602	1.572	1.602	1.582	1.644	1.613	1.644	1.570
A2-P36	1ª	1.644	1.698	1.666	1.702	1.607	1.663	1.635	1.667	1.603	1.657	1.630	1.661	1.644	1.702	1.673	1.706	1.421
A1-P01	2ª	6.068	6.693	6.383	6.971	5.943	6.546	6.245	6.811	5.948	6.553	6.251	6.820	5.896	6.486	6.191	6.766	4.542
A1-P02	2ª	5.544	5.800	5.677	6.331	5.412	5.676	5.544	6.182	5.433	5.696	5.565	6.213	5.386	5.596	5.491	6.123	5.006
A1-P03	2ª	5.192	4.937	5.072	5.690	5.041	4.859	4.950	5.545	5.097	4.849	4.973	5.590	5.000	4.809	4.904	5.508	4.402
A1-P04	2ª	4.887	4.833	4.859	5.302	4.780	4.743	4.761	5.195	4.793	4.744	4.768	5.202	4.740	4.695	4.718	5.155	4.421
A1-P05	2ª	4.809	4.987	4.898	5.217	4.700	4.879	4.790	5.105	4.711	4.891	4.801	5.115	4.642	4.837	4.739	5.069	4.578
A1-P06	2ª	4.990	5.176	5.082	5.450	4.875	5.055	4.965	5.328	4.884	5.073	4.978	5.340	4.820	5.011	4.916	5.291	4.685
A1-P07	2ª	5.175	5.139	5.156	5.453	5.071	5.019	5.045	5.330	5.067	5.037	5.052	5.342	5.031	4.973	5.002	5.291	4.495
A1-P08	2ª	4.373	4.541	4.459	4.971	4.281	4.440	4.361	4.859	4.276	4.448	4.362	4.868	4.260	4.395	4.328	4.825	4.140
A1-P09	2ª	4.700	4.604	4.655	4.892	4.595	4.507	4.551	4.783	4.608	4.515	4.562	4.797	4.563	4.464	4.514	4.748	3.966
A1-P10	2ª	4.793	4.808	4.800	5.036	4.690	4.700	4.695	4.923	4.700	4.716	4.708	4.941	4.652	4.661	4.656	4.886	4.344
A1-P11	2ª	5.006	4.841	4.923	5.170	4.894	4.732	4.813	5.053	4.910	4.749	4.830	5.071	4.849	4.692	4.771	5.013	4.448
A1-P12	2ª	4.918	4.877	4.897	5.159	4.797	4.764	4.780	5.036	4.822	4.781	4.802	5.059	4.744	4.722	4.733	4.995	4.113
A1-P13	2ª	4.864	4.961	4.914	5.238	4.759	4.847	4.803	5.116	4.765	4.866	4.816	5.136	4.721	4.793	4.757	5.074	4.446
A1-P14	2ª	4.379	4.808	4.596	5.000	4.298	4.703	4.500	4.890	4.285	4.710	4.498	4.900	4.284	4.666	4.475	4.850	4.345
A1-P15	2ª	4.427	4.805	4.618	4.976	4.343	4.699	4.521	4.865	4.336	4.710	4.523	4.880	4.336	4.661	4.499	4.828	4.220
A1-P16	2ª	4.623	4.519	4.573	4.743	4.517	4.422	4.470	4.635	4.533	4.431	4.482	4.650	4.469	4.377	4.423	4.589	4.529
A1-P17	2ª	4.553	4.538	4.549	4.743	4.453	4.439	4.446	4.637	4.469	4.453	4.461	4.655	4.409	4.400	4.405	4.595	4.037
A1-P18	2ª	4.716	4.727	4.725	4.998	4.615	4.627	4.621	4.892	4.621	4.639	4.630	4.903	4.581	4.590	4.585	4.861	4.312
A1-P19	2ª	4.337	4.616	4.477	4.984	4.251	4.510	4.381	4.872	4.242	4.519	4.380	4.880	4.226	4.476	4.351	4.831	4.448

A1-P20	2ª	4.165	4.446	4.305	4.657	4.075	4.345	4.210	4.555	4.075	4.351	4.213	4.557	4.017	4.307	4.162	4.510	4.396
A2-P21	2ª	6.171	6.700	6.432	7.046	6.019	6.540	6.279	6.867	6.048	6.571	6.310	6.911	6.321	6.832	6.577	7.177	5.365
A2-P22	2ª	6.070	6.708	6.392	7.057	5.967	6.559	6.263	6.909	5.941	6.573	6.257	6.915	6.263	6.874	6.568	7.227	3.642
A2-P23	2ª	5.321	5.988	5.652	6.181	5.228	5.857	5.542	6.047	5.210	5.870	5.540	6.059	5.522	6.160	5.841	6.359	5.586
