



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

CAICK MARCELO ROSA MARTINS

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CANAVIAIS EM DIFERENTES FASES  
FENOLÓGICAS POR SENSORIAMENTO REMOTO NO VALE DO SUBMÉDIO DO  
SÃO FRANCISCO**

RECIFE – PE

2019

CAICK MARCELO ROSA MARTINS

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CANAVIAIS EM DIFERENTES FASES  
FENOLÓGICAS POR SENSORIAMENTO REMOTO 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: Agrometeorologia.

Autor : Caick Marcelo Rosa Martins

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

Co-orientador: Prof. Dr. Anderson Santos da Silva

RECIFE – PE

2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

M386e     Martins, Caick Marcelo Rosa.  
              Evapotranspiração de canaviais em diferentes fases fenológicas por  
Sensoriamento remoto no Vale do Submédio do São Francisco / Caick Marcelo  
Rosa Martins. – Recife, 2019.  
              86 f.: il.

              Orientador(a): Fabrício Marcos Oliveira Lopes.  
              Coorientador(a): Anderson Santos da Silva.  
              Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2019.  
              Inclui referências.

              1. Cana-de-açúcar 2. Landsat-8 3. Sensor MODIS 4. Fenológicos 5. Semiárido  
I. Lopes, Fabrício Marcos Oliveira, orient. II. Silva, Anderson Santos  
da, coorient. III. Título

CDD 664

CAICK MARCELO ROSA MARTINS

APROVADO EM: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CANAVIAIS EM DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS POR  
SENSORIAMENTO REMOTO NO VALE DO SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO

---

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes – UFRPE  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura – UFRPE  
(Examinador interno)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Cristina Rodrigues Nascimento - UFRPE  
(Examinadora externa)

---

Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega - UFPE  
(Examinador externo)

## **DEDICO**

Aos meus pais Ana Lúcia Rosa e Aelson de Jesus Martins, que nunca mediram esforços para me ajudar;

À Suzele Aragão, a minha namorada e fiel companheira que sempre me apoiou;

Às minhas irmãs Nathália e Thamires, e aos meus sobrinhos Ana Camille e Kayron;

À minha vizinha Joana que é uma inspiração na minha vida;

Às minhas tias Vitalina Carvalho Rosa e Antonia Rosa representando toda a minha família Rosa;

À minha família Martins;

À todas as pessoas negras e pobres desse país, sobretudo as maranhenses como eu;

À todas as pessoas que acreditaram no meu potencial pessoal e profissional;

À Josemichael Martins e Carla Rosa (In memoriam) meus primos que faleceram, os seus sonhos continuam vivos comigo;

À minha madrinha Dulce Maria (In memoriam), que se estivesse viva estaria muito orgulhosa de minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal Rural de Pernambuco que me abrigou proporcionando aprendizados que levarei para o restante de minha vida pessoal e profissional;

Ao Prof. Fabrício Marcos Oliveira Lopes que aceitou o desafio de ser meu orientador e pelos ensinamentos repassados desde o início deste trabalho;

À Jhon Lennon que me auxiliou muito e foi fundamental para a realização do trabalho me dando dicas e compartilhando conhecimento;

Agradeço à minha mãe Ana Lúcia Rosa que sempre esteve ao meu lado me apoiando em minhas decisões. Sempre me deu forças e serve de inspiração na minha vida, que passou por inúmeras dificuldades na vida, mas nunca desistiu para dar um futuro melhor aos seus filhos. Meu exemplo;

Ao meu pai Aelson de Jesus Martins que sempre batalhou por mim e que nunca mediu esforços para me dar sempre o melhor;

Em nome de Maria Vitalina Carvalho Rosa agradeço à toda família Rosa, que me abrigou e me fez sentir mais seguro por ter uma família tão abençoada;

À Suzele Aragão da Silva (Sudjah) minha namorada e fiel companheira, por todo amor, incentivo e sempre estar ao meu lado suportando comigo as tristezas e alegrias;

Agradeço aos meus amigos de infância pela amizade e amor. Antônio Neto, Hans Müller, Rômulo, Cássio, Anilton (Nih) e Renan José;

Aos meus amigos que fiz na pós-graduação pelo apoio: José Edson, Olímpio, Keila, Juliana, Juez, Anabel, Hélio, Jhon Lennon, Carlos Donato, Sirleide, Pedro Francisco;

Agradeço a todos que participaram da construção deste trabalho de forma direta e indireta.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Origem da cana-de-açúcar no Brasil.....	19
3.2 Panorama econômico-comercial da cana-de-açúcar.....	19
3.3 Caracterização fisiológica da cana-de-açúcar.....	20
3.4 Balanço de radiação à superfície .....	21
3.5 Evapotranspiração.....	22
3.6 Evapotranspiração de referência obtida conforme método de Priestley-Taylor ( $ET_{0(PT)}$ ).....	22
3.7 Evapotranspiração real ( $ET_r$ ).....	23
3.8 Satélite Landsat-8.....	24
3.9 Satélite Terra.....	25
3.10 Produtos sensor MODIS – EVI.....	25
3.11 Avaliação espectral de fases fenológicas.....	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1 Caracterização da área de estudo.....	27
4.2 Dados Orbitais.....	28
4.3 Dados Meteorológicos.....	29
4.4 Processamento de imagens e balanço de radiação à superfície.....	29
4.5 Fluxo de Calor no Solo ( $G$ ) .....	33
4.6 Fração de Cobertura Vegetal - FCV.....	33
4.7 Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura -TVDI.....	34
4.8 Coeficiente de Priestley-Taylor ( $\alpha_{PT}$ ).....	34
4.9 Declividade da curva de pressão de vapor ( $\Delta$ ).....	35
4.10 Constante psicométrica modificada ( $\gamma^*$ ).....	35
4.11 Fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ).....	35
4.12 Evapotranspiração de referência Priestley-Taylor ( $ET_{0(PT)24h}$ ) .....	35
4.13 Evapotranspiração de referência padrão da FAO ( $ET_0$ 24h).....	36
4.14 Coeficiente de cultivo ( $k_c$ ).....	36
4.15 Evapotranspiração real ( $ET_r$ ).....	36
4.16 Avaliação estatística (validação).....	36
4.17 Classificação do uso da terra e cobertura vegetal.....	37
4.18 Série temporal do EVI/MODIS.....	38

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1 Avaliação dos dados SONDA.....	40
5.2 Classificação do uso da terra e cobertura vegetal.....	43
5.3 Série temporal da cobertura vegetal - EVI/MODIS.....	47
5.4 Albedo da Superfície ( $\alpha$ ).....	48
5.5 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).....	51
5.6 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).....	53
5.7 Índice de Área Foliar (IAF).....	55
5.8 Temperatura da Superfície (TS).....	57
5.9 Balanço de Radiação à superfície ( $R_n$ ).....	59
5.10 Fluxo de Calor no Solo (G).....	61
5.11 Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura –TVDI.....	63
5.12 Coeficiente Priestley-Taylor ( $\alpha_{PT}$ ).....	65
5.13 Fluxo de Calor Latente ( $\lambda E$ ).....	67
5.14 Evapotranspiração de referência de Priestley-Taylor ( $ET_{0(PT)}$ ).....	69
5.15 Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar (Kc).....	72
5.16 Avaliação estatística (validação).....	73
6. CONCLUSÕES.....	74
7. REFERÊNCIAS.....	75



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fases fenológicas da cana-de-açúcar.....	21
<b>Figura 2.</b> Temperatura da superfície em função do NDVI - (TVDI).....	23
<b>Figura 3.</b> Localização da área de estudo.....	27
<b>Figura 4.</b> Fluxograma das etapas do processamento para obtenção do balanço de radiação à superfície.....	30
<b>Figura 5.</b> Talhão Dominicana de cana-de-açúcar da AGROVALE.....	39
<b>Figura 6.</b> Radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar.....	41
<b>Figura 7.</b> Radiação solar e velocidade do vento.....	42
<b>Figura 8.</b> Cartas de uso da terra e cobertura vegetal para o período de 2012 a 2016 na região do Vale do Submédio São Francisco .....	46
<b>Figura 9.</b> Série temporal do EVI/MODIS para o período de 2012 a 2016 - Talhão Dominicana.....	48
<b>Figura 10.</b> Cartas de albedo da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	50
<b>Figura 11.</b> Cartas de NDVI da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	52
<b>Figura 12.</b> Cartas de SAVI da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	54
<b>Figura 13.</b> Cartas de IAF da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	56
<b>Figura 14.</b> Cartas de temperatura da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	58
<b>Figura 15.</b> Cartas de balanço de radiação à superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	60
<b>Figura 16.</b> Cartas de fluxo de calor no solo da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	62
<b>Figura 17.</b> Cartas de TVDI da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	64
<b>Figura 18.</b> Cartas de coeficiente Priestley-Taylor da superfície da cana-de- na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	66
<b>Figura 19.</b> Cartas de fluxo de calor latente da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	68
<b>Figura 20.</b> Cartas de Evapotranspiração de referência Priestley-Taylor da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	71
<b>Figura 21.</b> Série temporal do EVI/MODIS no Talhão Dominicana de cana-de-açúcar da AGROVALE.....	72
<b>Figura 22.</b> Evapotranspiração da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	73

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1.</b> Valores médios de $ET_{0(PM)}$ para diferentes regiões agroclimática em $mm.dia^{-1}$ .....	22
<b>Tabela 2.</b> Valores do coeficiente da cultura da cana-de-açúcar ( $K_c$ ).....	24
<b>Tabela 3.</b> Características do Satélite Landsat-8.....	24
<b>Tabela 4.</b> Dados orbitais referentes às imagens do satélite Landsat-8.....	28
<b>Tabela 5.</b> Dados meteorológicos da estação automática do SONDA referentes às imagens do satélite Landsat-8.....	29
<b>Tabela 6.</b> Coeficiente de cultivo médio da cana-de-açúcar.....	36
<b>Tabela 7.</b> Coeficiente de correção estatística ou coeficiente de correção de Pearson.....	37
<b>Tabela 8.</b> Índice Kappa e o correspondente desempenho da classificação.....	38
<b>Tabela 9.</b> Classificação do uso da terra e cobertura vegetal na região do Vale do Submédio do São Francisco.....	45
<b>Tabela 10.</b> Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar no talhão Dominicana da AGROVALE.....	72

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

DAP	Dias após o plantio
DOS1	<i>Dark Object Substraction-1</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FCV	Fração de Cobertura Vegetal
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
IAF	Índice de área foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	Números Digitais
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	<i>Operacional Land Imager</i>
SATVeg	Sistema de Análise Temporal da Vegetação
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission.</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TVDI	<i>Temperature Vegetation Dryness Index</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

"a" e "b"	coeficientes linear e angular da reta
%	porcentagem
$\epsilon_0$	emissividades da superfície
$\lambda E$	fluxo de calor latente
$\epsilon_{NB}$	emissividade do satélite
$\alpha_{atm}$	reflectância da atmosfera
$\alpha_{toa}$	albedo no topo da atmosfera
$R_{24h}$	radiação solar global diária
$t_{24h}$	Transmitância atmosférica média diária
$\Delta$	Declividade da curva de pressão de vapor
°C	Grau Celsius
$AL_i$	Fator aditivo específico de cada banda espectral
C1	coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho
C2	coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul
$D_r$	Distância relativa Terra-Sol
$E_s$	Declividade da curva de pressão de vapor
ET0	Evapotranspiração de referência
(ET0 <sub>PT</sub> )	Evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor
ET <sub>p</sub>	Evapotranspiração potencial
ET <sub>r</sub>	Evapotranspiração real
G	Fluxo de Calor no Solo
G'	fator de ganho
hPa	hectopascal
I	i bandas espectrais
K	Kelvin
K <sub>p</sub>	coeficiente Kappa
K <sub>1</sub> e K <sub>2</sub>	constantes de calibração banda 10 Landsat-8
K <sub>c</sub>	coeficiente de cultura
km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
$k_{s,i}$	irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera
L	fator de ajuste do SAVI
L'	fator de correção para a interferência do solo
LE	Fluxo de calor Latente
m	metro
ML <sub>i</sub>	Fator multiplicativo específico de cada banda espectral
mm	milímetro
mm.dia <sup>-1</sup>	Milímetros por dia
ms <sup>-1</sup>	Metros por segundo
NDVImax	valor máximo da figura de NDVI
NDVImin	valor mínimo da figura de NDVI
P	Pressão atmosférica
Patm	Pressão atmosférica
r	coeficiente de correlação simples de Pearson
R <sup>2</sup>	coeficiente de determinação

$R_{L\downarrow}$	radiação de onda longa incidente
$R_{L\uparrow}$	radiação de onda longa emitida
$R_n$	Balço de Radiação instantâneo
$S$	Constante Solar (1367 W.m <sup>-2</sup> )
t.ha <sup>-1</sup>	Tonelada por hectare
$T_a$	Temperatura do ar
$U_2$	velocidade do vento à 2 m de altura
W.m <sup>-2</sup>	Watts por metro quadrado
$Z$	ângulo zenital solar
$\alpha'$	coeficiente de Priestley-Taylor
$\Gamma$	constante psicométrica
$\gamma^*$	Constante psicométrica modificada
$\epsilon_a$	emissividade atmosférica
$\mu\text{m}$	micrômetro
$\rho_4$	reflectância do vermelho
$\rho_5$	reflectância do infravermelho próximo
$\rho_{IVP}$	reflectância no infravermelho próximo
$\rho_V$	reflectância no vermelho
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann
<b><math>\alpha_{PT}</math></b>	coeficiente Priestley-Taylor
$\tau_{sw}$	transmissividade atmosférica

MARTINS, C. M.R. **Evapotranspiração de canaviais em diferentes fases fenológicas por sensoriamento remoto no Vale do Submédio do São Francisco**. 2019. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE.

**Autor: Caick Marcelo Rosa Martins**

**Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes**

## **RESUMO**

A cana-de-açúcar no Brasil se destaca devido seu grande potencial para produção de massa seca e energia e assim como toda cultura, potencializa sua produtividade a partir da gestão e do planejamento. Na região do Vale do Submédio do São Francisco os índices produtivos da cana-de-açúcar são elevados, devido ao emprego da irrigação durante o ciclo de produção. Considerando o atual cenário de escassez dos recursos hídricos, se fazem cada vez mais necessários melhores manejos para o controle da disponibilidade de água, aumentando a eficiência da irrigação, diminuindo gastos financeiros e atenuando desperdício de água. É necessário o aprimoramento de ferramentas para a obtenção da evapotranspiração, utilizada na estimativa da demanda hídrica da cultura, que permitam realizar um melhor planejamento da utilização e conservação dos recursos hídricos disponíveis para a agricultura. Para isso, estão sendo empregadas diversas técnicas como o sensoriamento remoto, além do uso de equações matemáticas para estimar parâmetros biofísicos. O presente estudo objetivou estimar a evapotranspiração real conforme o método de Priestley-Taylor em áreas de produção da cana-de-açúcar de diferentes fases fenológicas na região do Vale do Submédio do São Francisco, utilizando sensoriamento remoto orbital e dados meteorológicos dos anos de 2013 a 2016. Foram utilizados dados meteorológicos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), junto ao Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados orbitais foram obtidos junto a plataforma de imagens do satélite Landsat-8 no banco de dados da Agência Espacial Norte-Americana (NASA). O processamento de imagens para a obtenção dos parâmetros biofísicos e a classificação supervisionada ocorreu no programa Quantum Gis 2.18.11. Foram utilizados produtos do sensor MODIS para caracterizar o comportamento da superfície da cana-de-açúcar ao longo do seu ciclo fenológico. Os parâmetros biofísicos apresentaram variações conforme a densidade da cobertura vegetal e o estágio fenológico da cana-de-açúcar. A evapotranspiração de Priestley-Taylor apresentou variação de 0,00 a 5,84 mm.dia<sup>-1</sup>, os maiores valores foram encontrados em áreas com avançada presença de biomassa, assim como os menores valores foram encontrados em áreas com baixa presença vegetal. Isso comprava a relação de proporcionalidade entre a evapotranspiração e os índices de vegetação (NDVI, SAVI, IAF e EVI). Conclui-se que o método Priestley-Taylor (1972) foi capaz de estimar a evapotranspiração de referência em áreas de produção da cana-de-açúcar em estágios fenológicos distintos na região do Vale do Submédio do São Francisco de modo satisfatório.

**Palavras-chave:** cana-de-açúcar, Landsat-8, Sensor MODIS, estágios fenológicos, semiárido

MARTINS, C. M.R. **Evapotranspiration of sugarcane in different phenological phases by remote sensing in the São Francisco Sub-medium Valley**. 2019. 86 f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco - UFRPE.

**Autor: Caick Marcelo Rosa Martins**

**Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes**

Sugarcane in Brazil stands out due to its great potential for production of dry mass and energy and, like all crops, it boosts productivity through management and planning. In the Vale do Submédio do São Francisco region, sugarcane production rates are high due to the use of irrigation during the production cycle. Considering the current scenario of scarcity of water resources, better management is increasingly necessary to control the availability of water, increasing the efficiency of irrigation, reducing financial expenses and reducing water waste. It is necessary to improve tools to obtain evapotranspiration, used to estimate the crop's water demand, which allow better planning of the use and conservation of water resources available for agriculture. To this end, several techniques are being employed, such as remote sensing, in addition to the use of mathematical equations to estimate biophysical parameters. This study aimed to estimate the real evapotranspiration according to the Priestley-Taylor method in sugarcane production areas of different phenological phases in the São Francisco Sub-medium Valley region, using orbital remote sensing and meteorological data from 2013 to 2016. We used meteorological data from the National Institute for Space Research (INPE), the National Environmental Data Organization System (SONDA) and the National Institute of Meteorology (INMET). The orbital data were obtained from the Landsat-8 satellite imaging platform in the database of the U.S. Space Agency (NASA). The image processing to obtain the biophysical parameters and the supervised classification occurred in the Quantum Gis 2.18.11 program. MODIS sensor products were used to characterize the behavior of the sugarcane surface throughout its phenological cycle. The biophysical parameters varied according to the density of the vegetation cover and the phenological stage of the sugarcane. The evapotranspiration Priestley-Taylor ranged from 0.00 to 5.84 mm.day<sup>-1</sup>, the highest values were found in areas with advanced biomass presence, as well as the lowest values were found in areas with low plant presence. This purchased the relationship of proportionality between evapotranspiration and vegetation indices (NDVI, SAVI, IAF and EVI). We conclude that the Priestley-Taylor method (1972) was able to estimate the reference evapotranspiration in sugarcane production areas in different phenological stages in the São Francisco Sub-medium Valley region in a satisfactory way.

**Keywords:** sugarcane, Landsat-8, MODIS sensor, phenological stages, semi-arid.

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar no Brasil se destaca devido a seu grande potencial para produção de massa seca e energia por unidade de área. Nos últimos anos representa um dos grandes mercados agrícolas do país, com previsão de crescimento de 40% na área plantada e de 100% na produção para próxima década (CONAB, 2015).

A cana-de-açúcar apresenta grande adaptabilidade em diversas condições climáticas, e assim como toda cultura, potencializa sua produtividade a partir da gestão e do planejamento, favorecida pelo manejo adequado, verificando o consumo hídrico vegetal e repondo água no solo em quantidades corretas (DANTAS, 2013).

Todavia, considerando o atual cenário de escassez dos recursos hídricos, se fazem cada vez mais necessários melhores manejos e usos adequados para o controle da disponibilidade de água, melhorando a eficiência da irrigação (SANTOS et al., 2009).

Neste contexto, o conhecimento da evapotranspiração é de grande importância na estimativa da real necessidade de irrigação da cana-de-açúcar e de outras culturas, bem como para o manejo racional dos recursos hídricos, diminuindo gastos financeiros e atenuando o desperdício de água (SANTOS, 2016).

Diante disso, é necessário o aprimoramento de ferramentas para a obtenção da evapotranspiração, que permitam realizar um melhor planejamento da utilização e consequentemente conservação dos recursos hídricos disponíveis para a agricultura. Para isso, estão sendo empregadas diversas técnicas, das quais o sensoriamento remoto, nas últimas décadas, tem se destacado (MOREIRA et al., 2010).

O sensoriamento remoto, enquanto ferramenta importante no desenvolvimento da ciência, permite identificar parâmetros biofísicos à superfície relacionados ao clima a partir de imagens orbitais e dados complementares de superfície, desempenhando papel importante no monitoramento de áreas (DEVRIES et al., 2015).

Um caráter vantajoso do sensoriamento remoto, motivo pelo qual é bastante utilizado, é a agregação de informações de áreas com pequenas e grandes extensões, com diferentes resoluções espaciais e temporais, sendo possível realizar o acompanhamento e monitoramento de focos de queimadas, recursos hídricos e alterações no uso do solo (SANTOS et al., 2014).

Essas técnicas quando associadas aos algoritmos como SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) e SAFER (*Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration*) permitem realizar estimativas do balanço de radiação e evapotranspiração real e apresentam vantagens, possibilitando a aquisição de informações de locais de difícil acesso, uso de



diferentes escalas (local e regional), obtendo informações de forma rápida e eficiente a baixo custo (CASTILLO et al., 2015).

Além dos algoritmos, existe uma infinidade de equações empíricas como: Priestley-Taylor, Penman-Monteith entre outras, baseadas em modelos físico-matemáticos utilizadas para estimar a evapotranspiração. Cada modelo apresenta suas necessidades e características, exibindo respostas positivas e eficazes em suas aplicações. Estes modelos podem ser associados aos programas computacionais no intuito de facilitar a obtenção das variáveis estudadas (BORGES JÚNIOR et al., 2012).

Neste sentido, se faz necessário gerar conhecimentos sobre a distribuição espacial e temporal da evapotranspiração da cana-de-açúcar, utilizando ferramentas tecnológicas para subsidiar a utilização racional dos recursos hídricos, sobretudo no semiárido brasileiro, área deste estudo, que vem enfrentando sucessivos anos de secas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

- Estimar a evapotranspiração real utilizando o método de Priestley-Taylor em áreas de produção da cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas na região do Vale do Submédio do São Francisco, utilizando sensoriamento remoto orbital e dados meteorológicos.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Estimar e analisar o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), temperatura da superfície ( $T_s$ ), coeficiente de Priestley-Taylor ( $\alpha_{PT}$ ), albedo da superfície ( $\alpha$ ), Índice de área foliar (IAF); balanço de radiação instantâneo ( $R_n$ ) de talhões de canaviais;
  - Realizar classificação supervisionada do uso e ocupação do solo;
  - Utilizar séries temporais de cobertura vegetal do sensor MODIS para identificar talhões de canaviais e seus estágios fenológicos;
  - Avaliar estatisticamente o comportamento da vegetação de cana-de-açúcar frente aos parâmetros biofísicos no Vale do Submédio do São Francisco.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Origem da cana-de-açúcar no Brasil**

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. L.) apresenta várias linhas de centro de origem, uma delas relata que cultura é originária da Polinésia e teve sua distribuição realizada pelos árabes. Introduzida na América por Cristóvão Colombo, o cultivo da cana-de-açúcar se desenvolveu muito bem na região em função das condições edafoclimáticas propícias para a sua produção (SILVA & SILVA, 2012).

No Brasil foi introduzida no ano de 1532, primeiramente, na capitania de São Vicente, no litoral paulista, considerada a localidade pioneira a cultivar, pois nesta região foram registrados os primeiros engenhos e assim, disseminou por pequenas plantações no restante do litoral brasileiro (UDOP, 2017).

Em decorrência do incremento monetário advindo da produção da cultura, cidades produtoras prosperaram economicamente e a partir disso, o país se manteve entre os principais líderes de produção. Com o passar do tempo, devido à grande adaptabilidade às condições de clima do país, a produção se intensificou e o Brasil se transformou no principal ator no processo de monopolização da cana-de-açúcar, em sua maioria destinada ao exterior (CANABRAVA, 2005).

