



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DIEGO ROSYUR CASTRO MANRIQUE

**MONITORAMENTO FENOLÓGICO DE CANAVIAIS USANDO O GOOGLE
EARTH ENGINE E TIMESAT NO VALE DO SUBMÉDIO DO SÃO
FRANCISCO**

RECIFE – PE
2022

DIEGO ROSYUR CASTRO MANRIQUE

**MONITORAMENTO FENOLOGICO DE CANAVIAIS USANDO O GOOGLE
EARTH ENGINE E TIMESAT NO VALE DO SUBMÉDIO DO SÃO
FRANCISCO**

Dissertação entregue ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - PPGEA da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo. Linha de Pesquisa: Monitoramento Ambiental e Recuperação de solos Agrícolas e Áreas Degradadas.

Autor: Diego Rosyur Castro Manrique

Orientador: Prof. Dr. Pabício Marcos Oliveira Lopes

RECIFE – PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C355m Castro Manrique, Diego Rosyur
Monitoramento Fenológico De Canaviais Usando o Google Earth Engine e Timesat No Vale Do
Submédio Do São Francisco / Diego Rosyur Castro Manrique. - 2022.
71 f. : il.

Orientador: Pabricio Marcos Oliveira .
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, Recife, 2022.

1. MODIS. 2. série temporal. 3. semiárido. 4. cana-de-açúcar. I. , Pabricio Marcos Oliveira, orient. II.
Título

CDD 630

DIEGO ROSYUR CASTRO MANRIQUE

**MONITORAMENTO FENOLÓGICO DE CANAVIAIS USANDO O GOOGLE
EARTH ENGINE E TIMESAT NO VALE DO SUBMÉDIO DO SÃO
FRANCISCO**

APROVADO EM 16 / 02 /2022

**Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes - UFRPE
(Orientador)**

**Dr. Eberson Pessoa Ribeiro- IFPE
(Examinador)**

**Profª. Drª. Cristina Rodrigues Nascimento - UFRPE
(Examinadora)**

DEDICO

À DEUS, onipotente, onipresente e onisciente;

À minha família, em especial para a mulher do meu coração, a minha querida mãe Carmen Manrique Z., por ser a inspiração da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, a meu DEUS, meu grande tesouro que cuida de mim e me ajuda a melhorar.

Em especial, a minha querida mãe Carmen Manrique Z., por sempre acreditar em mim e por estar orgulhosa da minha formação.

Ao professor Pabício Marcos de Oliveira Lopes, mais que meu orientador, é meu amigo. Graças a você, pela total disponibilidade e a boa vontade de me orientar.

Agradeço ao coordenador do programa de pós-graduação em engenharia agrícola, professor Ênio Farias de França e Silva e aos docentes, especialmente os que lecionaram a mim, pelo comprometimento com o programa e pelos conhecimentos transmitidos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Fenologia	17
3.2. Caracterização fisiológica da cana-de-açúcar	17
3.3. Condições ambientais para o desenvolvimento da cana-de-açúcar....	19
3.4. Uso da Cana-de-açúcar.....	19
3.5. Diagrama do NDVI para um ciclo fenológico de uma cultura agrícola.	20
3.6. TIMESAT	20
3.7. Parâmetros fenológicos derivados de séries temporais	21
3.8. Extração de parâmetros fenológicos pelo <i>software TIMESAT</i>	23
3.9. Linguagem de programação Python.....	25
3.10. Aplicação da linguagem de programação Python.....	25
3.11. Ambiente computacional de trabalho: Jupyter Notebook.....	26
3.12. Biblioteca GDAL	26
3.13. Plataforma <i>Google Earth Engine</i>	26
3.14. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	27
3.15. Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)	28
3.16. Índice de área foliar (IAF)	28
3.17. Sensor MODIS.....	28
3.18. Satélite Landsat-5.....	29
3.19. CHIRPS	30

4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Caracterização da área de estudo.....	31
4.2. Datas da colheita da cana-de-açúcar na área teste	32
4.1. Dados Orbitais	33
4.2. Dados Meteorológicos	34
4.3. Aplicação do Python e GDAL	34
4.4. Produção dos parâmetros fenológicos no <i>software</i> TIMESAT.....	34
4.5. Parâmetros biofísicos derivados de imagens do sensor MODIS	36
4.6. Análise estatística e validação dos dados estimados pelo TIMESAT ..	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. Série temporal dos dados meteorológicos.....	40
5.2. Validação da precipitação do CHIRPS com dados observados	41
5.3. Classificação do uso e da cobertura da terra.....	43
5.4. Classificação do MapBiomas para área teste.....	45
5.5. Série Temporal do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	47
5.6. Série Temporal do índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI).....	50
5.7. Série Temporal do índice de área foliar (IAF)	50
5.8. Análise dos parâmetros fenológicas do ciclo da cana-de-açúcar no TIMESAT	51
5.9. Avaliação estatística	58
5.9.1. Teste de normalidade.....	58
5.9.2. Teste t de <i>Student</i>	59
5.9.3. Validação das datas de colheitas estimadas com <i>software</i> TIMESAT	60
6. CONCLUSÕES	63
7. REFERÊNCIAS.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases fenológicas da cana-de-açúcar.....	18
Figura 2 - Diagrama fenológico idealizado para único ciclo.....	20
Figura 3 - Série temporal do NDVI para um período de cinco anos em função do tempo (decêndios).	22
Figura 4 - Série temporal do NDVI (níveis de cinza) para cobrir um período de três anos em função do tempo (decêndios).	23
Figura 5 - Parâmetros Fenológicos.....	23
Figura 6 - Localização da área de estudo - Composição de cor RGB.	31
Figura 7 - Fluxograma do processamento do TIMESAT.....	35
Figura 8 - Dados meteorológicos da estação meteorológica automática do Labmet Juazeiro, Ba para o período 2008 a 2012.	40
Figura 9 - Relação entre a precipitação observada na estação meteorológica do Labmet/UFVSF em função da precipitação do CHIRPS entre 2008 e 2020, Juazeiro, BA.....	42
Figura 10 - Classificação do uso e cobertura vegetal da microbacia usando MapBiomias Coleção 6 (2006 - 2012).	44
Figura 11 - Distribuição temporal da área de cana-de-açúcar da microbacia no período 2001 a 2020 em Juazeiro, BA.....	45
Figura 12 - Classificação da Área teste de cana-de-açúcar usando MapBiomias, Coleção 6, para os anos de 2006 a 2012.	46
Figura 13 - Distribuição Temporal da área teste de cana-de-açúcar no período 2001 a 2020.....	47
Figura 14 - Série temporal do NDVI do sensor MODIS.	48
Figura 15- Imagens de NDVI do sensor TM da área teste de cana-de-açúcar em Juazeiro, BA.....	49
Figura 16: Série temporal do SAVI obtido do sensor MODIS.	50
Figura 17 - Série temporal do IAF do sensor MODIS da área teste de cana-de-açúcar.	51
Figura 18 - Serie Temporal NDVI e filtro Savitsky-Golay.	51
Figura 19 - Relação entre os picos máximos de NDVI em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.....	54
Figura 20 - Relação entre a produtividade primária bruta em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.....	55
Figura 21 - Relação entre a amplitude sazonal do NDVI em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.....	56

Figura 22 - Ciclos fenológicos em função da produtividade líquida da cana-de-açúcar.	57
Figura 23 - Calendário Agrícola da área teste.	58
Figura 24 - Comparação entre a as datas de colheita usando o <i>software</i> TIMESAT e as datas de colheita da área teste no período 2006 a 2012.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características espectrais e espaciais do sensor MODIS.	29
Tabela 2 - Características do satélite Landsat-5.....	29
Tabela 3 - Características agrícolas e industriais da variedade RB92579.....	32
Tabela 4 - Datas das colheitas dos 13 lotes pertencentes à área teste.....	33
Tabela 5 - Configurações de entrada usadas no <i>software</i> TIMESAT para a área de estudo.	36
Tabela 6 - Classificação do coeficiente de correlação (r) e do índice de desempenho (e).....	39
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos dos dados de precipitação medidos e estimados pelo CHIRPS.	43
Tabela 8 - Parâmetros fenológicos obtidos com o <i>software</i> TIMESAT, dos 19 ciclos fenológicos identificados para a área teste (Histórico Calendário Agrícola).	53
Tabela 9 - Teste de Normalidade, usando Shapiro-Wilks.....	59
Tabela 10 - Resultados do Test t <i>Student</i>	59
Tabela 11 - Parâmetros estatísticos das áreas que conformam a área teste. ...	62

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

API	Interface de programação de aplicativo
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EE	Earth Engine
EOS	Earth Observing System
EROS	Earth Resources Observation and Science
EVI	Enhanced Vegetation Index
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GEE	Google Earth Engine
GUI	Interface gráfica de usuário
IAF	Índice de área foliar
IDE	Ambiente de desenvolvimento interativo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Labmet	Laboratório de Meteorologia
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
MCR	Matlab Compiler Runtime
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PIB	Produto Interno Bruto Nacional
RMSE	Erro quadrático médio da raiz
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
SWIR	Infravermelho de onda curta
TM	Thematic Mapper

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
d	Índice de concordância de Willmott (1981)
ha	Hectare
K	Número de variáveis independentes na regressão
kg	Quilos
L	fator de ajuste
m	Metros
m ² /m ⁻²	Metro quadrado por metro quadrado
MAE	Erro médio absoluto
MJ/m ²	Megajoule por metro quadrado
mm	Milímetro
mm/mês	Milímetro por mês
N	Número de observações
°C	Grau Celsius
r	Correlação de Pearson
R	Refletância da banda do Vermelho.
R ²	Coefficiente de determinação ajustado
RMSE	Erro quadrático médio da raiz
Y_{esti}	Variável estimada
$\overline{Y_{esti}}$	Médias dos valores estimados.
Y_{obsi}	Variável observada
$\overline{Y_{obsi}}$	Médias dos valores observados

CASTRO MANRIQUE, D.R., **Monitoramento fenológico de canaviais usando o *Google Earth Engine* e TIMESAT no Vale do Submédio do São Francisco**. 2022. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE.

Autor: Diego Rosyur Castro Manrique

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

RESUMO

O monitoramento da fenologia da cultura da cana-de-açúcar é de grande importância, uma vez que o mercado globalizado exige informações confiáveis sobre a quantidade de matéria-prima para a produção de açúcar e álcool. O presente estudo objetivou estimar os parâmetros fenológicos da cana-de-açúcar (início, meio e final do ciclo) entre as safras de 2001 e 2020, utilizando série temporal de imagens MODIS, obtidas do *Google Earth Engine* e do *software* TIMESAT. O estudo foi realizado nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar localizado no município de Juazeiro, BA. Os dados meteorológicos foram obtidos nas páginas virtuais do Laboratório de Meteorologia da Universidade Federal do Vale do São Francisco e do CHIRPS, enquanto as imagens dos satélites Terra/MODIS, Landsat-5 e MapBiomas do catálogo do *Google Earth Engine*. Os dados de precipitação foram avaliados em função da precipitação do produto CHIRPS, obtendo uma correlação “muito alta” ($R^2 = 0,734$); além disso, a precipitação do CHIRPS teve relação com o NDVI, mesmo em canaviais irrigados, podendo influenciar nas datas da colheita. Ademais, as séries temporais dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) foram usadas para avaliar a evolução espacial e temporal da área teste em cada ciclo fenológico. De modo geral, as datas das colheitas de cana-de-açúcar estimadas com a série temporal do sensor MODIS NDVI no *software* TIMESAT comparadas com os dados de colheitas reais, entre as safras de 2006 a 2012, apresentaram uma diferença média de 10 dias, com índice de desempenho igual a 0,99 e de coeficiente de correlação de 0,99, significativo ao nível de confiança de 5%. Conclui-se que o *software* TIMESAT foi capaz de estimar os parâmetros fenológicos em áreas de produção de cana-de-açúcar, utilizando imagens MODIS processadas no *Google Earth Engine* durante o período de tempo avaliado (2001 a 2020).

Palavras-chaves: MODIS, série temporal, semiárido, cana-de-açúcar.

CASTRO MANRIQUE, D.R., **Phenological monitoring of sugarcane fields using *Google Earth Engine* and TIMESAT in the São Francisco Sub-medium Valley**. 2022. 71f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco - UFRPE.

Author: Diego Rosyur Castro Manrique

Adviser: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

ABSTRACT

The monitoring of the phenology of the sugarcane crop is of great importance, since the globalized market requires reliable information on the amount of raw material for the production of sugar and alcohol. The present study aimed to estimate the phenological parameters of sugarcane (beginning, middle and end of the cycle) between the 2001 and 2020 crops, using time series of MODIS images, obtained from Google Earth Engine and TIMESAT software. The study was carried out in sugarcane growing areas located in the municipality of Juazeiro, BA. The meteorological data were obtained from the virtual pages of the Meteorology Laboratory of the Federal University of São Francisco Valley and CHIRPS, while the Terra/MODIS, Landsat-5 and MapBiomass satellite images from the Google Earth Engine catalog. Precipitation data were evaluated as a function of precipitation from the CHIRPS product, obtaining a "very high" correlation ($R^2 = 0,734$); moreover, CHIRPS precipitation was related to NDVI, even in irrigated sugarcane fields, and could influence harvest dates. Furthermore, the time series of vegetation indices (NDVI, SAVI and IAF) were used to evaluate the spatial and temporal evolution of the test area in each phenological cycle. In general, the sugarcane harvest dates estimated with the time series of the MODIS NDVI sensor in the TIMESAT software compared with the actual harvest data, between the 2006 and 2012 harvests, showed an average difference of 10 days, with a performance index equal to 0,99 and a correlation coefficient of 0,99, significant at the 5% confidence level. It is concluded that the TIMESAT software was able to estimate the phenological parameters in sugarcane production areas, using MODIS images processed in Google Earth Engine during the evaluated time period (2001 to 2020).

Keywords: MODIS, time series, semiarid, sugarcane.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum Spp*) é uma das culturas de grande importância social, econômica e ambiental, sendo o Brasil o maior produtor mundial com uma produção de 600 milhões de toneladas e de 8,5 milhões de hectares (POSSEBON; POLLI, 2020).

O Brasil tem como base econômica o setor agrícola, sendo o setor sucroalcooleiro de suma importância para o Produto Interno Bruto Nacional (PIB). O Brasil tem 25% da produção mundial, sendo um dos maiores produtores de combustíveis à base de etanol orgânico e cana-de-açúcar, sendo um grande exportador de açúcar para o mercado internacional. Por isso, o setor agropecuário recebe investimentos em pesquisas científicas e na expansão de áreas canavieira (SANTOS, 2016).

O clima do Nordeste brasileiro tem favorecido as condições de trabalho na região, estimando-se um aumento de 1,6% na área e 2,5% na produtividade média, resultando em uma produção de 51,1 milhões de toneladas (CONAB, 2020).

Com base nisso, o sensoriamento remoto é uma ferramenta utilizada no monitoramento agrícola, pois permite a identificação de parâmetros biofísicos relacionados ao clima à superfície por meio de imagens de satélite, seja em áreas pequenas ou grandes (TERRES *et al.*, 1995; DEVRIES *et al.*, 2015).

Os algoritmos utilizados em sensoriamento remoto são compostos por equações ajustadas para adaptar técnicas em diferentes escalas e, portanto, gerar informações aplicáveis, sem a necessidade de contato físico com a superfície a ser estudada. Os algoritmos utilizados têm diversos objetivos, sendo a pesquisa científica sobre recursos naturais o mais importante (BASTIAANSEN *et al.*, 1998; SANTOS, 2016).

O ciclo fenológico de culturas agrícolas pode ser medido ou estimado por observação de campo feitas pelo agricultor, mas é muito difícil manter o mesmo método de inferência em grandes áreas. Portanto, a utilização de série temporal de imagens orbitais é essencial para estimar os ciclos fenológicos de culturas agrícolas em grandes áreas, bem como para inferências econômicas. Além disso, os calendários históricos de safras podem ser facilmente refeitos, constituindo um importante banco de dados (JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016).

Nesse contexto, a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) permite o processamento de grande quantidade de informações geoespaciais em nuvem com alto desempenho e, dá acesso a uma ampla coleção de dados de satélite, utilizando uma linguagem de programação acessível ao usuário, como o JavaScript e Python. O GEE permite acesso ao processamento gratuito de dados de satélites orbitais, como Landsat, MODIS, Sentinel, com séries temporais consideráveis que permitem o acompanhamento da fenologia de culturas agrícolas e por sua vez, facilitar as estimativas de parâmetros biofísicos (XAVIER *et al.*, 2020).

Algoritmos específicos aplicado em imagens do sensor MODIS, a bordo da plataforma Terra pertencente ao programa internacional *Earth Observing System* (EOS), liderado pela *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa), produziram dados para estudos de vegetação em escala global. Os dados obtidos pelo sensor MODIS possuem moderada resolução espacial, alta repetibilidade temporal, boa qualidade radiométrica e alta precisão geométrica, representando um grande potencial de aplicação para o monitoramento da cultura da cana-de-açúcar em grandes áreas (ANTUNES *et al.*, 2016).

Para o cálculo das datas dos parâmetros das fases fenológicas existem diversos *softwares*, entre eles destaca-se o TIMESAT, pois ele possibilita cálculos rápidos, envolvendo uma série temporal de imagens de satélite. Dentre os parâmetros biofísicos mais utilizados como entrada no TIMESAT tem-se o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). Este índice visa potencializar a resposta espectral das plantas e amenizar a influência do solo (ALLEN *et al.*, 2002; ANTUNES *et al.*, 2016). Além do NDVI, tem-se o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), que reduz o efeito da reflexão do solo abaixo da vegetação (*background*) (HUETE, 1988; REYMUNDO; ACEVEDO, 2020) e o Índice de Área Foliar (IAF), que está diretamente relacionada com a produtividade da cultura (ALLEN *et al.*, 2007; SANTANA *et al.*, 2016).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi estimar os parâmetros fenológicos da cana-de-açúcar (início, meio e fim do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar, acúmulo de vegetação ativa e produção total da vegetação) entre as safras de 2001 e 2020, utilizando série temporal de imagens MODIS, Google Earth Engine e o software TIMESAT.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Estimar os parâmetros fenológicos da cana-de-açúcar (início, meio e fim do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar, acúmulo de vegetação ativa e produção total da vegetação) entre as safras de 2001 a 2020, utilizando série temporal de imagens MODIS, *Google Earth Engine* e o *software* TIMESAT.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar os dados mensais estimados de precipitação do CHIRPS com os dados medidos da estação meteorológica próxima da área de estudo;
- Avaliar as séries temporais do NDVI e da precipitação do CHIRPS para verificar a influência da chuva na data da colheita da cana-de-açúcar irrigada;
- Testar os métodos de ajustes aplicados na série temporal do NDVI do MODIS, disponíveis no *software* TIMESAT, para ajustá-la a uma curva sem ruídos de nuvens ou pixels misturados;
- Validar as datas da colheita para os anos safras de 2006 a 2012;
- Analisar estatisticamente as datas da colheita observadas e estimadas da área teste de cana-de-açúcar;
- Construir um calendário agrícola da área estudada com datas do início, meio e final dos ciclos fenológicos da cana-de-açúcar entre 2001 e 2020.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fenologia

A fenologia é o estudo da relação entre o crescimento vegetativo e o meio ambiente. A fenologia, geralmente, refere-se especificamente as mudanças sazonais no crescimento e declínio vegetativo. Muitas mudanças fenológicas podem ser monitoradas por meio de sensoriamento remoto porque as plantas mudam em aparência e estrutura durante seu ciclo de crescimento (CAMPBELL; WYNNE, 2011; LIANG, 2019; SPARKS; MENZEL, 2013).