A2-P24	2ª	5.624	5.658	5.641	6.119	5.485	5.533	5.509	5.977	5.516	5.545	5.530	6.000	5.763	5.817	5.790	6.276	4.821
A2-P25	2ª	5.534	5.483	5.509	5.958	5.396	5.362	5.379	5.817	5.428	5.374	5.401	5.842	5.670	5.641	5.655	6.113	4.898
A2-P26	2ª	5.216	5.432	5.323	5.762	5.096	5.320	5.208	5.638	5.110	5.320	5.215	5.645	5.363	5.610	5.486	5.945	5.044
A2-P27	2ª	5.174	5.406	5.289	5.769	5.051	5.288	5.170	5.642	5.069	5.297	5.183	5.654	5.317	5.576	5.446	5.950	4.963
A2-P28	2ª	5.229	5.533	5.381	5.828	5.112	5.413	5.262	5.701	5.123	5.423	5.273	5.711	5.392	5.703	5.548	6.009	4.992
A2-P29	2ª	5.530	5.786	5.656	6.061	5.375	5.638	5.506	5.904	5.402	5.652	5.527	5.921	5.655	5.932	5.793	6.214	4.828
A2-P30	2ª	5.640	5.845	5.741	6.110	5.482	5.694	5.588	5.949	5.508	5.711	5.609	5.969	5.773	5.989	5.881	6.260	5.416
A2-P31	2ª	5.308	5.519	5.412	5.797	5.177	5.396	5.287	5.665	5.203	5.410	5.307	5.682	5.444	5.673	5.559	5.959	4.861
A2-P32	2ª	5.711	5.674	5.691	5.983	5.563	5.528	5.546	5.828	5.580	5.543	5.562	5.846	5.849	5.811	5.830	6.130	4.787
A2-P33	2ª	5.830	5.826	5.826	6.135	5.675	5.681	5.678	5.980	5.697	5.690	5.693	5.993	5.972	5.985	5.978	6.297	4.543
A2-P34	2ª	5.469	5.477	5.472	5.739	5.343	5.358	5.350	5.610	5.361	5.370	5.366	5.627	5.628	5.627	5.627	5.896	4.659
A2-P35	2ª	4.875	5.619	5.244	5.802	4.746	5.489	5.118	5.664	4.764	5.501	5.133	5.680	5.015	5.770	5.392	5.962	4.574
A2-P36	2ª	4.986	5.571	5.274	5.781	4.847	5.432	5.140	5.636	4.864	5.444	5.154	5.649	5.119	5.721	5.420	5.939	4.927
A1-P01	3ª	11.048	11.891	11.472	12.401	10.871	11.656	11.264	12.154	10.835	11.642	11.239	12.139	10.652	11.400	11.026	11.906	11.397
A1-P02	3ª	10.394	11.733	11.069	12.332	10.240	11.533	10.887	12.112	10.200	11.518	10.859	12.103	10.064	11.228	10.646	11.825	11.487
A1-P03	3ª	10.043	10.521	10.289	11.480	9.853	10.364	10.108	11.256	9.849	10.328	10.089	11.270	9.705	10.104	9.904	11.003	10.792
A1-P04	3ª	9.839	10.748	10.293	11.340	9.685	10.576	10.130	11.147	9.639	10.550	10.095	11.128	9.540	10.302	9.921	10.877	10.701
A1-P05	3ª	9.880	11.128	10.504	11.475	9.712	10.936	10.324	11.280	9.682	10.920	10.301	11.257	9.563	10.665	10.114	11.012	11.526
A1-P06	3ª	10.220	11.291	10.755	11.711	10.033	11.086	10.560	11.507	10.012	11.076	10.544	11.485	9.881	10.813	10.347	11.237	11.155
A1-P07	3ª	11.050	11.269	11.158	11.763	10.915	11.059	10.987	11.546	10.830	11.056	10.943	11.536	10.653	10.787	10.720	11.268	11.469
A1-P08	3ª	9.904	10.658	10.283	11.187	9.714	10.476	10.095	10.998	9.708	10.453	10.080	10.971	9.529	10.200	9.864	10.727	11.823
A1-P09	3ª	10.455	10.747	10.604	11.133	10.294	10.576	10.435	10.952	10.255	10.545	10.400	10.924	10.057	10.297	10.177	10.677	10.321
A1-P10	3ª	10.434	10.948	10.690	11.285	10.226	10.761	10.494	11.090	10.240	10.743	10.492	11.074	10.017	10.488	10.253	10.817	11.968