Na região Nordeste a cultura da cana-de-açúcar apresentou elevação na produção no período de 1970 a 1975, com recursos do programa do álcool (Proálcool), principalmente, nos tabuleiros costeiros por ser uma região mais favorecida por chuvas em determinados períodos do ano. Depois disso, ocorreu a expansão para as áreas do interior, sendo cultivada na região semiárida do Nordeste com destaque para o Vale do Submédio do São Francisco (SILVA et al., 2013).

#### **3.2. Panorama econômico-comercial da cana-de-açúcar**

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, com 20,3% da produção mundial, deste total, 32% são destinados ao consumo interno e 68% para a exportação (CONAB, 2016).

O cenário nacional na safra 2016/2017 apresentou uma leve queda se comparada a 2015/2016, no entanto, o país ainda permaneceu como maior produtor mundial. Ao contrário disso, a região Nordeste elevou sua produção no mesmo período, obtendo 48,83 milhões de toneladas (CONAB, 2017).

Grande parte da produção da região Nordeste é dependente das chuvas, apresentando estiagem, com longos períodos sem ocorrência de precipitação, conseqüentemente, provocando a redução da produção. Apesar disso, a região do Vale do Submédio do São Francisco tem ganhado destaque devido sua elevada produtividade, 91,2 t.ha<sup>-1</sup>, sendo maior que a média nacional de 76,6 t.ha<sup>-1</sup> (SILVA et al., 2012a).

O grande diferencial dessa região, para ter elevados índices produtivos, é a utilização da irrigação. O manejo da irrigação aplicada à cana-de-açúcar interfere diretamente no comportamento da cultura, pois promove o aumento na produtividade do colmo, no teor de sacarose, longevidade produtiva do canavial, precocidade da colheita, diminuição da taxa de tombamento, facilitando a colheita mecanizada, melhorando a circulação de máquinas e apresentando maior resistência às pragas e doenças (SANTOS et al., 2012).

### 3.3. Caracterização fisiológica da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à 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..

O vegetal apresenta-se em touceiras, sendo a parte aérea composta pelo caule tipo colmo com nós e entrenós bem definidos. As folhas estão aderidas aos colmos e se dispõem em opostas e alternas, são constituídas de forma completa pela lâmina foliar, bainha e colar (SILVA & SILVA, 2012).

A parte subterrânea é composta por raízes e caules subterrâneos, espessos e ricos em reservas nutritivas, providos de nós e entrenós que crescem horizontalmente, com sistema radicular fasciculado, que pode alcançar até quatro metros de profundidade (SANTOS, 2015).

A inflorescência da cana-de-açúcar é hermafrodita, sendo uma panícula, chamada de bandeira ou flecha, são flores pequenas formando espigas florais agrupadas em panícula com pendões terminais de coloração geralmente cinzas. O fruto é extremamente pequeno, suas dimensões aproximadas são de 1,5 mm x 0,5 mm (SILVA & SILVA, 2012).

O caule concentra o maior nível de sacarose no vegetal, além disso, apresenta em sua composição teores de glucose, frutose, material inorgânico, gomas, ceras e ácido, fibras e água. Ela se mostra eficiente no aproveitamento da luz e resistente as temperaturas elevadas na faixa de 30°C a 45°C (WONG SAK HOI & MARTINCIGH, 2013).

O comportamento da cultura varia durante os estádios fenológicos de acordo com cada cultivar. Neste sentido, o conhecimento do comportamento fisiológico é primordial para um

bom desenvolvimento da cultura durante o ciclo de produção, envolvendo todas suas fases de desenvolvimento, implicando na obtenção de bons índices produtivos (JADOSKI et al., 2010).

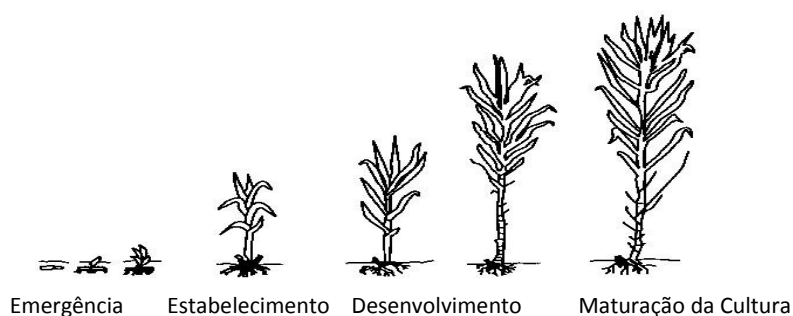
A cana-de-açúcar segundo classificação de Doorembos & Kassam (1979) apresenta as seguintes fases fenológicas de desenvolvimento, exibidas na Figura 1:

**Emergência** - etapa na qual ocorre a germinação e dura de 30 a 60 dias;

**Estabelecimento** - fase na qual o vegetal estabelece desenvolvimento do sistema radicular, emissão das primeiras folhas e tem duração de 60 a 90 dias;

**Desenvolvimento** - é a etapa em que ocorre o alongamento do colmo, inicia o acúmulo de sacarose e tem duração média de 180 a 210 dias;

**Maturação**, fase em que ocorre o acúmulo intenso de açúcares e seus colmos atingem o máximo potencial de sacarose e apresenta duração de 60 a 90 dias.



**Figura 1.** Fases fenológicas da cana-de-açúcar. Fonte: Doorembos & Kassam (1979); Monteiro (2009).

A produção de cana-de-açúcar apresenta dois tipos de ciclos: a “cana de ano”, na qual o plantio é realizado no início da estação chuvosa. Após o primeiro corte, a cana-soca passa a ter um ciclo de 12 meses (OLIVEIRA,2010).

A “cana de ano e meio”, na qual o plantio é realizado nos primeiros meses do ano com condições de temperatura e umidade favoráveis. A planta inicia o seu processo de maturação até completar 15 a 18 meses (OLIVEIRA,2010).

### 3.4. Balanço de radiação à superfície

O balanço de radiação (saldo de radiação) representa o cômputo das interações dos diversos tipos de energia com a superfície. Determina a quantidade de fluxo de energia, relacionando radiações incidentes, refletidas e/ou emitidas, incluindo as radiações de onda longa e de onda curta à superfície da Terra, representando a principal fonte de energia utilizada pelos processos físicos, químicos, biológicos e meteorológicos à superfície e às camadas inferiores da atmosfera (GOMES, 2009; BEZERRA, 2013).

A determinação do balanço de radiação pode ser realizada utilizando sensores automáticos ou por estimativas com emprego de modelos matemáticos, utilizados no monitoramento do clima, na previsão de tempo, na modelagem hidrológica e na meteorologia agrícola (BISHT et al., 2005).

Neste sentido, com o advento da tecnologia do sensoriamento remoto, estão sendo desenvolvidas técnicas para estimar componentes do balanço de radiação, utilizando imagens de satélites, diferentemente dos métodos tradicionais que fazem análises pontuais (VELOSO, 2014).

### 3.5. Evapotranspiração

A evapotranspiração é caracterizada como transferência de água, pelos vegetais e solo, para a atmosfera, na qual ocorre alteração no estado físico da água, de líquido para gasoso. É o somatório da evaporação e transpiração, sendo que as ações desses dois processos ocorrem de forma separada (KLAR, 1984; REICHARD & TIMM, 2012; PACHECO et al., 2014).

A evapotranspiração pode ser quantificada por métodos diretos com mensurações diretas, utilizando lisímetros ou por métodos indiretos utilizando fórmulas empíricas e modelos matemáticos, como Priestley-Taylor e Penman-Monteith (VELOSO et al., 2017).

Os métodos diretos geralmente possuem complexidade e custos elevados, necessitando de pessoas capacitadas para a realização das tarefas que demandam tempo, diferentemente dos métodos indiretos, baseados em equações matemáticas (BEZERRA et al., 2014).

A FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) adotou o modelo parametrizado da equação de Penman-Monteith FAO-56 como o padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência  $ET_{0(PM)}$ , por envolver maior número de variáveis climáticas (ALLEN et al., 1989; PEREIRA et al., 2013). A Tabela 1 apresenta valores médios típicos para  $ET_0$  FAO para diferentes regiões agroclimáticas.

**Tabela 1.** Valores médios de  $ET_{0(PM)}$  para diferentes regiões agroclimática em  $mm.dia^{-1}$

Regiões	Temperatura média diária		
	Esfriar ( $\sim 10^{\circ} C$ )	Moderado ( $20^{\circ} C$ )	Quente ( $>30^{\circ} C$ )
Trópicos e subtropicais			
Úmido e subúmido	2 a 3	3 - 5	5 a 7
Árido e semiárido	2 a 4	4 - 6	6 a 8
Região temperada			
Úmido e subúmido	1 - 2	2 a 4	4 - 7
Árido e semiárido	1 a 3	4 - 7	6 a 9

Fonte: Allen et al. (1989)

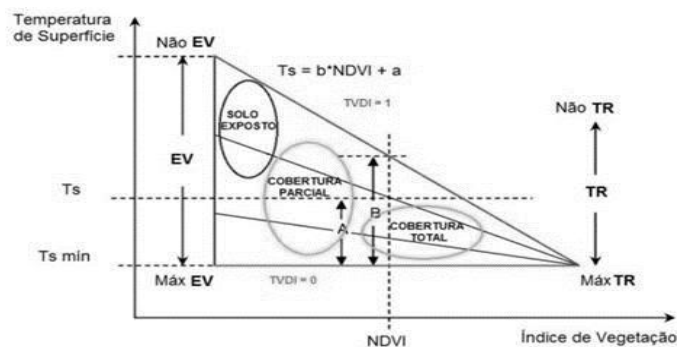
### 3.6. Evapotranspiração de referência obtida conforme método de Priestley-Taylor ( $ET_{0(PT)}$ )

O método Priestley-Taylor (1972) é uma simplificação do método Penman-Monteith para estimar  $ET_0$ , no entanto, este método necessita de calibração no parâmetro ambiental  $\alpha_{PT}$ , que varia em função das variáveis ambientais (NICHOLS et al., 2005).

A vantagem deste método é a necessidade da utilização de poucos dados (saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura do ar) para se estimar o fluxo de calor latente. Porém, a base teórica de  $\alpha_{PT}$  não é bem esclarecida, tendo em vista que pode apresentar variação substancialmente em função da rugosidade do dossel e da umidade da superfície do solo (Xu & Singh, 2000).

Khaldi et al. (2014) sugeriram uma expressão que combina o índice de ressecamento da vegetação por temperatura (TVDI) e a fração de cobertura vegetal (FCV) para estimar  $\alpha_{PT}$  para um dado pixel. Estes autores desenvolveram uma metodologia baseada no método do triângulo (Figura 2) que permite estimar  $ET_{0(PT)}$  em que  $\alpha_{PT}$  é calculado usando uma interpolação linear entre  $T_s$  (Temperatura da superfície) e NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada).

Os três pontos do triângulo correspondem as condições extremas da superfície em termos de  $T_s$  e NDVI, permitindo deduzir os valores extremos de  $T_s$  e NDVI (mínimos e máximos). Os valores típicos de  $\alpha_{PT}$  variam de 1,08 (evaporação do solo nu) a 1,32 (evapotranspiração do solo nos vegetais), com valor médio de 1,26, sendo este aplicado, principalmente, em climas úmidos.



**Figura 2.** Temperatura da superfície em função do NDVI-(TVDI). Adaptado de Sandholt et al., (2002). (TR Transpiração, EV Evaporação,  $T_s$  -Temperatura de Superfície).

### 3.7. Evapotranspiração real ( $E_{Tr}$ )

A determinação da  $E_{Tr}$  pode ser dada multiplicando-se a  $ET_0$  pelo coeficiente de cultura ( $K_c$ ). O  $K_c$  é uma variável dependente das condições ambientais e fisiológicas das

plantas e é determinado de acordo com as fases do ciclo da cultura (LONGHI, 2013). Os valores de Kc para a cana-de-açúcar, estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores do coeficiente da cultura da cana-de-açúcar (Kc)

Período de desenvolvimento	Dias de Ciclo	Coeficiente (kc)
Do plantio até 25% de cobertura	30 a 60 dias	0,40 a 0,60
De 25 a 50% de cobertura	30 a 40 dias	0,75 a 0,85
De 50 a 75% de cobertura	15 a 25 dias	0,90 a 1,00
De 0,75 a cobertura completa	45 a 55 dias	1,00 a 1,20
Utilização Máxima	180 a 330 dias	1,05 a 1,30
Início da senescência	30 a 150 dias	0,80 a 1,05
Maturação	30 a 60 dias	0,60 a 0,75

**Fonte:** Doorenbos & Kassam (1994)

### 3.8. Satélite Landsat-8

O satélite Landsat-8 (*Land Remote Sensing Satellite*) foi desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), objetivando coletar dados sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis da superfície terrestre e foi lançado no ano de 2013 a uma altitude de aproximadamente 705 km, contendo os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) (COELHO & CORRÊA, 2013).

Sua passagem na linha do Equador ocorre às 10:00 horas, com diferença de 15 minutos para mais ou para menos. A cobertura das imagens desse satélite é de praticamente todo o globo, com exceção para as mais altas latitudes polares, ocorrendo à revista a cada 16 dias. O tamanho aproximado da cena é de 170 km ao norte-sul por 183km a leste-oeste. A Tabela 3 exhibe as principais características do satélite Landsat-8 (COELHO & CORRÊA, 2013).

**Tabela 3.** Características do Satélite Landsat-8.

Sensores	Operational Land Imager (OLI)- bandas de 1 a 9 Thermal Infrared Sensor (TIRS)- bandas 10 e 11
Bandas espectrais/Resolução Espacial	Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)(0.435 - 0.451 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 2 - Blue (0.452 - 0.512 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 3 - Green (0.533 - 0.590 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 4 - Red (0.636 - 0.673 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 5 - Near Infrared (NIR) (0.851 - 0.879 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1 (1.566 - 1.651 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2 (2.107 - 2.294 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 8 - Panchromatic (0.503 - 0.676 $\mu\text{m}$ )15m
	Band 9 - Cirrus (1.363 - 1.384 $\mu\text{m}$ ) 30m
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1(10.60 - 11.19 $\mu\text{m}$ ) 100 *(30m)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2(11.50 - 12.51 $\mu\text{m}$ )100 *(30m)
Resolução Radiométrica	16 bits
Projeção	Projeção UTM, Datum WGS 1984
Revisita	16 dias
Órbita	Heliossíncrona

**Fonte:** Alvarenga & Moraes (2014).



### 3.9. Satélite Terra

A plataforma orbital TERRA foi lançada em 18 de dezembro de 1999 a bordo do veículo lançador Atlas IIAS, como parte do programa da NASA denominado *Earth Observing System* (EOS) em parceria com as agências aeroespaciais do Canadá e do Japão com o objetivo de monitorar os recursos da Terra, dos oceanos e da atmosfera que podem ser usados para estudos de processos e tendências em escala local como global (SILVEIRA, 2015).

O satélite começou a ser utilizado em fevereiro de 2000 e está a uma altura de 705km com inclinação de 98,2°, apresenta resolução temporal de 1 a 2 dias obedecendo órbita polar e heliossíncrona e dura cerca de 98 minutos o tempo de órbita (EMBRAPA, 2013).

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um dos cinco sensores a bordo do satélite Terra, desenvolvido pela Goddard Space Flight Center (NASA), possuindo 36 bandas espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  e resolução espacial que varia de 250 a 1000 metros. Apresenta resolução temporal de 1 e 2 dias conforme a resolução espectral de cada banda (EMBRAPA, 2013).

O sensor MODIS além de estar presente no satélite TERRA, está a bordo do satélite AQUA lançado em 2002, além disso, é utilizado para mensurar fluxo de energia radiante, propriedades dos aerossóis, no acompanhamento de cobertura vegetal e no monitoramento de atividades vulcânicas e queimadas (TELES, 2015).

### 3.10. Produtos do sensor MODIS-EVI

As imagens do sensor MODIS são utilizadas para obter diversos produtos, por exemplo, MOD13Q1 que fornece dados de índice de vegetação como o NDVI e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) - (Índice de Vegetação melhorado) com uma resolução temporal de 16 dias e uma resolução espacial de 250m.

O EVI apresenta grande sensibilidade às variações estruturais do dossel, permitindo uma melhor discriminação dos alvos, sendo utilizado para análise de fases fenológicas de diversas culturas (RISSO et al., 2012; JOHANN et al., 2012; SOUZA et al., 2015; GRZEGOZEWSKI et al., 2016). O EVI varia entre -1,0 a +1,0, representando melhor a dinâmica da vegetação ao longo de uma série temporal de imagens. Ele pode ser calculado pela Equação 2, conforme Huete et al. (1994):

$$\text{EVI} = G' * \frac{(\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}})}{(\rho_{\text{IVP}} + C1 * \rho_{\text{V}} - C2 * \rho_{\text{A}} + L')} \quad (1)$$

Sendo:

$G'$ : fator de ganho

$\rho_{IVP}$ : reflectância no infravermelho próximo;

$\rho_V$ : reflectância no vermelho;

$C1$ : coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho;

$C2$ : coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul;

$\rho_A$ : reflectância no azul;

$L'$ : fator de correção para a interferência do solo.

### **3.11. Avaliação espectral de fases fenológicas**

A partir do monitoramento da cobertura vegetal, o sensoriamento remoto possibilita a identificação de comportamentos da vegetação no decorrer do tempo. O NDVI e o EVI são índices de vegetação que analisam o comportamento da cobertura vegetal, permitindo acompanhar o desenvolvimento da cultura (BARIANI et al., 2016).

Estudos em escala regional são utilizados para identificar as diferentes fases fenológicas, além de analisar mudanças no uso e na cobertura da terra, utilizando índices de vegetação, os quais evidenciam variações sazonais, interanuais de parâmetros estruturais e biofísicos da vegetação (HUETE et al., 2002; CORREIA et al., 2006).

Informações obtidas conforme os comportamentos espectrais de alvos agrícolas são utilizados para discriminar e quantificar esses alvos na paisagem local, monitorando alterações na cobertura da superfície, assim como a discriminação de fases fenológicas das culturas, monitoramento da seca, estimando a produtividade e etc. (MENDES et al., 2014).

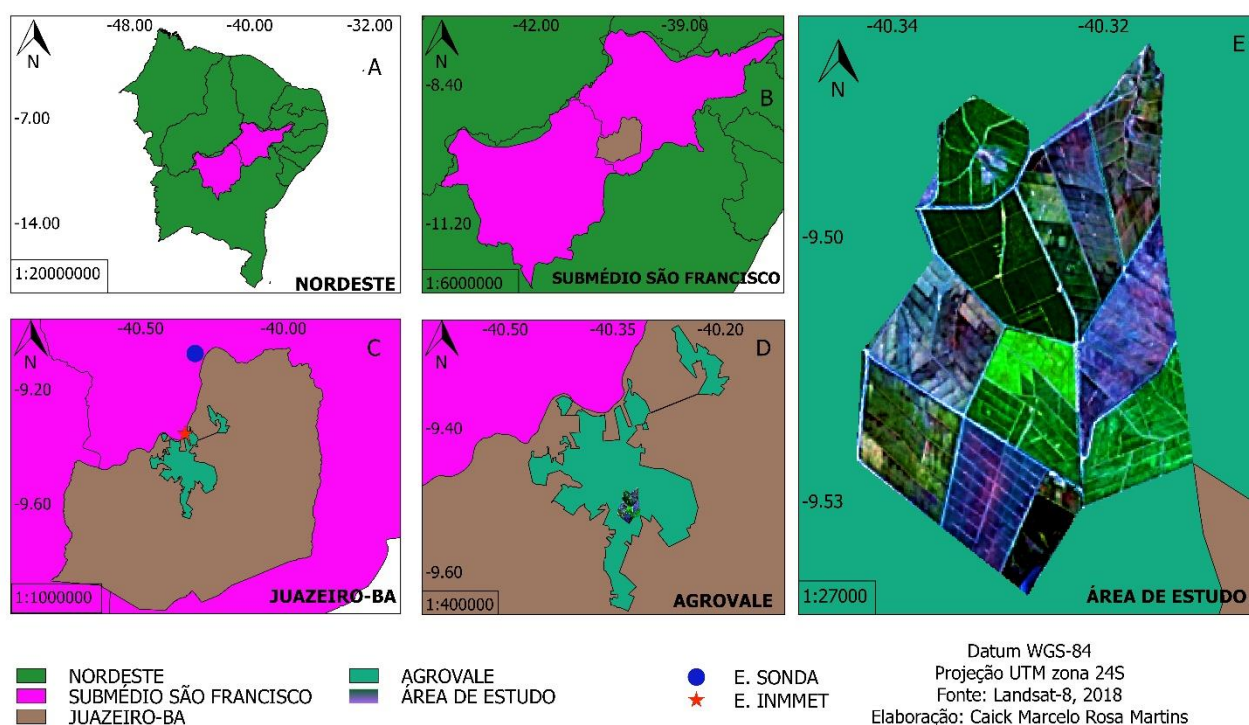
Diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas neste sentido utilizando de sensores a bordo de satélites para caracterizar fisiologicamente as culturas como Nhongo et al. (2017), Souza et al. (2014), e Teles (2015) avaliando diferentes tipos de cobertura vegetal em escalas sazonais distintas, mostrando, assim, a eficácia na análise em diferentes ambientes.

Neste sentido, séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS e de outros satélites têm sido utilizadas com sucesso para descrever os estágios fenológicos de cana-de-açúcar (AGUIAR et al., 2008; RAMME et al., 2010; XAVIER et al., 2006).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na região do Vale do Submédio do São Francisco (Figura 3), no município de Juazeiro-BA, nas áreas de cultivo pertencentes à empresa Agroindústria do Vale do São Francisco-AGROVALE S.A., que ocupa área aproximadamente de 20.000 ha de cana-de-açúcar irrigada, prevalecendo a irrigação superficial (gotejamento) e a principal variedade cultivada é a RB 92579 (SÁ, 2016).



**Figura 3.** Localização da área de estudo. (A) Nordeste; (B) Vale do Submédio do São Francisco (C) Juazeiro-BA; (D) AGROVALE; (E) Área de estudo cana-de-açúcar. Composição R-G-B.

A região do Vale do Submédio do São Francisco ocupa 110.445 km<sup>2</sup> (17% da área total da bacia) e segundo classificação climática de Köppen-Geiger (2007) apresenta clima BSh, predominando clima semiárido. A área possui precipitação média anual aproximada de 430 mm, distribuídos irregularmente durante o ano. A umidade relativa do ar média anual é de 66% e a temperatura média anual do ar é de 26,5°C (PINHEIRO et al., 2015; NEMUS, 2016; LOPES et al., 2017).

Os solos da região são classificados como planossolos solódico eutrófico, bruno não cálcico, cambissolo eutrófico, solos litólicos eutróficos, vertissolo. Quanto à topografia ocorre relevo plano e ondulado com vales abertos (NASCIMENTO et al., 2012).

A vegetação característica da região é majoritariamente pertencente ao bioma Caatinga, composto de árvores de cascas grossas, arbustos espinhentos com ramificações, plantas suculentas e herbáceas, que se desenvolvem com bastante vigor depois das chuvas. A maioria das plantas é xerófita, que perdem folhas dos arbustos no período da seca, apresentando poucas folhas largas (CRUZ et al., 2005).

A região ocupa áreas dos estados da Bahia e Pernambuco, estendendo-se de Remanso até a cidade de Paulo Afonso (BA), e incluindo as sub-bacias dos rios Pajeú, Tourão e Vargem, além da sub-bacia do rio Moxotó, último afluente da margem esquerda. A evapotranspiração média anual é de 1550 mm, sendo esta a região da bacia que apresenta maiores valores de evapotranspiração (MOURA et al., 2006; CODEVASF, 2019)

### 4.3. Dados Orbitais

As imagens do satélite Landsat-8 dos sensores OLI e TIRS foram adquiridas gratuitamente na página virtual da Agência Espacial Norte-Americana (NASA), referentes aos anos de 2013 a 2016. As cenas de 10 datas foram escolhidas considerando um valor máximo de até 20% de cobertura de nuvens, em formato Geotiff, de órbita/ponto 217/067, projeção cartográfica UTM Zona 24N sistemas de coordenadas geodésicas e Datum WGS-84, conforme a Tabela 5.