Quando uma planta amadurece ocorrem mudanças espectrais e fisiológicas. A cada estágio fenológico, as plantas sofrem mudanças químicas, físicas e biológicas, conhecidas como senescência, que resultam na deterioração progressiva das folhas, caules, frutos e flores. Estas mudanças podem ser observadas espectralmente. Portanto, as imagens de sensoriamento remoto podem ser um meio eficaz de monitorar as mudanças sazonais na vegetação (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Em um contexto agrícola, a fenologia pode ser usada para determinar o calendário de uma cultura agrícola, que variará de região para região em resposta às interações entre o caráter genético da cultura, o clima, a tecnologia e as práticas agrícolas locais aplicadas (CAMPBELL; WYNNE, 2011; LIANG, 2019).

3.2. Caracterização fisiológica da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é da ordem Graminales, família Poaceae, gênero *Saccharum* e apresenta como principais espécies a *Saccharum officinarum* L., *Saccharum sinensis* L., *Saccharum barbiri* L. e *Saccharum robustum* L., (SILVA; SILVA, 2012).

A cana-de-açúcar desenvolve-se na forma de touceiras, cuja parte aérea é composta por caules, folhas, inflorescências e sementes, enquanto a parte subterrânea é composta por raízes e rizomas. A anatomia e morfologia da cana-de-açúcar reafirma a habilidade especializada da planta em acumular grandes quantidades de sacarose. Como outros membros da família Poaceae, as partes acima do solo da planta compreendem uma série de nós separados por entrenós

nos quais se desenvolvem os botões e as folhas, gerados por um meristema apical vegetativo. Os entrenós contêm as estruturas celulares especializadas para a transferência e armazenamento de sacarose (MARASCA *et al.*, 2015).

Segundo Doorenbos, Kassam (1979), a cana-de-açúcar apresenta os seguintes estágios fenológicos de desenvolvimento (Figura 1): emergência, nesta primeira fase é onde ocorre a germinação e dura de 30 a 60 dias; estabelecimento, pode-se notar que nesta fase a planta estabelece um desenvolvimento do sistema radicular, as primeiras folhas podem ser vistas e dura de 60 a 90 dias; desenvolvimento da cultura, nesta etapa ocorre o alongamento do colmo, inicia o acúmulo de sacaroses dos colmos e tem duração média de 180 a 210 dias; e maturação, nesta fase ocorre um intenso acúmulo de açúcares e seus colmos têm o potencial máximo de sacarose e duram de 60 a 90 dias.

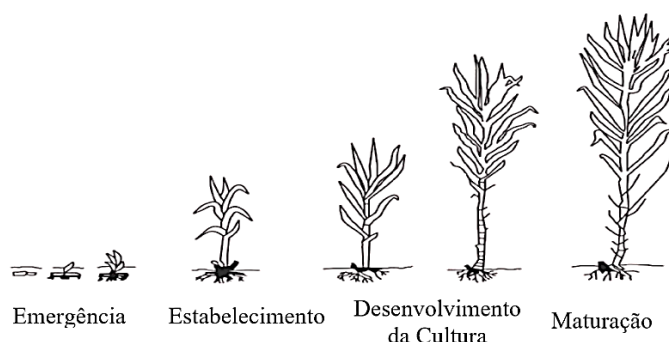


Figura 1 - Fases fenológicas da cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Doorenbos, Kassam (1979).

De acordo com o boletim de acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, 2020/2021, para o estado da Bahia, a projeção para a safra é de 51 mil hectares, o que representa um aumento de 8,5% em relação à safra 2019/2020. Essa expansão está relacionada à substituição de áreas antes utilizadas para pastagem ou que estavam em pousio. Da mesma forma, pode-se destacar o trabalho da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) no estado da Bahia, que ajudou a melhorar a estimativa das avaliações de safra por empresa (CONAB, 2020).

3.3. Condições ambientais para o desenvolvimento da cana-de-açúcar

As regiões tropicais são as ideais para o cultivo de cana-de-açúcar. Três são os fatores climáticos que mais influenciam no seu desenvolvimento: precipitação, temperatura e radiação. A planta usa aproximadamente 148 a 300g de água para produzir um grama de matéria seca. Um regime de 1.500 a 1.800mm de precipitação é ótimo para o seu desenvolvimento. Se durante a fase de crescimento vegetativo a demanda por água for atendida, ocorrerá rápido crescimento, alongamento e formação de internódios (ANEC, 2018; CARDOZO; SENTELHAS, 2013).

O desenvolvimento desta cultura está intimamente relacionado com a temperatura, caso ocorram temperaturas inferiores a 25°C ou superiores a 38°C, isto causa um efeito negativo na fase de germinação ou rebrota. Por outro lado, se as temperaturas forem superiores a 38°C, seu efeito será notado na redução da matéria seca e, conseqüentemente, na diminuição da taxa de fotossíntese, aumentando a respiração e a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar, devendo-se à capacidade de fixar o CO₂ nos feixes vasculares das vagens, daí o uso da radiação solar, por ser mais intensa, maior será a eficácia da fotossíntese (ANEC, 2018; MUÑOZ; TRUJILLO, 2020).

3.4. Uso da Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é utilizada para a produção de diversos produtos. Entre eles pode-se destacar o etanol e o açúcar. O suco de sacarose é o mais importante, pois é extraído e cristalizado nas usinas de onde se forma o açúcar. O etanol é outro derivado importante, pois recentemente tornou-se uma fonte de energia orgânica não poluente. Da conversão para o álcool nas fábricas, seu rendimento é estimado em, aproximadamente, 52 litros por 100 quilos de açúcar, sua densidade gira em torno de 780 gramas por litro (ANEC, 2018; COSTA *et al.*, 2013).

Outros usos são na engorda de bovinos, a cana-de-açúcar tem 15% de sólidos e estima-se que aproximadamente 9 kg destes ingeridos por quilo de peso vivo, equivaleria a produzir 4.000 kg de carne viva em relação a 36

toneladas de sólidos da cana, além de também serem utilizados nas usinas como combustível nas caldeiras (ANEC, 2018).

3.5. Diagrama do NDVI para um ciclo fenológico de uma cultura agrícola

A representação das fases fenológicas de uma cultura agrícola (Figura 2) pode ser inferida a partir do gráfico de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) que aumenta e diminui ao longo do seu ciclo. Observa-se que após a germinação, o valor do NDVI próximo de zero, a planta apresenta uma taxa de desenvolvimento positiva até atingir o valor máximo de NDVI. Após alguns dias, a planta entra numa fase de senescência que diminui a uma taxa negativa até atingir o final do ciclo fenológico, o que significa que a cultura foi colhida (CAMPBELL; WYNNE, 2011). A duração do ciclo fenológico pode ser calculada como a diferença entre a data final com a do início do ciclo.

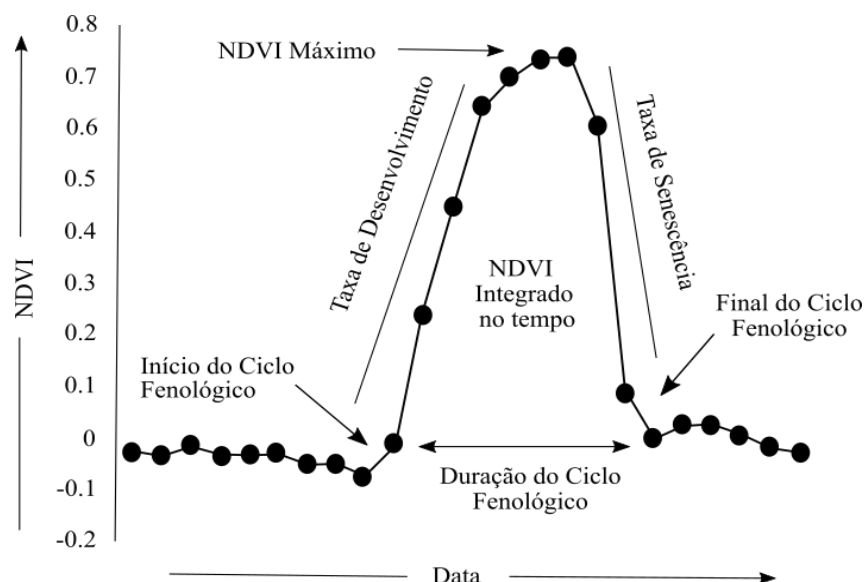


Figura 2 - Diagrama fenológico idealizado para único ciclo.

Fonte: Adaptado de Kirsten de Beurs citado por Campbell; Wynne (2011).

3.6. TIMESAT

O *software TIMESAT*, na versão 3.3, foi projetado, principalmente, para analisar séries temporais de dados de satélite. Essas séries temporais são frequentemente afetadas pelo alto grau de ruído nos dados. O uso de funções ajustadas reduz as incertezas e leva a medições mais estáveis. O *software TIMESAT* usa um método de filtragem adaptativo chamado de *Savitzky-Golay* ou métodos baseados em ajustes de mínimos quadrados para funções

assimétricas gaussianas e modelos logísticos duplos. A partir das funções do modelo ajustado (*Savitzky-Golay*, gaussianas e modelos logísticos), uma série de parâmetros fenológicos sazonais são estimados. O termo sazonal descreve os eventos fenológicos que ocorrem anualmente (por exemplo, o início e o fim da estação de crescimento), em que cada parâmetro pode ser ilustrado em um mapa, indicando as datas da fase fenológica estudada, em escalas regional ou global (EKLUNDH; JÖNSSON, 2017; KLEIN *et al.*, 2021).

Segundo Eklundh, Jönsson (2017), o *TIMESAT* consiste em uma série de rotinas numéricas e gráficas codificadas nos ambientes computacionais *Matlab* e *Fortran* 2003. O *software Matlab*, que vem com uma interface gráfica de usuário (GUI) versátil, é aplicado, principalmente, para testar configurações de entrada. As rotinas do Matlab são pré-compiladas e não precisam ser instaladas. Em vez disso, o processamento é feito no módulo *Matlab Compiler Runtime* (MCR), que é configurado na máquina do usuário ao executar o arquivo *MCRinstall.exe*. O último arquivo é fornecido junto com o pacote do programa *TIMESAT*. A versão *Fortran* do pacote é altamente vetorizada e eficiente, devendo ser usada para processar grandes conjuntos de dados. Para a versão *Fortran* são fornecidos arquivos executáveis pré-compilados.

O *TIMESAT* foi originalmente projetado para séries temporais com ruído de dados de NDVI do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), extraindo parâmetros de fenológicos da vegetação. O programa tem a capacidade de executar diferentes tipos de séries temporais de sensoriamento remoto, como as séries temporais do satélite *Terra/MODIS* em diferentes resoluções temporais, além do programa ter sido testado com séries temporais de umidade do solo, embora essas aplicações não sejam o principal objetivo (EKLUNDH; JÖNSSON, 2017; JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016, ZHANG *et al.*, 2020).

3.7. Parâmetros fenológicos derivados de séries temporais

Uma série temporal é considerada como um ciclo de cultivo por ano. Durante um período de n anos, pode haver, no caso geral, $n-1$ ciclos fenológicos completos junto com duas frações de um ciclo fenológico no início e no final da série temporal. Os parâmetros fenológicos podem ser extraídos para cada uma

das $n-1$ ciclos completos, usando as funções ajustadas (EKLUNDH; JÖNSSON, 2017; JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016).

A Figura 3 ilustra a série temporal do NDVI, em níveis de cinza, para um período de cinco anos (tempo em decêndios = período de 10 dias). Neste caso, n é igual a cinco anos, logo o número de ciclos completos determinados pela função de ajuste (linha contínua) é $n-1$, ou seja, quatro ciclos completos. O início e o fim dos ciclos são marcados com círculos preenchidos na linha contínua ajustada (EKLUNDHA; JÖNSSON, 2017; JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016, JÖNSSON; EKLUNDH, 2004).

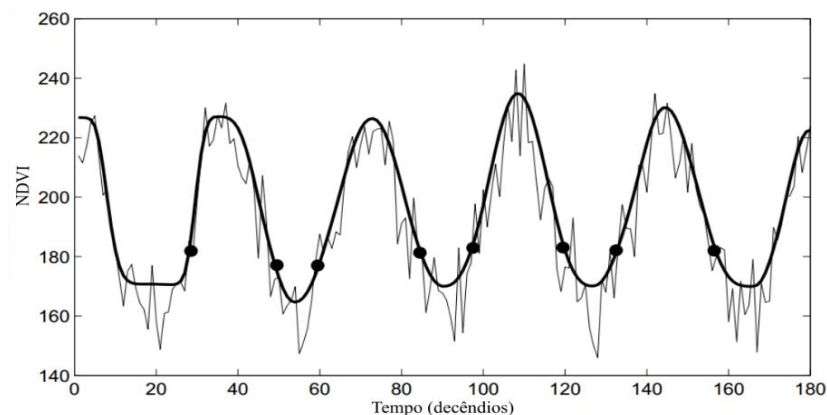


Figura 3 - Série temporal do NDVI para um período de cinco anos em função do tempo (decêndios).

Fonte: Eklundh; Jönsson (2017).

Outro caso a ser considerado é se houver n ciclos em que cada um atinge seu pico no meio do ano, em princípio seria possível extrair os parâmetros fenológicos para cada um dos anos. No entanto, o TIMESAT não está programado para isso, mas extrairá dados fenológicos apenas para os $n-1$ ciclos fenológicos mais centrais (EKLUNDH; JÖNSSON, 2017; JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016, JÖNSSON; EKLUNDH, 2004). Para superar esse problema, o usuário pode duplicar a série temporal e fazer uma série artificial abrangendo três anos (Figura 4). Os parâmetros de sazonalidade extraídos do ciclo médio desta série temporal artificial são os desejados.

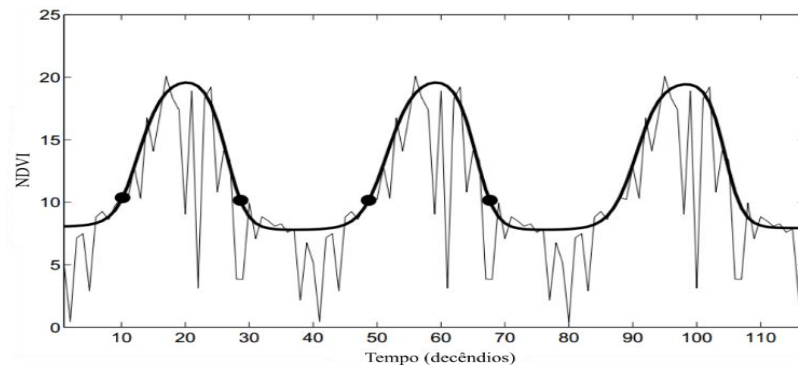


Figura 4 - Série temporal do NDVI (níveis de cinza) para cobrir um período de três anos em função do tempo (decêndios).

Fonte: Eklundh; Jönsson (2017).

3.8. Extração de parâmetros fenológicos pelo *software TIMESAT*

Na versão atual do *TIMESAT*, vários parâmetros fenológicos são calculados, como: as datas de início e término do ciclo fenológico; o maior valor e a amplitude de cada um dos ciclos fenológicos de uma série temporal entre outros. Alguns destes parâmetros são mostrados na Figura 5. O uso da função ajustada (Curva vermelha) fornece estimativas mais estáveis dos parâmetros fenológicos, em que os efeitos de ruído são reduzidos. Observe, mais uma vez, que uma série temporal abrangendo n anos fornecerá parâmetros fenológicos para $n-1$ ciclos centrais.

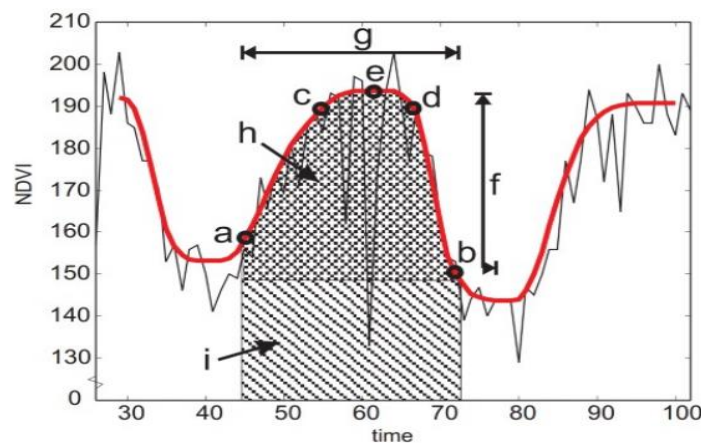


Figura 5 - Parâmetros Fenológicos.

Fonte: Adaptado por Eklundh, Jönsson (2017).

Os pontos (a) e (b) marcam o início e o final do ciclo fenológico, respectivamente. Os pontos (c) e (d) fornecem os níveis de 80%; (e) ponto com o maior valor de NDVI ajustado; (f) amplitude sazonal; e (g) duração sazonal do

ciclo. Finalmente, (h) e (i) são integrais que mostram o efeito cumulativo da vegetação durante a estação.

As definições de todos os parâmetros fenológicos sazonais extraídos são descritos abaixo. Não existem definições únicas dos parâmetros fenológicos e diferentes pesquisadores podem defender várias maneiras de extrair e validar esses parâmetros. No entanto, a importância desses parâmetros reside na possibilidade de mapear mudanças espaciais ou temporais na cobertura vegetal decorrentes de mudanças climáticas ou de uso do solo. Eklundh; Jönsson (2017); Jönsson; Eklundh, (2004) definem os parâmetros como segue:

1. Data de início do ciclo (a): tempo em decêndios durante o qual a borda esquerda aumentou para um nível definido pelo usuário (geralmente uma certa amplitude sazonal) estimado a partir do nível inferior esquerdo.
2. Data do final do ciclo (b): tempo em decêndios durante o qual a borda direita diminuiu para um nível definido pelo usuário medido a partir do nível mínimo correto.
3. Duração do ciclo (g): tempo em dias desde o início até o final do ciclo.
4. Nível de base: média dos valores mínimos esquerdo e direito.
5. Tempo do meio do ciclo (c e d): calculado como o valor médio dos tempos em dias para os quais, respectivamente, a borda esquerda aumentou para o nível de 80% e a borda direita diminuiu para o nível de 80%.
6. Valor máximo dos dados para a função ajustada durante o ciclo (e): pode ocorrer em um momento diferente em comparação com o tempo para o médio do ciclo.
7. Amplitude sazonal (f): diferença entre o valor máximo e o nível básico.
8. Taxa de aumento no início do ciclo: calculado como o quociente da diferença entre os níveis esquerdos de 20% e 80% e a diferença de tempo correspondente.
9. Taxa de declínio no final do ciclo: calculado como o valor absoluto da razão da diferença entre os níveis corretos de 20% e 80% e a diferença de tempo correspondente. Portanto, a taxa de declínio é dada como uma quantidade positiva.

10. Grande integral sazonal (Área baixo da curva, h): integral temporal que descreve o início até o fim do ciclo vegetativo. A grande integral sazonal também representa a vegetação sazonalmente ativa, produtividade primária bruta (JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016; JÖNSSON; EKLUNDH 2004).

11. Pequena integral de ciclo (Área Retângulo, i): integral da diferença entre a função que descreve a ciclo e o nível de base do início ao fim do ciclo. A pequena integral do ciclo fornece a produção total da vegetal conhecida como produtividade primária líquida (JAYAWARDHANA; CHATHURANGE, 2016; JÖNSSON; EKLUNDH 2004).

3.9. Linguagem de programação Python

De acordo com Chrism (2019), o Python é definido como uma linguagem clara e poderosa de programação orientada a objetos, comparável a Perl, Ruby, Scheme ou Java. Alguns dos recursos notáveis do Python são descritos: 1. usa sintaxe elegante, tornando os programas fáceis de ler; 2. contém uma grande biblioteca padrão que suporta muitas tarefas comuns de programação, como conexão a servidores da web, pesquisa de texto com expressões regulares, leitura e modificação de arquivos; 3. pode ser integrado a um aplicativo para fornecer uma interface programável; 4. funciona em qualquer sistema operacional, incluindo *Mac OS X*, *Windows*, *Linux* e *Unix*, com versões não oficiais também disponíveis para *Android* e *iOS*; 5. é um *software* livre, que pode ser modificado e redistribuído, porque embora a linguagem seja protegida por direitos autorais, ela está disponível sob uma licença de código aberto; 6. há uma variedade de tipos de dados básicos disponíveis: números (inteiros de ponto flutuante, complexo e comprimento ilimitado), *strings* (*ASCII* e *Unicode*), listas e dicionários.