A1-P11	3ª	10.586	11.088	10.837	11.489	10.439	10.903	10.671	11.294	10.393	10.881	10.637	11.273	10.211	10.627	10.419	11.015	11.371
A1-P12	3ª	10.383	11.071	10.726	11.446	10.228	10.882	10.555	11.246	10.189	10.861	10.525	11.229	10.003	10.606	10.304	10.967	11.599

A1-P13	3ª	10.285	11.151	10.719	11.484	10.134	10.962	10.548	11.287	10.086	10.942	10.514	11.268	9.921	10.673	10.297	11.009	11.732
A1-P14	3ª	10.458	10.728	10.595	11.270	10.313	10.541	10.427	11.073	10.251	10.520	10.386	11.055	10.061	10.287	10.174	10.788	11.208
A1-P15	3ª	10.301	10.722	10.514	11.196	10.096	10.548	10.322	11.007	10.108	10.517	10.313	10.987	9.892	10.295	10.093	10.728	11.897
A1-P16	3ª	10.051	10.478	10.266	10.826	9.940	10.302	10.121	10.641	9.857	10.279	10.068	10.620	9.714	10.038	9.876	10.374	10.787
A1-P17	3ª	10.058	10.715	10.390	10.988	9.894	10.539	10.216	10.802	9.870	10.518	10.194	10.785	9.689	10.269	9.979	10.527	10.951
A1-P18	3ª	10.110	10.864	10.490	11.209	9.953	10.691	10.322	11.028	9.916	10.664	10.290	10.999	9.762	10.425	10.094	10.766	11.375
A1-P19	3ª	10.149	10.451	10.301	11.024	10.014	10.283	10.149	10.847	9.944	10.244	10.094	10.807	9.786	10.037	9.912	10.588	11.921
A1-P20	3ª	9.944	10.286	10.115	10.659	9.800	10.127	9.963	10.486	9.747	10.081	9.914	10.448	9.532	9.877	9.705	10.224	11.393
A2-P21	3ª	11.298	12.610	11.950	13.108	11.095	12.348	11.722	12.830	11.059	12.352	11.706	12.841	11.428	12.632	12.030	13.136	8.783
A2-P22	3ª	11.943	12.592	12.270	13.292	11.772	12.347	12.059	13.031	11.676	12.334	12.005	13.008	12.054	12.655	12.354	13.335	5.874
A2-P23	3ª	11.010	11.991	11.498	12.447	10.864	11.757	11.310	12.209	10.762	11.743	11.253	12.182	11.167	12.051	11.609	12.512	9.088
A2-P24	3ª	11.371	11.734	11.553	12.386	11.205	11.507	11.356	12.153	11.132	11.491	11.312	12.131	11.489	11.784	11.636	12.447	9.187
A2-P25	3ª	11.440	11.531	11.486	12.177	11.237	11.310	11.274	11.947	11.203	11.293	11.248	11.927	11.513	11.584	11.549	12.238	9.270
A2-P26	3ª	11.136	11.370	11.252	11.978	10.970	11.185	11.078	11.782	10.900	11.143	11.022	11.734	11.228	11.467	11.347	12.081	8.764
A2-P27	3ª	11.227	11.387	11.307	12.033	11.044	11.183	11.113	11.824	10.993	11.149	11.071	11.785	11.299	11.458	11.379	12.123	8.509
A2-P28	3ª	11.218	11.615	11.416	12.117	11.038	11.400	11.219	11.901	10.981	11.374	11.178	11.866	11.319	11.680	11.499	12.203	11.101
A2-P29	3ª	11.497	11.922	11.708	12.370	11.275	11.667	11.471	12.123	11.239	11.658	11.449	12.096	11.551	11.954	11.752	12.427	8.256
A2-P30	3ª	11.665	11.984	11.824	12.505	11.433	11.718	11.575	12.240	11.403	11.719	11.561	12.228	11.706	11.999	11.852	12.535	9.144
A2-P31	3ª	11.317	11.605	11.460	12.041	11.097	11.374	11.235	11.810	11.086	11.366	11.226	11.793	11.371	11.643	11.507	12.100	9.519
A2-P32	3ª	11.268	12.192	11.728	12.545	11.124	11.939	11.532	12.285	11.010	11.924	11.467	12.271	11.425	12.204	11.814	12.568	9.580