**Tabela 4.** Dados orbitais referentes às imagens do satélite Landsat-8.

Data	DJ- Dia Juliano	Hora	Nebulosidade	Ângulo Azimutal (°)	Ângulo Elevação (°)	Distância Terra-Sol
30/05/2013	150	12:50	4,81	39,746	48,314	1,013
03/09/2013	246	12:50	0,01	58,665	57,341	1,008
05/10/2013	278	12:50	0,00	79,980	64,700	0,999
02/06/2014	153	12:48	11,67	40,087	47,599	1,014
22/09/2014	265	12:48	0,00	70,157	61,669	1,003
24/08/2015	236	12:48	0,31	54,448	54,174	1,011
12/11/2015	316	12:48	0,00	110,44	65,193	0,989
14/12/2015	348	12:48	0,36	120,337	61,122	0,984
10/08/2016	223	12:48	4,00	49,500	51,116	1,013
30/11/2016	335	12:48	11,88	121,137	62,379	0,986

**Fonte:** (USGS, 2018).

## 4.2. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos do repositório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), junto ao Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) referentes aos anos de 2013 a 2016. As estações meteorológicas automáticas utilizadas neste estudo estão localizadas no município de Petrolina-PE, (09° 04' 08''S; 40° 19' 11''W; 387m -SONDA) e (09° 23'18''S; 40° 31' 23,74''W; 373m - INMET).

Os dados meteorológicos (Tabela 4) foram coletados conforme os dias de obtenção das imagens do Landsat-8, totalizando 10 datas para a obtenção das seguintes variáveis: Temperatura do ar (Ta, °C), Umidade Relativa do ar (UR, %), Pressão atmosférica (P, hPa), Radiação Global (RG, W.m<sup>-2</sup>), Velocidade do vento (ws, ms<sup>-1</sup>), Direção do vento (wd, Graus) e Precipitação (mm).

**Tabela 5.** Dados meteorológicos da estação automática do SONDA referentes às imagens do satélite Landsat-8.

Data	DJ	Hora	Ta (C°)	UR (%)	P (hPa)	RG (W.m <sup>-2</sup> )	Ws (m.s <sup>-1</sup> )	Wd (Graus)	Precipitação (mm)
30/05/2013	150	12:50	28,46	54,15	972,08	713,0	4,218	123,5	0
03/09/2013	246	12:50	26,05	49,19	973,35	803,0	5,144	114,4	0
05/10/2013	278	12:49	31,64	32,58	970,58	883,0	5,625	82,5	0
02/06/2014	153	12:47	27,20	52,97	970,02	701,0	4,240	99,1	0
22/09/2014	265	12:48	31,79	32,71	970,27	849,0	4,790	121,6	0
24/08/2015	236	12:47	26,58	47,62	972,85	809,0	4,160	123,0	0
12/11/2015	316	12:48	29,51	42,04	970,81	890,0	5,160	74,4	0
14/12/2015	348	12:48	29,87	41,97	970,81	937,0	4,920	124,8	0
10/08/2016	223	12:48	26,85	47,89	974,92	787,0	4,159	130,7	0
30/11/2016	335	12.48	31,62	45,39	968,8	916,0	3,380	87,7	0

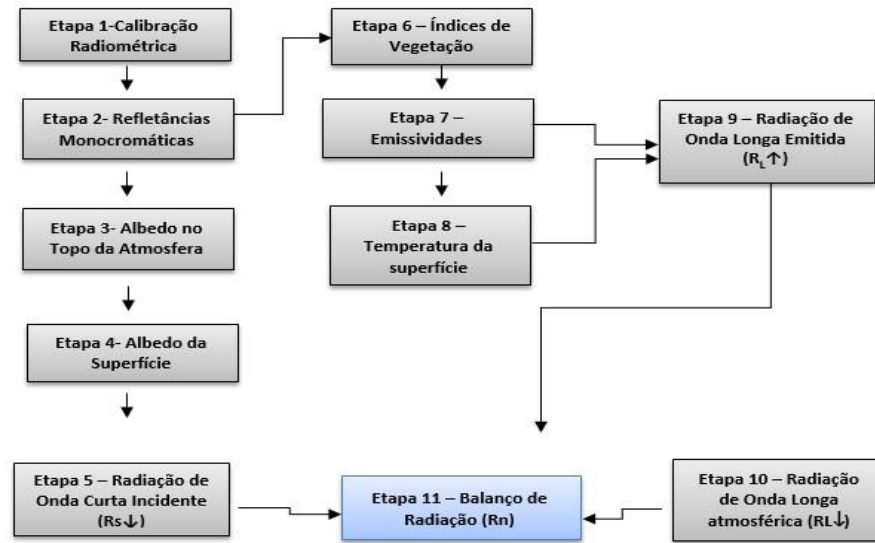
**Fonte:** (SONDA, 2018)

## 4.4. Processamento de imagens e balanço de radiação à superfície

Após a aquisição, as cenas foram manipuladas no programa Quantum Gis 2.18.11, no qual foram utilizadas as bandas multiespectrais: 2 a 7 e 10, com resolução espacial de 30m. O processamento das imagens Landsat-8 para a obtenção do balanço de radiação à superfície (Rn) obedeceu ao fluxograma descrito, resumidamente, na Figura 4.

A calibração radiométrica (Etapa 1) e a reflectância da superfície (Etapa 2) foram executadas automaticamente com o *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP). Este complemento também efetua a correção atmosférica usando o modelo DOS1 (*Dark Object Substraction*) para a reflectância de superfície. Em seguida, foram feitas, a composição colorida

em cor natural (RGB-bandas 432), reprojeção cartográfica (WGS84, UTM, 24S) e recorte da área de interesse.



**Figura 4.** Fluxograma das etapas do processamento para obtenção do balanço de radiação a superfície. **Fonte:** Bezerra (2013)

### Etapa 3- Albedo no Topo da Atmosfera ou Albedo Planetário

O albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) é a quantidade de radiação refletida de cada pixel sem correção atmosférica, que consiste em uma combinação linear da refletância espectral em cada uma das seis bandas refletivas do sensor OLI – Landsat-8 (bandas 2 a 7) e seus respectivos pesos (FAUSTO, 2014) estimados segundo estudos de Silva et al. (2016).

$$\alpha_{toa} = 0,300 * \rho_2 + 0,277 * \rho_3 + 0,233 * \rho_4 + 0,143 * \rho_5 + 0,035 * \rho_6 + 0,012 * \rho_7 \quad (2)$$

Sendo:  $\rho_2$ ;  $\rho_3$ ;  $\rho_4$ ;  $\rho_5$ ;  $\rho_6$  e  $\rho_7$  - as refletâncias monocromáticas sem correção atmosférica das bandas 2; 3; 4; 5; 6 e 7, respectivamente.

### Etapa 4- Albedo da Superfície

O albedo da superfície é um componente relevante para a estimativa do balanço de radiação, sendo chamado também de poder refletor da superfície, definido como o coeficiente de reflexão da superfície para a radiação de onda curta (DANTAS, 2013). O albedo da superfície ( $\alpha$ ) é obtido a partir da equação proposta por Bastiaanssen (1995):

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (3)$$

Sendo:  $\alpha_{atm}$  - reflectância da própria atmosfera que varia de 0,025 a 0,04, no entanto, recomenda-se usar 0,03 (Bastiaanssen, 2000);  $\tau_{sw}^2$  - transmissividade atmosférica.

A transmitância é definida como a fração de radiação incidente que é transmitida pela atmosfera e representa os efeitos de absorção e reflexão que acontecem dentro da atmosfera.

Em condições de céu claro e seco, transmitância é determinada levando em consideração a altitude, conforme a seguinte equação:

$$\tau_{sw}=0,75+2*10^{-5} *z \quad (4)$$

Sendo: z é a imagem de altitude (m) obtida do SRTM de 30 m de resolução espacial.

### **Etapa 5 – Radiação de Onda Curta Incidente ( $R_{s\downarrow}$ )**

A radiação de onda curta incidente  $R_{s\downarrow}$  ( $W.m^{-2}$ ) está relacionada aos fluxos de radiação solar direta e difusa que atingem a superfície terrestre em condição de céu claro (ALLEN et al., 2002) dada por:

$$R_{s\downarrow}=S* \cos Z*d_r*\tau_{sw} \quad (5)$$

Sendo: S - constante solar ( $1367 W.m^{-2}$ ).  $d_r$  - o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano (TASUMI, 2003), determinado pela seguinte equação:

$$d_r=1+0,033 \cos \left( DJ \frac{2\pi}{365} \right) \quad (6)$$

Sendo: DJ- Dia Juliano das imagens de satélite.

### **Etapa 6 – Índices de Vegetação (NDVI, SAVI e IAF)**

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação. Ele é determinado por meio da razão entre a diferença da refletância do infravermelho próximo ( $\rho_5$ ) e a do vermelho ( $\rho_4$ ) normalizada pela soma de ambas, corrigidas dos efeitos atmosféricos, como evidência a equação seguinte (ALLEN et al., 2002):

$$NDVI=\frac{\rho_5-\rho_4}{\rho_5+\rho_4} \quad (7)$$

Os valores de NDVI variam de -1 a +1, sendo que os valores positivos são obtidos em áreas com algum tipo de cobertura vegetal e de acordo com a atividade fotossintética e densidade de plantas, e em superfície com água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero (GIONGO, 2008).

O Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) proposto por Huete (1988) considera os efeitos do solo exposto nas imagens analisadas, tendo como objetivo amenizar os

efeitos do impacto da umidade do solo. Para isso o autor realizou ajustes que culminaram na seguinte equação para determinar o SAVI:

$$\text{SAVI} = \frac{(1+L)(\rho_4 - \rho_5)}{(L + \rho_4 + \rho_5)} \quad (8)$$

Sendo: L- constante denominada de fator de ajuste do índice, podendo assumir valores de 0,25 a 1,0 dependendo da cobertura do solo, sendo 0,25 para vegetação densa e 1,0 para vegetação com baixa densidade. Para esta pesquisa utilizou-se 0,1 devido a estudos mais recentes como propostos por Allen et al. (2007); Silva et al. (2011).

O Índice de Área Foliar (IAF) ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ) é um índice usado como indicador da biomassa de cada pixel da imagem, utilizado como medida de crescimento de plantas em modelos agrônômicos, expresso por (ALLEN et al., 2007):

$$\text{IAF} = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - \text{SAVI}}{0,59}\right)}{0,91} \quad (9)$$

### Etapa 7 – Emissividades

As emissividades do satélite ( $\epsilon_{\text{NB}}$ ) e da superfície ( $\epsilon_0$ ) são estimadas, considerando valores de  $\text{NDVI} > 0$  e de  $\text{IAF} < 3$ , por (ALLEN et al., 2002) :

$$\epsilon_{\text{NB}} = 0,97 + 0,0033 \text{ IAF} \quad (10)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \text{ IAF} \quad (11)$$

Além disso, para valores de pixel de  $\text{IAF} \geq 3$ , considera-se  $\epsilon_{\text{NB}} = \epsilon_0 = 0,98$  e para corpos hídricos ( $\text{NDVI} < 0$ )  $\epsilon_{\text{NB}} = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,985$ .

### Etapa 8 - Temperatura da superfície

A temperatura da superfície terrestre ( $T_s$ , K) é estimada por:

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{\epsilon_{\text{NB}} * K_1}{L_{\lambda_i}} + 1\right)} \quad (12)$$

Sendo:  $K_1$  e  $K_2$  – constantes obtidas nos metadados da banda 10 expressos em:  $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ,  $L_{\lambda_i}$  – radiância da banda termal 10 do sensor TIRS.



### Etapa 9 – Radiação de Onda Longa Emitida pela superfície ( $R_{L\uparrow}$ )

A  $R_{L\uparrow}$  ( $W.m^{-2}$ ) foi obtida através da lei da equação de Stefan-Boltzmann, conforme Allen et al. (2002):

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_o * \sigma * T_s^4 \quad (13)$$

Sendo:  $\sigma$  - constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 * 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$ .

### Etapa 10 – Radiação de Onda Longa Incidente ( $R_{L\downarrow}$ )

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície  $R_{L\downarrow}$  ( $W.m^{-2}$ ) é calculada de acordo com Bastiaanssen (1995) e Allen et al., (2002) por:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a * \sigma * T_a^4 \quad (14)$$

Sendo:  $T_a$  = temperatura do ar na hora da passagem do satélite (K);  $\epsilon_a$  - emissividade atmosférica, obtida pela equação:

$$\epsilon_a = 0,85 (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (15)$$

### Etapa 11 – Balanço de Radiação instantâneo ( $R_n$ )

O Balanço de radiação instantâneo ( $W.m^{-2}$ ) é obtido pela seguinte equação (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005):

$$R_n = (1-\alpha) RS_{\downarrow} + RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1-\epsilon_o) RL_{\downarrow} \quad (16)$$

#### 4.5. Fluxo de Calor no Solo (G)

O fluxo de calor no solo (G) foi estimado empiricamente conforme expressão sugerida por Bastiaanssen et al., (2000):

$$G = R_n \left( \left( \frac{T_s}{\alpha} \right) ( 0,0038 * \alpha + 0,0074 \alpha^2 ) ( 1 - 0,98 NDVI^4 ) \right) \quad (17)$$

#### 4.6. Fração de Cobertura Vegetal - FCV

A fração de cobertura vegetal é um indicador da fração da área horizontal de um pixel da imagem de satélite coberta por vegetação verde, e foi estimada conforme Choudhury et al. (1994):

$$FCV = \left( 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0,9} \right) \quad (18)$$

Sendo: NDVImax - valor máximo da imagem de NDVI; NDVImin- valor mínimo da imagem de NDVI. Os valores de FCV variam de 0 (solo exposto) a 1 (solo completamente vegetado).

#### 4.7. Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura -TVDI

O TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) proposto por Sandholt et al. (2002) estima a escassez de água da vegetação, monitora a umidade do solo e da vegetação (HUANG et al., 2013). O TVDI foi obtido conforme Sandholt et al. (2002) dado por:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (19)$$

Sendo: T<sub>s</sub>max, T<sub>s</sub>min são as temperaturas máxima e mínima da superfície, correspondente ao limite úmido.

$$T_{max} = a + (NDVI * b)(\text{limite seco}) \quad (20)$$

$$T_{min} = a + (NDVI * b)(\text{limite úmido}) \quad (21)$$

Sendo: "a" e "b" são os coeficientes linear e angular da reta, que representa o limite seco. Estes limites, seco e úmido são obtidos a partir de um gráfico de dispersão entre NDVI e a T<sub>s</sub> e são utilizados para normalização do modelo.

O TVDI varia de 0 a 1, sendo que os valores próximos de 0 indicam condições ótimas de umidade da superfície e vegetação sem estresse, além de ocorrer evapotranspiração máxima e acesso ilimitado a água. Os valores próximos de 1 indicam baixa disponibilidade hídrica, superfície seca e estresse hídrico severo na vegetação, afetando diretamente os processos fisiológicos da vegetação (HUANG et al., 2013; SOUZA, 2017).

#### 4.8. Coeficiente de Priestley-Taylor ( $\alpha_{PT}$ )

O coeficiente Priestley-Taylor ( $\alpha_{PT}$ ) representa energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico e depende da cobertura vegetal, da sua rugosidade e do teor de água de superfície (SENTELHAS et al., 2000).

Para calcular o coeficiente de Priestley-Taylor *propõe-se* uma expressão que combina o TVDI e FCV (SANDHOLT et al., 2002):

$$\alpha_{PT} = 1,26 * (1 - TVDI) * FCV \quad (22)$$

#### 4.9. Declividade da curva de pressão de vapor ( $\Delta$ )

O valor da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água ( $\Delta$ ) kPa.°C<sup>-1</sup> foi calculado pela equação:

$$\Delta = \frac{4098}{(t+237,3)^2} * \left[ 0,6108 * \left( \frac{\exp(17,27*t)}{(t+237,3)} \right) \right] \quad (23)$$

Sendo: t - temperatura do ar no momento da passagem do satélite, es - pressão de saturação do vapor d'água (kPa).

#### 4.10. Constante psicométrica modificada ( $\gamma^*$ )

A constante psicométrica modificada  $\gamma^*$  foi obtida a partir da seguinte equação:

$$\gamma^* = (0,665 * 10^{-3} * P) * (1 + 0,33 * U_2) \quad (24)$$

Sendo:  $U_2$  - velocidade do vento à 2 m de altura (m.s<sup>-1</sup>); P - Pressão atmosférica, calculada conforme (BURMAN & POCHOP, 1994):

$$P = 1013 + 0,01055 * Z \quad (25)$$

Sendo: Z - altitude local.

#### 4.11. Fluxo de calor Latente ( $\lambda E$ )

O fluxo de calor latente ( $\lambda E$ , (Wm<sup>-2</sup>)) é um parâmetro que estima quantidade de calor utilizada nos processos de evapotranspiração e foi calculado conforme equação de Priestley & Taylor (1972):

$$\lambda E = \alpha_{PT} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (R_n - G) \quad (26)$$

#### 4.12. Evapotranspiração de referência Priestley-Taylor ( $ET_{0(PT)} 24h$ )

A Evapotranspiração 24h foi obtida conforme (Bezerra et al., 2008):

$$ET_{024h} = 0,035 * \frac{\lambda E}{R_n - G} * ((1 - \alpha)R_{24h} - 123 t_{24h}) \quad (27)$$

Sendo:  $R_{24h}$  - radiação solar global diária medida na estação meteorológica experimental (W.m<sup>-2</sup>);  $t_{24h}$  transmissividade atmosférica média diária e 0,035 fator de conversão de Wm<sup>2</sup> para mm.dia<sup>-1</sup>, adimensional.

#### 4.13. Evapotranspiração de referência padrão da FAO (ET<sub>0</sub> 24h)

A determinação da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith foi feita utilizando o programa ET<sub>0</sub> calc. Versão 3.2, disponibilizado pela FAO e acessível através do site <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>, a partir da entrada de dados meteorológicos diários.

As variáveis de entrada para o cálculo de ET<sub>0</sub> foram: temperatura máxima do ar, temperatura média do ar, temperatura mínima do ar, umidade relativa média do ar, velocidade do vento e insolação. Foram estimados 10 valores de evapotranspiração referentes às 10 datas analisadas no estudo.

#### 4.14. Coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>)

O coeficiente de cultivo para cada fase da cana-de-açúcar foi estimado considerando o DAP (dias após o plantio) tomando como referência o início do ciclo e os menores valores de EVI de acordo com datas analisadas. Os valores de K<sub>c</sub> foram estimados conforme a Tabela 6.

**Tabela 6.** Coeficiente de cultivo médio da cana-de-açúcar.

Estágios Fenológicos	Dias após o plantio (DAP)	K <sub>c</sub>
Brotação e Emergência	30	0,55
Perfilhamento e estabelecimento da cultura	66	0,95
Crescimento e desenvolvimento dos colmos	186	1,01
Maturação	104	0,91

**Fonte:** Ferreira (2014)

#### 4.15. Evapotranspiração real (E<sub>Tr</sub>)

A evapotranspiração real foi estimada segundo Jensen (1968):

$$E_{Tr} = K_c * ET_0(PT) \text{ 24h} \quad (28)$$

#### 4.16. Avaliação estatística (validação)

A validação do método procedeu por meio da correlação da ET<sub>0</sub> de Priestley-Taylor com a ET<sub>0</sub> Penman-Monteith. Para a escolha dos valores de evapotranspiração do método de Priestley-Taylor foi escolhido um pixel de cada uma das 10 imagens de evapotranspiração que apresentassem 60% de Fração de Cobertura Vegetal em pontos aleatórios no mapa.

Os valores de evapotranspiração de ET<sub>0</sub> Penman-Monteith considerados para a análise foram extraídos do programa ET<sub>0</sub> calc Versão 3.2 utilizando a média diária. O desempenho do

método foi avaliado utilizando indicadores estatísticos como coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Erro Médio (EM) e o coeficiente de correlação simples de Pearson ( $r$ ).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - Oi)^2} \quad (29)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ei - Oi) \quad (30)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (31)$$

Sendo:  $Y_i$  é a evapotranspiração de referência estimada pelo método-padrão (PenmanMonteith-FAO 56) ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $X_i$  é a evapotranspiração de referência obtida pelo método testado (Priestley & Taylor, 1972) ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $\bar{X}$  é a média dos valores de evapotranspiração de referência obtidos pelo método testado ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $n$  é o número de observações;  $E_i$  valores da estimativa;  $O_i$  valores observados.

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) foi utilizado para relacionar os dois métodos de ET, avaliando o comportamento de uma variável em relação a outra, exibindo índices na Tabela 7, que indica o grau da correlação.

**Tabela 7.** Coeficiente de correção estatística ou coeficiente de correção de Pearson

Coeficiente de Pearson ( r )	Definição
0,00-0,19	Correlação bem fraca
0,20 -0,39	Correlação fraca
0,40-0,69	Correlação moderada
0,70-0,89	Correlação forte
0,90-1	Correlação muito forte

**Fonte:** Devore (2006)

#### 4.17. Classificação do uso da terra e cobertura vegetal

A classificação do uso da terra e cobertura vegetal foi realizada considerando a capacidade do NDVI de apontar as diferenças na intensidade de reflectância de diferentes alvos, principalmente de vegetação. Desta maneira no presente estudo foram assumidas as seguintes estratificações para a classificação conforme o NDVI:

- Cana 3 (NDVI >0,800) estágio de pleno desenvolvimento da maturação, pronta para corte;
- Cana 2 (NDVI 0,600- 0,800) estágio avançado de desenvolvimento da cultura;

- Cana 1 (NDVI 0,400 – 0,599) estágio de desenvolvimento inicial da cultura;
- Vegetação + Solo (NDVI 0,200-0,399) ocorre a presença da cultura não cobrindo totalmente o solo, fase de implantação da cana-de-açúcar;
- Solo Exposto (0,199-0) áreas sem a presença da vegetação, caracterizadas pelas vias entre os talhões e áreas pós-colheitas;
- Água (NDVI < 0) corpos d'água presentes na área, representada por reservatórios.

Para verificar a acurácia do mapeamento foi utilizado o índice Kappa (Kp) que representa uma medida da concordância real, ou seja, é uma medida do quanto a classificação está de acordo com a real área. O coeficiente Kappa (Tabela 8) é uma medida do quanto a classificação está de acordo com os dados de referências, tomados como dados reais e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (32)$$

Sendo:  $x_{ii}$  é o valor na linha  $i$  e coluna  $i$ ;  $x_{i+}$  é a soma da linha  $i$  e  $x_{+i}$  é a soma da coluna  $i$  da matriz de confusão;  $n$  é o número total de amostras e  $c$  o número total de classes. A tabela 6 exibe a classificação dos valores do K de acordo com o desempenho.