3.10. Aplicação da linguagem de programação Python

O Python é amplamente utilizado em computação científica e numérica. Ele é composto dos seguintes complementos descrito por Chrism (2019): 1. *SciPy* é uma coleção de pacotes para matemática, ciências e engenharia; 2. *Pandas* é uma biblioteca de modelagem e análise de dados; 3. *IPython* é um shell (interface de usuário) interativo poderoso que permite fácil edição e gravação de uma sessão de trabalho e suporta computação paralela e

visualizações (PRASAI et al., 2021, FULADLU; ALTAN, 2021, SONG; SONG, 2022)

3.11. Ambiente computacional de trabalho: Jupyter Notebook

Jupyter Notebook é um ambiente de trabalho interativo que permite desenvolver código em Python. O ambiente Jupyter foi criado a partir do Projeto IPython em 2014, à medida que evoluía para oferecer suporte à ciência de dados interativos e a computação científica em todas as linguagens de programação. O Jupyter é um *software* 100% de código aberto, gratuito para qualquer pessoa usar (OElsen et al., 2020; SCHRÖDER; STAEHLKE; KRÜGER, 2021).

3.12. Biblioteca GDAL

A Biblioteca de abstração de dados geoespaciais (*Geospatial Data Abstraction Library* – GDAL) é uma biblioteca de tradução para formatos de dados geoespaciais do tipo raster ou vetorial lançada sob licença da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). O GDAL tem capacidade de converter em lote (grandes quantidades) arquivos no formato “Tif” para diversos formatos, entre eles “envi” e “img”, apresentando uma variedade de utilitários de linha de comando úteis para tradução e processamento de dados (APPEL et al., 2018; WARMERDAM et al., 2020).

3.13. Plataforma Google Earth Engine

O *Google Earth Engine* (GEE) consiste em um catálogo de vários petabytes de imagens de satélites e um conjunto de dados geoespaciais com recursos de análise em escala planetária e o disponibiliza para cientistas, pesquisadores e desenvolvedores detectarem mudanças, mapearem tendências e quantificarem diferenças na superfície da Terra. Estes dados estão prontos para análise, localizado ao lado de um serviço de computação inerentemente paralelo de alto desempenho, podendo ser acessado e controlado por meio de uma interface de programação de aplicativo (API) acessível pela web e um ambiente de desenvolvimento interativo (IDE) associado à web que permite a prototipagem rápida e a visualização dos resultados (GORELICK et al., 2017; MAYER et al., 2021).

Os usuários podem acessar e analisar dados do catálogo público, bem como seus próprios dados privados, usando uma biblioteca de operadores fornecida pela *API Earth Engine*. Esses operadores são implementados em um grande sistema de processamento paralelo que subdivide e distribui automaticamente os cálculos, fornecendo recursos de análise de alto desempenho. Os usuários acessam a API por meio de uma biblioteca de desenvolvimento interativo baseado na web construído sobre essa biblioteca associada (GORELICK *et al.*, 2017; XAVIER *et al.*, 2020).

O editor de código do *Earth Engine* (EE) é um IDE baseado na web para a API *JavaScript* do *Earth Engine*. As funções do editor de código são projetadas para tornar o desenvolvimento de fluxos de trabalho geoespaciais complexos rápido e fácil. O editor de código possui os seguintes elementos: 1. editor de código *JavaScript*; 2. exibição de mapa para visualizar conjuntos de dados geoespaciais; 3. documentação de referência da API; 4. gerenciador de script; 5. saída do console; 6. gerenciador de tarefas (guia Tarefas) para lidar com consultas de longa duração; 7. consulta de mapa interativo (guia Inspetor); 8. pesquisa de arquivos de dados ou scripts salvos; e 9. ferramentas de desenho de geometria.

3.14. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

O NDVI é usado para monitorar as características da vegetação e também como um índice quantitativo do funcionamento do ecossistema. Ele resulta na razão entre a diferença entre as refletâncias das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo pela sua soma. O índice permite identificar a vegetação de outras superfícies. O NDVI varia entre -1 e +1. Quanto mais próximo de +1 indica alta atividade fotossintética da cobertura vegetal (fenologia foliar) e estreita relação com a evapotranspiração; valores baixos de NDVI indicam situações de pouca ou nenhuma cobertura vegetal e baixa atividade fotossintética; e os valores negativos correspondem, principalmente, a nuvens, água e neve. O NDVI é obtido a partir da equação (ALLEN *et al.*, 2002) (Equação 1):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

em que: NIR é a refletância da banda do Infravermelho Próximo; R é a refletância da banda do Vermelho.

3.15. Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

Entre os fatores que modificam o comportamento do NDVI está a relação entre a vegetação e o solo observada por um sensor em áreas áridas e semiáridas. Este índice é calculado como a diferença normalizada entre a refletância da banda do vermelho R e a refletância da banda do infravermelho próximo (NIR) ajustada com um fator “L” (entre 0 e 1). O valor recomendado de L é igual a 0,5, que permite ser utilizado em diferentes tipos de cobertura (ARBOIT; MAGLIONE, 2018). O SAVI pode ser obtido pela seguinte expressão (HUETE, 1988) (Equação 2):

$$SAVI = \left[\frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right] * (1 + L) \quad (2)$$

em que: L é o fator de ajuste; NIR é a refletância do infravermelho próximo; R é a refletância do vermelho.

3.16. Índice de área foliar (IAF)

O IAF é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, calculado pela seguinte equação empírica (ALLEN *et al.*, 2007) (Equação 3):

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3)$$

3.17. Sensor MODIS

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um instrumento que opera nos satélites *Terra* e *Aqua* lançados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em 1999 e 2002, respectivamente, possuindo 36 bandas espectrais em três resoluções espaciais (250, 500 e 1000 m), com uma resolução radiométrica de 16 bits. A Tabela 1 contém as bandas de refletância da superfície e as resoluções espaciais (DEVELOPERS, 2020). Vários produtos estão disponíveis, como refletância da superfície e índices de vegetação.

Tabela 1 - Características espectrais e espaciais do sensor MODIS.

Bandas	Intervalo de comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
Banda 1 – Vermelha	0,62 – 0,67	250 – 500
Banda 2 – NIR	0,841 – 0,876	250 – 500
Banda 3 – Azul	0,459 – 0,479	500
Banda 4 – Verde	0,545 – 0,565	500
Banda 5 – *SWIR 1	1,230 – 1,250	500
Banda 6 – *SWIR 2	1,628 – 1,652	500
Banda 7 – *SWIR 3	2,105 – 2,155	500

*SWIR é a banda do infravermelho de onda curta.

Fonte: Adaptado de Developers (2020).

3.18. Satélite Landsat-5

O programa *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat) foi desenvolvido no final da década de 1960 pela NASA, com o objetivo principal de coletar dados sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis da superfície terrestre. O Programa Landsat teve oito satélites lançados, dos quais estão em operação o Landsat-7 (em condições precárias) e o Landsat-8. O Landsat – 5 foi lançado em março de 1984. Ele possui dois instrumentos o *Multispectral Scanner* (MSS) e *Thematic Mapper* (TM). O Landsat-5 entregou dados de imagem da Terra quase 29 anos, antes de ser desativado em 5 de junho de 2013 (www.usgs.gov).

As imagens do satélite Landsat-5 têm uma resolução temporal de 16 dias ciclo de repetição, resolução espacial de 30m para as bandas do visível e 120m para as bandas térmicas (GALLO, 2015). A cobertura das imagens desse satélite é de praticamente todo o globo, com exceção para as mais altas latitudes polares. A seguir são exibidas na Tabela 2 mais características do satélite Landsat-5.

Tabela 2 - Características do satélite Landsat-5.

Sensor	Bandas Espectrais
TM (Thematic Mapper)	Banda 1 Visível (0,45 - 0,52 μm) 30 m
	Banda 2 Visível (0,52 - 0,60 μm) 30 m
	Banda 3 Visível (0,63 - 0,69 μm) 30 m
	Banda 4 Infravermelho Próximo (0,76 - 0,90 μm) 30 m
	Banda 5 Infravermelho Próximo (1,55 - 1,75 μm) 30 m
	Banda 6 Infravermelho Termal (10,40 - 12,50 μm) 120 m
	Banda 7 Infravermelho Médio (2,08 - 2,35 μm) 30 m

Fonte: Adaptado de Gallo (2015).

3.19. CHIRPS

O CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) apresenta uma base de dados de precipitação (1981 até os dias atuais) com cobertura quase global de 50° S a 50° N e resolução espacial de 0,05° x 0,05° e, vem ganhando destaque em pesquisas dos últimos anos, pois alcançou resultados bastantes satisfatórios em vários estudos ligados à avaliação espaço-temporal de eventos meteorológicos em todo o mundo (FUNK *et al.*, 2015; TOTÉ *et al.*, 2015; KATSANOS *et al.*, 2016; PAREDES-TREJO *et al.*, 2017; GUO *et al.*, 2017; RIVERA *et al.*, 2018; PRAKASH, 2019; LE *et al.*, 2020; NAWAZ *et al.*, 2021).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em uma área de cana-de-açúcar irrigada localizada no submédio do vale de São Francisco, entre as latitudes 9°20' S a 9°40' S, longitudes de 40°13'W a 40°30'W e altitude de 396 m, em média, no município de Juazeiro, BA (Figura 6). A classificação climática de Juazeiro, BA, segundo Koppen é BSw^h, semiárido quente, com chuvas de verão e período seco bem definido no inverno. A temperatura média da região é de 26,1°C, a pluviosidade média anual de 503,08 mm e a umidade relativa do ar média de 65,2% (SÁ *et al.*, 2016). Por estar inserida na bacia do Rio São Francisco a região apresenta elevado potencial hídrico, porém não há excedente hídrico no solo, o que impõe a necessidade de realização de irrigação suplementar.

O município de Juazeiro possui uma área cultivada de aproximadamente 20.000 ha de cana-de-açúcar, sendo a principal variedade cultivada a *Saccharum officinarum* ssp (RB 92579) (SÁ *et al.*, 2016). A área teste é composta por 13 lotes de cana-de-açúcar (cana-ano).

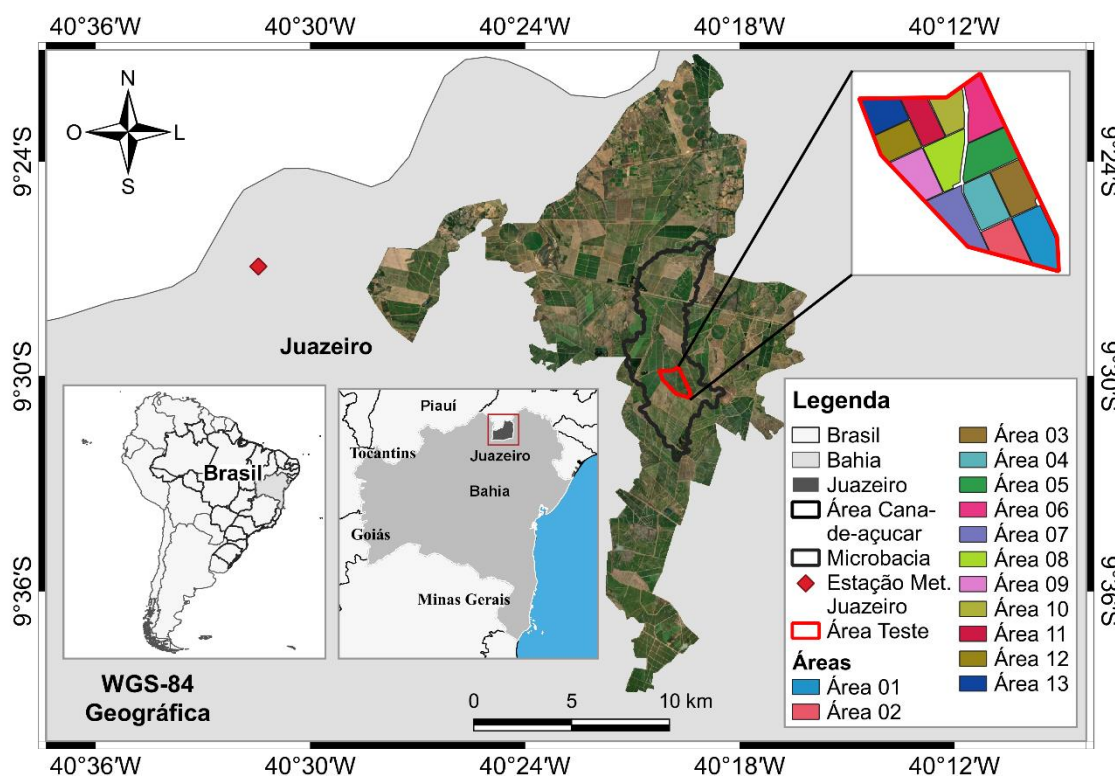


Figura 6 - Localização da área de estudo - Composição de cor RGB.

Entre os anos 2000 e 2015, a RB92579 teve um aumento produtivo significativo de 0,5% para 35% da área colhida, demonstrando assim uma produtividade agrícola elevada com uma média de 80 t ha⁻¹ (SANTOS *et al.*, 2021). Em alguns casos, quando se utilizou a técnica de irrigação plena, essas médias aumentaram de 140 t ha⁻¹ para 260 t ha⁻¹ em treze meses de cultivo. Esse potencial produtivo e sua grande presença nos canaviais, fazem jus às suas características que são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características agrícolas e industriais da variedade RB92579.

Classificação Agrícola	Classes
Recomendação de área	Tabuleiro, várzea, encostas e chã
Perfilhamento em cana planta	Alto
Perfilhamento em cana soca	Alto
Brotação da soca crua	Boa
Brotação da soca queimada	Muito boa
Fechamento entre linhas	Bom
Florescimento	Eventual
Maturação	Média a tardia
Produtividade agrícola	Elevada
Exigências ambientais	Média restrição
Resistência ao estresse hídrico (seca)	Rápida recuperação
Açúcar Total Recuperável (ATR)	Elevada
Período Longo Industrial (PUI)	Longo

Fonte: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético - RIDESA (2015).

Os solos, dessa região, são formados por rochas alcali-granitos, migmatitos, gnaises e anfibolitos, correspondendo a solos classificados como planossolo solódico eutrófico, bruno não cálcico, cambissolo eutrófico, solos litólicos eutróficos, vertissolo (NASCIMENTO *et al.*, 2012). Quanto à topografia ocorre relevo plano e ondulado com vales abertos, onde a vegetação predominante é a Caatinga arbustiva densa que se desenvolve com maior vigor após os primeiros indícios de ocorrência de chuvas (CRUZ; BORBA; ABREU, 2005).

4.2. Datas da colheita da cana-de-açúcar na área teste

As datas reais de colheita da cana-de-açúcar dos 13 lotes da área teste (Figura 6), para o período de 2006 a 2012, foram feitas em meses diferenciados (Tabela 4). Para os anos safras entre 2006 e 2008, as colheitas foram efetuadas nos meses de outubro e novembro, enquanto que entre os anos de 2007 e 2012

foram feitas nos meses de julho, agosto ou setembro (SILVA, 2016). As datas reais da colheita da cana-de-açúcar foram comparadas com as datas calculadas pelo *software TIMESAT* para determinar com quantos dias as datas estimadas diferem das datas reais de colheita da cana-de-açúcar.

Tabela 4 - Datas das colheitas dos 13 lotes pertencentes à área teste.

ÁREAS	ANOS SAFRAS						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
01	24/10	02/11	20/10	29/09	14/09	27/08	16/07
02	25/10	31/10	21/10	29/09	15/09	29/08	16/07
03	25/10	31/10	21/10	28/09	14/09	28/08	16/07
04	24/10	31/10	21/10	28/09	14/09	25/08	15/07
05	23/10	31/10	20/10	29/09	13/09	24/08	15/07
06	22/10	31/10	19/10	28/09	14/09	27/08	15/07
07	21/10	31/10	19/10	27/09	14/09	26/08	15/07
08	20/10	28/10	18/10	27/09	11/09	26/08	14/07
09	21/10	28/10	19/10	27/09	09/09	25/08	14/07
10	21/10	30/10	17/10	27/09	11/09	24/08	14/07
11	20/10	27/10	17/10	26/09	11/09	23/08	14/07
12	25/10	02/11	21/10	29/09	14/09	29/08	16/07
13	25/10	02/11	21/10	29/09	14/09	29/08	16/07

Fonte: Silva (2016).

4.1. Dados Orbitais

Para o estudo temporal, foram utilizadas 460 imagens do produto MOD13Q1, com resolução espacial 250m, composição 16 dias e retângulo h14v09, referentes aos anos de 2001 a 2020, do sensor MODIS, localizado a bordo do satélite Terra, foram adquiridas gratuitamente na página virtual da NASA no *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), *Earth Resources Observation and Science* (EROS) Center (<https://lpdaac.usgs.gov>).

As imagens anuais de cobertura e uso da terra, referentes aos anos de 2006 a 2012, dos sensores TM, localizados a bordo dos satélites Landsat-5, foram adquiridas gratuitamente na página virtual do *Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil* (MapBiomass) (<https://mapbiomas.org/>) para caracterização da área de estudo e sua vizinhança, também processadas na plataforma do *Google Earth Engine Code*.

4.2. Dados Meteorológicos

Os dados mensais de precipitação acumulado (mm), radiação solar global acumulada (MJ m^{-2}), temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar média (%) foram utilizados para caracterizar as condições meteorológicas próxima a área de estudo, os dados não apresentaram falhas. No entanto, a série temporal dos dados meteorológicos compreendeu apenas o período de 2008 a 2020, devido à falta de medições anteriores. Esses dados pertencem à estação meteorológica automática do Laboratório de Meteorologia (Labmet) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UFVSF), que está localizada no município de Juazeiro, BA, nas coordenadas geográficas $09^{\circ} 04' 08'' \text{ S}$, $40^{\circ} 19' 11'' \text{ W}$ e altitude de 387 m (<http://labmet.univasf.edu.br/>).

4.3. Aplicação do Python e GDAL

O ambiente computacional Jupyter Notebook foi utilizado para importar a biblioteca de GDAL que converte, em lote, imagens (.tif) para imagens binárias (.envi). Um novo código elaborado para listar as imagens de acordo com as séries temporais de NDVI estabelecidas. No *software* TIMESAT foi informado uma nova lista de imagens com a extensão (.txt).

4.4. Produção dos parâmetros fenológicos no *software* TIMESAT

Após o pré-processamento do produto NDVI/MODIS feitas no GEE, Python e GDAL foi executado o *software* TIMESAT para obtenção dos parâmetros fenológicos da cana-de-açúcar, tais como: as datas de início, meio e final do ciclo fenológico, de NDVI inicial, central e final, total de vegetação sazonalmente ativa, produção total da vegetação, entre outros. O fluxograma das cinco etapas de processamento do *software* TIMESAT está representado na Figura 7.