A2-P33	3ª	12.044	11.899	11.970	12.567	11.797	11.659	11.728	12.314	11.777	11.631	11.704	12.289	12.080	11.961	12.021	12.622	8.906
A2-P34	3ª	11.162	11.502	11.331	12.067	10.997	11.268	11.133	11.835	10.931	11.268	11.099	11.824	11.276	11.534	11.405	12.106	10.808
A2-P35	3ª	10.007	12.134	11.067	12.377	9.897	11.889	10.893	12.131	9.787	11.879	10.833	12.118	10.175	12.154	11.165	12.412	9.255
A2-P36	3ª	9.855	11.566	10.706	11.949	9.727	11.329	10.528	11.716	9.612	11.309	10.460	11.683	10.037	11.614	10.825	12.018	9.128
A1-P01	4ª	15.523	16.192	15.860	16.892	15.292	15.902	15.597	16.588	15.284	15.922	15.603	16.602	14.802	15.390	15.096	16.069	16.784
A1-P02	4ª	14.834	16.089	15.467	16.793	14.624	15.828	15.226	16.514	14.613	15.848	15.230	16.536	14.181	15.266	14.723	15.960	16.572
A1-P03	4ª	14.481	14.897	14.697	16.018	14.223	14.678	14.451	15.729	14.263	14.678	14.470	15.782	13.810	14.158	13.984	15.207	12.116
A1-P04	4ª	14.274	15.132	14.702	15.871	14.051	14.896	14.473	15.613	14.049	14.907	14.478	15.633	13.638	14.364	14.001	15.073	18.439
A1-P05	4ª	14.439	15.565	15.002	16.051	14.209	15.308	14.759	15.792	14.217	15.331	14.774	15.807	13.786	14.775	14.280	15.251	18.446

A1-P06	4ª	14.785	15.728	15.255	16.297	14.535	15.458	14.996	16.028	14.553	15.487	15.020	16.046	14.109	14.924	14.516	15.485	18.238
A1-P07	4ª	15.588	15.686	15.636	16.312	15.390	15.411	15.401	16.030	15.344	15.445	15.395	16.060	14.859	14.879	14.869	15.483	15.960
A1-P08	4ª	14.305	15.029	14.669	15.677	14.048	14.786	14.417	15.423	14.084	14.798	14.441	15.433	13.597	14.250	13.923	14.883	14.649
A1-P09	4ª	14.957	15.155	15.059	15.666	14.738	14.922	14.830	15.422	14.732	14.928	14.830	15.431	14.230	14.381	14.306	14.876	16.667
A1-P10	4ª	14.994	15.390	15.191	15.861	14.722	15.140	14.931	15.601	14.775	15.159	14.967	15.624	14.238	14.605	14.422	15.053	17.419
A1-P11	4ª	15.139	15.513	15.325	16.045	14.926	15.264	15.095	15.785	14.919	15.279	15.099	15.802	14.424	14.728	14.576	15.233	16.519
A1-P12	4ª	14.931	15.486	15.208	16.004	14.711	15.232	14.972	15.738	14.710	15.249	14.979	15.759	14.214	14.696	14.455	15.187	15.405
A1-P13	4ª	14.726	15.511	15.119	15.954	14.515	15.254	14.885	15.695	14.501	15.274	14.888	15.711	14.034	14.708	14.371	15.149	16.489
A1-P14	4ª	14.927	15.143	15.037	15.788	14.721	14.891	14.806	15.525	14.696	14.909	14.803	15.546	14.199	14.377	14.288	14.970	15.165
A1-P15	4ª	14.860	15.166	15.015	15.768	14.591	14.928	14.760	15.513	14.642	14.936	14.789	15.532	14.112	14.411	14.262	14.960	17.066
A1-P16	4ª	14.592	14.901	14.748	15.374	14.419	14.662	14.540	15.126	14.373	14.676	14.524	15.142	13.919	14.137	14.028	14.586	17.910
A1-P17	4ª	14.606	15.127	14.870	15.546	14.379	14.887	14.633	15.297	14.392	14.901	14.646	15.317	13.899	14.358	14.129	14.747	16.847