**Tabela 8.** Índice Kappa e o correspondente desempenho da classificação.

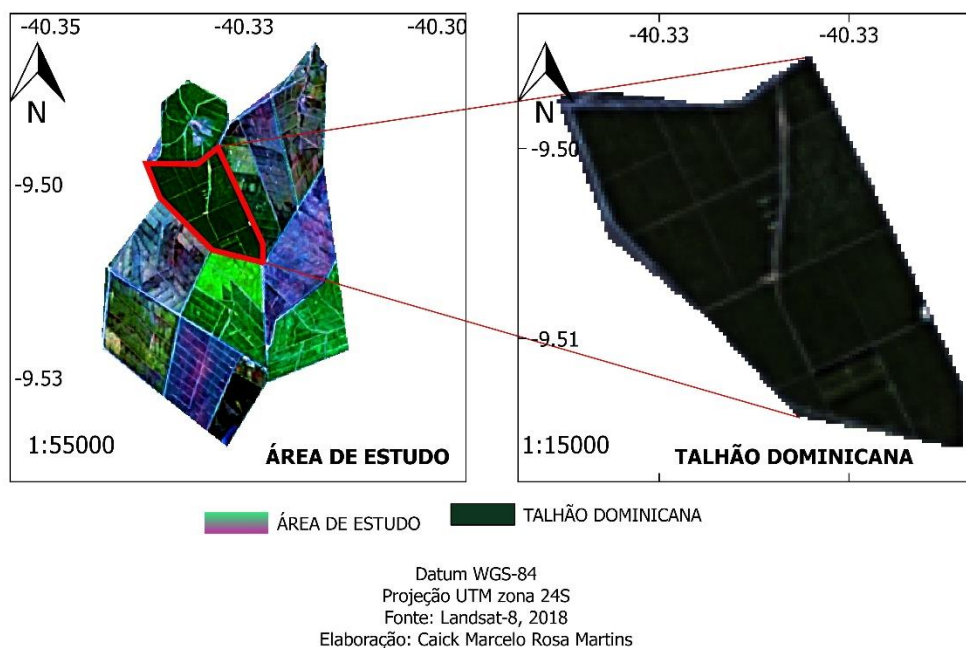
Índice Kappa	Desempenho
< 0	Péssimo
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Bom
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k \leq 1,0$	Excelente

**Fonte:** Landis & Koch (1977)

#### 4.18. Série temporal do EVI/MODIS

O acompanhamento das variações na intensidade de cobertura vegetal conforme a fase fenológica da cana-de-açúcar foi feito extraíndo-se a série temporal dos pixels de EVI/MODIS do talhão denominado Dominicana exibido na Figura 5, disponibilizado no site <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/pages/home.html> SATVeg (Sistema de Análise Temporal da Vegetação - EMBRAPA).

Por meio do uso do índice de vegetação EVI é possível acompanhar a evolução da densidade de cobertura vegetal, relacionando seu comportamento às alterações dos estágios fenológicos da cultura.



**Figura 5.** Talhão Dominicana de cana-de-açúcar da AGROVALE. **Fonte:** SATVeg (2018)

O talhão Dominicana é composto por 11 lotes com área total de 131,06 ha, dos quais 121,50 ha plantados com cana-de-açúcar, 9,34 ha de ruas e drenos mais 0,22 ha de pedras.

O talhão apresenta solo tipo vertissolo; o sistema de irrigação é por gotejamento, espaçamento (0,90m x 2,10m), variedade cultivada (SP 79-1011) e o tipo de colheita é manual. Nas safras a partir de 2014 após uma renovação do plantio desse talhão, foram plantados em 93% dessa área, a variedade VAT 90-212 e os 7% restantes compostos de várias outras variedades.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Avaliação dos dados SONDA

As Figuras 6 e 7 mostram o comportamento dos elementos meteorológicos: radiação global ( $\text{W.m}^{-2}$ ), temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento à 2m de altura ( $\text{m.s}^{-2}$ ) em função da hora GMT (Tempo Médio de Greenwich) nas datas da passagem do Landsat-8. Esses são os principais parâmetros meteorológicos que afetam a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

O ciclo diário da radiação solar global apresentou comportamento típico em todas as datas. Não ocorreu interferência de nuvens na incidência de radiação nos horários das passagens do satélite Landsat-8 sobre a estação automática meteorológica do SONDA.

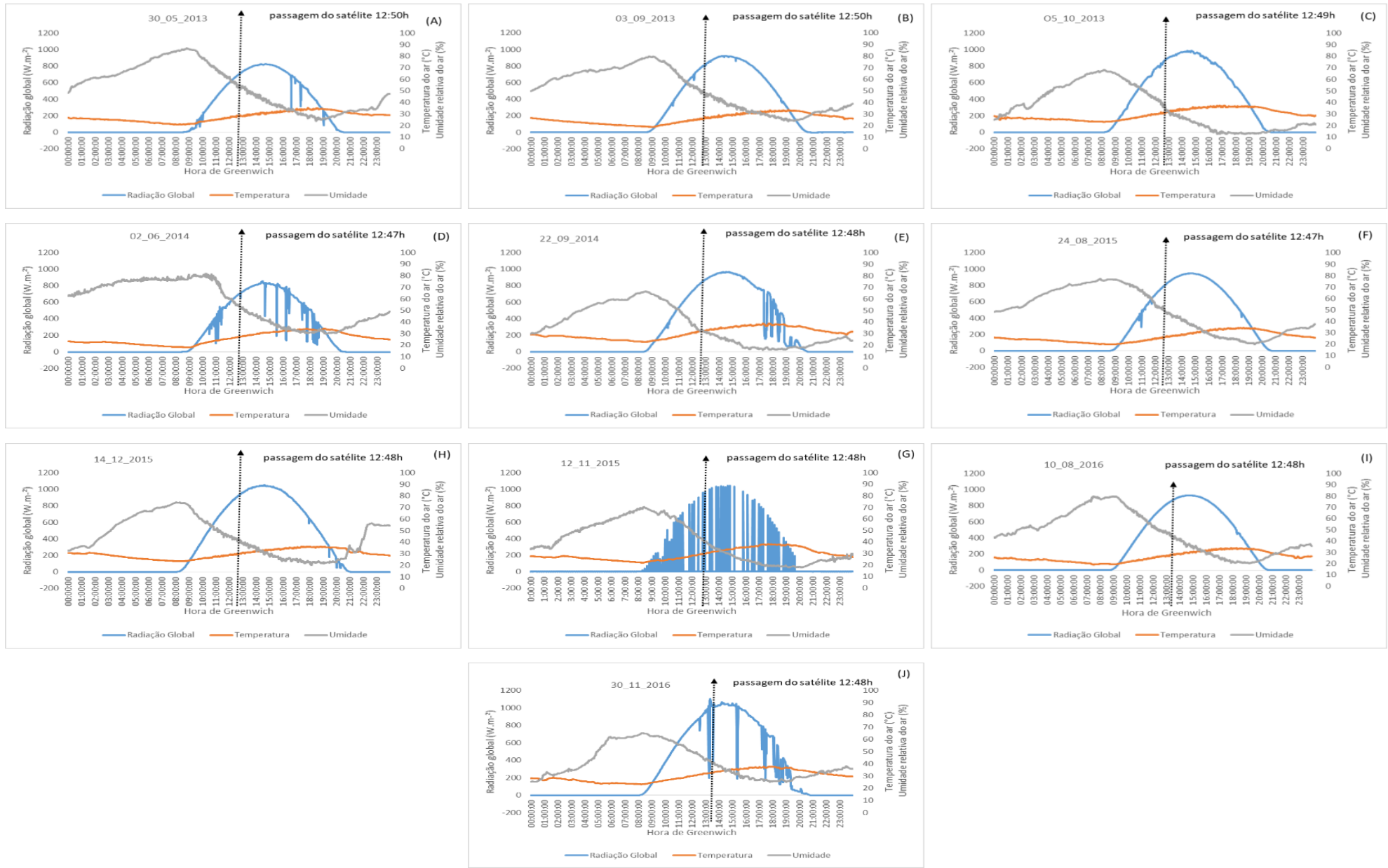
A inferência da cobertura de nuvens na radiação solar incidente foi mínima ao longo das datas 03/09/2013 (Figura 6B), 05/10/2013 (Figura 6C), 24/08/2015 (Figura 6F) 14/12/2015 (Figura 6H) e 10/08/2016 (Figura 6I), podendo ser caracterizados como dias de céu claro. Nestas datas, a radiação solar incidente contribuiu para aumentar a ET0.

O céu apresentou-se parcialmente nublado nas datas 30/05/2013 (Figura 5A), 02/06/2014 (Figura 5D), 22/09/2014 (Figura 5E), 12/11/2015 (Figura 5G) e 30/11/2016 (Figura 5I), apresentando quedas bruscas nas linhas de exibição dos gráficos, devido a presença de nuvens que interrompem instantaneamente a captação da radiação solar que incide sobre o radiômetro. Na data 12/11/2015 (Figura 5G) o céu apresentou elevada cobertura de nuvens registrada pelos decaimentos nas medidas do radiômetro, mas no instante da passagem do satélite, o imageamento da área foi feito com o céu totalmente limpo ( $890 \text{ Wm}^{-2}$ ), ou seja, cobertura de nuvens igual a zero como mostrado na Tabela 4.

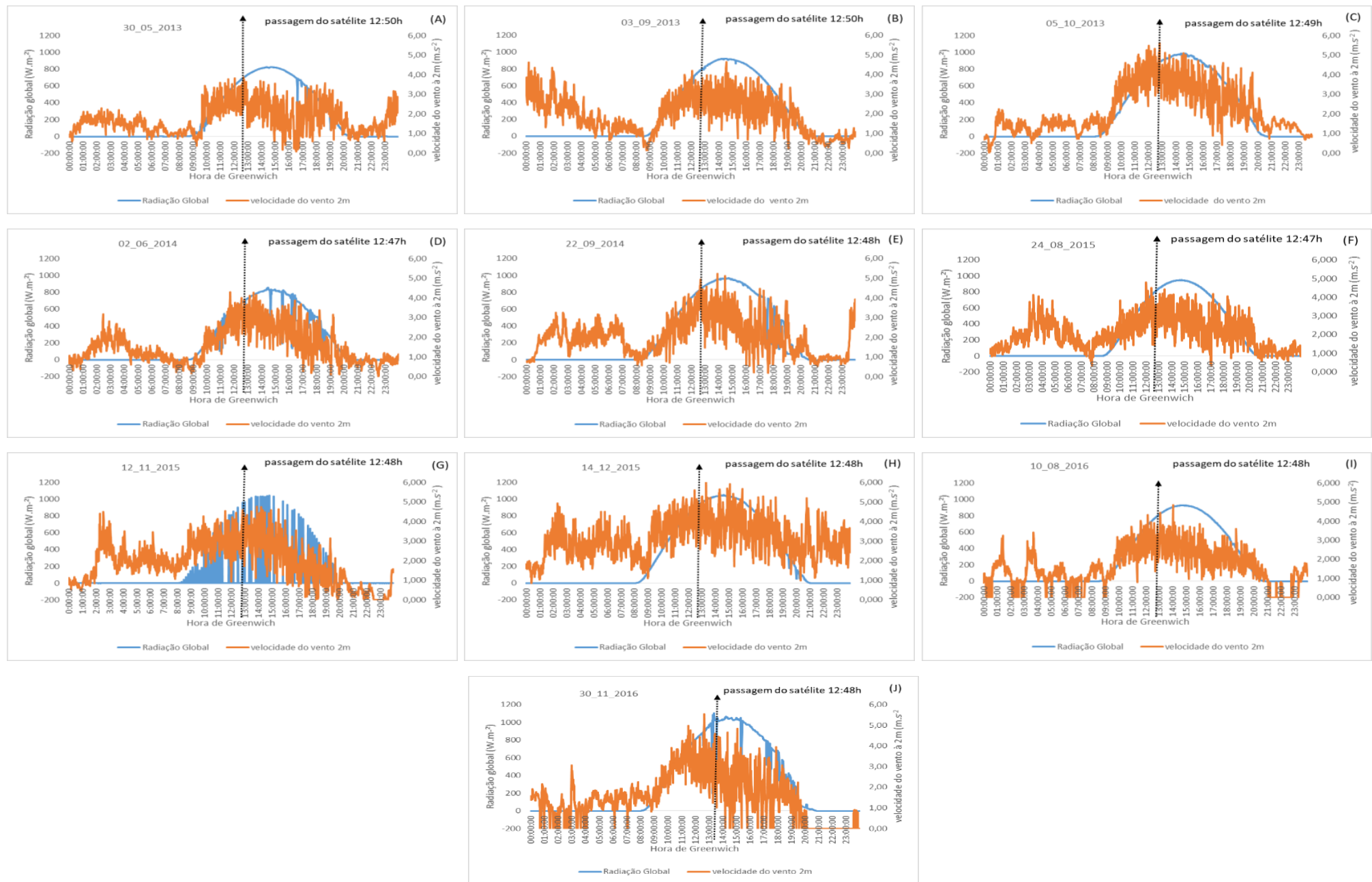
Em todas as datas (Figura 6) a temperatura do ar apresentou comportamento oposto a umidade relativa do ar, exibidos no período da manhã com maior umidade e menor temperatura, assim como no período da tarde a temperatura se elevou e a umidade relativa do ar caiu. Dessa forma, configurou-se os dias com manhãs mais úmidas e frias, assim como tardes mais quentes e secas, contribuindo para uma maior evapotranspiração no período da tarde.

O ciclo diário da velocidade do vento (Figura 7) exibe um padrão complexo, inviabilizando, assim, comparações diretas com a radiação solar incidente. O vento apresentou direção predominante de sudeste ( $90,1^{\circ}$  a  $179,9^{\circ}$ ) ou de nordeste ( $0,1^{\circ}$  a  $89,1^{\circ}$ ) nos horários e datas das passagens do satélite (Tabela 5). Estudos realizados por Melo et al. (2013) em Petrolina mostram que a pequena variação da direção do vento resulta do domínio da circulação de grande escala, enquanto que o padrão complexo visto no ciclo diário da velocidade é indicativo da interação entre essa circulação (ventos alísios) e circulações locais.





**Figura 6.** Radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar: A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C.05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G.12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016



**Figura 7.** Radiação solar e velocidade do vento. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016

## 5.2. Classificação do uso da terra e cobertura vegetal

O resultado da classificação da cobertura vegetal para as datas analisadas é exibido na Tabela 9. Na data 30/05/2013 (Figura 8A) a classe com maior representatividade foi CANA2, ocupando 729 ha (57,74%), seguida de CANA1 com 332,19 ha (26,31%), CANA3 com 84,71 ha (6,71% do território); Solo Exposto 51,86 ha (4,11 %); ÁGUA com 37,31 ha (2,95%) e a menor classe identificada foi a VEGETAÇÃO+SOLO ocupando 27,59 ha, (2,18%). Nessa data, a CANA2 ocupou os talhões das regiões sudeste, na parte central e ao norte da área de estudo.

Em 03/09/2013 (Figura 8B) observou-se forte redução da área de CANA2 passando para 311,42 ha (24,66%) (Tabela 9), ou seja, talhões que eram de CANA2 foram suprimidos, em processos de colheita, dando lugar às áreas com menor teor de vegetação, aumentando, a área classificada como VEGETAÇÃO + SOLO tornando-se a maior classe identificada na Figura 8B. Além disso, é possível notar a variação do nível de densidade vegetal se comparado a data anterior.

Na data 05/10/2013 (Figura 8C), a CANA1 ocupou 586,98 ha (46,49%) mostrando-se mais representativa dentre as classes (Tabela 9). Comparada a data anterior é possível notar alterações em talhões da região oeste que apresentaram crescimento em função disso as áreas de VEGETAÇÃO+SOLO diminuíram, no entanto, as áreas de CANA1 aumentaram, sendo observadas com destaque em talhões da região norte da área (Figura 8C).

Em 02/06/2014 (Figura 8D) a maior classe identificada foi CANA2 ocupando 483,03 ha (38,25% da área total), seguida de VEGETAÇÃO+SOLO com 383,31 ha (30,40 %), CANA3 ocupou 228,53 (18,10 %), CANA1 apresentou ocupação de 71,06 ha (5,63%), seguido de SOLO EXPOSTO com 67,39 ha (5,34 %) e área de AGUA totalizando 2,28% de toda área classificada.

A ocorrência da classe VEGETAÇÃO+SOLO (Figura 8D) é devido ao processo de colheita da cana de 1 ano e meio, que estava em desenvolvimento no dia 30/05/06 (Figura 8 A) que após 1 ano já estava apta para a colheita.

A classificação da data 22/09/2014, exibido na Tabela 9, identificou VEGETAÇÃO+SOLO como maior área, ocupando 510,08 ha (40,40%). A área de CANA2 foi a segunda maior classe identificada com 470,72 há (37,28 %), CANA1 ocupou 178,52 ha (14,14 %), o SOLO EXPOSTO ocupou 5,80% da área, seguido da ÁGUA com 2,39% de ocupação.

A classe CANA3 na Figura 8E, não foi identificada devido a data da análise coincidir com o período inicial do ciclo da cultura, em decorrência disso a estratificação que a cana apresentou maior representatividade na classificação foi VEGETAÇÃO +SOLO, que já havia sido maior na data de análise anterior.

Em 24/08/2015 (Figura 8F) passados praticamente 1 ano da última análise, as classes continuaram mantendo a mesma ordem de classificação por tamanho da área ocupada, sendo VEGETAÇÃO+SOLO, CANA2, CANA1, SOLO EXPOSTO, ÁGUA e CANA3. Isto se deve ao fato das datas compreenderem o intervalo de 1 ciclo da cultura, sendo identificadas na fase inicial, por isso não apresentam a estratificação CANA3 que confere um estágio de maturação avançado.

No entanto, a disposição dos estágios dos talhões foi alterada, pois talhões da região norte, que na data 22/09/2014 (Figura 8E) eram VEGETAÇÃO+SOLO elevaram a biomassa e passaram a ser classificados como CANA1 no dia 24/08/2015 (Figura 8F).

Avaliando a data 12/11/2015 (Figura 8G) a classe VEGETAÇÃO+SOLO ocupou 473,38 ha (37,49%) seguido de CANA2 com 343,01 (27,17%), CANA1 ocupando 254,30ha (20,14%), CANA3 com 97,65ha (7,73%), SOLO EXPOSTO e ÁGUA ocupando, respectivamente, 5,035 e 2,44% do total da área classificada.

Passados praticamente 3 meses da última data analisada o panorama se encontra praticamente na mesma fase, no entanto, ocorreu o crescimento da área de CANA3, motivado pela diminuição das áreas de CANA2 que se transformaram em área de CANA3, indicando o avanço do estágio fenológico (Figura 8G).

A data 14/12/2015 (Tabela 9) apresentou a CANA2 e CANA1 ocupando respectivamente 488,95ha e 478,80ha (38,68% e 37,92 % da área) seguidos de VEGETAÇÃO+SOLO ocupando 137,29 ha (10,87%). Com tamanho de área de 85,14 ha CANA3 precedeu as estratificações restantes: SOLO EXPOSTO e ÁGUA.

Comparada a avaliação no mês anterior, ocorreu a diminuição da área de VEGETAÇÃO+SOLO que aumentou sua densidade de cobertura e evoluindo o estágio fenológico se transformando em CANA2 e CANA1 que passaram a ser as maiores classes, observados na Figura 8H.

A 10/08/2016 (Tabela 9) indicou VEGETAÇÃO+SOLO ocupando 517,46 ha (40,98%), CANA2 com 488,95 há (38,68 %), CANA1 ocupando 13% da área, SOLO EXPOSTO, ÁGUA e CANA3 ocuparam, respectivamente, 3,57%, 1,90% e 1,60% do total da área classificada. O aumento da classe VEGETAÇÃO+SOLO indica a ocorrência da colheita, diminuindo a biomassa dos talhões da região sudoeste, exibidos na Figura 8J.

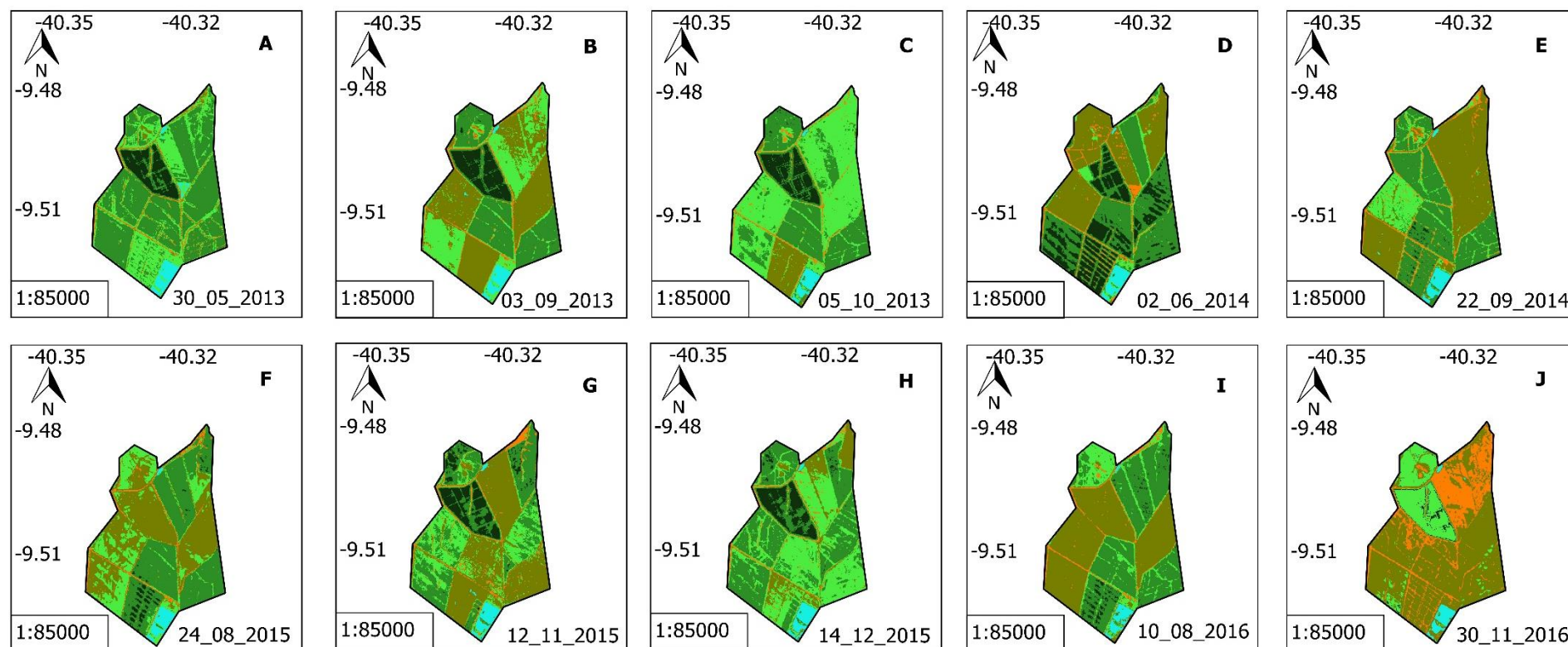
Na última data analisada 30/11/2016, a maior classe identificada foi VEGETAÇÃO+SOLO, ocupando 60,36% do total da área classificada, sendo observada nos talhões na região sul da área de estudo como exibe a Figura 8J. Seguido de SOLO EXPOSTO ocupando 20,62% da área.

A CANA1 apresentou de 197,21 ha (15,62%). ÁGUA ocupou 2,06% da área seguido de CANA3 ocupando 16,5 ha e CANA 2 que não alcançou 1 ha ocupado. As áreas classificadas como água correspondem a dois reservatórios localizados nas regiões norte e sul que são utilizados como fonte na irrigação dos talhões próximos e ocupam em média 2,00% da área classificada.

Ocorreu o processo da colheita, dessa forma intensificando o aumento das áreas classificadas como VEGETAÇÃO+SOLO. O índice Kappa (Tabela 9) se apresentou satisfatório em todas as datas classificadas, variando de 96,77% a 98,55%, confirmando a acurácia da classificação. Dessa maneira, o Índice Kappa foi definido como Excelente conforme Landis & Koch (1977).