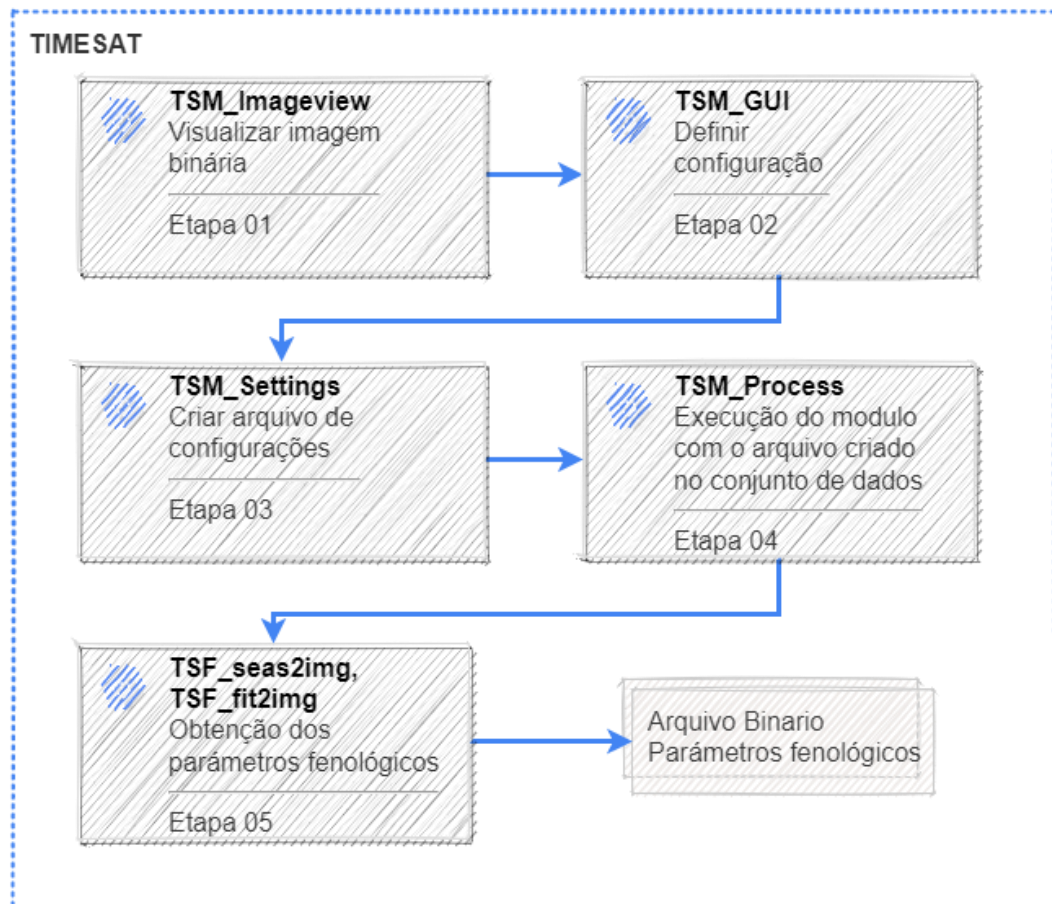


Figura 7 - Fluxograma do processamento do TIMESAT.

A etapa 1 consiste na preparação dos dados de entrada e visualização de imagens binárias. Nesta etapa as imagens de NDVI do sensor MODIS dos anos safras 2001 a 2020 foram convertidas no formato ASCII para serem visualizadas no módulo do TIMESAT chamado de *IMAGE VIEW*.

Na etapa 2, ocorreu a execução do módulo *TSM GUI* do TIMESAT para selecionar a série temporal de imagens de NDVI, bem como se verificou a qualidade dos dados de entrada da série temporal (etapa1). Em seguida, selecionou-se um dos modelos de ajuste: Savitsky-Golay, Gaussiana ou Logística Dupla. Nesta pesquisa foi utilizado o modelo de ajuste Savitsky-Golay, pois os dados do NDVI relativamente não são afetados por ruídos.

A etapa 3 constitui-se na criação de um arquivo de configuração ASCII com o módulo *TSM_settings*. Este tipo de configuração controla como o TIMESAT trata os dados de entrada. Entre os tipos de configuração tem-se: Configurações gerais, que controlam a configuração de todos os pixels e configurações de classes específicas que controlam o processamento para uma determinada cobertura do solo.

Na etapa 4 ocorreu a execução do módulo *TSF_process* do *Fortran*, com o arquivo de configuração criado, que é utilizado no conjunto de dados. Os dados de saída foram arquivos binários para os dados fenológicos e dados ajustados. Cada arquivo contém os resultados da série temporal de NDVI de entrada.

Por fim, tem-se a etapa 5, na qual foram produzidos arquivos binários como dados de saída. Também, foram produzidos parâmetros fenológicos, que incluem a exibição de dados fenológicos ou dados ajustados para pixels individuais para o período de tempo estabelecido.

Após o pré-processamento do produto NDVI/MODIS feitas no GEE, Python e GDAL foi executado o TIMESAT para obtenção dos parâmetros fenológicos. Os ajustes utilizados no *software* TIMESAT para o presente estudo estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Configurações de entrada usadas no *software* TIMESAT para a área de estudo.

Configuração	Valor
Par. sazonal. (0-1)	1 (sim)
Nº de iterações	2
Forçar valor mínimo	0 (não)
Método de ajuste	<i>Savitsky-Golay</i>
Método de início de temporada	Amplitude Sazonal
Valor de início da temporada	0,2
Valor final da temporada	0,2

O filtro de *Savitzky-Golay* foi escolhido porque se ajustou melhor a série temporal de NDVI do sensor MODIS, o que resultou em uma estimativa melhor das datas de colheita da cana-de-açúcar.

4.5. Parâmetros biofísicos derivados de imagens do sensor MODIS

Um código, na linguagem *Javascript*, no GEE, foi feito para processar imagens de NDVI, SAVI e IAF do sensor MODIS nas datas próximas da colheita da cana-de-açúcar e, também as séries temporais referentes aos anos de 2001 a 2020.

O Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a $+1$ e para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1, já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero (ROUSE *et al.*, 1974). Um total de 460 imagens NDVI do produto MOD13Q1, foi multiplicada

pelo fator 0,0001 para a obtenção do NDVI entre -1 e +1. Além disso, se utilizou o datum WGS-84 e projeção Geográfica. Em seguida, essas imagens foram recortadas de acordo com a área de estudo.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI), que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, foi utilizada a expressão (Huete, 1988) (Equação 4):

$$SAVI = \left[\frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right] * (1 + L) \quad (4)$$

em que, R e NIR correspondem, respectivamente, as bandas 1 e 2 do satélite Terra, sensor MODIS; o fator L é uma função do tipo de solo. Nesse estudo, foi utilizado L = 0,5 (HUETE; WARRICK, 1990).

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela seguinte equação empírica obtida por Allen *et al.* (2002) (Equação 5). O IAF, no código elaborado, foi calculado usando o comando *expression* do *JavaScript no GEE*.

$$IAF = \frac{Ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (5)$$

Em que: Ln é o logaritmo natural e SAVI é o *Soil Adjusted Vegetation Index*.

4.6. Análise estatística e validação dos dados estimados pelo TIMESAT

Segundo os autores Field (2009) e Barros *et al.* (2012), para informar se a distribuição está próxima da normalidade é preciso o uso de testes de Normalidade. Neste estudo, foi usado o Teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, porque as amostras são menores que 50 e maiores que 3 (SHAPIRO; WILK, 1965).

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar se os lotes de cana-de-açúcar da área teste seguem uma distribuição normal. E por isso que foi aplicado o teste t de *Student* (Teste Paramétrico) para determinar se

há uma diferença significativa das médias populacionais dos lotes. Todos os testes foram calculados usando o *Software Microsoft Excel*.

A comparação entre as datas de colheita da cana-de-açúcar (Tabela 4) com as datas de colheitas estimadas pelo *software TIMESAT*, para o período de 2006 a 2012, foi feita utilizando os seguintes parâmetros estatísticos: Correlação de Pearson (r) (Equação 6); Coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) (Equação 7); Erro quadrático médio da raiz (RMSE) (Equação 8); Erro médio absoluto (MAE) (Equação 9); Índice de concordância de Willmott (1981)(d) (Equação 10) e Índice de desempenho de Camargo; Sentelhas (1997)(e) (Equação 11). A estatística descritiva das datas reais de colheita e estimadas com o TIMESAT, assim como foram realizadas utilizando *softwares Microsoft Excel* e QGIS com o intuito de identificar as variações dos conjuntos de dados coletados.

Além disso, os dados de precipitação do CHIRPS foram comparados com dados medidos na estação meteorológica automática da UFVSF. A série temporal do CHIRPS serviu para explicar, em parte, a influência da chuva nas datas das colheitas de cana-de-açúcar observadas nas séries temporais do NDVI, SAVI e IAF. Adicionalmente, também foi realizada, entre si, a comparação dos parâmetros fenológicos obtidos pelo *software TIMESAT* para determinar o coeficiente de correlação e a tendência de aumento ou diminuição entre variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{obsi} - \overline{Y_{obsi}})(Y_{esti} - \overline{Y_{esti}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{obsi} - \overline{Y_{obsi}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{esti} - \overline{Y_{esti}})^2}} \quad (6)$$

em que: Y_{esti} é a variável estimada; Y_{obsi} é a variável observada; N é o número de observações ($i = 1, 2, \dots, n$).

$$R_{ajustado}^2 = \left[1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-K-1} \right] \quad (7)$$

em que: N é o número de observações ($i = 1, 2, \dots, n$) e K é o número de variáveis independentes na regressão.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{obsi} - \overline{Y_{esti}})^2}{N}} \quad (8)$$

em que: Y_{obsi} é a variável observada; Y_{esti} é a variável estimada; e N é o número de observações ($i = 1, 2, \dots, n$).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_{obsi} - Y_{esti}|}{N} \quad (9)$$

em que: Y_{esti} é a variável estimada; Y_{obsi} é a variável observada.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{esti} - Y_{obsi})^2}{\sum_{i=1}^N [|Y_{esti} - \overline{Y_{esti}}| + |Y_{obsi} - \overline{Y_{obsi}}|]} \quad (10)$$

em que: Y_{esti} é o valor estimado; Y_{obsi} é o valor observado; $\overline{Y_{obsi}}$ e $\overline{Y_{esti}}$ são as médias dos valores observados e estimados.

$$e = r * d \quad (11)$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson; e d é o índice de concordância de Willmott (1981).

Na Tabela 6, mostra-se os valores do coeficiente de correlação (r) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) e do índice de desempenho (e) (COHEN, 1988) para a classificação dos modelos:

Tabela 6 - Classificação do coeficiente de correlação (r) e do índice de desempenho (e).

r	Correlação	e	Desempenho
> 0,9	Quase perfeita	> 0,85	Ótimo
0,7 - 0,9	Muito Alta	0,76 - 0,85	Muito Bom
0,5 - 0,7	Alta	0,66 - 0,75	Bom
0,3 - 0,5	Moderada	0,61 - 0,65	Mediano
0,1 - 0,3	Baixa	0,51 - 0,60	Sufrível
0 - 0,1	Muito baixa	0,41 - 0,50	Mau
-	-		Péssimo

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Série temporal dos dados meteorológicos

Na Figura 8, constata-se a variabilidade dos dados mensais de temperatura do ar, precipitação acumulada (mm), radiação global (MJ m^{-2}) e umidade relativa do ar (%) da estação meteorológica automática do Labmet da UFVSF para o período disponível entre 2008 e 2020.

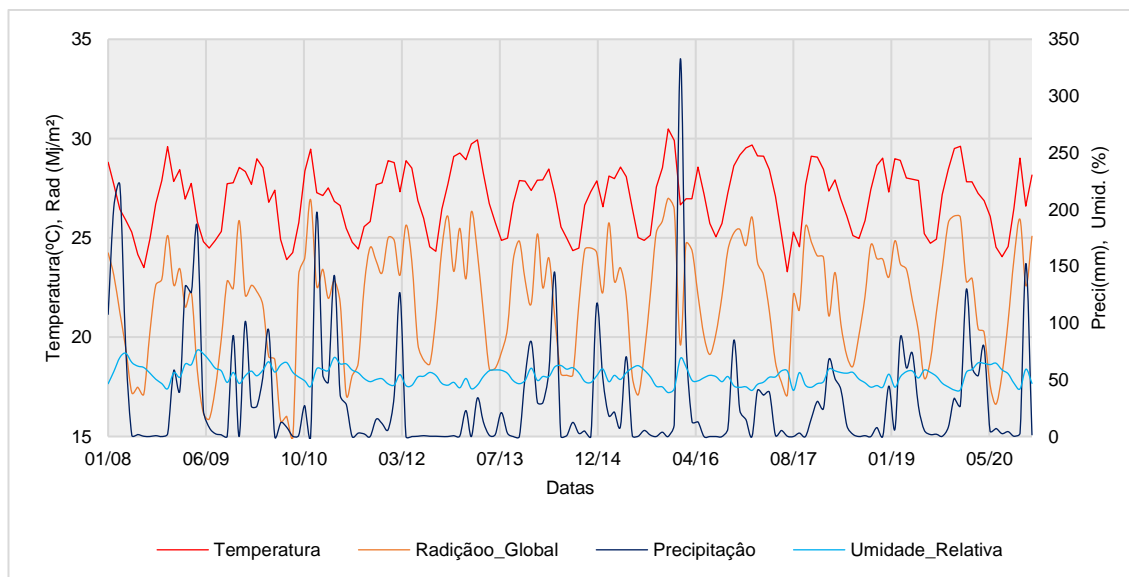


Figura 8 - Dados meteorológicos da estação meteorológica automática do Labmet Juazeiro, Ba para o período 2008 a 2012.

No ano 2016 ocorreram os maiores registros de chuva. O período seco ocorreu entre os meses de maio e outubro e o período chuvoso entre os meses de novembro a abril, com exceção do ano de 2011, em que o acumulado de chuvas entre dezembro e fevereiro chegou a 126 mm mês^{-1} . A melhor época para plantar a cana-de-açúcar na região é entre os meses de fevereiro e março, evitando o período chuvoso da região (PINTO SANTIAGO *et al.*, 2017). Por outro lado, a colheita da cana-de-açúcar pode ser realizada no período seco que vai de abril a janeiro (BUSTAMANTE *et al.*, 2012), pois a precipitação em época de colheita da cana-de-açúcar prejudica fortemente a produção.

Os maiores registros de temperatura do ar ocorreram nos anos de 2013 e 2015, no mês de março e novembro, respectivamente; e as menores temperaturas do ar ocorreram nos anos 2008 e 2017 no mês de julho. Rocha *et al.* (2020) observaram que, nas últimas três décadas, a temperatura do ar tem aumentado em resposta ao desenvolvimento urbano na região.

A radiação global manteve-se no intervalo entre 14,98 e 26,99 MJ m⁻², sendo o menor valor observado no mês de agosto do ano de 2010 e o maior valor apresentado no mês de novembro do 2015. Para todos os anos estudados, os menores valores de radiação global foram observados nos meses de maio a julho. Teixeira; Silva; Reis (2002) constataram que a diminuição nos valores de radiação solar está associada ao aumento da nebulosidade da região no período chuvoso.

A umidade relativa do ar apresentou os menores valores no mês de novembro e janeiro dos anos 2015 e 2017, respectivamente, e os maiores valores no mês de abril dos anos 2008 e 2009. Em geral, Santiago *et al.* (2019) observaram que, no período de dezembro a abril, há uma maior probabilidade da umidade relativa média do ar ser igual ou superior a 70%, com probabilidade de ocorrência dessa umidade relativa de 29% para o mês de abril.

5.2. Validação da precipitação do CHIRPS com dados observados

Na Figura 9, observa-se a relação entre a precipitação medida na estação meteorológica do Labmet da UFVSF em função da precipitação do CHIRPS para o município de Juazeiro entre 2008 e 2020. A maioria dos pontos concentram-se entre 0 e 100 mm, com baixa dispersão da nuvem. O coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,7342, ou seja, os dados de precipitação do CHIRPS explicam 73,42% dos dados medidos na estação meteorológica do Labmet.

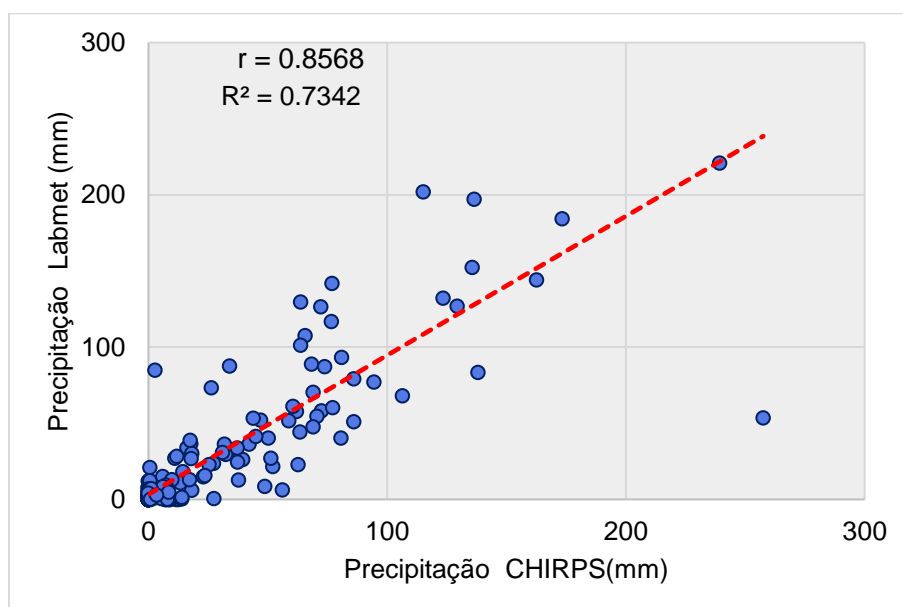


Figura 9 - Relação entre a precipitação observada na estação meteorológica do Labmet/UFVSF em função da precipitação do CHIRPS entre 2008 e 2020, Juazeiro, BA.

Na Tabela 7 estão representados os parâmetros estatísticos, resultado da comparação entre os dados estimados e medidos de precipitação. Observou-se que o Coeficiente de Correlação de Pearson (r) foi de 0,857, sendo classificado como Muito Alto de acordo com Camargo e Sentelhas (1997), demonstrando, assim, que há alta correlação linear entre os dados do CHIRPS e os dados de precipitação da estação meteorológica avaliada. Paredes-Trejo *et al.* (2017), realizando a validação do CHIRPS para o Nordeste Brasileiro, encontraram uma correlação de 0,94. Costa *et al.* (2019) validaram produto CHIRPS para o Brasil, obtendo uma correlação de 0,954 com os dados observados. Silva, *et al.* (2020) também validaram os dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para a Sub-Bacia do Rio Apeú, Castanhal, PA, obtendo uma correlação de 0,99.

O Erro médio Absoluta (MAE) (Tabela 7) encontrado para a precipitação do CHIRPS foi 13,446 mm ano⁻¹, o que reforça o fato de que a eficácia de detecção do CHIRPS é dependente das características edafoclimáticas da região analisada (RIVERA *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2020).

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos dos dados de precipitação medidos e estimados pelo CHIRPS.

N ^o	r	R ²	ME	MAE	RMSE	Classif.	Í.	Índice	Desempenho
							Concordância	Desempenho	
							d	e	Desempenho
1	0,85	0,73	-	13,44	26,88	Muito	0,923	0,79	Muito Bom
	7	4	0,588	6	0	Alta		1	

r: coeficiente de correlação de Pearson, R²: Coeficiente de determinação ajustado, ME: Erro médio, MAE: Erro médio absoluto, RMSE: raiz do quadrado médio do erro, d: coeficiente de concordância (1981), e: Índice de desempenho de Camargo & Sentelhas (1997) e Desempenho.

Em relação aos valores de RMSE alcançou valores de 26,880 mm ano⁻¹. O índice de concordância (d) foi de 0,923 e o índice de desempenho (e) de 0,791, classificado de acordo com Cohen (1988) como Muito Bom. Estes resultados concordam com Silva *et al.* (2020) que encontraram índice de concordância de 0,97 para a Sub-Bacia do Rio Apeú, Castanhal, PA.

5.3. Classificação do uso e da cobertura da terra

Na Figura 10, observa-se a classificação anual do uso e da cobertura da terra para a microbacia entre os anos de 2006 e 2012. Notou-se que a cana-de-açúcar é a cobertura vegetal mais prevalente seguida por formação savânica (Caatinga), corpos hídricos e formação florestal. Percebeu-se, ainda, uma diminuição das manchas de cana-de-açúcar acompanhada pelo aumento nas manchas de formação savânica por cinco anos consecutivos, entre os anos de 2006 e 2011. A partir de 2012, as manchas de cana-de-açúcar voltam a expandir avançado sobre a formação savânica.