A1-P18	4ª	14.633	15.261	14.950	15.749	14.415	15.022	14.719	15.504	14.413	15.034	14.724	15.512	13.954	14.497	14.225	14.973	17.698
A1-P19	4ª	14.630	14.814	14.722	15.534	14.435	14.583	14.509	15.295	14.399	14.582	14.490	15.290	13.937	14.080	14.008	14.765	17.488
A1-P20	4ª	14.434	14.691	14.562	15.165	14.227	14.468	14.347	14.928	14.211	14.459	14.335	14.928	13.691	13.957	13.824	14.398	18.142
A2-P21	4ª	14.568	16.155	15.358	16.736	14.344	15.853	15.099	16.416	14.296	15.864	15.080	16.434	14.578	16.034	15.306	16.618	15.346
A2-P22	4ª	15.251	15.861	15.558	16.792	15.066	15.574	15.320	16.500	14.963	15.568	15.266	16.484	15.247	15.787	15.517	16.701	14.151
A2-P23	4ª	14.644	15.564	15.102	16.146	14.463	15.287	14.875	15.870	14.371	15.284	14.827	15.855	14.661	15.474	15.068	16.066	14.977
A2-P24	4ª	14.591	15.308	14.950	16.055	14.420	15.041	14.730	15.781	14.321	15.033	14.677	15.766	14.598	15.209	14.904	15.965	15.171
A2-P25	4ª	14.605	15.090	14.848	15.841	14.401	14.829	14.615	15.570	14.336	14.821	14.579	15.557	14.573	14.994	14.784	15.752	14.377
A2-P26	4ª	14.693	14.833	14.762	15.591	14.486	14.609	14.548	15.356	14.422	14.566	14.494	15.311	14.636	14.790	14.713	15.546	18.196
A2-P27	4ª	14.898	15.002	14.949	15.742	14.674	14.756	14.715	15.493	14.626	14.729	14.678	15.456	14.817	14.923	14.870	15.679	15.617
A2-P28	4ª	14.482	15.259	14.870	15.872	14.296	15.004	14.650	15.614	14.209	14.986	14.598	15.584	14.470	15.173	14.822	15.803	14.807
A2-P29	4ª	14.696	15.566	15.129	16.119	14.471	15.273	14.872	15.831	14.402	15.271	14.837	15.808	14.643	15.445	15.044	16.024	13.542
A2-P30	4ª	14.858	15.627	15.242	16.256	14.625	15.324	14.975	15.951	14.561	15.334	14.947	15.945	14.791	15.489	15.140	16.132	14.836
A2-P31	4ª	14.502	15.212	14.856	15.779	14.282	14.941	14.611	15.505	14.234	14.941	14.587	15.493	14.452	15.100	14.776	15.683	14.116
A2-P32	4ª	14.465	15.881	15.171	16.309	14.323	15.586	14.954	16.008	14.175	15.582	14.878	16.000	14.516	15.737	15.126	16.175	16.675
A2-P33	4ª	15.240	15.579	15.408	16.313	14.994	15.298	15.146	16.018	14.942	15.279	15.111	16.001	15.168	15.487	15.328	16.210	14.579
A2-P34	4ª	14.483	14.908	14.695	15.533	14.289	14.638	14.464	15.265	14.219	14.642	14.430	15.256	14.477	14.812	14.645	15.443	14.418

A2-P35	4ª	13.531	15.727	14.626	16.040	13.372	15.443	14.407	15.752	13.264	15.442	14.353	15.746	13.543	15.599	14.571	15.925	14.883
A2-P36	4ª	13.483	15.158	14.316	15.647	13.316	14.887	14.102	15.376	13.204	14.870	14.037	15.345	13.516	15.064	14.290	15.567	13.115

Anexo 6. Tabela com as produtividades médias de matéria seca da cana-de-açúcar (Kg MS ha^{-1}) apuradas pelos modelos avaliados durante os quatro períodos de coleta de amostra e a variação percentual das produtividades médias modeladas vs produtividade média observadas em campo.