**Tabela 9.** Classificação do uso da terra e cobertura vegetal na região do Vale do Submédio do São Francisco.

<b>Data</b>	<b>Cana 3</b>	<b>Cana 2</b>	<b>Cana1</b>	<b>Vegetação + solo</b>	<b>Solo Exposto</b>	<b>Água</b>	<b>Índice Kappa</b>
<b>30/05/2013</b>	6,71% 84,71 ha	57,74% 729 ha	26,31% 332,19 ha	2,18% 27,59 ha	4,11% 51,86 ha	2,95% 37,31 ha	97,03%
<b>03/09/2013</b>	7,58% 95,74 ha	24,66% 311,42 ha	24,27% 306,43 ha	37,36% 471,76 ha	3,80% 47,97 ha	2,32% 29,34 ha	97,90%
<b>05/10/2013</b>	6,77% 85,52 ha	32,40% 409,01 ha	46,49% 586,98 ha	8,57% 108,25 ha	3,70% 46,69 ha	2,07% 26,12 ha	98,01%
<b>02/06/2014</b>	18,10 % 228,53 ha	38,25% 483,03 ha	5,63% 71,06 ha	30,40% 383,81 ha	5,34% 67,39 ha	2,28% 28,85 ha	98,35%
<b>22/09/2014</b>	0,00% 0,00 ha	37,28% 470,72 ha	14,14% 178,52 ha	40,40% 510,08 ha	5,80% 73,20 ha	2,39% 30,15 ha	97,23%
<b>24/08/2015</b>	1,77% 22,34 ha	36,36% 459,16 ha	19,33% 244,01 ha	36,57% 461,72	3,68% 46,51 ha	2,29% 28,91 ha	98,12%
<b>12/11/2015</b>	7,73% 97,65 ha	27,17% 343,01 ha	20,14% 254,30 ha	37,49% 473,38 ha	5,03% 63,47 ha	2,44% 30,85 ha	98,09%
<b>14/12/2015</b>	6,74% 85,14 ha	38,68% 488,39 ha	37,92% 478,80 ha	10,87 % 137,29 ha	3,39% 42,80 ha	2,39% 30,24 ha	97,85%
<b>10/08/2016</b>	1,61% 20,27 ha	38,72% 488,95 ha	13,22% 166,93 ha	40,98% 517,46 ha	3,57% 45,05 ha	1,90% 24,00 ha	96,77%
<b>30/11/2016</b>	1,31% 16,50 ha	0,03% 0,36 ha	15,62% 197,28 ha	60,36% 762,21 ha	20,62% 260,35 ha	2,06% 25,97 ha	98,55%



## CLASSES



Datum WGS-84

Projeção UTM zona 24S

Fonte: Landsat-8, 2018

Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 8.** Cartas de classificação do uso da terra e cobertura vegetal para o período de 2012 a 2016 na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### 5.3. Série temporal da cobertura vegetal - EVI/MODIS

A Figura 9 mostra a série temporal do EVI dos anos de 2012 a 2016. Este período compreende três ciclos completos de produção de cana-de-açúcar do talhão Dominicana selecionado especificamente para análise. O EVI apresentou variação de 0,0987 (no estágio inicial do ciclo da cultura) a 0,757 (no estágio próximo a colheita).

No início do ciclo a cana-de-açúcar possui EVI baixo, com isso o solo interfere de forma mais acentuada nas trocas de energia, nos níveis de umidade e na temperatura da superfície (Figura 9). O decréscimo acentuado no valor do EVI faz referência ao momento da colheita, evidenciado próximo as datas 09/05/2014, 25/05/2015 e 09/06/2016 observados na Figura 9, momento no qual o solo volta a interferir de forma acentuada diminuindo o valor do EVI.

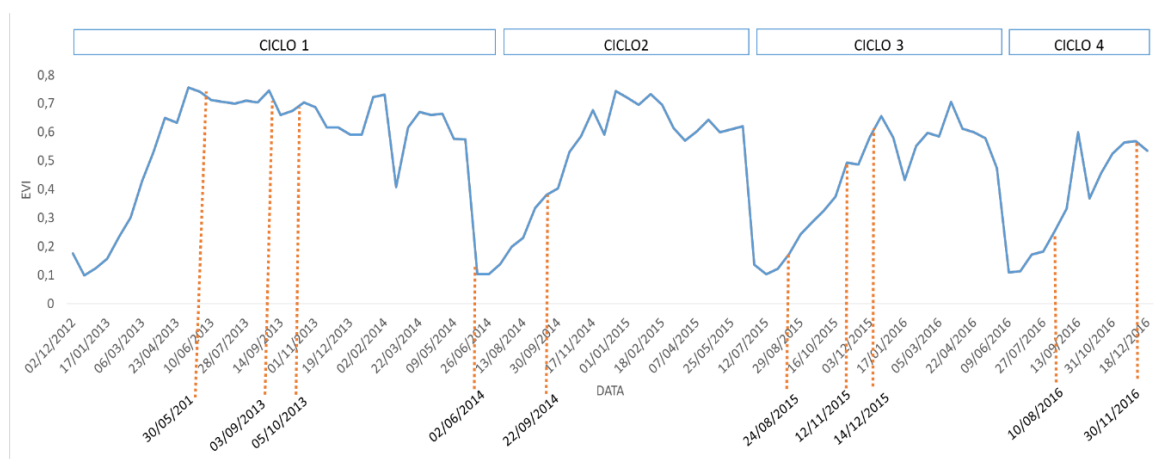
Comportamento este evidenciado em estudos de Gonçalves et al. (2012), Mariano & Moreira (2015) que encontraram valores baixos de EVI para a cana-de-açúcar durante o período de colheita e início de desenvolvimento, sendo caracterizado por áreas que apresentam solo exposto e vegetação baixa.

Dois tipos de ciclos foram bem caracterizados, ciclo de 1 ano e meio, (CICLO1) com implantação da cultura em dezembro de 2012 e final de ciclo em maio de 2014. As imagens de satélites analisadas nesse período (03/09/2013; 05/10/2013) foram classificadas como áreas de CANA 3, confirmando assim a análise realizada pelo EVI, identificando elevada densidade de vegetação.

O segundo tipo de ciclo apresenta duração de 1 ano (CICLO 2, CICLO 3), e ocorre em duas vezes em períodos analisados (Figura 9): de julho de 2014 a julho de 2015 (CICLO 2) e de agosto de 2015 a julho de 2016 (CICLO 3). Em 02/06/2014 os valores do EVI eram baixos e dessa forma classificados com CANA1. A data 22/09/2014, alocado no ápice produtivo da cultura apresentou valores elevados do EVI, confirmando a classificação CANA3.

O CICLO 2 englobou as seguintes datas de imagens: 24/08/2015, na qual foi observado a cultura em fase de crescimento inicial, sendo classificado como CANA1; e (12/11/2015 e 14/12/2015) que apresentaram valores de EVI elevados lhe conferindo a classificação como CANA2.

Assim como as datas 10/08/2016 e 30/11/2016, classificadas respectivamente como VEGETAÇÃO+SOLO (que se mostram em fase inicial de cultivo) e CANA2, que configura a presença de um 4º ciclo, no entanto, não foi analisado de forma completa.



**Figura 9.** Série temporal do EVI/MODIS para o período de 2012 a 2016 - Talhão Dominicana.

#### 5.4. Albedo da Superfície ( $\alpha$ )

O albedo é um parâmetro importante que varia conforme as características físicoquímicas das superfícies, altura das plantas, fase fenológica, índice de área foliar e com o ângulo zenital. Além disso, as atividades antrópicas (agricultura, desflorestamento e urbanização) também são atenuantes que interferem no albedo (ARYA, 2001).

Durante o período estudado o albedo da superfície variou de 0,03 a 0,42, já em valores médios apresentou variação de 0,16 em 02/06/2014 (Figura 10D) a 0,13 em 30/11/2016 (Figura 10J) e a média geral alcançou o valor de 0,18. Os valores encontrados se assemelharam aos trabalhos de Santos (2016) que encontrou variação de 0,11 e máximo de 0,22 de albedo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar em São Paulo.

Silva et al. (2011) encontraram valores para a mesma área estudada que oscilaram entre 0,15 e 0,27 com valor médio de 0,20 para o ciclo da cultura, resultado este que é semelhante ao citado por Juárez (2004) que obteve um valor médio de 0,21 com variações entre 0,15 e 0,25, sendo que o padrão sazonal demonstrou valores mínimos na estação chuvosa e máximos na estação seca.

Os maiores valores de albedo foram encontrados nas áreas de solo exposto, destacado por áreas com a coloração azul, sobretudo em talhões da região sul da Figura 10J. Os valores do albedo se elevam, pois superfícies sem vegetação apresentarem maior capacidade reflexiva que superfícies vegetadas.

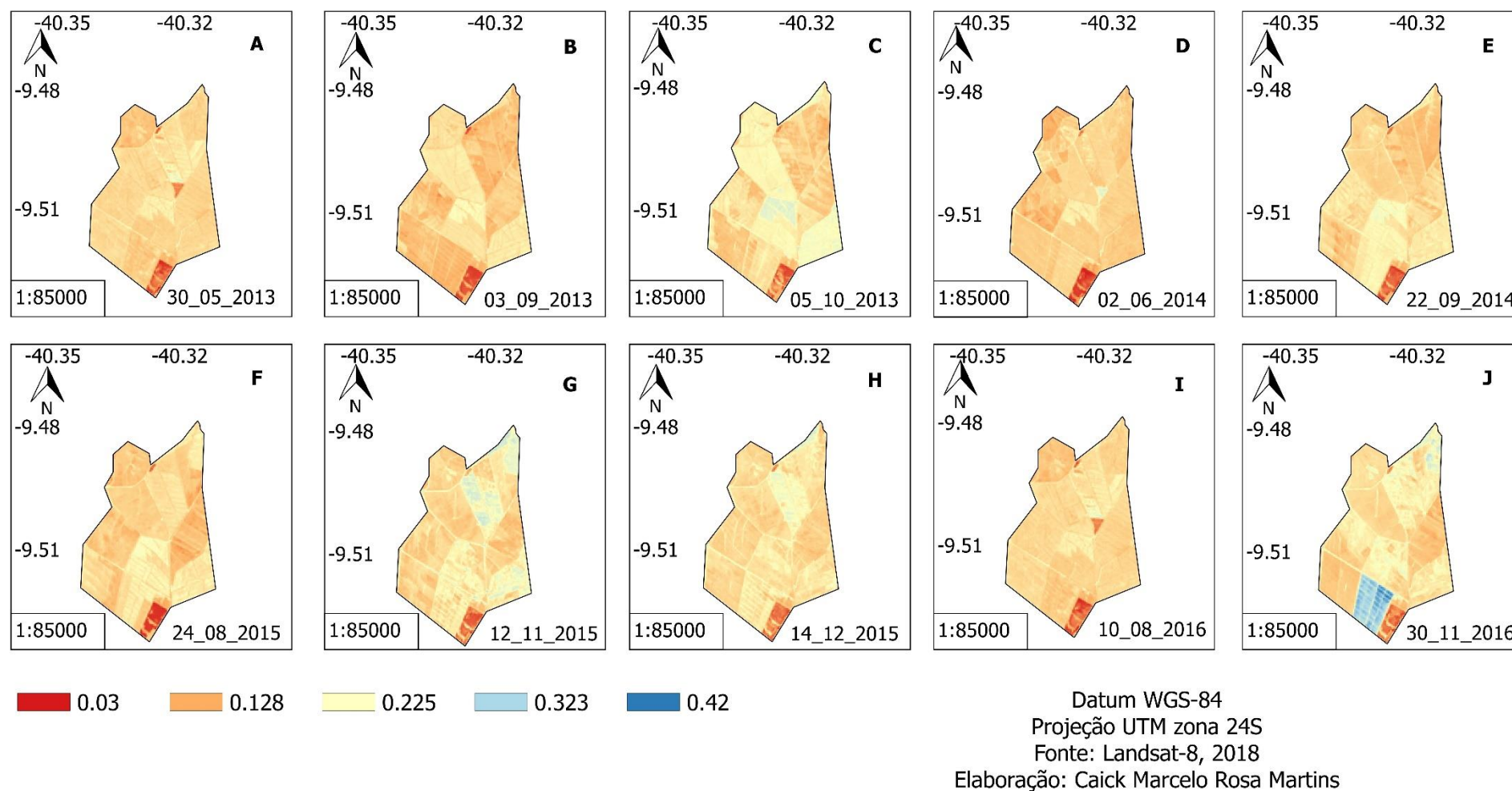
Áreas classificadas com CANA3 e CANA2 apresentaram valores intermediários de albedo exibindo valores menores que os das áreas de solo exposto, no entanto, valores maiores que da superfície de ÁGUA, que apresentam destaque em todos mapas da Figura 10, com a coloração vermelho localizado na região sul dos mapas.



O albedo de forma geral apresentou valores baixos, (evidenciado nas Figuras 10A a 10J, pela coloração salmão) isto se deve ao fato de que em condições de irrigação nas áreas de cana-de-açúcar o solo apresenta menor refletividade e maior umidade.

Dessa forma, o solo absorve mais radiação eletromagnética por estar mais úmido, causando redução da refletância reduzindo o albedo, corroborando, assim com os escritos de Leitão & Oliveira (2000), Wang & Davidson (2007) e Esteves et al. (2012) mencionando que as condições hídricas do solo e da planta influenciam diretamente nos padrões sazonais do albedo.

De acordo com Esteves et al. (2012), em períodos de menor disponibilidade hídrica os valores de albedo tendem a ser maiores que em períodos com elevada precipitação, assim como foi observado por Oliveira et al. (2014) ao compararem os valores de albedo da cana-de-açúcar em períodos distintos do ano, nas estações seca e chuvosos anos de 2006 e 2007.



**Figura 10.** Cartas de albedo de cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### **5.5. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)**

O NDVI é utilizado para mensurar o vigor vegetativo e a densidade da cana-de-açúcar, servindo de indicador de período de plantio, pois seus valores variam ao longo do tempo conforme a presença e a intensidade da vegetação na cobertura do solo.

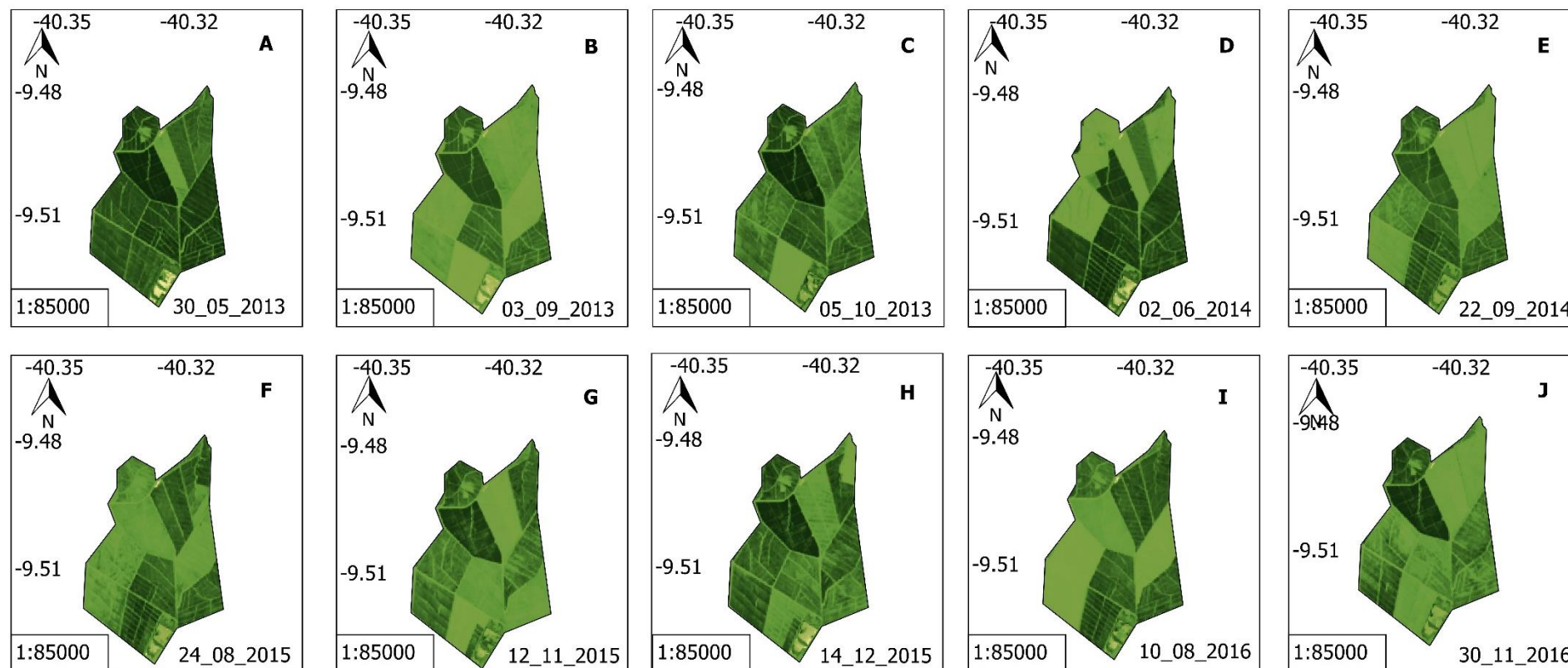
Os valores de NDVI apresentaram variação de -0,1 na data 02/06/2014, (Figura 11D), a 0,92 em 05/10/2013, (Figura 11C). Áreas com coloração verde escuro indicam a presença de NDVI elevado, assim como áreas com tons de verde claro apresentam valores baixos de NDVI, até a coloração branca, indicando o menor valor de NDVI.

O menor valor médio de NDVI 0,39 foi obtido em 03/09/2013, (Figura 11B) com talhões de coloração verde claro, e o maior valor 0,67 referente a data 30/05/2013, exibido na Figura 11A com talhões de coloração verde escuro. Valores semelhantes foram encontrados em estudo de Lira (2008) avaliando parâmetros biofísicos da cana-de-açúcar no Submédio São Francisco com NDVI variando de 0,17 a 0,65.

Santos (2016) encontrou valores com uma maior amplitude de variação de 0,15 a 0,90. Assim como Santos et al. (2015) encontraram valores de 0,31 a 0,95 determinados de acordo com o estágio, com os menores valores de NDVI sendo encontrados nos estágios iniciais e maiores nos estágios próximos a maturação.

Os altos valores de NDVI indicam a existência de vegetação densa em plena atividade fotossintética, sendo estas áreas classificadas como CANA2 e CANA3, assim como os menores valores indicam baixa atividade fotossintética, geralmente são áreas que apresentam a cana em seu desenvolvimento inicial.

Os menores valores foram obtidos em áreas classificadas como VEGETAÇÃO + SOLO, áreas que apresentam resquícios de cana-de-açúcar em menor proporção e que apresentam coloração verde claro nas Figuras de 11A a 11J. Assim como relatado por Gonçalves (2008) que encontrou valores baixos de NDVI em fases de desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar.



NDVI



Datum WGS-84  
 Projeção UTM zona 24S  
 Fonte: Landsat-8, 2018  
 Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 11.** Cartas de NDVI da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

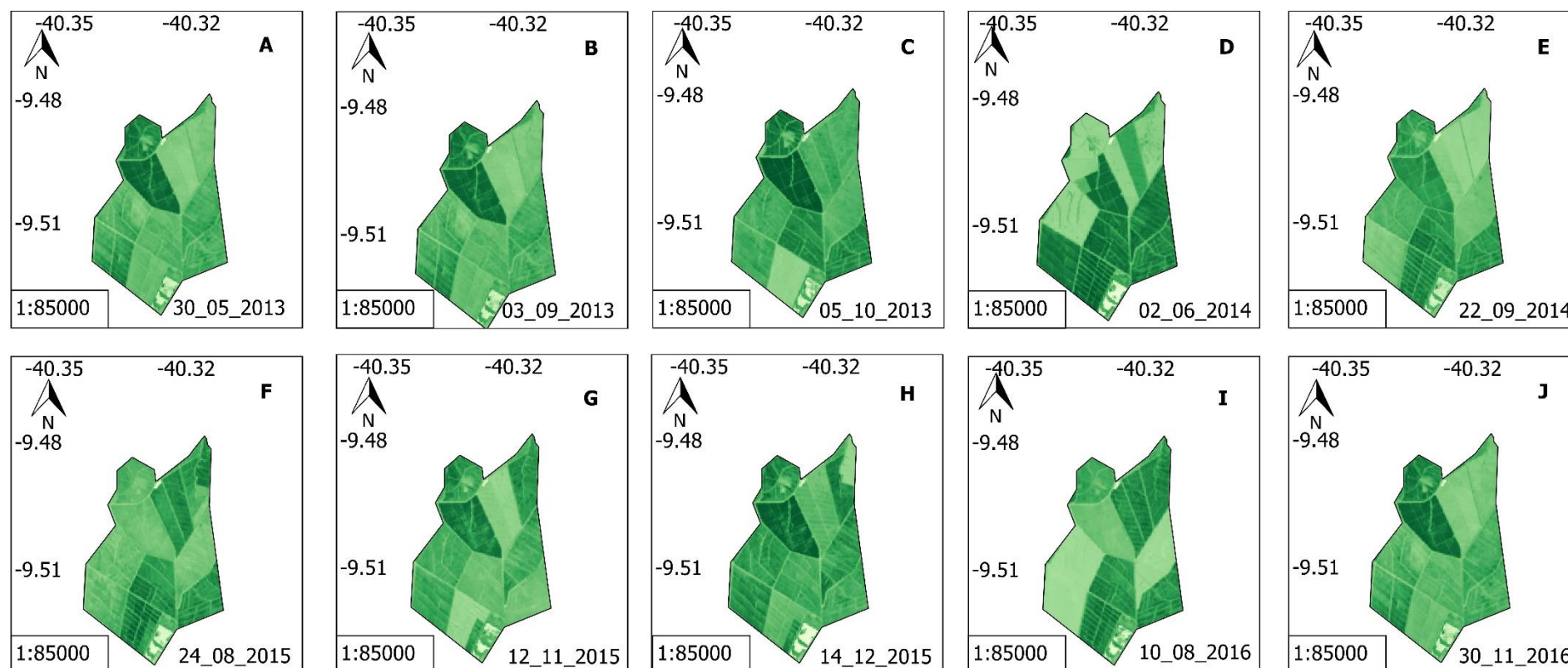
### **5.6. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)**

Os valores do SAVI apresentaram variação de -0,33 em 30/05/2013 (Figura 12A) a 0,85 que foi encontrado nas datas 30/05/2013 (Figura 12A) e 05/10/2013 (Figura 12C). Em valores médios o SAVI variou de 0,34 na data 03/09/2013 (Figura 12B) a 0,60 na data 30/05/2013 (Figura 12A).

Os maiores valores de SAVI foram encontrados nas Figuras 12A a 12J em talhões exibindo a coloração verde escuro, que apresentam maior densidade de vegetação, assim como, os menores valores de SAVI foram encontrados em talhões com coloração verde claro, que apresentam menor densidade vegetal.

O SAVI minimiza os efeitos do solo e avalia de modo mais criterioso a vegetação, fato este que está de acordo com os achados de Polônio (2015) que encontrou valores baixos (0,03) nas áreas de solo exposto, ou quando na fase inicial de crescimento da cultura e maiores valores (0,78) quando a vegetação estava em estágio avançado de maturação.

Valores negativos (-0,33, -0,03) foram encontrados, indicando a presença de corpos d'água e nuvens, exibido pela coloração branca na região sul das Figuras 12A a 12J. Quando analisados em áreas com vegetação os valores do índice foram representados por valores positivos, assim como encontrado por Alvarenga & Moraes (2014) indicando a presença de biomassa e solo coberto por vegetação.