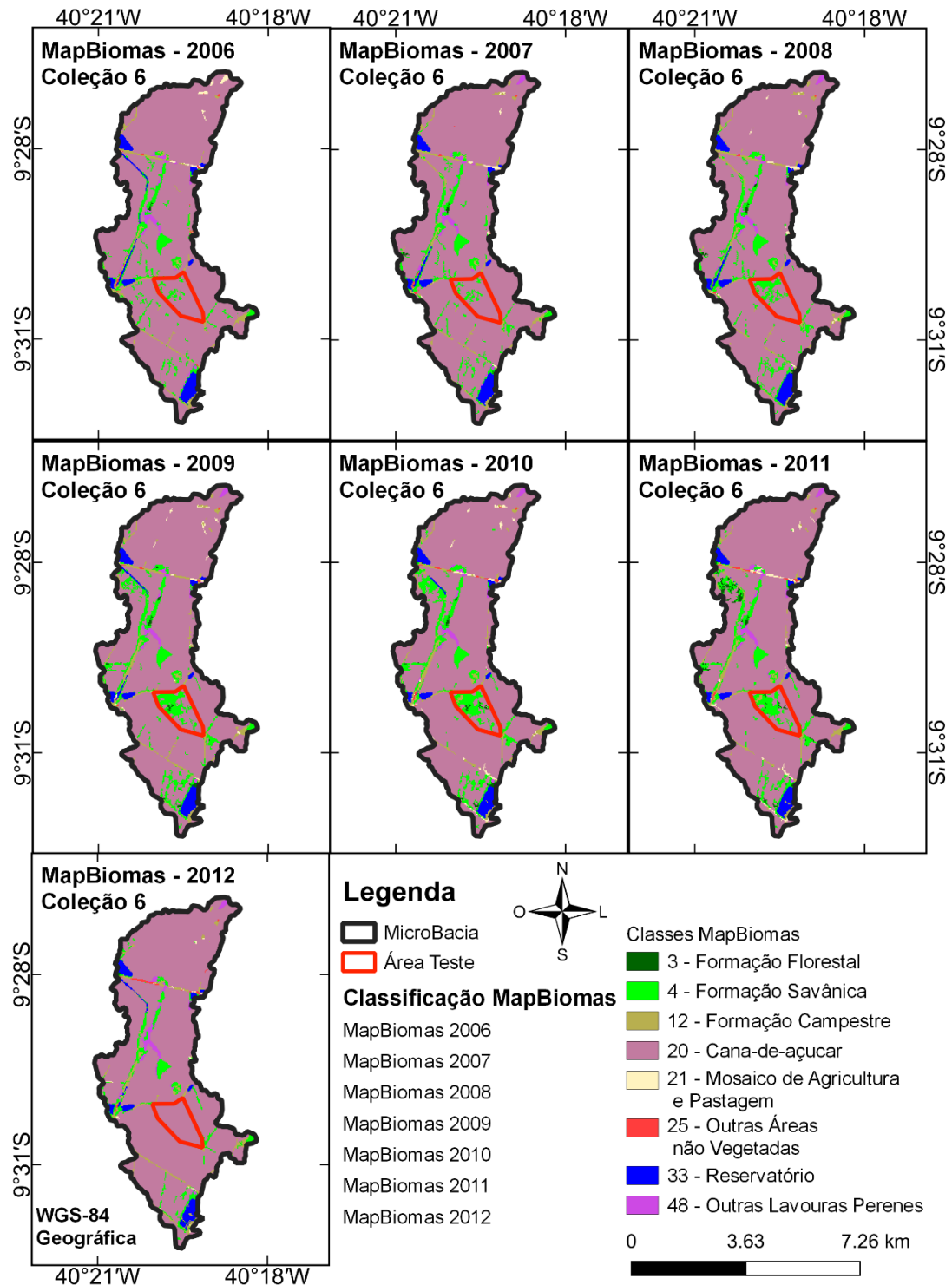


Figura 10 - Classificação do uso e cobertura vegetal da microbacia usando MapBiomas Coleção 6 (2006 - 2012).

Na Figura 11, observa-se as fortes variações da área (ha) de cana-de-açúcar, entre 2001 e 2020. A área de cana-de-açúcar na microbacia apresentou dois momentos distintos. O primeiro momento, entre os anos de 2001 a 2011, em que a área plantada de cana-de-açúcar chegou a atingir um pico de 2.523,18

ha em 2003, reduzindo-se a área para 2.360,05 ha em 2009. Um motivo para isso ter ocorrido pode estar relacionado à estagnação da variedade plantada ou a redução da área plantada e aumento da área de Caatinga. O segundo momento ocorreu a partir de 2012, atingido um pico de área planta de cana-de-açúcar de 2.566,85 ha em 2017, devido a mudança de variedade de cana-de-açúcar. Em Juazeiro, BA, a cana-de-açúcar tem sido produzida em grandes extensões territoriais, cuja produção pode ser afetada por variações climáticas, e por se tratar de um monocultivo ocupante de extensas áreas também acaba afetando o ambiente em que está inserida de diferentes formas, tornando-se necessária a avaliação dos efeitos causados por essa interação do sistema solo-água-planta-atmosfera (ESTEVES *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021).

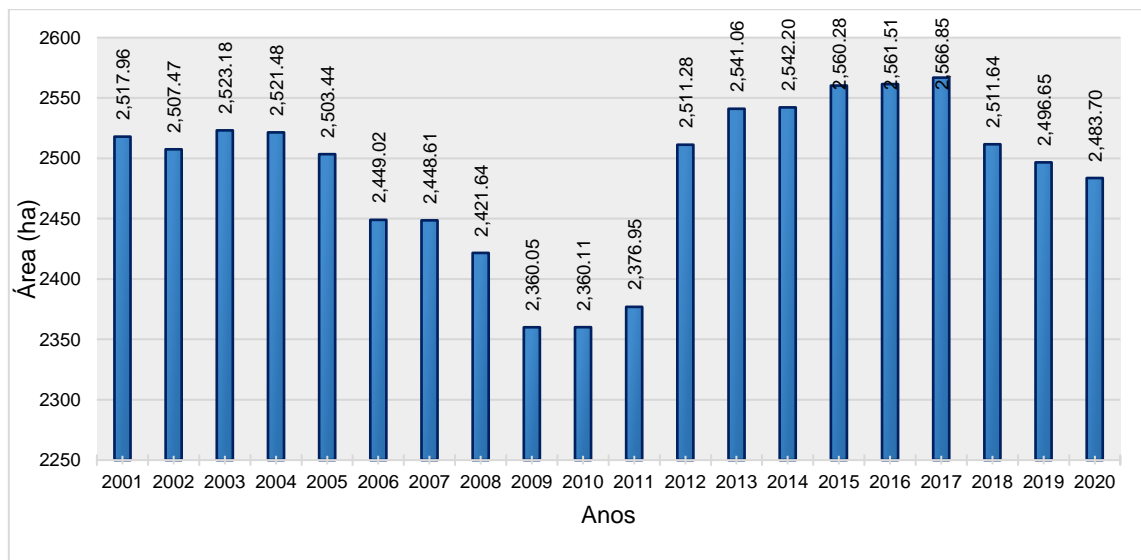


Figura 11 - Distribuição temporal da área de cana-de-açúcar da microbacia no período 2001 a 2020 em Juazeiro, BA.

5.4. Classificação do MapBiomass para área teste

Para ter uma melhor referência das variações da cana-de-açúcar na Área teste, obteve-se a classificação do MapBiomass da coleção 6 para o período 2006 a 2012 (Figura 12). Notou-se uma diminuição expressiva das manchas de cana-de-açúcar, seguido do aumento da formação savânica entre 2006 a 2011. Em 2012, ocupou-se quase 100% da área com cana-de-açúcar.

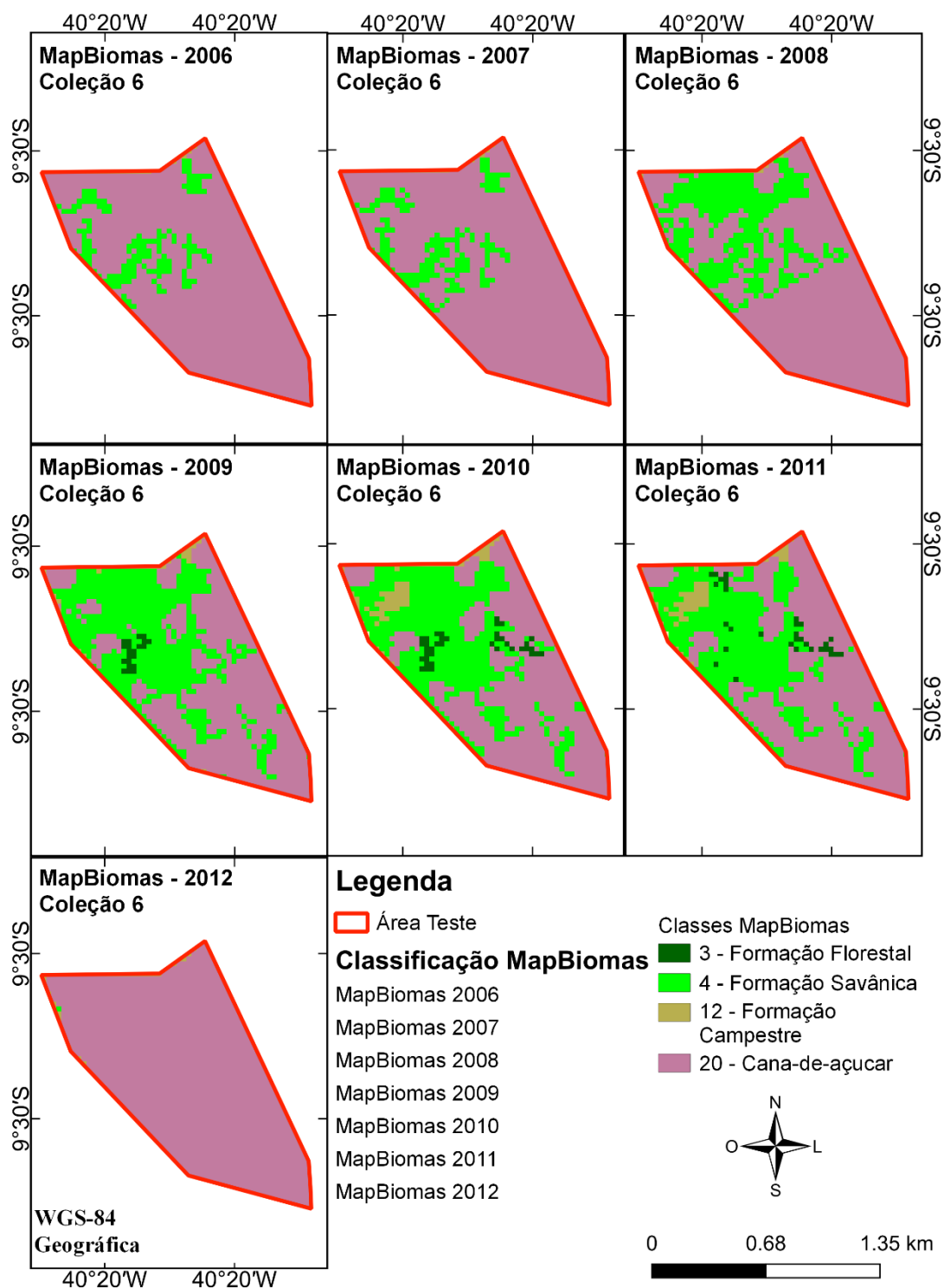


Figura 12 - Classificação da Área teste de cana-de-açúcar usando MapBiomass, Coleção 6, para os anos de 2006 a 2012.

Observa-se na Figura 13, uma variação a partir do ano 2005 para o ano 2006 de 127,29 ha para 113,55 ha, tendo a maior queda no ano 2010 com o valor de 67,80 ha. Pela qual se identificou que depois da mudança de variedade SP 79-1011 para a variedade VAT 90-212 a área teste foi plantada por completo,

tendo valores constantes ao redor de 128 ha, o que faz que a área plantada com cana-de-açúcar esteja uniforme.

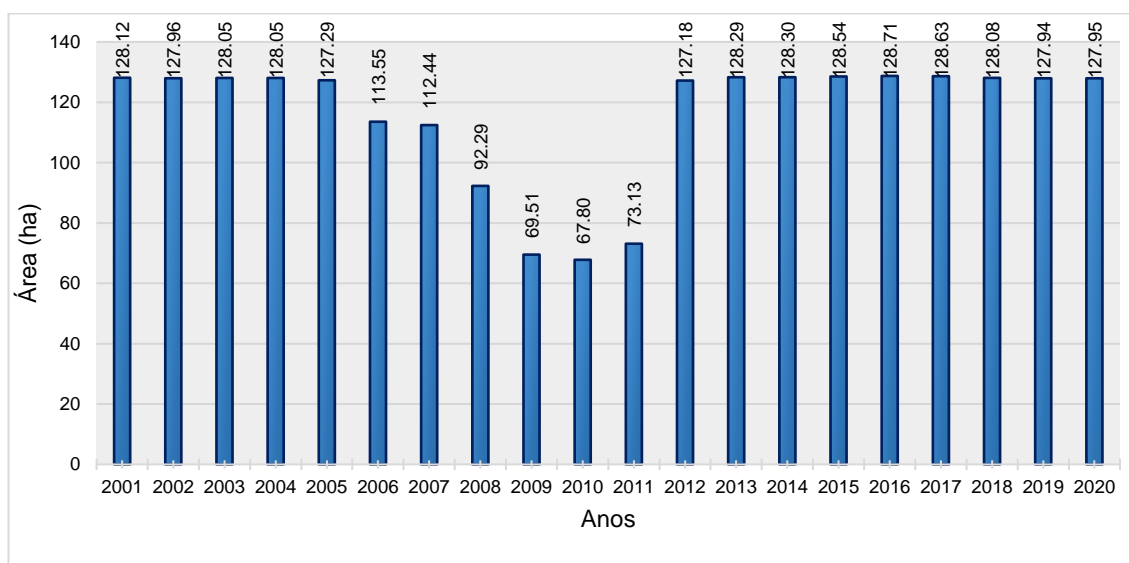


Figura 13 - Distribuição Temporal da área teste de cana-de-açúcar no período 2001 a 2020.

5.5. Série Temporal do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

A Figura 14 mostra a série temporal de NDVI para os anos de 2001 e 2020, compreendendo 19 ciclos fenológicos da cana-de-açúcar da área teste. Os ciclos fenológicos são mantidos entre a faixa de 0,25 para o início da emergência e 0,8 para o final da fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Percebe-se que o início da fase fenológica da cana-de-açúcar de cada ciclo apresentou baixo valor de NDVI. Após o final do desenvolvimento e da maturação de cada ciclo fenológico a cana-de-açúcar é colhida, caracterizando uma queda brusca nos valores de NDVI. No vale do Submédio São Francisco, Lira (2008) deparou com valores de NDVI da cana-de-açúcar entre 0,17 e 0,65. Santos (2016) encontrou valores elevados de NDVI entre 0,15 e 0,9. Por outro lado, Santos *et al.* (2015) identificaram valores de NDVI de 0,31 a 0,95, no início do ciclo fenológico e no final do ciclo fenológico, respectivamente.

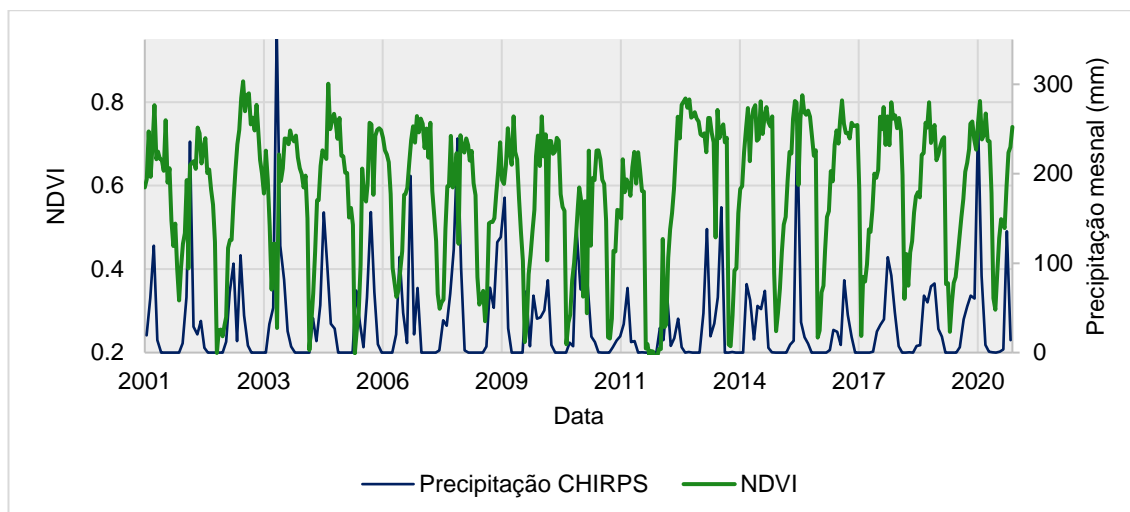


Figura 14 - Série temporal do NDVI do sensor MODIS.

Observou-se dois períodos distintos na Figura 14. O primeiro período correspondendo aos anos de 2001 a 2012 em que foi plantada na área teste a variedade SP 79-1011 de cana-de-açúcar, indicando boa produtividade, com amplitudes maiores de NDVI entre os anos de 2002 e 2005. A partir de 2006 observou-se uma redução das curvas do NDVI, refletido os menores valores de amplitudes de NDVI entre 2006 e 2012. O segundo período, de 2013 a 2020, é marcado por um aumento da amplitude de NDVI, como consequência da substituição da variedade SP 79-1011 para a variedade VAT 90-212 de cana-de-açúcar.

Percebeu-se que o comportamento da série temporal do NDVI não tem uma relação clara com a precipitação, pois os canaviais são irrigados (Figura 14). Em canaviais irrigados do semiárido, a precipitação é irregular e, pode ser indesejada no período de corte da cana-de-açúcar, podendo alterar a data da colheita e prejudicar a produção. Para Aguiar *et al.* (2007), o principal impedimento para o andamento normal do corte da cana-de-açúcar ao longo do período de colheita é a ocorrência de chuvas, especialmente as de longa duração, pois afeta diretamente o trânsito de maquinário envolvido tanto no corte da cana-de-açúcar, para colheita mecanizada, quanto no transporte da cana-de-açúcar da lavoura até a unidade de produção. No entanto, os ruídos observados na série temporal do NDVI podem ser causados por nuvens, constituintes

atmosféricos e geometrias de visualização variadas do sensor e podem ser reduzidos por algoritmos especializados (XU, *et al.*, 2017).

Na Figura 15, mostra-se as imagens de NDVI do Landsat-5, sensor TM, da área teste para os anos 2006 a 2010. As áreas com degradê de verde claro para escuro indicam a variação de baixo para alto de NDVI, variação entre 0,1137 a 0,7251, respectivamente. Em contrapartida, as áreas com coloração branca são aquelas com valores de NDVI menores que 0,1137. Em 2006, observou-se duas áreas bem distintas, uma na parte de cima do campo com valores elevados de NDVI da cana-de-açúcar e a outra na parte de baixo do campo com os menores valores de NDVI. Percebeu-se que, entre anos de 2007 e 2009, ocorreu uma inversão de valores de NDVI, ou seja, a parte de cima da área teste permaneceu com baixo valores de NDVI por três anos consecutivos, caracterizando um período de repouso, enquanto que a cobertura inferior da área apresentou valores elevados de NDVI. Em 2010 ocorreu uma homogeneidade da cobertura vegetal da área teste.