Modelagem	1ª Amostragem				2ª Amostragem				3ª Amostragem				4ª Amostragem			
	Área 01		Área 02		Área 01		Área 02		Área 01		Área 02		Área 01		Área 02	
	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)	Kg MS ha^{-1}	Var. (%)
Mod. 01	1.466,1	38,3%	1.784,2	17,9%	4.826,1	9,8%	5.480,6	12,6%	10.279,6	-9,4%	11.216,1	23,6%	14.782,9	-11,5%	14.561,9	-2,4%
Mod. 02	1.484,2	40,0%	1.810,6	19,7%	4.932,9	12,3%	5.764,2	18,4%	10.924,3	-3,7%	11.852,2	30,6%	15.323,8	-8,2%	15.420,8	3,3%
Mod. 03	1.476,6	39,3%	1.796,1	18,7%	4.880,9	11,1%	5.621,0	15,4%	10.603,4	-6,5%	11.532,8	27,1%	15.054,8	-9,9%	14.990,0	0,4%
Mod. 04	1.555,6	46,7%	1.851,1	22,3%	5.249,1	19,5%	6.070,5	24,7%	11.384,9	0,4%	12.372,6	36,4%	15.918,1	-4,7%	16.048,2	7,5%
Mod. 05	1.455,5	37,3%	1.756,3	16,1%	4.719,4	7,4%	5.347,7	9,8%	10.117,6	-10,8%	11.035,7	21,6%	14.558,6	-12,8%	14.363,9	-3,8%
Mod. 06	1.473,3	38,9%	1.782,9	17,8%	4.825,6	9,8%	5.630,5	15,6%	10.740,2	-5,3%	11.617,5	28,0%	15.076,0	-9,7%	15.146,6	1,5%
Mod. 07	1.464,4	38,1%	1.769,6	17,0%	4.772,5	8,6%	5.489,1	12,7%	10.428,9	-8,1%	11.326,6	24,8%	14.817,3	-11,3%	14.755,2	-1,1%
Mod. 08	1.543,6	45,6%	1.823,2	20,5%	5.130,6	16,8%	5.927,1	21,7%	11.187,7	-1,4%	12.133,1	33,7%	15.657,2	-6,2%	15.769,2	5,7%
Mod. 09	1.444,9	36,3%	1.751,5	15,8%	4.728,8	7,6%	5.364,0	10,2%	10.080,7	-11,1%	10.971,8	20,9%	14.558,4	-12,8%	14.284,0	-4,3%
Mod. 10	1.464,4	38,1%	1.778,0	17,5%	4.836,6	10,1%	5.643,5	15,9%	10.716,9	-5,5%	11.602,1	27,9%	15.090,1	-9,6%	15.138,4	1,4%
Mod. 11	1.454,6	37,2%	1.764,7	16,6%	4.782,7	8,9%	5.503,7	13,0%	10.398,8	-8,3%	11.287,0	24,4%	14.824,3	-11,2%	14.711,2	-1,4%
Mod. 12	1.534,2	44,7%	1.817,7	20,1%	5.145,9	17,1%	5.944,1	22,1%	11.167,8	-1,6%	12.110,9	33,5%	15.674,5	-6,1%	15.752,5	5,5%
Mod. 13	1.393,6	31,4%	1.792,9	18,5%	4.681,3	6,5%	5.629,1	15,6%	9.911,5	-12,6%	11.319,8	24,8%	14.081,7	-15,7%	14.542,9	-2,6%
Mod. 14	1.410,3	33,0%	1.822,5	20,4%	4.780,6	8,8%	5.920,0	21,6%	10.471,0	-7,7%	11.898,3	31,1%	14.547,0	-12,9%	15.320,0	2,6%
Mod. 15	1.402,0	32,2%	1.807,7	19,5%	4.730,9	7,7%	5.774,6	18,6%	10.191,3	-10,2%	11.609,1	27,9%	14.314,4	-14,3%	14.931,4	0,0%
Mod. 16	1.478,2	39,4%	1.862,0	23,1%	5.090,4	15,9%	6.232,1	28,0%	10.916,9	-3,8%	12.428,9	37,0%	15.115,2	-9,5%	15.955,6	6,9%
Obs. Campo	1.060,3	0,0%	1.513,2	0,0%	4.393,7	0,0%	4.869,1	0,0%	11.343,7	0,0%	9.073,3	0,0%	16.701,0	0,0%	14.925,4	0,0%