SAVI



Datum WGS-84

Projeção UTM zona 24S

Fonte: Landsat-8, 2018

Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 12.** Cartas de SAVI da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### 5.7. Índice de Área Foliar (IAF)

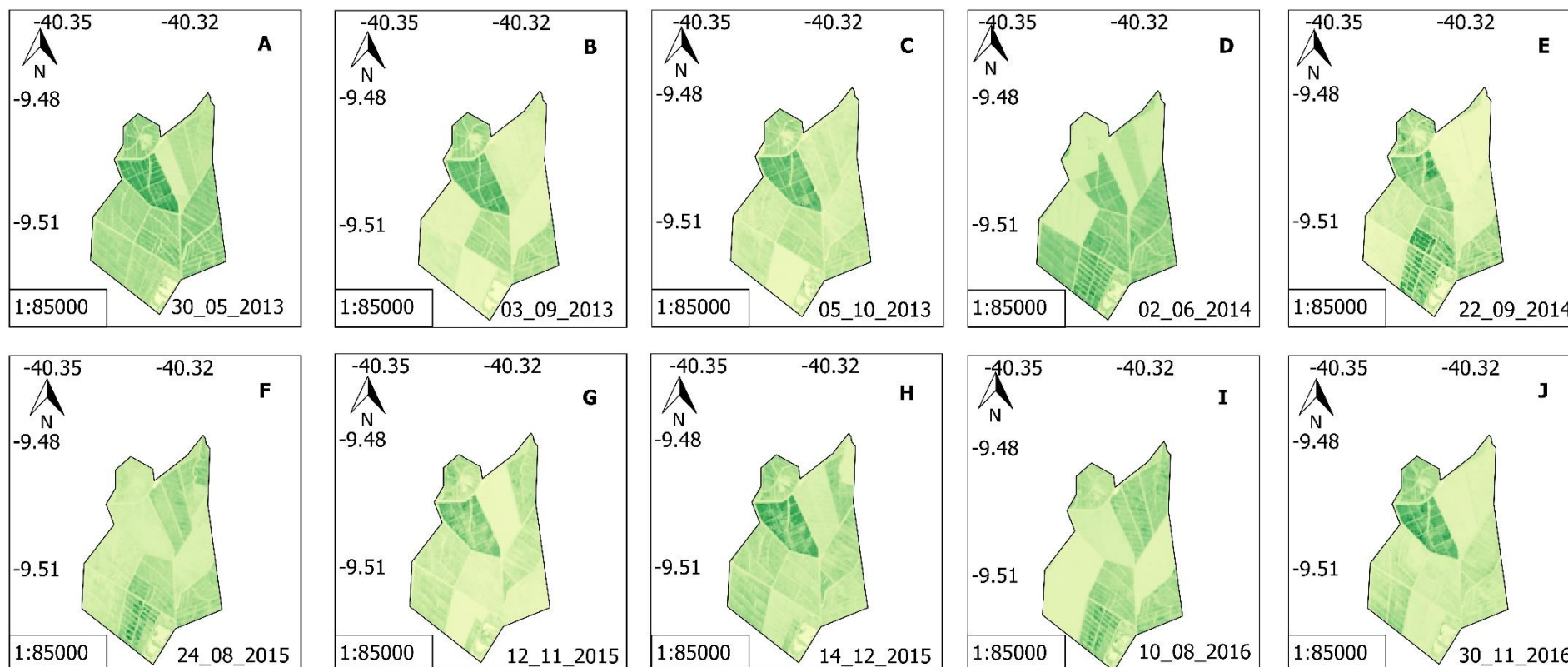
O índice de área foliar é um parâmetro utilizado no acompanhamento do desenvolvimento da cultura, analisando a contribuição do solo e da vegetação em resposta a reflectância e conseqüentemente ao albedo da superfície (OLIVEIRA et al., 2015b).

O IAF apresentou variação de  $0,0 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  em todos os dias analisados até  $11,99 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  na data 24/08/2015 (Figura 13F). O menor valor médio de IAF foi de  $2,10 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  ocorrendo na data 12/11/2015 (Figura 13G) e o maior  $3,92 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  encontrado na data 30/05/2013 (Figura 13A).

Os maiores valores do IAF foram identificados em áreas classificadas como CANA3, áreas com elevada biomassa com a cultura próxima da fase de colheita, evidenciadas nas Figuras 13A a 13J com coloração verde escuro, com destaque para 30/05/2013 (Figura 13A), mencionado anteriormente como a maior média do índice.

Os menores valores do IAF como esperado foram encontrados em áreas com menor presença de cobertura vegetal, classificadas como VEGETAÇÃO+SOLO, além das áreas de SOLO EXPOSTO como as ruas dos talhões que não apresentam a cultura, evidenciadas nas Figuras 13A a 13J com coloração verde claro, com destaque para 12/11/2015 (Figura 13G), sendo a menor média das datas analisadas.

Os menores valores são encontrados no início do ciclo do cultivo e logo após a realização da colheita, épocas com baixa presença de cobertura vegetal. Concordando com os escritos de Georgescu et al. (2013) que encontraram valores de IAF baixo em áreas com maior presença de solo e com menor quantidade de biomassa vegetal, assim como valores de IAF alto são encontrados em áreas com maior densidade vegetal.



IAF



Datum WGS-84  
 Projeção UTM zona 24S  
 Fonte: Landsat-8, 2018  
 Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 13.** Cartas de IAF da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016, J. 30/11/2016.



## 5.8. Temperatura da Superfície (TS)

A temperatura é um parâmetro atuante nos processos à superfície envolvida no balanço de energia, evaporação do solo, transpiração da vegetação e em processos de desertificação é utilizada como indicador de degradação terrestre e mudança climática (ARAÚJO; DI PACE, 2010).

A temperatura da superfície variou de 30,81°C na data 02/06/2014 (Figura 14D) a 50,63°C na data 05/10/2013 (Figura 14C). A maior média de temperatura foi encontrada na data 22/09/2014 alcançando 43,41°C, exibida na Figura 14E, que em decorrência disto, apresentou coloração vermelho escuro em grande parte da área analisada, sobretudo em talhões da região norte.

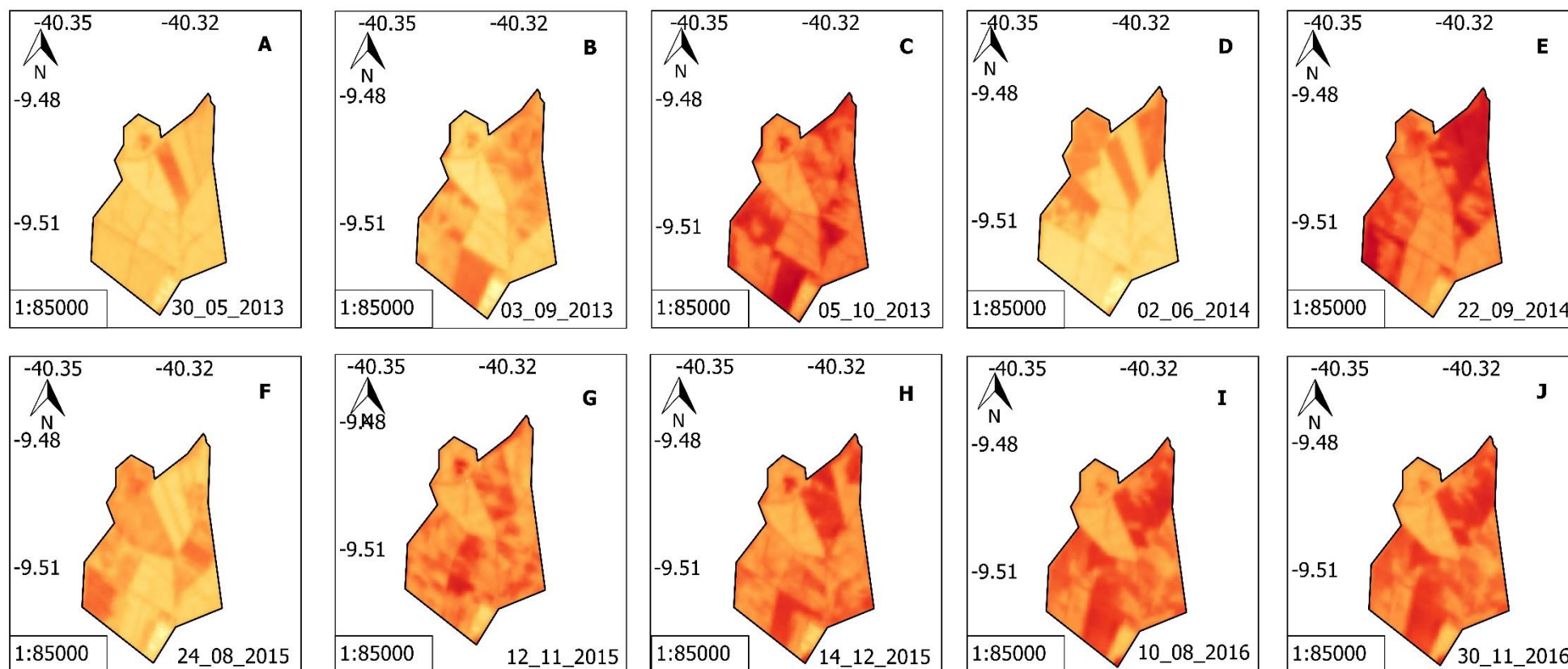
A menor média foi encontrada na data 30/05/2013, dessa forma a Figura 14A apresentou coloração laranja claro, na maioria dos talhões da área analisada, indicando a ocorrência de temperaturas abaixo de 35,8°C.

Talhões com temperaturas elevadas, indicados pela cor vermelho escuro nos mapas, estão em fase inicial de cultivo, onde a presença de solo influencia elevando o valor da temperatura. Talhões com temperaturas medianas apresentam a cana em seu estágio intermediário e cores alaranjadas nos mapas. Talhões com temperaturas baixas apresentam o cultivo em estágio de maturação e apresentam cores mais claras nos mapas.

As temperaturas mais elevadas foram encontradas em solos com menor percentual de cobertura vegetal, que foram encontrados nas áreas de VEGETAÇÃO+SOLO e nas áreas de SOLO EXPOSTO, áreas de coloração vermelho escuro. Concordando com Dantas (2013) que avaliando a cobertura vegetal concluiu que em áreas com maior existência de vegetação, a temperatura da superfície tende a diminuir, assim como ocorre o inverso.

Dessa maneira, corroborando com os achados de Santos (2016) observando que os maiores valores de temperatura são decorrentes da redução de biomassa da cana-de-açúcar devido a colheita e na fase inicial, na qual o solo ainda se encontra em grande parte exposto sem a presença da vegetação para interceptar a radiação solar.

Em estudos avaliando a temperatura da superfície em cultivos de cana-de-açúcar Gomes et al. (2013), Tartari et al. (2015) também encontram valores elevados da temperatura da superfície em áreas com baixos índices de vegetação, assim como temperaturas menores em áreas com alta densidade de vegetação.



Temperatura da Superfície (C°)



Datum WGS-84  
 Projeção UTM zona 24S  
 Fonte: Landsat-8, 2018  
 Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 14.** Cartas de temperatura da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### 5.9. Balanço de Radiação à superfície (Rn)

O Balanço de Radiação à superfície ou saldo de radiação Rn ( $\text{W.m}^{-2}$ ) de uma superfície representa a quantidade de energia na forma de ondas eletromagnéticas disponíveis para repartir entre os fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração, aquecimento do ar e do solo (MACHADO et al., 2014).

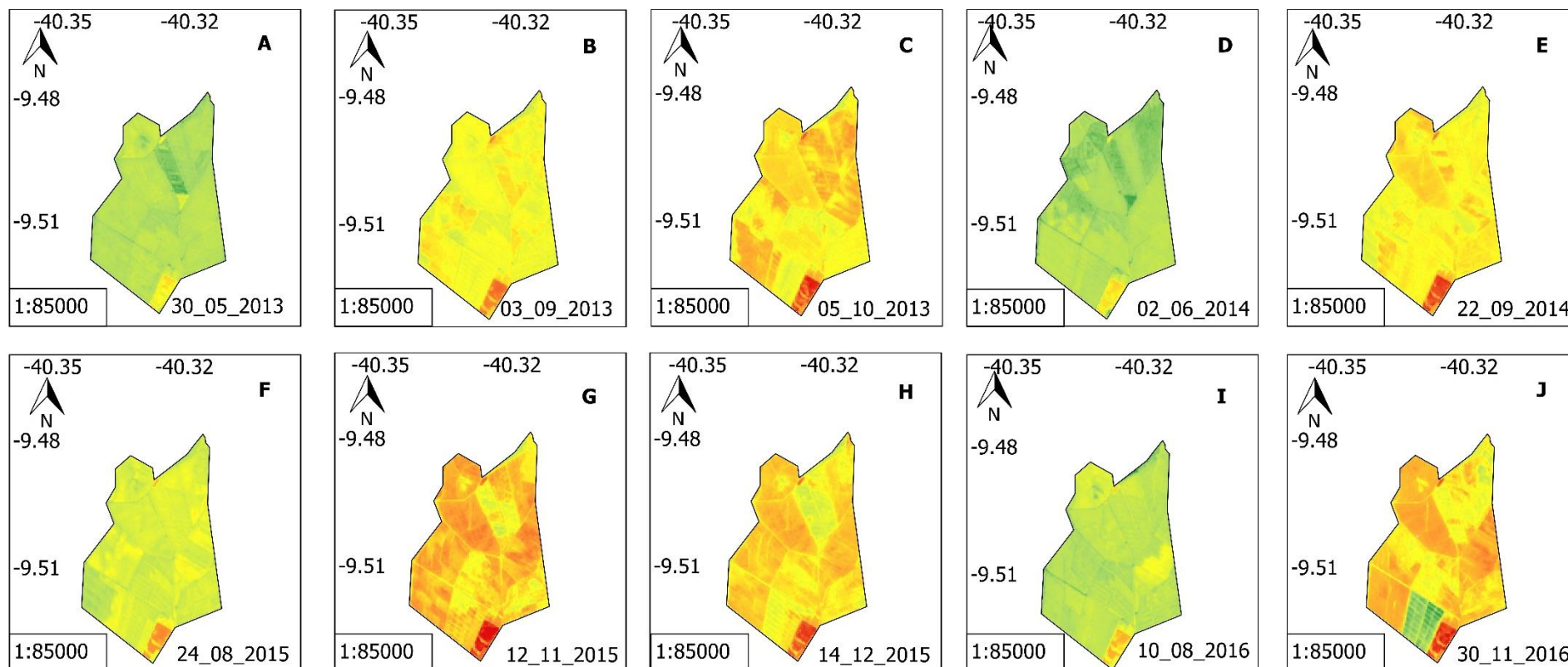
Os valores de Rn descreveram que o fluxo de energia disponível variou de  $334,23 \text{ W.m}^{-2}$  na data 10/08/2016 (Figura 15I) a  $741,21 \text{ W.m}^{-2}$  na data 30/11/2016 (Figura 15J) dentro da amplitude de GIONGO et al. (2010) que estimaram variações de 234,8 a  $859,2 \text{ W.m}^{-2}$  para a cana-de-açúcar em diferentes estágios fenológicos.

Machado et al. (2014), estudando as características da cana-de-açúcar na zona da mata sul do estado de Pernambuco, encontraram valores de saldo que variaram de  $600 \text{ W.m}^{-2}$  a  $680 \text{ W.m}^{-2}$ , valores que se assemelham aos valores encontrados neste estudo.

A maior média entre as datas analisadas ( $591,73 \text{ W.m}^{-2}$ ) foi estimada na data 12/11/2015 (Figura 15G), que apresenta coloração vermelha, indicando elevado valor de balanço de radiação à superfície. A menor média de  $449,74 \text{ W.m}^{-2}$  em 02/06/2014 (Figura 15D) apresenta coloração verde em todos os talhões de produção de cana-de-açúcar, indicando, assim, baixos valores de Rn.

Os maiores valores de Rn foram encontrados em áreas com menor presença de vegetação, evidenciadas nas Figuras 15A a 15J com coloração verde, assim sendo áreas classificadas como SOLO, VEGETAÇÃO+SOLO. Da mesma forma como encontrado por Machado et al. (2014), relatando que os maiores valores de balanço foram encontrados em áreas com menor densidade de cobertura vegetal.

As áreas de SOLO EXPOSTO (estradas nas áreas de produção) influenciam na avaliação devido a ação da reflectância, absorção de energia e ausência da biomassa da cana-de-açúcar, tal fato também mencionado por Santos (2016). Devido a isso, os maiores valores do Rn foram encontrados em talhões com produção inicial e na fase final após a colheita. A fase de desenvolvimento apresentou valores médios e a fase de maturação exibiu os menores valores do parâmetro.



Balanco de Radiação Rn ( $W.m^{-2}$ )



Datum WGS-84

Projeção UTM zona 24S

Fonte: Landsat-8, 2018

Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 15.** Cartas de balanço de radiação à superfície da cana-de-açúcar no Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### 5.10. Fluxo de Calor no Solo (G)

A estimativa do fluxo de calor no solo foi realizada conforme Bastiaanssen (2000) e apresentou variação de  $29,43 \text{ W.m}^{-2}$  na data 02/06/2014 (Figura 16D) a  $136,46 \text{ W.m}^{-2}$  na data 05/10/2013 (Figura 16C). Os resultados corroboram com os escritos de Santos (2016) que encontrou em talhões de cana-de-açúcar valores instantâneos menores que  $50 \text{ W.m}^{-2}$ .

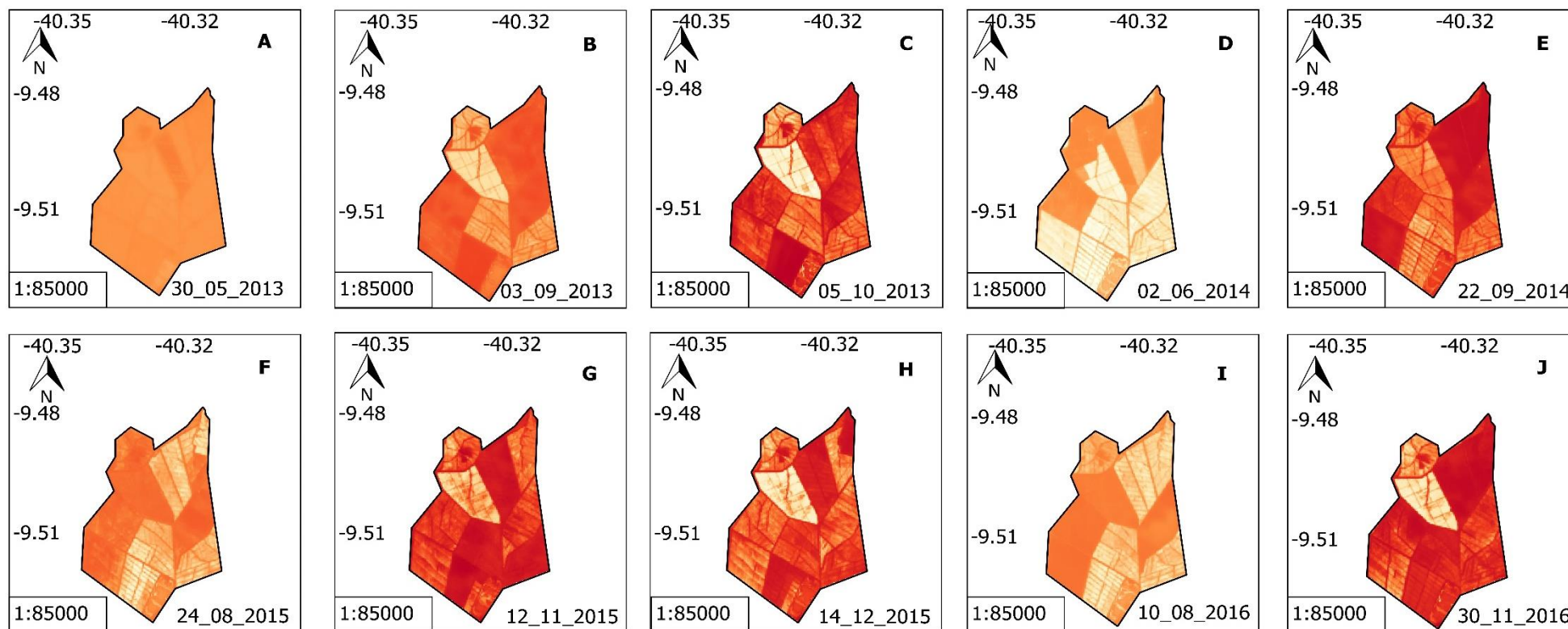
A maior média diária estimada foi  $112,52 \text{ W.m}^{-2}$  em 12/11/2015 (Figura 16G), apresentando coloração vermelho escuro na maioria dos talhões analisados, assim como a menor média de  $63,35 \text{ W.m}^{-2}$  encontrada na data 02/06/2014 (Figura 16D) em coloração laranja claro, sobretudo nos talhões da região sul da área, indicando baixo fluxo de calor no solo da ordem de  $61,40 \text{ W.m}^{-2}$ .

Os maiores valores do fluxo de calor no solo foram encontrados em áreas classificadas como SOLO EXPOSTO, VEGETAÇÃO+SOLO, áreas de coloração laranja claro das imagens de 16A a 16J, sendo estas áreas caracterizadas por possuírem baixa densidade de cobertura vegetal (IAF de 0, a  $2,98 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ ), assim como também ocorre o comportamento inverso, em áreas com menores taxas do G apresentam maior densidade de cobertura vegetal.

Os resultados foram os mesmos encontrados por Santos (2016) e Gomes et al. (2013) que analisaram a cultura da cana e identificaram menores valores de G em áreas com maior cobertura vegetal. Dessa forma, a fase inicial apresenta maior concentração de calor na superfície, influenciando diretamente no processo de brotação dos propágulos.

Corroborando, assim, com Lira (2008), analisando a cana-de-açúcar produzida no Vale do submédio do São Francisco, constatou assim como Santos (2016) e Gomes et al. (2013) que áreas de cultivos mais densos apresentam menores valores de G, assim como áreas menos densas apresentam maiores valores de G.

Deste modo geral, a quantificação de G é de importância, pois representa a entrada e saída de energia interferindo entre outros processos na evapotranspiração. Quanto maior fluxo de calor no solo, maior será a capacidade evaporativa da área, da mesma maneira o inverso ocorre, quanto menor fluxo de calor no solo, menor será a capacidade evaporativa da área, considerando ainda as ações de outros parâmetros como: NDVI, albedo, temperatura da superfície (FUNARI & FILHO, 2017).



Fluxo de Calor no Solo (W.m<sup>-2</sup>)



Datum WGS-84  
 Projeção UTM zona 24S  
 Fonte: Landsat-8, 2018  
 Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 16.** Cartas de fluxo de calor no solo da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### **5.11. Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura -TVDI**

O TVDI é um parâmetro biofísico baseado na relação do NDVI e da temperatura da superfície que avalia o estresse da vegetação e as condições de umidade da superfície.