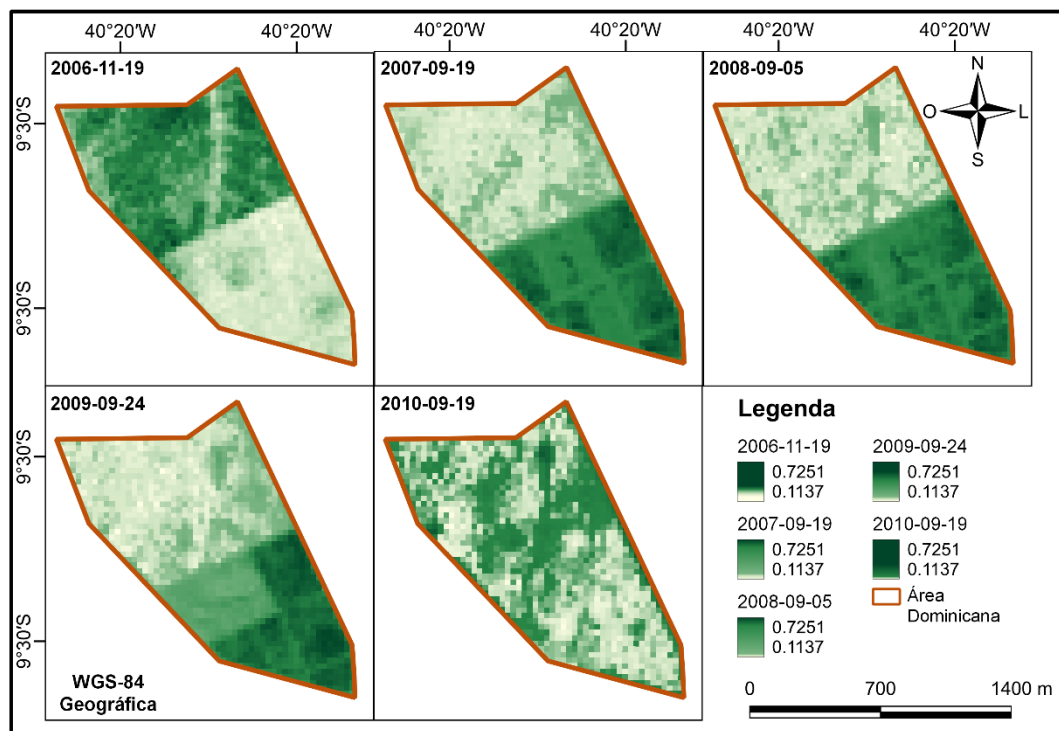


Figura 15- Imagens de NDVI do sensor TM da área teste de cana-de-açúcar em Juazeiro, BA.

5.6. Série Temporal do índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

Na Figura 16, observa-se a série temporal de SAVI para os anos de 2001 a 2020, compreendendo 19 ciclos fenológicos da cana-de-açúcar da área teste. A série temporal do SAVI é similar do NDVI com a mesma duração do ciclo fenológico da cana de um ano, porém a amplitude do SAVI é menor que a do NDVI. Os valores de SAVI representados no gráfico das séries temporais, variaram entre 0,1 e 0,65 do início e ao final do ciclo fenológico. Como sabido, o SAVI minimiza os efeitos do solo e valida os critérios de vegetação. Dessa forma, os resultados deste estudo corroboram com os valores de NDVI encontrados por Polônio (2015) em áreas com solo exposto (0,03) e em área com cana-de-açúcar na maturação (0,78) no vale do São Francisco.

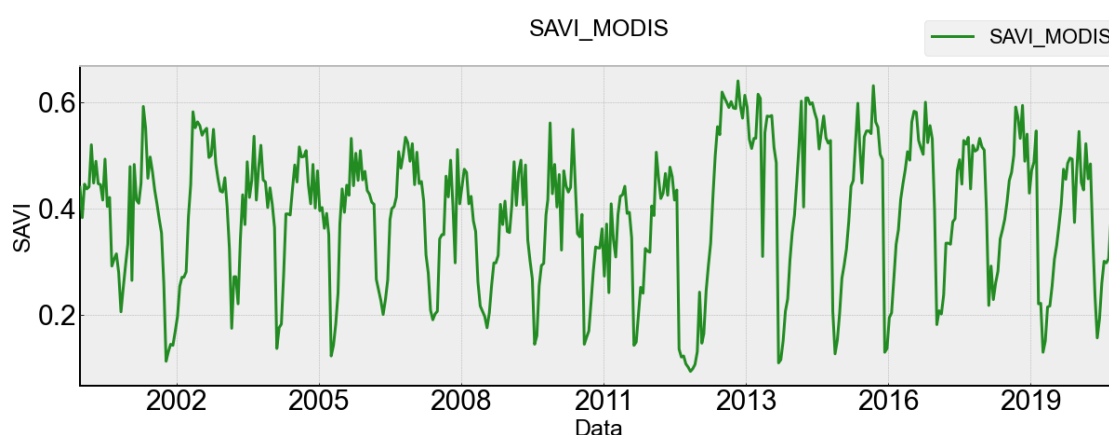


Figura 16: Série temporal do SAVI obtido do sensor MODIS.

5.7. Série Temporal do índice de área foliar (IAF)

Na Figura 17, observa-se a série temporal de IAF do sensor MODIS para os anos de 2001 a 2020. O comportamento do IAF é similar ao do NDVI e do SAVI para a cana-de-açúcar da área teste. O IAF manteve-se na faixa de 0 (sem folhas) a 2,75 m² de folhas por m² de área de terreno, observado em toda a área teste. Os maiores valores foram identificados no final do ciclo fenológico, com forte atividade fotossintética, e os menores valores no início da fase fenológica, com baixa presença de cobertura vegetal. Sabe-se que a partir de 2012 ocorreu a mudança de variedade de cana-de-açúcar, o IAF de 2013 permaneceu com valor superior e, posteriormente, nos anos seguintes a tendência foi decrescente, obtendo-se valores entre 0,0 e 2,0 m² m⁻².

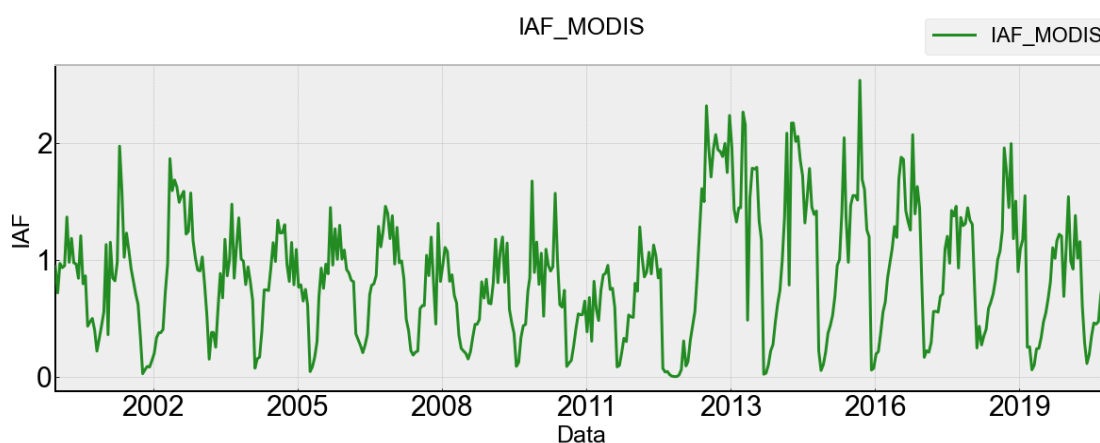


Figura 17 - Série temporal do IAF do sensor MODIS da área teste de cana-de-açúcar.

5.8. Análise dos parâmetros fenológicos do ciclo da cana-de-açúcar no TIMESAT

O filtro Savitsky-Golay se ajustou melhor na série temporal de NDVI do MODIS (Figura 18) com todas as configurações da Tabela 5 no Timesat. Dessa maneira as datas obtidas do ajuste se aproximaram ao ideal (Datas de colheita da área teste).

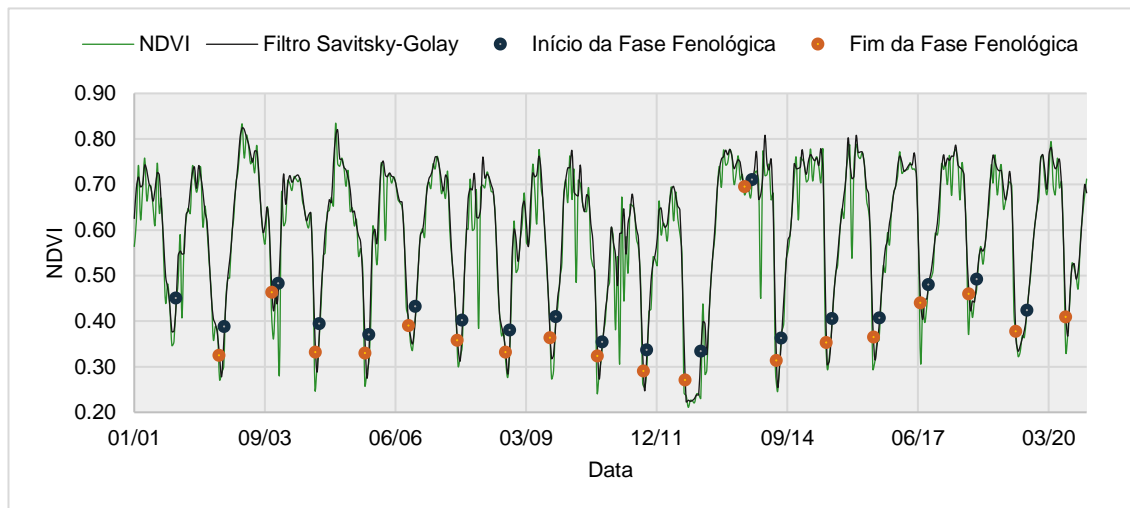


Figura 18 - Serie Temporal NDVI e filtro Savitsky-Golay.

A Tabela 8 ilustra os parâmetros fenológicos da área teste de cana-de-açúcar estimados pelo *software* TIMESAT, usando a série temporal de NDVI do sensor MODIS para o período de 2001 a 2020. Na coluna 1 estão representados os 19 ciclos fenológicos da cana-de-açúcar, e nas colunas 2 e 3 as datas do início (a) e da colheita (b) dos anos safras, respectivamente. Observou-se que o

mês mais frequente para o início da estação de crescimento da cana-de-açúcar com a variedade SP 79-1011 foi novembro, enquanto com a variedade VAT 90-212 o mês de agosto foi o que mais se repetiu. O final do ciclo fenológico para a variedade 1 ficou entre setembro e outubro e, para a variedade 2 o mês de junho ou julho. A safra 2003/2002 teve o ciclo fenológico mais longo que durou 367,84 dias. Por outro lado, a safra 2013/2014 teve a menor estação de crescimento e desenvolvimento, perfazendo 189,12 dias. A duração média dos ciclos fenológicos foi de 312,17 dias.

Tabela 8 - Parâmetros fenológicos obtidos com o *software* TIMESAT, dos 19 ciclos fenológicos identificados para a área teste (Histórico Calendário Agrícola).

Ciclos	a	b	g	e	NDVI P.	f	h	i	NDVI I.	NDVI F.
1	17/11/2001	13/10/2002	332,4800	25/04/2002	0,7411	0,4132	12,6400	5,4270	0,4502	0,3247
2	21/11/2002	21/11/2003	367,8400	16/05/2003	0,8240	0,4733	16,3400	7,5720	0,3876	0,4630
3	11/01/2004	21/10/2004	285,1200	27/05/2004	0,7229	0,3674	12,3200	5,2160	0,4829	0,3315
4	19/11/2004	05/11/2005	353,7600	28/04/2005	0,8195	0,5380	14,8600	8,1010	0,3943	0,3296
5	04/12/2005	03/10/2006	305,4400	04/05/2006	0,7515	0,4388	12,8800	6,3110	0,3704	0,3903
6	24/11/2006	11/10/2007	322,2400	12/05/2007	0,7598	0,4282	13,5600	6,2630	0,4321	0,3577
7	17/11/2007	14/10/2008	334,0800	09/04/2008	0,7589	0,4602	13,3900	6,5260	0,4022	0,3317
8	16/11/2008	20/09/2009	309,4400	08/06/2009	0,7623	0,4609	12,4600	6,1290	0,3799	0,3630
9	04/11/2009	19/09/2010	321,9200	07/04/2010	0,7740	0,4780	13,2700	6,7550	0,4097	0,3233
10	26/10/2010	05/09/2011	317,2800	10/04/2011	0,6790	0,4189	11,5100	5,7890	0,3544	0,2902
11	01/10/2011	20/07/2012	296,3200	20/03/2012	0,6958	0,4607	11,1100	6,4110	0,3368	0,2705
12	17/11/2012	19/10/2013	338,88	15/05/2013	0,7772	0,3225	14,61	4,151	0,3341	0,6952
13	14/12/2013	19/06/2014	189,1200	17/04/2014	0,8081	0,3356	9,3230	2,7080	0,7105	0,3138
14	26/07/2014	07/07/2015	348,9600	14/02/2015	0,7788	0,4968	15,4700	8,7000	0,3629	0,3525
15	19/08/2015	02/07/2016	319,2000	15/02/2016	0,8068	0,4963	13,9800	7,1440	0,4054	0,3651
16	17/08/2016	26/06/2017	316,0000	27/02/2017	0,7689	0,4090	13,9700	6,0510	0,4066	0,4402
17	25/08/2017	02/07/2018	313,7600	24/02/2018	0,7862	0,3725	14,3500	5,2500	0,4802	0,4599
18	30/08/2018	25/06/2019	301,1200	01/03/2019	0,7643	0,3853	12,7600	5,1820	0,4917	0,3774
19	19/09/2019	13/07/2020	300,8000	13/03/2020	0,7813	0,4303	13,4100	6,0370	0,4238	0,4090
Mínimo			189,1200		0,6790	0,3356	9,3230	2,7080	0,3368	0,2705
Máximo			367,8400		0,8240	0,5380	16,3400	8,7000	0,7105	0,4630
Media			313,0489		0,7657	0,4369	13,2002	6,1984	0,4268	0,3607

a - Data do início do ciclo fenológico; b – Data do final do ciclo fenológico; e - Data com o maior valor de NDVI ajustado; NDVI P. - Ponto com o maior valor de NDVI ajustado (NDVI Pico); f - Amplitude sazonal do NDVI; g - Duração sazonal do ciclo. h e (i) São integrais que mostram o efeito cumulativo da vegetação durante a estação (Produtividade Bruta e Líquida, respectivamente), NDVI I. – O NDVI do início do ciclo fenológico, NDVI F. – O NDVI do final do ciclo fenológico

Na Figura 19, constata-se a relação entre os picos máximos de NDVI em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar. À medida que o valor do pico de NDVI aumenta a duração do ciclo fenológico também aumenta. A data do pico máximo da curva de NDVI ocorreu em 16/05/2003 (coluna e, Tabela 8), safra 2002/2003, com valor de NDVI igual a 0,8240; e o menor valor pico de NDVI em 10/04/2011 (safra 2010/2011). Com a mudança do tipo de cana-de-açúcar o máximo valor de NDVI foi atingido em 17/04/2014 com um valor máximo de 0,8081, sendo o comportamento do coeficiente de correlação de 0,5834 classificado por Camargo; Sentelhas, (1997) (Tabela 6) como “alta”.

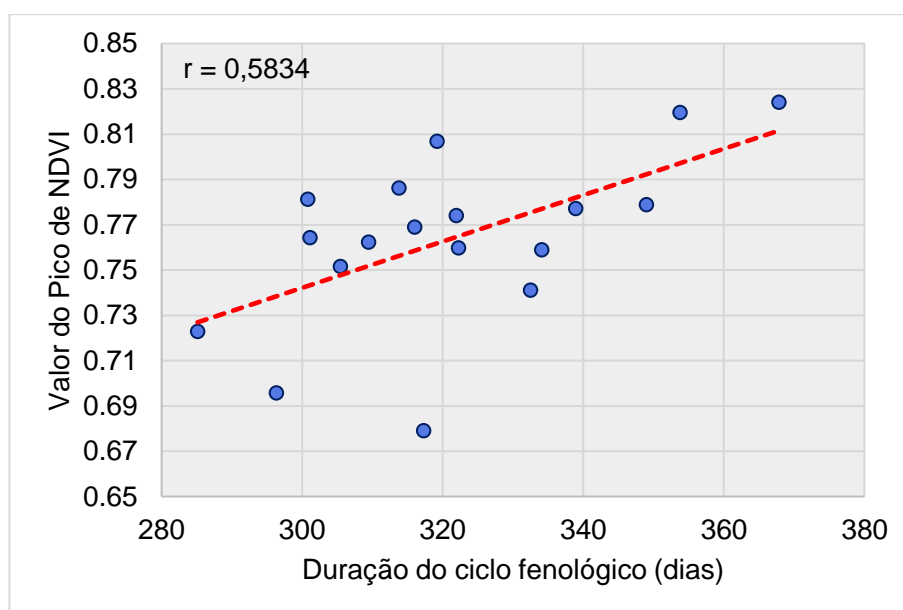


Figura 19 - Relação entre os picos máximos de NDVI em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.

Na Figura 20, observa-se a relação entre a produtividade primária bruta (grande integral, h) em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar. A nuvem de pontos de produtividade primária bruta estão bem distribuídos ao longo da reta de regressão linear, indicando excelente coeficiente de determinação ($R^2=0,714$) com a duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar. À medida que o valor da produtividade primária bruta aumenta a duração do ciclo fenológico também aumenta. A máxima produtividade primária bruta ocorreu na safra 2001/2003 (coluna h, Tabela 8), com valor de produtividade bruta igual a $16,34 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$; e o menor valor de produtividade bruta igual a $9,3230 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ observado na safra 2012/2013. Com a mudança da variedade de cana-de-açúcar, o máximo valor de produtividade primária bruta ocorreu na safra 2014/2015 com $15,47 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$. Neste estudo, a produtividade primária bruta foi

sempre maior que a produtividade primária líquida no canavial irrigado da área teste, contrariando as afirmações de Eklundh, Jönsson (2017) e Jönsson; Eklundh (2004) que, em áreas sempre verdes, a produtividade primária bruta (primeira integral) pode ser pequena, mesmo que a produção total de vegetação seja grande.

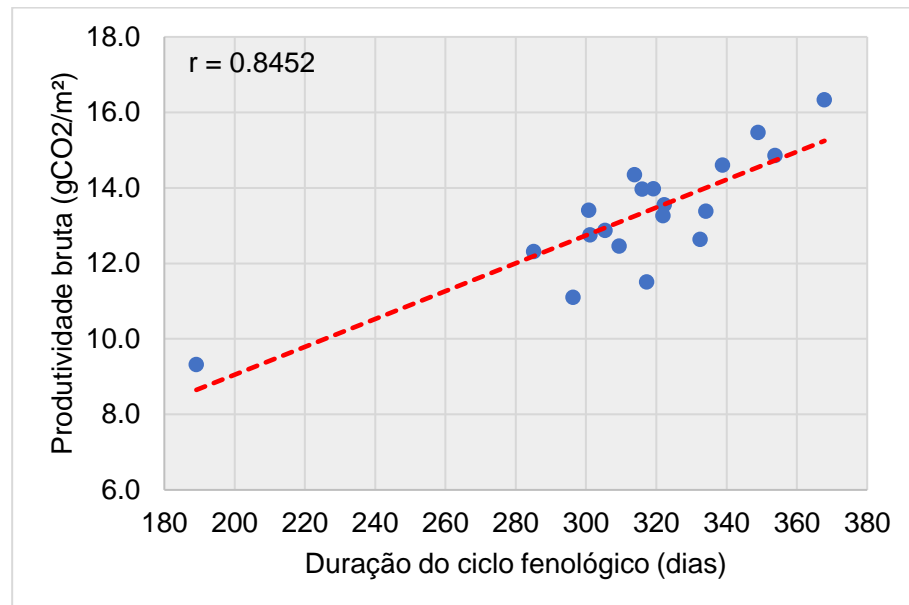


Figura 20 - Relação entre a produtividade primária bruta em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.

Na Figura 21, mostra-se a relação entre a amplitude sazonal do NDVI em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar. À medida que o valor da amplitude sazonal do NDVI aumenta a duração do ciclo fenológico também aumenta, mostrando excelente relação entre elas com coeficiente de determinação igual a 0,9868. O valor de maior amplitude sazonal do NDVI foi igual a 0,5380, observado na safra 2004/2005 (coluna f, Tabela 8), enquanto que o menor valor de amplitude sazonal do NDVI foi igual a 0,3225 verificada na safra 2011/2013. Com a mudança do tipo de cana de açúcar irrigada, o máximo valor de produtividade bruta ocorreu na safra 2014/2015 com um valor máximo de 0,4968. A irrigação e o tipo de variedade de cana-de-açúcar têm grande influência no desenvolvimento anual da vegetação. Neste estudo, a precipitação pluvial não tem influência no desenvolvimento da cana-de-açúcar. No entanto, Jönsson; Eklundh (2004) observaram que, as maiores amplitudes sazonal do NDVI foram encontradas em áreas semiáridas africanas, onde o desenvolvimento da vegetação seguiu um acentuado ciclo anual de crescimento

e o declínio estava associado às variações pluviométricas. Constatou-se que menores as amplitudes sazonais produzem menores valores de produtividade primária bruta e líquida como observado na Tabela 8.

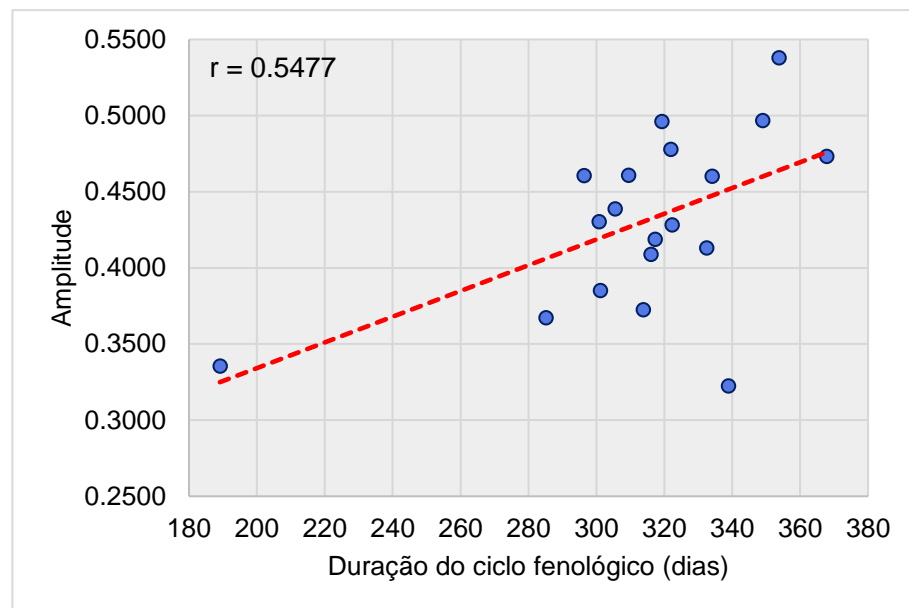


Figura 21 - Relação entre a amplitude sazonal do NDVI em função da duração do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.

A Figura 22 ilustra o número de ciclos fenológicos da cana-de-açúcar em função da produtividade primária para o período de 2001 a 2020. Observou-se que a integral sazonal (h), que representa a vegetação sazonalmente ativa ou a produtividade primária bruta, atingiu o valor máximo de $16,34 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no 2º ciclo fenológico, safra 2002/2003; e o menor valor, $9,323 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, no 13º ciclo fenológico da cana-de-açúcar. Constatou-se também que a menor produtividade primária líquida ou a produção de vegetação (i) foi de 2,7 no 13º ciclo fenológico da cana-de-açúcar, decorrente da mudança de variedade. Para Running; Nemani (1988); Goward; Dye (1987); Ruimy; Saugier; Dedieu (1994); Eklundh; Jönsson (2017) a integral anual do NDVI é frequentemente usada como medida da produção primária líquida.

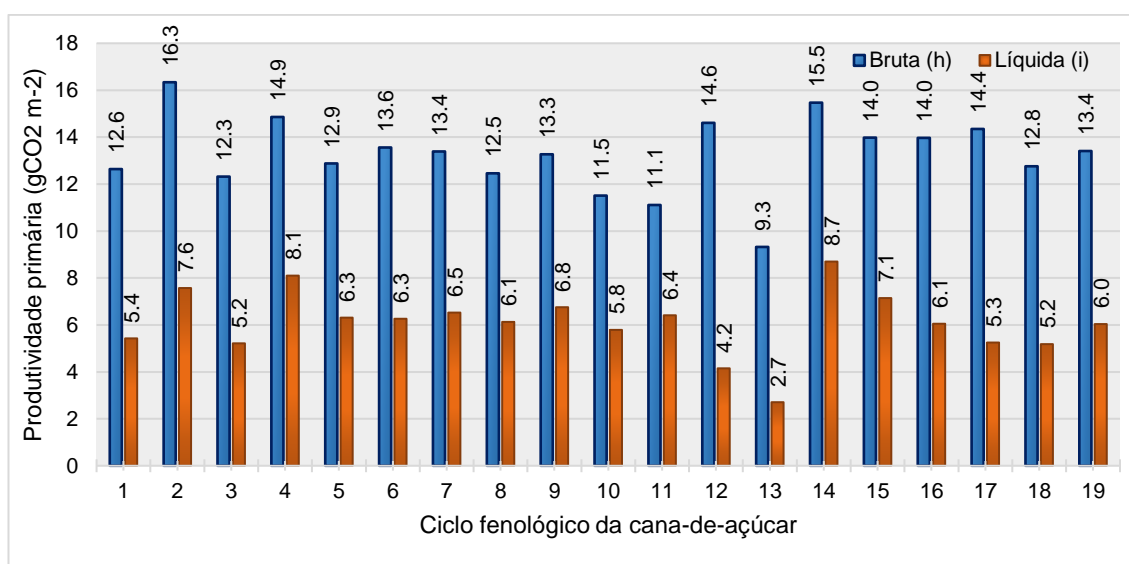


Figura 22 - Ciclos fenológicos em função da produtividade líquida da cana-de-açúcar.

A Tabela 8 observa-se que pode ser usado como calendário agrícola (Figura 23), tendo em consideração os parâmetros (a - Data do início do ciclo fenológico; b - Data do final do ciclo fenológico; e - Data com o maior valor de NDVI ajustado) que ajuda nas atividades do plantio, manejo e na colheita da cana-de-açúcar (CAMPBELL; WYNNE, 2011). Outras pesquisas que foram realizadas para o desenvolvimento do calendário agrícola indicaram que as datas podem variar de acordo na altitude, já que foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Jacuizinho, Rio Grande do Sul, para a cultura de tabaco (DUARTE, 2020), já para Campbell; Wynne (2011) foi realizado o calendário agrícola para conhecer o contraste do crescimento de duas culturas (trigo e

milho) e identificar as variações espectrais com o uso de imagens aéreas, no oeste de Kansas, EUA.

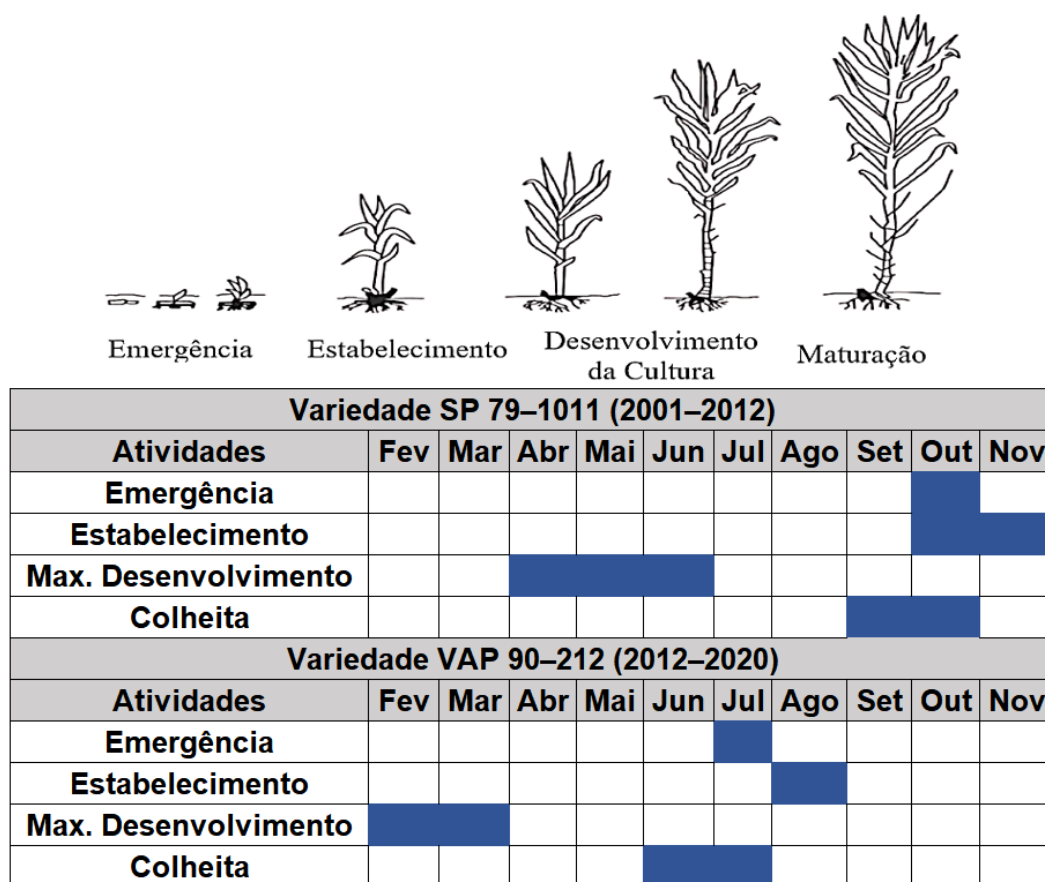


Figura 23 - Calendário Agrícola da área teste.

5.9. Avaliação estatística

5.9.1. Teste de normalidade

O teste de normalidade Shapiro-Wilks foi aplicado as datas das colheitas para os 13 lotes e a área total de cana-de-açúcar (Tabela 9), considerando as seguintes hipóteses: H0: As datas das colheitas da cana-de-açúcar seguem uma distribuição normal; H1: As datas da colheita da cana-de-açúcar não seguem uma distribuição normal. Observou-se que as datas das colheitas de todos os lotes de cana-de-açúcar, exceto o lote 7, seguem uma distribuição normal, uma vez que os valores de p-valor do teste de Shapiro-Wilks são menores que 0,05, ou seja, para um nível de significância de 5%. A hipóteses de “Aceitar H0” evidência que as datas das colheitas da cana-de-açúcar de todas as áreas, com

exceção da área 7, seguem uma distribuição normal. Portanto, optou-se por incluir a área 7 na análise do teste paramétrico (t de *Student*).

Tabela 9 - Teste de Normalidade, usando Shapiro-Wilks.

Áreas	W	P Valor	Hipótese
Área 01	0,8843	0,2465	Aceitar H0; 0,2465 > 0,05
Área 02	0,9122	0,4115	Aceitar H0; 0,4115 > 0,05
Área 03	0,9269	0,525	Aceitar H0; 0,525 > 0,05
Área 04	0,9019	0,3424	Aceitar H0; 0,3424 > 0,05
Área 05	0,9771	0,9444	Aceitar H0; 0,9444 > 0,05
Área 06	0,9562	0,7855	Aceitar H0; 0,7855 > 0,05
Área 07	0,7822	0,0272	Rejeitar H0; 0,0272 < 0,05
Área 08	0,8705	0,1874	Aceitar H0; 0,1874 > 0,05
Área 09	0,8629	0,1606	Aceitar H0; 0,1606 > 0,05
Área 10	0,8892	0,2704	Aceitar H0; 0,2704 > 0,05
Área 11	0,8842	0,2458	Aceitar H0; 0,2458 > 0,05
Área 12	0,8388	0,0968	Aceitar H0; 0,0968 > 0,05
Área 13	0,8325	0,0844	Aceitar H0; 0,0844 > 0,05
Área Total	0,8905	0,2774	Aceitar H0; 0,2774 > 0,05

5.9.2. Teste t de *Student*

O teste paramétrico de t de Student foi utilizado para testar a aceitação da hipótese nula (H0) em que as datas reais e estimadas da colheita da cana-de-açúcar têm médias iguais. Se essa condição não for satisfeita, aceita-se a hipótese alternativa (H1) considerando-se que as médias das datas de colheitas observadas e estimadas são diferentes. Levando em consideração o exposto, de acordo com os resultados do teste t de *Student* (Tabela 10), todas as áreas de cana-de-açúcar aceitaram a hipóteses nula, ou seja, as datas da colheita observada e as estimadas com o *software* TIMESAT, não teve diferença, ou seja, não houve diferença entre as datas médias dos grupos comparados ao nível de significância de 5% (p valor > 0,05).

Tabela 10 - Resultados do Test t *Student*.

Áreas	T-Student		HIPOTESE
	t	P Valor	
Área 01	-0,0186	0,9855	Aceitar H0.
Área 02	-0,0288	0,9775	Aceitar H0.
Área 03	-0,0085	0,9933	Aceitar H0.
Área 04	-0,0051	0,996	Aceitar H0.
Área 05	-0,0305	0,9761	Aceitar H0.

Área 06	-0,0577	0,955	Aceitar H0.
Área 07	-0,0208	0,9838	Aceitar H0.
Área 08	-0,0539	0,9579	Aceitar H0.
Área 09	-0,0636	0,9503	Aceitar H0.
Área 10	-0,0573	0,9553	Aceitar H0.
Área 11	-0,0618	0,9518	Aceitar H0.
Área 12	-0,0697	0,9456	Aceitar H0.
Área 13	-0,0607	0,9526	Aceitar H0.
Área Total	-0,0097	0,9924	Aceitar H0.

5.9.3. Validação das datas de colheitas estimadas com *software* TIMESAT

Na Figura 24, observa-se a comparação entre datas de colheita estimadas usando o *software* TIMESAT e as datas de colheita observadas, convertidas em dias contadas a partir de 01/01/1900, para a área teste no período 2006 a 2012, Juazeiro, BA. Constatou-se que os pontos estão muito próximo da reta de regressão linear (1:1) indicando um excelente ajuste entre as datas de colheitas reais e estimadas pelo *software* TIMESAT. Além disso, as datas das colheitas reais e as datas das colheitas estimadas relacionam-se muito bem, apresentando um coeficiente de correção ou Pearson (r) de 0,99998 (quase perfeito), coeficiente de determinar (r^2) de 0,99997, índice de concordância (d) de 0,99993, índice de desempenho (e) igual a 0,99991 (classificado como ótimo), tendência de subestimar os valores (ME igual a -3,92170), erro médio absoluto de 10,45908 dias e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 11,87514 dias, conforme observado na Tabela 11.

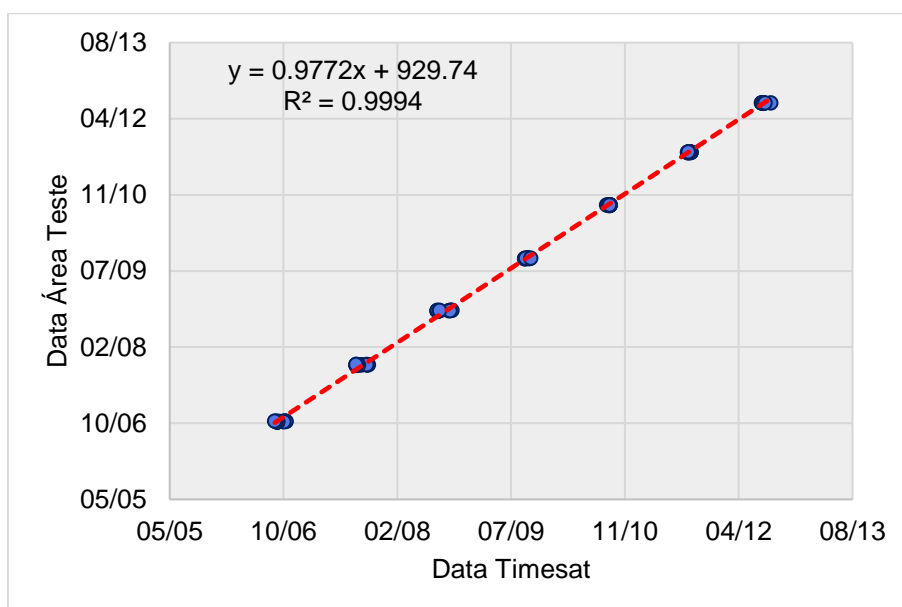


Figura 24 - Comparação entre a as datas de colheita usando o *software* TIMESAT e as datas de colheita da área teste no período 2006 a 2012.

Verificou-se na Tabela 11 que os resultados obtidos para o coeficiente de correlação de Pearson (r) apontam que as melhores áreas são as Áreas 1,2,3,4 e 7, tendo um coeficiente de correlação o mais próximo a 1. Para as demais áreas, os resultados obtidos ficaram entre 0,9995 e 0,9998. Portanto, a área teste foi classificada com correlação “Quase Perfeita”, indicando que o *software* TIMESAT estimou com precisão as datas de colheita da cana-de-açúcar. Valores semelhantes foram encontrados em estudo de Ramírez-Cuesta *et al.* (2021), os quais correlacionaram os parâmetros fenológicos com os processos do solo (arborização, agricultura, degradação, urbanização, entre outros) tendo como resultado valores de R^2 de 0,67 a 0,97.

Tabela 11 - Parâmetros estatísticos das áreas que conformam a área teste.

Nº	Áreas	r	R ²	ME	MAE	RMSE	Class. r	Í. Concordância d	Índice Desempenho e	Desempenho
1	Área 01	0,99998	0,99997	-7,51348	7,51348	9,87784	Quase perfeita	0,99995	0,99993	Ótimo
2	Área 02	0,99998	0,99996	-11,62334	12,11198	13,61934	Quase perfeita	0,99991	0,99989	Ótimo
3	Área 03	0,99998	0,99996	-3,45415	5,51995	7,75924	Quase perfeita	0,99997	0,99995	Ótimo
4	Área 04	0,99998	0,99997	-2,05910	4,14594	5,64924	Quase perfeita	0,99998	0,99997	Ótimo
5	Área 05	0,99981	0,99962	-12,52278	26,52714	32,06543	Quase perfeita	0,99949	0,99930	Ótimo
6	Área 06	0,99985	0,99970	-23,55789	26,31575	33,06011	Quase perfeita	0,99945	0,99930	Ótimo
7	Área 07	0,99999	0,99997	-8,37940	8,37940	9,61145	Quase perfeita	0,99995	0,99994	Ótimo
8	Área 08	0,99975	0,99951	-22,07053	25,92219	34,74823	Quase perfeita	0,99940	0,99915	Ótimo
9	Área 09	0,99975	0,99951	-26,01226	27,39178	36,86031	Quase perfeita	0,99932	0,99908	Ótimo
10	Área 10	0,99984	0,99967	-23,43206	26,30445	34,63318	Quase perfeita	0,99940	0,99924	Ótimo
11	Área 11	0,99981	0,99961	-25,29798	27,54840	37,01778	Quase perfeita	0,99932	0,99913	Ótimo
12	Área 12	0,99978	0,99957	-28,53315	29,27420	40,43884	Quase perfeita	0,99919	0,99897	Ótimo
13	Área 13	0,99978	0,99956	-24,90240	28,06704	39,32921	Quase perfeita	0,99923	0,99901	Ótimo
14	Área Total	0,99998	0,99997	-3,92170	10,45908	11,87514	Quase perfeita	0,99993	0,99991	Ótimo

r: coeficiente de correlação de Pearson, R²: Coeficiente de determinação ajustado, ME: Erro médio, MAE: Erro médio absoluto, RMSE: raiz do quadrado médio do erro, d: índice de concordância de Willmott (1981), e: Índice de desempenho de Camargo & Sentelhas (1997), Class. r: Classificação do coeficiente de correlação de Pearson (r).