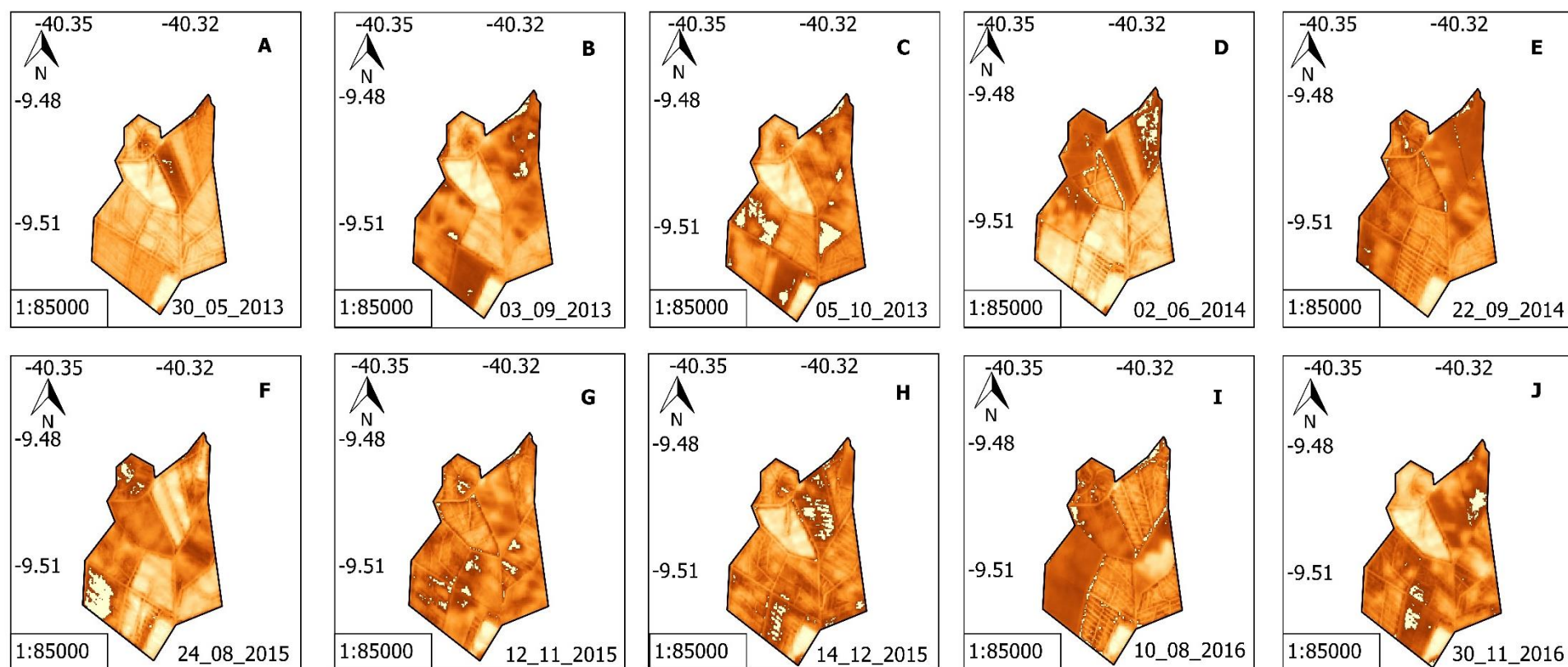
Nas Figuras 17A a 17J, a coloração marrom escuro indica TVDI elevado, com alta taxa de ressecamento, evidenciado na Figura 17E na data 22/09/2014 nos talhões da região norte. Além disso, a coloração marrom claro indica áreas com menor taxa de ressecamento, sendo observadas nas Figuras 17D em talhões da região sul e nas Figuras 17A, 17B, 17C e 17H em talhões da região noroeste da área analisada.

A maior média 0,64 foi encontrada nas datas 10/08/2016 (Figura 17I) e 22/09/2014 (Figura 17E), ambas com 64,0% de ressecamento na média dos pixels. A menor média ocorreu na data 30/05/2013 (Figura 17A) com 40,0% de ressecamento.

Os maiores valores TVDI foram encontrados em épocas com menor período de ocorrência de precipitação na região (maio a outubro) isso mostra a grande relação do índice com o regime de chuvas, mesmo a área sendo irrigada. Corroborando assim com Souza (2017) e Rahimzadeh-Bajgiran et al. (2012) que identificaram a relação entre baixos valores totais de chuva e altos valores de TVDI, mostrando uma forte dependência do índice com o regime de chuvas.

Os maiores valores do índice de ressecamento foram encontrados em áreas com menores densidades de cobertura vegetal, corroborando com os escritos Schirmbeck (2016), citando que o estresse hídrico tem relação direta com a  $T_s$  e a quantidade de biomassa, pois a redução da umidade acarreta o aumento da  $T_s$  e a redução do índice de vegetação.

O TVDI exibiu maiores valores nas fases inicial do ciclo e após a colheita da cana-de-açúcar, períodos em que o solo está mais exposto à radiação global, causando o aumento no nível de ressecamento. Assim, como os menores valores de TVDI foram encontrados nas fases de desenvolvimento avançando, o período no qual a cultura apresenta grande densidade cobrindo o solo e diminuindo o nível de ressecamento.



TVDI



Datum WGS-84  
 Projeção UTM zona 24S  
 Fonte: Landsat-8, 2018  
 Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 17.** Cartas de TVDI da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016, J. 30/11/2016.



### 5.12. Coeficiente Priestley-Taylor ( $\alpha_{PT}$ )

O coeficiente Priestley-Taylor apresentou variação de 0,00 em todas as datas analisadas a 1,26 na data 24/08/2015 (Figura 18F) apresentando maior média 0,61 na data 30/05/2013 (Figura 18J) e menor que 0,29 nas datas 22/09/2014 (Figura 18E) e 12/11/2015 (Figura 18G).

Os valores encontrados foram maiores do que os valores padrões estimados por Priestley & Taylor (1972), sendo: 1,08 (evaporação do solo nu) e 1,32 (evapotranspiração em vegetação densa) e usualmente utiliza-se o valor de 1,26. Outros autores como Viswanadhama et al. (1991) estimaram valores de 0,67 a 3,12 e Sanches et al. (2010) de 0,53 a 0,76, evidenciando a variação dos valores do coeficiente diferente dos padrões.

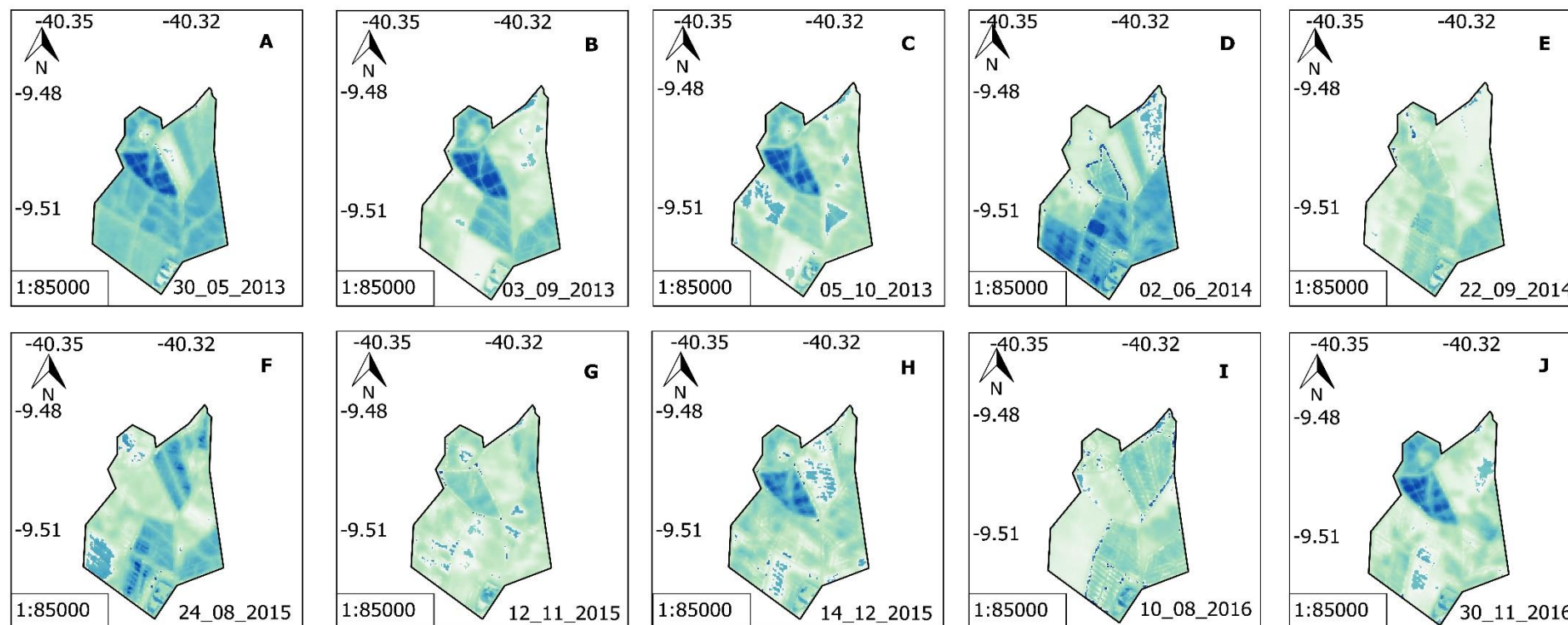
Talhões com a coloração azul escuro indicam a ocorrência de valores semelhantes ao padrão médio do coeficiente (1,26), sendo observada de forma mais nítida nos talhões da região norte das Figuras 18A, 18B, 18C, 18J, e em talhões da região centro-sul (Figura 18D).

Talhões com a coloração azul claro indicam a ocorrência de valores baixos do coeficiente, sendo observado em talhões em todas as imagens, com destaque para a data 10/08/2016 na região sudoeste da Figura 18G e na região sul das Figuras 18B, 18C e norte da Figura 18E.

Os maiores valores do coeficiente foram encontrados em áreas com maior densidade de vegetação, exibidos pela coloração azul escuro nos mapas, assim como os menores foram encontrados em áreas de coloração azul claro, onde a influência do solo se fez de forma aguda. Além disso, a temperatura da superfície foi outro parâmetro que apresentou comportamento proporcional a variação do TVDI.

O NDVI, SAVI e o IAF foram índices de vegetação que se mostraram proporcionais à variação do coeficiente, fato este confirmado por Sanches et al. (2010) encontrando altos valores do coeficiente, quando evidenciados os maiores índices de vegetação, assim como a ocorrência de valores baixos do coeficiente de Coeficiente Priestley-Taylor estão relacionados com menores valores de índices de vegetação.

No período chuvoso (Novembro a Abril) o coeficiente se mostrou baixo e elevado no período seco da região (Maio a Outubro). Fato confirmado nos escritos de Sanches et al. (2010) que encontraram menores valores de  $\alpha_{PT}$  durante a estação úmida e maiores na seca.



Coefficiente Priestley-Taylor



Datum WGS-84

Projeção UTM zona 24S

Fonte: Landsat-8, 2018

Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 18.** Cartas de coeficiente Priestley-Taylor da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### 5.13. Fluxo de Calor Latente ( $\lambda E$ )

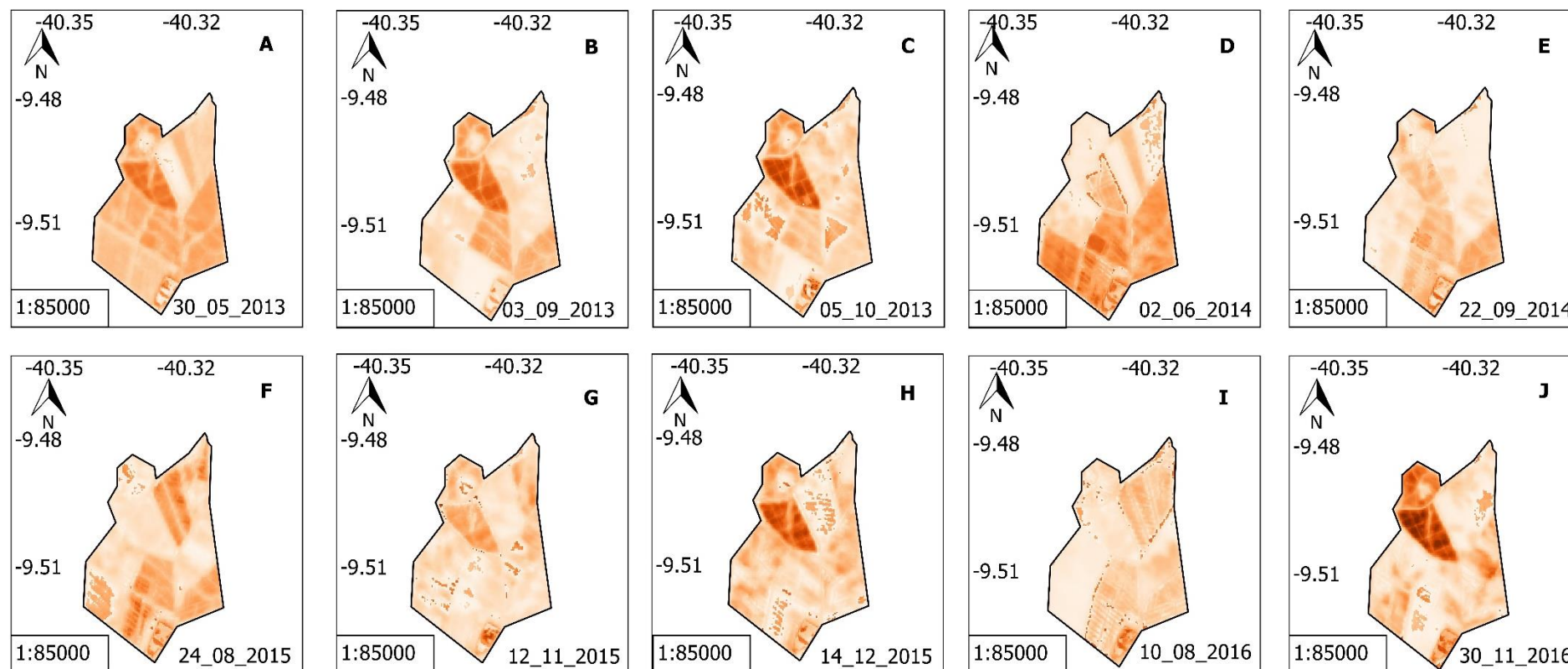
O fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) é um parâmetro que mensura a quantidade de calor utilizada no processo de evaporação e evapotranspiração. E sua estimativa é importante em escalas regionais sendo utilizada de aporte para o manejo de irrigação e avaliação de processos meteorológicos (DANTAS, 2013).

Os valores de  $\lambda E$  apresentaram variação de 0,00 em todas as datas analisadas a 473,65  $W.m^{-2}$  na data 30/11/2016 (Figura 19J), a maior média do parâmetro foi de 147,31  $W.m^{-2}$  encontrada na data 30/05/2013 (Figura 19A), assim como, a menor 85,27  $W.m^{-2}$  foi encontrada na data 10/08/2016 na Figura 19I.

Tais valores se assemelham aos encontrados por Santos (2016) que apresentaram variação de 30  $W.m^{-2}$  a 243  $W.m^{-2}$  avaliando a cana-de-açúcar em diversos estágios de cultivo. Lira (2008) encontrou valores de  $\lambda E$  em cana-de-açúcar semelhantes aos encontrados neste estudo, variando de 50  $W.m^{-2}$  a 300  $W.m^{-2}$ .

Os maiores valores de  $\lambda E$  foram encontrados em áreas com elevada densidade de vegetação (NDVI, SAVI e IAF elevados), classificadas como CANA3 e CANA2, apresentando maior intensidade de fluxo de energia próxima a fase de maturação da cultura, exibidos nas imagens de 19A a 19J pela coloração marrom escuro, com destaque na data 30/11/2016 (Figura 19J) em talhões da região noroeste.

Os menores valores de  $\lambda E$  foram encontrados em áreas com baixa densidade de vegetação, classificados como VEGETAÇÃO+SOLO e CANA1 e nas Figuras 19A a 19J apresentam coloração salmão. Dantas (2013) encontrou valores de  $\lambda E$  mais elevados em áreas de cana-de-açúcar mais densa e os mais baixos em áreas de solo exposto ou em regiões onde a vegetação é esparsa.



Fluxo de Calor Latente ( $W.m^{-2}$ )



Datum WGS-84  
 Projeção UTM zona 24S  
 Fonte: Landsat-8, 2018  
 Elaboração: Caick Marcelo Rosa Martins

**Figura 19.** Cartas de fluxo de calor latente da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

#### 5.14. Evapotranspiração referência de Priestley-Taylor ( $ET_{PT}$ )

No início do desenvolvimento da cultura, a evapotranspiração de referência é baixa ocorrendo maior participação da evaporação de água no solo, pois apresenta menor quantidade de vegetação. No decorrer do desenvolvimento da cultura com a elevação da cobertura vegetal, a taxa de evaporação diminui percentualmente, enquanto a transpiração aumenta (ALLEN et al., 1998).

Os valores de  $ET_{PT}$  variaram de 0,00 mm.dia<sup>-1</sup> (valor encontrado em todas as datas analisadas) a 5,84 mm.dia<sup>-1</sup> em 12/11/2015 (Figura 20G). Tais valores se mostraram semelhantes aos escritos de Oliveira et al. (2015a) que no submédio Francisco encontraram valores que variaram de 2,20 mm.dia<sup>-1</sup> e 8,13 mm dia<sup>-1</sup> com média de 5,31 mm.dia<sup>-1</sup>.

Santos (2016) encontrou variação de valores de  $ET_0$  de cana-de-açúcar entre 0,54 a 2,83 mm.dia<sup>-1</sup>, assim como Machado et al. (2014), na região do litoral sul de Pernambuco, encontraram  $ET_0$  variando de 2 a 5,5 mm.dia<sup>-1</sup>.

Moraes et al. (2014) obtiveram variação de  $ET_0$  de 0,41 a 4,86 mm.dia<sup>-1</sup> também utilizando o sensoriamento remoto para mensurar parâmetros na cana-de-açúcar. Silva et al. (2012a), analisando a mesma área encontraram valores de 1,2 a 7,5 mm.dia<sup>-1</sup>, apresentando média durante o ciclo da cultura de 4,7 mm.dia<sup>-1</sup>.

Lira (2008) encontrou valores da evapotranspiração de referência medida variando de 5,85 a 7,96 mm.dia<sup>-1</sup> e com o método de razão de Bower os valores foram de 4,70 a 6,43 mm.dia<sup>-1</sup>. Assim como Silva et al. (2015) encontraram evapotranspiração da cana-de-açúcar variando 1,73 a 5,04 mm.dia<sup>-1</sup> no estado de Alagoas.

Silva et al. (2015), no município de Capim - PB, testando diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração, encontraram valores médios ao longo de um ciclo da cultura de 3,74 a 4,86 mm.dia<sup>-1</sup>. Teodoro et al. (2015) encontraram valores de evapotranspiração de 1,58 a 5,9 mm.dia<sup>-1</sup>.

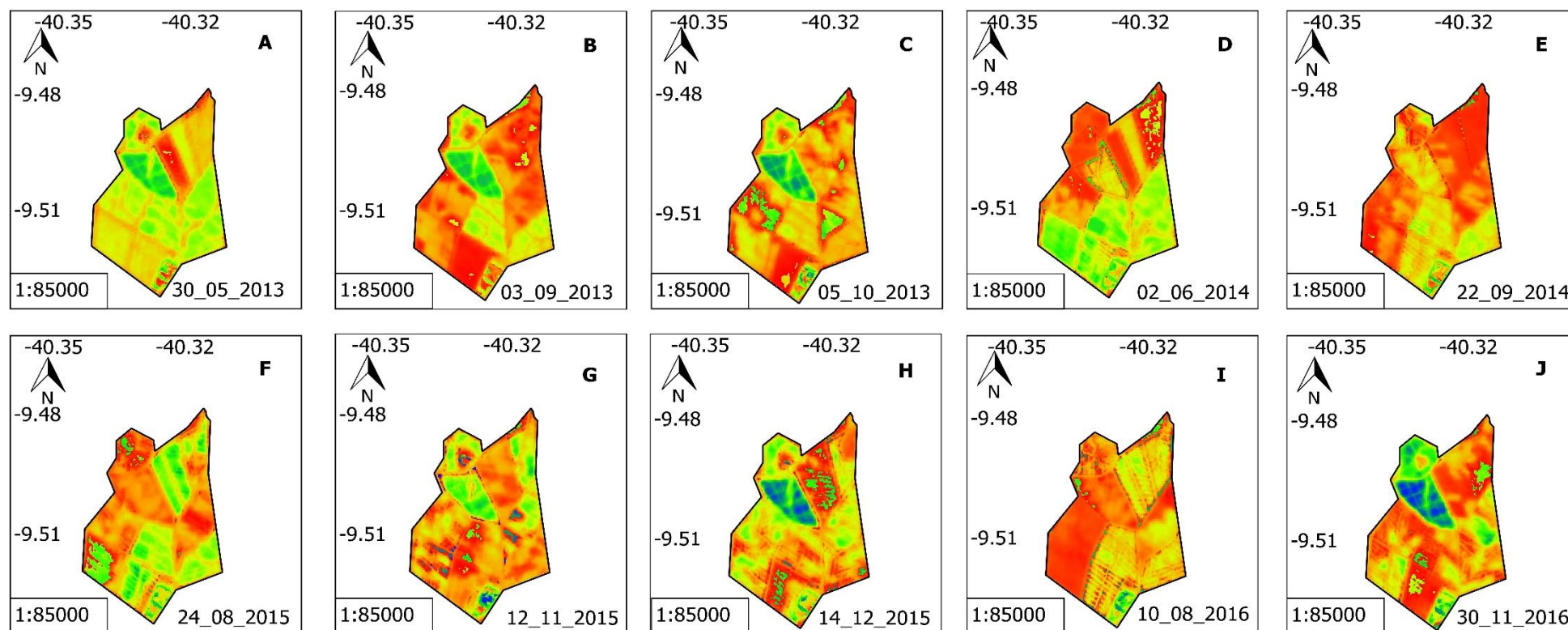
Os maiores valores de  $ET_{PT}$  foram encontrados em áreas com maior presença de cobertura vegetal, representadas nas Figuras de 20A a 20J pela cor azul, com destaque para a data 14/12/2015 (Figura 20H) e 30/11/2016 (Figura 20J) exibindo talhões com elevada evapotranspiração na região noroeste dos mapas. Sendo áreas classificadas como CANA 3 e CANA 2.

Áreas com menor densidade de cobertura vegetal, apresentaram menores valores de evapotranspiração, representados pela coloração vermelha nos mapas das Figuras 20A a 20J, com destaque para 03/09/2013 (Figura 20B), 22/09/2014 (Figura 20E) e 10/08/2016 (Figura

201), já os a talhões de coloração laranja e amarela indicam evapotranspiração de mediana a baixa, áreas estas classificadas como SOLO EXPOTO, VEGETAÇÃO+SOLO e CANA1.

Estas observações concordam com os trabalhos de Lira (2008) e Silva et al. (2012b) no qual a **ET** apresentou baixos valores em solos expostos e com pouca vegetação em função da diminuição acentuada em razão de uma redução do seu índice de área foliar.

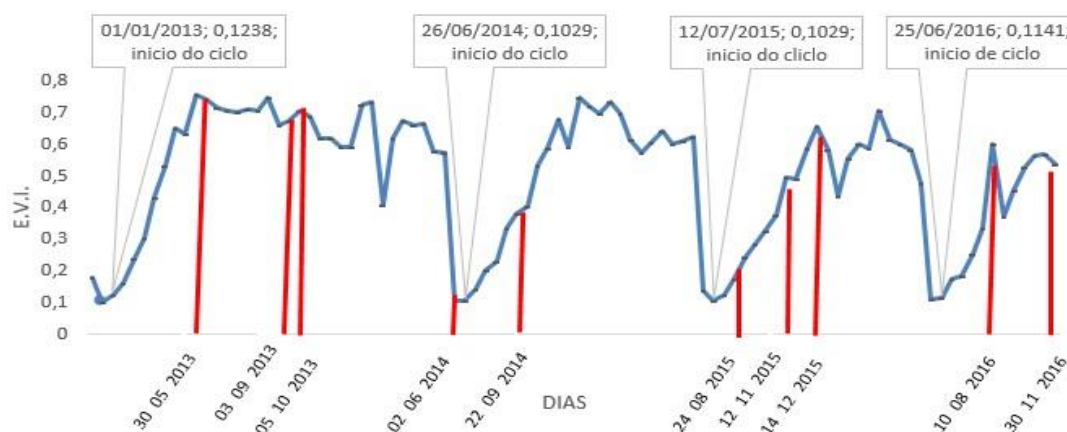
Áreas classificadas como corpos hídricos apresentaram maior evapotranspiração por serem superfície líquidas, nas quais o volume evaporado é elevado, corroborando com Silva (2015) que observou que a evapotranspiração real diária sobre superfícies líquidas se apresentou elevada quando comparadas com outras áreas vegetadas.