O MAE indica que quanto menor o seu valor mais preciso é a data calculada pelo TIMESAT e a data real da colheita de cana-de-açúcar. Assim, as Áreas 1,3,4 e 7 foram os que apresentaram o menor erro médio absoluto e, portanto, maior precisão variando entre 4 a 9 dias. Quanto ao índice de desempenho (e) os melhores resultados ocorreram nas áreas 1,3,4 e 7, em quanto para demais áreas, os valores de índice de desempenho está entre 0,9989 e 0,9998, classificadas como “Ótimo”, indicando que a determinação das datas com o *software* TIMESAT estimam com precisão esta variável.

6. CONCLUSÕES

O *software* TIMESAT foi capaz de estimar os parâmetros fenológicos (início, meio e fim do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar, acúmulo de vegetação ativa e produção total da vegetação) em áreas de produção de cana-de-açúcar na região do vale do Submédio do São Francisco, utilizando imagens MODIS processadas no Google Earth Engine dos anos 2001 a 2020, de modo satisfatório.

O produto de precipitação CHIRPS teve uma ótima eficácia na detecção da precipitação ocorrida nos anos avaliados, já que foi classificada como uma correlação “Muito alta” ($R^2 = 0,734$) com respeito aos dados de precipitação da estação automática Labmet.

Existe uma relação entre os dados do NDVI do sensor MODIS e os dados de precipitação do CHIRPS, porque se deve ter em consideração que nos canaviais irrigados a precipitação pode ser indesejada nas datas próximas da colheita.

Entre os ajustes usados pelo *software* TIMESAT, o filtro Savitsky-Golay foi o que melhor se ajustou na série temporal do NDVI do sensor MODIS, já que reduz a interferência atmosférica nas séries temporais e usado também para o cálculo dos parâmetros fenológicos.

Os parâmetros estatísticos foram capazes de calcular o comportamento das datas de colheita da cana-de-açúcar da área teste, comparado com as datas de colheita estimadas pelo *software* TIMESAT, apresentando um erro absoluto (MAE) de 10 dias. Por tanto, o uso do *software* TIMESAT é considerado uma alternativa eficiente na elaboração do calendário agrícola.

Pretendendo-se informar aos produtores das diferentes áreas agrícolas que a metodologia pode ser empregada nas diferentes culturas. Como sugestão para futuros trabalhos fica a utilização do *Software* TIMESAT em nível regional.

7. REFERÊNCIAS

AGUIAR, D. A. DE; SILVA, W. F.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; PAES, L. A. D. Monitoramento da colheita da cana. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. (Eds.): **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**, São José dos Campos: Ed. Bookimage, p. 123 – 131, 2007

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSSEN, W.; ROBISON, C. W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.395-406, 2007.

ALLEN, R. G; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)**. Advanced training and User's Manual. Idaho implementation, version, v. 1, p. 98, 2002.

ANEC. Ficha técnica de la caña de azucar. 2018. **Plataforma Siafemor**. Disponível em: <http://siafemor.inifap.gob.mx/anec/ficha-tecnica-cana.php>. Acesso em: 20 dez. 2020.

ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. DE C.; RODRIGUES, L. H. A. Representação de ciclos harmônicos de séries temporais Modis para análise do cultivo da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1868–1879, nov. 2016.

APPEL, M.; LAHN, F.; BUYTAERT, W.; PEBESMA, E. Open and scalable analytics of large Earth observation datasets: From scenes to multidimensional arrays using SciDB and GDAL. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 138, p. 47–56, 1 abr. 2018.

ARBOIT, M. E.; MAGLIONE, D. S. Situación actual y cambios recientes en los índices de vegetación (vis) en ciudades forestadas con climas secos. Caso área metropolitana de Mendoza, Argentina. **Revista Urbano**, p. 18–35, 30 nov. 2018. DOI: 10.22320/07183607.2018.21.38.02. Disponível em: <https://doi.org/10.22320/07183607.2018.21.38.02>. Acesso em: 8 jan. 2020.

BARROS, M. V. G. DE; REIS, R. S.; HALLAL, P. C.; FLORINDO, A. A.; FARIAS JÚNIOR, J. C. DE. Análise de dados em saúde. [S.l: s.n.], 2012.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, n. 1, p. 213-229, 1998. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00254-6. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6). Acesso em: 02 jan. 2022.

BUSTAMANTE, M.; NOBRE, C.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P.; BARIONI, L.; FERREIRA, L.; LONGO DE FREITAS, K.; MAY, P.; PINTO, A.; OMETTO, J. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, p. 559–577, dez. 2012. DOI: 10.1007/s10584-012-0443-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3>. Acesso em: 02 nov. 2021.

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

CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition**. 5. ed. New York: Guilford Press, 2011.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 449–456, dez. 2013.

CHRISM. **Python**. 2019. Disponível em: <https://wiki.python.org/moin/BeginnersGuide/Overview>. Acesso em: 26 dez. 2020.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2. ed. New York: Routledge, 1988. DOI: 10.4324/9780203771587. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780203771587>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-açúcar**, v. 7 – safra 2019/20, n. 2, segundo levantamento. Brasília, p. 1-64, agosto 2020.

COSTA, J., PEREIRA, G., SIQUEIRA, M. E., CARDOZO, F.; DA SILVA, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo chirps para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 24, jun. 2019. DOI: 10.5380/abclima.v24i0.60237. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>. Acesso em: 01 dez. 2021.

COSTA, S. M.; MAZZOLA, P. G.; SILVA, J. C. A. R.; PAHL, R.; PESSOA, A.; COSTA, S. A. Use of sugar cane straw as a source of cellulose for textile fiber production. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 189–194, 1 mar. 2013.

CRUZ, F. N.; BORBA, G. L.; ABREU, L. R. D. **Ciências da natureza e realidade: interdisciplinar**. Natal: EDUFRRN, 2005. Disponível em: http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia_PAR_UAB/Fasciculos%20-%20Material/Ciencia_Natureza_Realidade/CI_NAT_A01_GR_RAARL_090810.pdf. Acesso em: 09 jun. 2021.

DEVELOPERS, **MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m**. 2020. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD13Q1. Acesso em: 23 nov. 2020.

DEVRIES, B.; VERBESSELT, J.; KOOISTRA, L.; HEROLD, M. Robust monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using

Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v.161, p. 107-121, 2015.

DOORENBOS, J. and KASSAM, A.H. Yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage**, Paper 33, Rome, 193 p., 1979.

DUARTE, V. A., **Calendário agrícola da fumicultura na bacia hidrográfica do rio Jacuizinho, RS**. 2020. 115f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, 2020.

EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P. **TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing Software Manual**. Sweden: [s. n.], 92 p., 2017.

ESTEVES, B. S.; SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. L.; MUNIZ, R. A. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 4, p. 663-670, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1597>. Disponível em: <https://docs.academicoo.com/user/barbbarase/albedo.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.

FIELD, A. **Descobrimos a estatística usando o SPSS**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 684 p.

FULADLU, K.; ALTAN, H. Examining land surface temperature and relations with the major air pollutants: A remote sensing research in case of Tehran. **Urban Climate**, v. 39, p. 100958, 1 set. 2021.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 150066, 2015. DOI: 10.1038/sdata.2015.66. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Acesso em: 01 dez. 2021.

GALLO, B. C. **Imagens multitemporais do Landsat TM como estratégia no apoio ao levantamento pedológico**. 2015. 79 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. DOI: 10.11606/D.11.2016.tde-09032016-120949. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-09032016-120949/pt-br.php>. Acesso em: 01 fev. 2021.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences. v. 202, p. 18–27, dez. 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Acesso em: 01 fev. 2021.

GOWARD, S.N., DYE, D.G. Evaluating North American net primary productivity with satellite observations. **Advances in Space Research**, v. 7, p. 165–174, 1987.

GUO, H.; BAO, A.; LIU, T.; NDAYISABA, F.; HE, D.; KURBAN, A.; MAEYER, P. D. Meteorological Drought Analysis in the Lower Mekong Basin Using Satellite-Based Long-Term CHIRPS Product. **Sustainability**, v. 9, n. 6, p. 901-921, 2017. DOI: 10.3390/su9060901. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su9060901>. Acesso em: 29 dez. 2021.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v. 4, n. 4, p.367-376, 1988.

HUETE, A.R.; WARRICK, A.R. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.32, p.155-167, 1990.

JAYAWARDHANA, W. G. N. N.; CHATHURANGE, V. M. I. Extraction of Agricultural Phenological Parameters of Sri Lanka Using MODIS, NDVI Time Series Data. **Procedia Food Science**, International Conference of Sabaragamuwa University of Sri Lanka 2015 (ICSUSL 2015). v. 6, p. 235–241, jan. 2016. DOI: 10.1016/j.profoo.2016.02.027. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.027>. Acesso em: 25 fev. 2021.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 8, p. 833–845, 2004. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.05.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>. Acesso em: 28 fev. 2021.

KATSANOS, D.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S. Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period. **Atmospheric Research**, v. 169, p. 459-464, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.05.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.015>. Acesso em: 29 jan. 2021.

KLEIN I, MAYR S, GESSNER U, HIRNER A, KUENZER C. Water and hydropower reservoirs: High temporal resolution time series derived from MODIS data to characterize seasonality and variability. **Remote Sensing of Environment**, v. 253, p. 112207, 1 fev. 2021.

LE, M. H.; LAKSHMI, V.; BOLTEN, J.; BUI, D. D. Adequacy of Satellite-derived Precipitation Estimate for Hydrological Modeling in Vietnam Basins. **Journal of Hydrology**, v. 586, p. 124820, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124820. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124820>. Acesso em: 15 jan. 2022.

LIANG, L. Phenology. In: **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. [s.l.] Elsevier, 2019.

LIRA, V. M. DE. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco**. 2008. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro De Tecnologia E Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2008.

LIU, C. Y.; ARYASTANA, P.; LIU, G. R.; HUANG, W. R. Assessment of satellite precipitation product estimates over Bali Island. **Atmospheric Research**, v.

244, p. 105032, 1 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105032. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105032>. Acesso em: 27 jun. 2021.

MARASCA, I. et al. Morfología de la caña de azúcar en la preparación profunda del suelo en canteros. **Idesia (Arica)**, v. 33, n. 4, p. 23–29, nov. 2015.

MAYER, T.; POORTINGA, A.; BHANDARI, B.; NICOLAU, A. P.; MARKERT, K.; THWAL, N. S.; MARKERT, A.; HAAG, A.; KILBRIDE, J.; CHISHTIE, F.; WADHWA, A.; CLINTON, N.; SAAH, D. Deep learning approach for Sentinel-1 surface water mapping leveraging Google Earth Engine. **ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 2, p. 100005, 1 dez. 2021.

MUÑOZ, C. A. U.; TRUJILLO, F. DE J. V. Effects of meteorological variables on sugarcane ripening in the Cauca river valley, Colombia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, 2020.

NASCIMENTO, E. F.; PEREIRA, F. A. C.; AGUIAR NETTO, A. O.; CAMPECHE, L. F. S. M.; SANTOS, C. A. Comportamento físico-hídrico dos solos do perímetro irrigado Curaçá em Juazeiro/BA. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 4, p. 435-447, 2012. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n4p435>. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/103>. Acesso em: 18 jan. 2022.

NAWAZ, M.; IQBAL, M. F.; MAHMOOD, I. Validation of CHIRPS satellite-based precipitation dataset over Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 248, n. 105289, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105289. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105289>. Acesso em: 26 jan. 2022.

OELSEN, C.; FREDERIC J.; BREDDELS, M.; FORDE, J. Z. **JUPYTER**. 2020. Disponível em: <https://jupyter.org/about>. Acesso em: 26 dez. 2020.

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 139, p. 26-40, 2017. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.12.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>. Acesso em: 22 jul. 2021.

PINTO SANTIAGO, E. J.; OLIVEIRA, G. M. DE; LEITÃO, M. D. M. V. B. R.; MOURA, M. S. B. DE; GONÇALVES, I. S. Precipitação esperada, em diferentes níveis de probabilidade, na região de Juazeiro, BA. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 457–464, 2017.

POLÔNIO, V. D. **Índices de vegetação na mensuração do estoque de carbono em áreas com cana-de-açúcar**. 2015. 74 f. Dissertação (mestrado em agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2015.

POSSEBON, I. F.; POLLI, H. Q. Cultivo orgânico da cana de açúcar. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 517–529, 2020. DOI: 10.31510/infa.v17i1.832. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31510/infa.v17i1.832>. Acesso em: 01 jul. 2021.

PRAKASH, S. Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI, and TMPA precipitation products across India. **Journal of Hydrology**, v. 571,

p. 50-59, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.036. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.036>. Acesso em: 05 nov. 2021.

PRASAI, R.; SCHWERTNER, T. W.; MAINALI, K.; MATHEWSON, H.; KAFLEY, H.; THAPA, S.; ADHIKARI, D.; MEDLEY, P.; DRAKE, J. Application of Google earth engine python API and NAIP imagery for land use and land cover classification: A case study in Florida, USA. **Ecological Informatics**, v. 66, p. 101474, 1 dez. 2021.

RAMÍREZ-CUESTA, J. M. *et al.* Characterization of the main land processes occurring in Europe (2000-2018) through a MODIS NDVI seasonal parameter-based procedure. **Science of The Total Environment**, v. 799, p. 149346, dez. 2021.

REYMUNDO, B. J. Q.; ACEVEDO, R. H. R. Temperatura superficial y estado de la vegetación del bosque de *Polylepis* spp, distrito de San Marcos de Rocchac, Huancavelica – Perú. **Enfoque UTE**, v. 11, n. 3, p. 69–86, 2020. DOI: 10.29019/enfoqueute.v11n3.592. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n3.592>. Acesso em: 30 jul. 2021.

RIDESA. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. **Plataforma Ridesa**. 2019. Disponível em: <https://www.ridesa.com.br>. Acesso em: 24 set. 2021.

RIVERA, J. A.; MARIANETTI, G.; HINRICHS, S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. **Atmospheric Research**, v. 213, p. 437–449, 2018. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.06.023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>. Acesso em: 30 dez. 2020.

ROCHA, M. DE J. D.; MAGALHÃES, J. H. F.; LIMA NETO, I. E.; SILVEIRA, C. DA S. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas na precipitação para os quatros cenários de Representative Roncentration Pathway do IPCC em Juazeiro do Norte, Ceará. In: Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste - SRHNE, 15., 2020, Pernambuco, **Anais[...]**. Caruaru: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 1 - 10, 2020.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 371p. 1974.

RUIMY, A.; SAUGIER, B.; DEDIEU, G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 5263–5284, 1994.

RUNNING, S.W., NEMANI, R.R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 347–367, 1988.

SÁ, Pâmella Crisley Costa de. **Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital**. 2016. 60 f. Dissertação (Mestrado em Manejo De Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

SANTANA, A. V. de; HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; NASCENTE, A. S. Índice de refletância na estimativa da área foliar e biomassa das folhas em feijão-. **Colloquium Agrariae**, v. 12, p. 13, 2016.

SANTIAGO, E. J. P.; CANTALICE, J. R. B.; MOUCO, M. A. DO C.; OLIVEIRA, G. M. DE; LUCENA, R. G. DE. Análise probabilística do comportamento térmico para tomada de decisão quanto ao florescimento de mangueiras cv. Palmer em Juazeiro-BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26., 2019, Bahia . **Anais [...]**. Juazeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf). p. 1035-1038, 2019.

SANTOS, J. E. O.. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto no município de Botucatu-SP**. 2016. 64f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Faculdade De Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, UNESP. Botucatu, 2016.

SANTOS, J. É. O.; NICOLETE, D. A. P.; FILGUEIRAS, R.; LEDA, V. C.; ZIMBACK, C. R. L. Imagens do Landsat-8 no mapeamento de superfícies em área irrigada. Irriga, Botucatu, **Edição Especial Irriga & Inovagri**, v. 1, n. 2, p. 3036, 2015.

SANTOS, J. M.; LOPES, P.M.O.; MOURA, G.B.A.; SILVA, A. S.; SILVA, J. L. B.; OLIVEIRA JUNIOR, J. G. Análise de canaviais irrigados com parâmetros biofísicos por sensoriamento remoto no Nordeste Brasileiro, **Revista Irriga**, no prelo, 2021.

SCHRÖDER, M.; STAEHLKE, S.; KRÜGER, F. Encoding Reproducible and Executable Experiments with Jupyter Notebooks. In: WOLKENHAUER, O. (Ed.). . **Systems Medicine**. Oxford: Academic Press, p. 431–444, 2021.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Bimetrika**, Oxford, Inglaterra, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. DOI: 0.1093/biomet/52.3-4.591. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SILVA, A. S. DA, **Estimativa De Produtividade Da Cana-De-Açúcar Utilizando Dados Agrometeorológicos E Imagens Do Sensor Modis**. 2016. 90 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, 2016.

SILVA, E. R., M., BARBOSA, I. C. C., SILVA, H. J. F., COSTA, L. G. S., ROCHA, E. J., P. Análise do Desempenho da Estimativa de Precipitação do Produto CHIRPS para Sub-Bacia do Rio Apeú, Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1094-1105, 2020.

SILVA, J. P. N.; SILVA, M. R. N.. **Noções da cultura da cana-de-açúcar**. Inhum-GO: Instituto Federal de Goiás; Santa Maria-RS: Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. P. 105, 2012.

SILVA, T. G. F.; SOUZA, C. A. A.; MOURA, M. S. B.; MARIN, F. R.; CARVALHO, H. F. S.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÍNCIO, J. D. Balanço de energia, emissão foliar e eficiência do uso da radiação pela cana-de-açúcar em cultivo sem e com palhada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos

Campos, v. 34, n. 1, p. 69-78, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/xL8h8WZPBhPkBMdL7Ld4q8K/?lang=pt>
Acesso em: 22 jan. 2022.

SONG, X.; SONG, Y. Introducing 3-PG2Py, an open-source forest growth model in Python. **Environmental Modelling & Software**, v. 150, p. 105358, 1 abr. 2022.

SPARKS, T.; MENZEL, A. Plant Phenology Changes and Climate Change. In: LEVIN, S. A. (Ed.). **Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)**. Waltham: Academic Press, p. 103–108, 2013.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; SILVA, T. G. F. DA; REIS, V. C. DA S. Radiação solar global e insolação no município de Juazeiro-BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Paraná. **Anais [...]**. Foz de Iguaçu: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). p. 2353-2358, 2002.

TERRES, J., M.; DELINCE, J.; VAN DE STEENE, M.; HAWKINS, A. The use of remote sensing and GIS capabilities to support the reform of the common agricultural policy of the European Community. **Remote Sensing Reviews**, v. 12, p. 53-60, 1995.

TOTÉ, C.; Patricio, D.; BOOGAARD, H.; WIJNGAART, R. V. D.; TARNAVSKY, E.; FUNK, C. Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1758-1776, 2015. DOI: 10.3390/rs70201758. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs70201758>. Acesso em: 01 nov. 2021.

WARMERDAM, F.; ROUAULT, E.; SCHWEHR, K.; KISELEV, A. **GDAL**. 2020. Disponível em: <https://gdal.org/>. Acesso em: 26 dez. 2020.

WILLMOTT, C. J. On the validation models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

XAVIER, G. DE O.; ALMEIDA, T. DE; OLIVEIRA, C. M. M. DE; OLIVEIRA, P. D. S. DE; COSTA, V. H. B.; GRANADO, L. M. A. Estimate and evaluation of reservoir metrics in Serra da Mesa dam (GO) using the Google Earth Engine platform. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 15, n. 5, e2584, 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2584. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2584>. Acesso em: 20 dez. 2020.

XU, X.; CONRAD, C.; DOKTOR, D. Optimising Phenological Metrics Extraction for Different Crop Types in Germany Using the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 254, 2017. DOI: 10.3390/rs9030254. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs9030254>. Acesso em: 18 dez. 2021.

ZHANG, X.; DU, X.; HONG, J.; DU, Z.; LU, X.; WANG, X. Effects of climate change on the growing season of alpine grassland in Northern Tibet, China. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01126, set. 2020.