**Figura 20.** Cartas de Evapotranspiração de referência Priestley-Taylor da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. A. 30/05/2013, B. 03/09/2013, C. 05/10/2013, D. 02/06/2014, E. 22/09/2014, F. 24/08/2015, G. 12/11/2015, H. 14/12/2015, I. 10/08/2016. J. 30/11/2016.

### 5.15. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar (Kc)

O coeficiente de cultivo para cada data estudada foi estimado considerando o DAP (dias após o plantio) tomando como referência o início do ciclo e os menores valores de EVI durante os anos de 2012 a 2016. A Figura 21 exibe a variação do EVI/MODIS e com as datas das passagens do Landsat-8 (barras em vermelho) e uma inferência da data do início do ciclo fenológico da cana-de-açúcar.



**Figura 21.** Série temporal do EVI/MODIS no Talhão Dominicana de cana-de-açúcar da AGROVALE

**Tabela 10.** Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar no talhão Dominicana da AGROVALE

DATA	Fase	KC
	Início do ciclo dia 01/01/2013	
30_05_2013	149 dias após o plantio (DAP)	0,95
03_09_2013	245 dias após o plantio (DAP)	1,01
05_10_2013	277 dias após o plantio (DAP)	1,01
	Início do ciclo 01/01/2013	
02_06_2014	517 dias após o plantio (DAP)	0,91
	Início 01/01/2013	
22_09_2014	88 dias após o plantio (DAP)	0,95
	Início do ciclo 12/07/2015	
24_08_2015	43 dias após o plantio (DAP)	0,55
12_11_2015	123 dias após o plantio (DAP)	0,95
14_12_2015	155 dias após o plantio (DAP)	1,01
	Início do ciclo 25/05/2016	
10_08_2016	77 dias após o plantio (DAP)	0,95
30_11_2016	189 dias após o plantio (DAP)	0,95



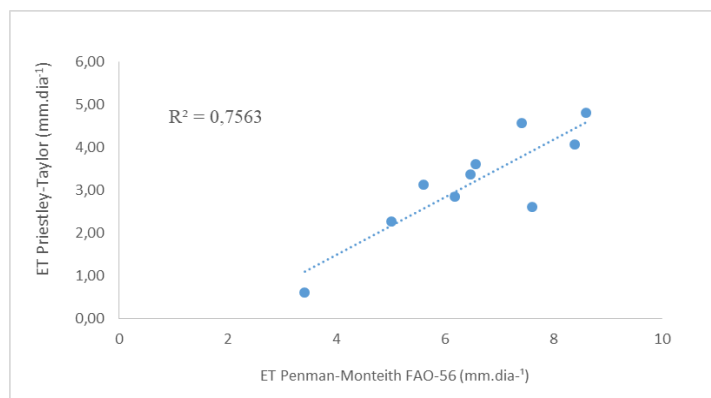
### 5.16. Avaliação estatística (validação)

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Figura 22) apresentou valor de 0,75, significativo ao nível de confiança de 95% ( $p < 0,00176$ ), indicando assim que o modelo proposto de Priestley-Taylor é capaz de explicar em 75,63% o método da evapotranspiração de referência padrão de Penman-Monteith FAO-56.

O valor de  $R^2$  se mostrou satisfatório confirmando a validação como uma ferramenta capaz de ser utilizada como alternativa ao método padrão apresentando resultados eficazes.

Conforme avaliação estatística o coeficiente de Pearson ( $r$ ) encontrado na análise foi de 0,88, conferindo assim, condição satisfatória de correlação entre os dois modelos avaliados, sendo que a correlação se estabeleceu positiva definida como forte. O Erro Médio encontrado se mostrou  $1,81 \text{ mm.dia}^{-1}$ .

Os parâmetros estatísticos foram capazes de mensurar o comportamento do método de evapotranspiração de Priestley-Taylor, comparando com o método da evapotranspiração padrão de Penman-Monteith FAO-56. Desta forma, o método de evapotranspiração de Priestley-Taylor, neste estudo se configurou como uma alternativa eficaz na estimativa da evapotranspiração.



**Figura 22.** Evapotranspiração da superfície da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco.

## 6. CONCLUSÕES

O método Priestley-Taylor (1972) foi capaz de estimar a evapotranspiração de referência em áreas de produção da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco, utilizando imagens do satélite Landsat-8 e dados meteorológicos dos anos de 2013 a 2016, de modo satisfatório.

A evapotranspiração de referência de Priestley-Taylor, durante o período analisado apresentou valores máximos de 5,84 mm dia<sup>-1</sup>, tais valores foram encontrados em áreas com avançada presença de biomassa, assim como os menores valores encontrados em áreas com baixa presença vegetal. Isso comprova a relação de proporcionalidade entre a evapotranspiração e os índices de vegetação (NDVI, SAVI, IAF e EVI).

A comparação da Evapotranspiração de Priestley-Taylor com a Evapotranspiração de Penman-Monteith FAO-56 no processo de validação se mostrou eficiente definindo o método de Priestley-Taylor como uma alternativa eficaz na estimativa da evapotranspiração em regiões áridas e semiáridas.

A utilização de série temporal de EVI/MODIS possibilitou inferir sobre o início e o final do ciclo fenológico da cana-de-açúcar, permitindo associar as datas da passagem do Landsat-8 com os dias após o plantio para determinação aproximada do Kc.

A classificação do uso da terra e da cobertura vegetal se mostrou eficiente, identificando talhões e os estratificando conforme o tipo de cobertura do solo. O processo de classificação se mostrou satisfatório, apresentando média de Índice Kappa superior a 98% o que confere ao processamento um alto grau de eficácia e confiabilidade.

Sugere-se que sejam utilizadas mais imagens do satélite Landsat-8, além de implementar à pesquisa utilizando cenas provenientes do sensor MODIS para a estimativa de evapotranspiração em canaviais.

## 7. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.T., RIZZI, R., SHIMABUKURO, Y.E. 2008. Monitoramento da colheita da cana-de-açúcar por meio de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.60. n.4, p.375-383, 2008.
- 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; PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. . Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - **FAO Irrigation and drainage paper 56**. p. 1–15, 1998.
- ALLEN, R. G; TASUMI, M. ; TREZZA, R. .**Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)**. Advanced training and Users Manual. Idaho implementation, version, v. 1, p. 98, 2002.
- ALLEN, R.G.; Jensen, M.E.; Wright, J.L. & Burman, R.D. Operational estimate of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 650-662, 1989.
- ALVARENGA, A. S.; MORAES, M. F. Processamento digital de imagens LANDSAT – 8 para obtenção dos índices de vegetação NDVI e SAVI visando a caracterização da cobertura vegetal no município de Nova Lima- MG. **Mundo Geo**, v. 77. 2014.
- ARAÚJO, T.L.; DI PACE, F.T. Valores instantâneos da temperatura da superfície terrestre na Cidade de Maceió- AL utilizando imagens do satélite TM/Landsat 5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, p.104- 111, 2010.
- ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. 2º Edition, Academic press, p. 420, 2001.
- BARIANI, C. J. M. V; FELICE, R. D.; BARIANI, N. M.V. Sensoriamento remoto de estádios fenológicos de culturas agrícolas irrigadas usando o NDVI. **Salão de Pesquisas**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão-Universidade Federal do Pampa, v.8; p.1-8, 2016.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. Ph. D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 237 p., 1995.

- BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hidrology**, , v. 229, n. 1, p. 87-100, 2000.
- BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, p.305-317, 2008.
- BEZERRA, J. M. B., MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O; SILVA & Ênio F. de F. e Silva<sup>6</sup>. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.1, p.73–84, 2014.
- BEZERRA, J. M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE. 2013.
- BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S., JIANG, LE, Estimation of the net radiation days. **Remote Sensing of Environment**, v.97, p.52-67, 2005.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F; ANJOS, R. J. A.; SILVA, T.J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.16, n.4, p.380-390, 2012.
- BURMAN, R. D.; POCHOP, L. O. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. **Amsterdam: Elsevier**. 278 p. 1994.
- CANABRAVA, A.P. **História econômica: Estudos e pesquisas**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, UNESP. 320 p , 2005.
- CASTILLO, E.M.D.; MARTIN, A.G.; ALADRÉN, L.A.L.; LUIS, M. Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). **Applied Geography**, v.62, p.247-255, 2015.
- CHOUDHURY, B.J.; AHMED N.U.; Idso S.B.; REGINATO R.J.; DAUGHTRY C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v.50, p.1- 17, 1994.
- CODEVASF- Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Submédio São Francisco**. Disponível em <http://www2.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/recus/submedio-sao-francisco>. Acesso em 18 de Fevereiro de 2019.

- COELHO, A.L.N.; CORREA, W.S.C. Temperatura de superfície celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Rev. Geogr. Acadêmica**. v.7, n.1, p.31-45, 2013.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-açúcar, v. 2 – safra 2015/16**, n. 3, terceiro levantamento. Brasília, p. 1-65, dezembro 2015.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v1- safra 2016/17, n. 1, primeiro levantamento. Brasília, p. 74, 2016.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v. 4- safra 2017;2018, n1, primeiro levantamento. Brasília : 2017.
- CORREIA, A. H.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V. Avaliação de índices de vegetação MODIS para detecção de desmatamentos na Amazônia.” **Ambiente & Água**. V1. p. 52-64, 2006.
- CRUZ, F. N.; BORBA, G. L.; ABREU, L. R. D.. **Ciências da natureza e realidade: interdisciplinar** – Natal, RN: EDUFRN Editora da UFRN. 348p, 2005.
- DANTAS, M. J. F.. **Evapotranspiração Na Sub-Bacia do Riacho Jardim - CE, por Sensoriamento Remoto**. 107f. Tese. (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, UNESP. Botucatu, 2013.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. São Paulo, SP: Thomson Pioneira,. 706p, 2006.
- 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.; KASSAM, A.H. Yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage, Paper 33**, Rome, 193 p, 1979.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.K. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 306p, 1994.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. Satélites de Monitoramento. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 8 nov. 2018.

ESTEVEES, B. S.; SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. L.; MUNIZ, R. A.; SILVA, R. M. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, V. 7, n.4, p. 663670, 2012.

FAUSTO, M. A. Análise de parâmetros biofísicos estimados pelo algoritmo SEBAL em áreas de cerrado na bacia do alto Rio Paraguai. 62 f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, 2014.

FERREIRA, R.C.. Evapotranspiração e produtividade de água no primeiro ciclo da cana-de-açúcar submetida à irrigação subsuperficial no semiárido do Brasil. 94f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. UFCG, 2014.

FUNARI, F.L.; PEREIRA FILHO, A. J. Estimativa do fluxo de calor no solo a partir da temperatura do Solo em São Paulo, SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v38 n1, p.49-57, 2017.

GEORGESCU, M.; LOBELL, D. B.; FIELD, C. B.; MAHALOV, A. Simulated hydroclimatic impacts of projected Brazilian sugarcane expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 5, p. 972–977, 2013.

GIONGO, P. R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, 2008.

GIONGO, P. R.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R.; MEDEIROS, S. R. R.; NAZARENO, A. C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.3, p. 279-287, 2010.

GOMES, H. E. **Balancos de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, 2009.

GOMES, L.C.F.; SANTOS, C.A.C.; ALMEIDA, H.A. Balanço de energia à superfície para a cidade de Patos-PB usando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 15-28, 2013.

GONÇALVES, R. R. V. **Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008**. 185f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP, 2008.

- GONÇALVES, R.R.V.; JUNIOR ZULLO, J.; COLTRI, P. P.; AVILA, A. M.H.; AMARAL, B.F.; SOUZA, E.P.M; ROMANI. **Relação entre o índice EVI e dados de precipitação nas áreas de plantio de cana-de-açúcar na região central do Brasil**. IV Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Bonito, MS. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.1054-1063, 2012.
- GRZEGOZEWSKI, D.M.; JOHANN, J.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; MERCANTE, E.; COUTINHO, A.C. Mapping soya bean and corn crops in the State of Paraná, Brazil, using EVI images from the MODIS sensor. **International Journal of Remote Sensing**, v.37, p.1257-1275, 2016
- HUANG, Y; TIAN, Q.;DU,L; SUN,S. Analysis of Spatial-Temporal Variation of Agricultural Drought and Its Response to ENSO over the Past 30 Years in the Huang Huai-Hai Region, China. **Terr. Atmos. Ocean. Sci**, v. 24, n. 4, Part II, p. 745-759, 2013.
- HUETE, A., JUSTICE, C., LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, p.224– 234, 1994.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.195-213, 2002.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p.295-309, 1988.
- JADOSKI, C. J.; TOPPA, E. V. B.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; Ono, E. O.; RODRIGUES, J.D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.3, n.2, p. 169-176, 2010.
- JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). Water deficits and plant growth. New York: **Academic Press**. v.2, p.1-22,1968.
- JOHANN, J.A.; ROCHA, J.V.; DUFT, D.G.; LAMPARELLI, R.A.C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1295-1306, 2012.
- JUÁREZ, R. I. N. **Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana de açúcar e modelagem numérica da atmosfera**.193f. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo-USO., 2004.

- KHALDI, A., KHALDI, A.; HAMIMED, A. Using the Priestley-Taylor expression for estimating actual evapotranspiration from satellite Landsat ETM + data. **Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions** Proceedings of ICWRS2014, p.364-398, 2014.
- KLAR, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. [s.l.] NOBEL, 1984.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Update world map of the Köppen-Geiger climate classification**, 2007.
- LANDIS, R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.
- LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, p.214-218, 2000.
- LIRA, V. M. DE. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da canadeaçúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2008.
- LONGHI, L. M. **Determinação do coeficiente de cultura (kc) e Evapotranspiração da cultura do alho na região do planalto Catarinense**. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2013.
- LOPES, I.; CERQUEIRA JÚNIOR, E. P.; MELO, J. M. M.; LEAL, B. G.. Potencial de geração de energia eólica no submédio São Francisco. **Journal of Environmenta Analysis and Progress**. v.2, n.4,p.330-340, 2017.
- MACHADO, C; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, M. B.; GALVINCIO, J. D.. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM – Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de PERNAMBUCO. **Revista Brasileira de Meteorologia**.,v.29 p.55 – 67, 2014.
- MARIANO, D.A.; MOREIRA, M.A. **Avaliação do desempenho de safras de cana-de-açúcar e sua relação com a umidade do solo utilizando dados MODIS e TRMM**.- XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. p. 2317-2324, 2015.
- MELO, E. C. S.; ARAGÃO, M. R. SILVA.; CORREIA, M. F.; Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, Submédio São Francisco, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p.229 - 241, 2013.



MENDES, D.F., FERRARI, J. L.; PELUZIO, J. B. E.; DARDENGO, M. C. J.D.; PELUZIO, T. M.O.; SILVA, S. F. Caracterização espectro-temporal de uma lavoura de café conilon em imagens Landsat . **Agrarian Academy**, Goiânia, v.1, n.01; p.108-121, 2014.

MONTEIRO, B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos - O fator meteorológico na produção agrícola**. Instituto Nacional de Meteorologia- INMET. 530p, 2009.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Determination of total accumulated rainfall, global radiation, evapotranspiration and degree-days originated from 62 the ECMWF model to sugar cane crop. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 2, p. 322-331, 2014.

MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo Sebal. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.1148-1159, 2010.

MOURA, M. S. B. ; SÁ, I. I. S.; SILVA, T. G. F. ; GALVÍNCIO, J. D.; RIBEIRO, J. G. **Variação espacial da precipitação e temperatura do ar no Submédio São Francisco**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006.

NASCIMENTO, E. F. do N.; PEREIRA, F. A. C.; NETTO, A. de O. A.; CAMPECHE, L. F. S. M; SANTOS, C. A.. Comportamento físico-hídrico dos solos do perímetro irrigado Curaçá em Juazeiro/BA. Irriga, v. 17, p. 435 - 447, 2012.

NEMUS - Gestão e Requalificação Ambiental, Lda. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco. **Caderno de Investimentos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco** 2016-2025. 248p. 2016.

NHONGO, E. J. S; FONTANA, D. C.; GUASSELLI, L. A.; ESQUERDO, J. C. D. M. Caracterização fenológica da cobertura vegetal com base em série temporal NDVI/MODIS na Reserva do Niassa. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 69, n. 6, p. 1175-1187, 2017.

NICHOLS, J., Eichinger, W., Cooper, D. I., Prueger, J. H., Hipps, L.E., Neale, C. M. U., and Bawazir, A. S.: Comparison of evaporation estimation methods for a riparian area, IIHR Technical Re-port No 436, **Hydroscience and Engineering**, University of Iowa, 2005.

OLIVEIRA, N. F.; SILVA, M. T.; GONÇALVES, A. A. S.; ARAÚJO, R. M. S. Variabilidade espaço temporal da Evaporação Potencial no submédio do rio São Francisco utilizando a análise fatorial em componentes principais. **Ciência e Natura**, v.36 (Ed. Especial II), p.462-473, 2014.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, F. J.; ALVES, R.C.; LIMA, L.A. SANTOS, S.T. RÉGIS, L.R.L. Produção de feijão caupi em função da salinidade e regulador de crescimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 11, p. 1049-1056, 2015b.

OLIVEIRA, L. D. S.; MOURA, M. S. B. ; CARMO, J. F. A. ; SILVA, T. G. F. **Evapotranspiração da Cana-de-Açúcar cv. VAT 90-212 irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco**. JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, Petrolina: Embrapa Semiárido,.Anais. p.93-99. 2015a.

OLIVEIRA, R. B. **Modelagem da Produtividade da Cana-de-açúcar Para as Principais Regiões Produtoras de Minas Gerais**.110 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2010.

PACHECO, A. P.; CERQUEIRA, M. A.; SILVA, B. B.; NICACIO, R. M. .Análise espaço temporal da evapotranspiração na área de preservação ambiental da Ilha de Santa Rita, Alagoas, Brasil. **Revista Árvore**. vol.38, n.3. p.453-460, 2014.

PEREIRA, A. R.; SEDYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 323p, 2013.

PINHEIRO, M. P. M.; A; CRUZ, R. L.; SIMÕES, W. L.. Comportamento do Teor de Água num Solo Cultivado com Cana-de-Açúcar Irrigada com Diferentes Lâminas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.4, p. 30-42, 2015.

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

PRIESTLEY, C. H. B. and Taylor, R. J.: On the assessment of sur-face heat flux and evaporation using large scale parameters, **Mon.Weather Rev.**, p.81–92, 1972.

RAHIMZADEH-BAJGIRAN, P.; Omasa, K.; Shimizu, Y. Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sensor**. v68. p.1-12, 2012.

RAMME, F.L.P.; LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 480-494, 2010.

- REICHARD, K.; TIMM. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2a edição ed. [s.l.] Manole, 2012.
- RISSO, J.; RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1317-1326, 2012.
- SÁ, P. C. C. **Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital**. 60f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal Rural do Semi-árido, UFERSA, 2016.
- SANCHES, L.; ALVES, M. C.; CAMPELO JUNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J. S.; DALMAGRO, H.J. Estimativa do coeficiente Priestley-Taylor em floresta monodominante Cambarazal no Pantanal. **Revista Brasileira de Meteorologia**. n.25 n.4, p448-454, 2010.
- SANDHOLT, I., RASMUSEN, K., ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 213-224, 2002.
- SANTOS, F. X.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. R.; SOUZA, E. R. Determinação do consumo hídrico da cenoura utilizando lisímetros de drenagem, no agreste pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.3, p.304-310, 2009.
- SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. **rev. ampl.** 2. ed. 637p, 2012.
- SANTOS, J. E. O.. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto no município de Botucatu-SP**. 64f. Dissertação (Mestrado) – 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. 30-36, 2015.
- SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; CARVALHO NETO, J.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, A.M. Assessment of land use change on the streamflow using GIS, remote sensing and physically-based model, SWAT. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 364, p. 3843, 2014.

SANTOS, M. A. L. **Balço hídrico, crescimento e produtividade de genótipos rb de cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro na região de rio Largo-AL**. 60f. Dissertação (Mestrado). – Universidade Estadual Paulista, UNESP. Botucatu, 2015.

SATVeg - Sistema de Análise Temporal da Vegetação. Disponível em <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/pages/home.html>. Acesso 20 de Novembro de 2018.

SCHIRENBECK, W. S. **Padrão espaço temporal do TVDI em área de cultivo de soja**. 78f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 2016.

SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, F. A. C.; VILLANOVA, N. A.; MAGGIOTTO, S. R. Variação sazonal do parâmetro de Priestley-Taylor para estimativa diária de evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n.1, p.49-53, 2000.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005.

SILVA, B.B., BRAGA, A.C., BRAGA, C.C., OLIVEIRA, L.M.M., MONTENEGRO, S.M.G.L., Junior, B.B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 20, n.1, p. 3-8, 2016.

SILVA, J.P. N.; SILVA, R. M. N. **Noções da cultura da cana-de-açúcar**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás/IFG-Inhumas; Universidade Federal de Santa Maria-UFSM. 105 p., 2012.

SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, J.L.; LYRA, G.B.; SANTOS, M.A.L.. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.849-856, 2015.

SILVA, T. G. F. ; MOURA, M. S. B. de, ZOLNIER; SOARES, José M; SOUZA, L.S. B. de, & BRANDÃO, Elieth O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15 n.2, p.139-147, 2011.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; CARMO, J. F. A.; SOUZA, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012a.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.64-71, 2012b.

SILVA, V.P.R.; OLIVEIRA, S.D.; SANTOS, C.A.C.; SILVA, M.T. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.17, n.2, p.180 - 189, 2013.

SILVEIRA, S. W.G. Análise de desempenho de produtos Modis para modelagem da dinâmica de inundação do pantanal Mato-grossense. 125 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Mato Grosso- UFMT, 2015.

SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Dados Ambientais Petrolina-PE. Disponível em <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>. Acesso em 04 de Janeiro de 2018.

SOUZA, C.H.W.; MERCANTE, E.; JOHANN, J.A.; LAMPARELLI, R.A.C.; URIBEOPAZO, M.A. Mapping and discrimination of soya bean and corn crops using spectrottemporal profiles of vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.36, n.7, p.1809-1824, 2015.

SOUZA, D,N,N.; CAMACHO, R,G V.; MELO.; J, I, M.; ROCHA, L, N, G.; Da SILVA, N, F. Estudo fenológico de espécies arbóreas nativas em uma unidade de conservação de Catinga no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Biotemas**, v. 27, n. 2, p. 31-42, 2014.

SOUZA, J. C. **Metodologia para avaliação ambiental em bacias hidrográficas, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto**. 95f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"- UNESP, 2017.

TARTARI R, MACHADO N.G; ANJOS M.R.; CUNHA J.M.; MUSIS C.R. NOGUEIRA, J.S., BIUDES, M.S.. Análise de índices biofísicos a partir de imagens TM Landsat 5 em paisagem heterogênea no Sudoeste da Amazônia. **Revista Ambiente Água**. 2015;v.10 n.4.p.943-953, 2015.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. Ph. D. Dissertation, University of Idaho, Moscow, Idaho. 2003.

TELES, T.S. **Relações de métricas fenológicas EVI/MODIS do TIMESAT com sombreamento e Padrões atípicos de temperatura em Floresta Estacional Decídua**. 90f . Dissertação (Mestrado). – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, 2015.

TEODORO, I., J. DANTAS NETO, L. A. HOLANDA, G. D. SAMPAIO NETO, J. L. SOUZA, G. V. S. BARBOSA, G. B. LYRA. Weather variables, water balance, growth, and agro industrial yield of sugarcane. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p.76 -88, 2015.

UDOP- UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA . **A História da Cana-deaçúcar - Da Antiguidade aos Dias Atuais**. Disponível em <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>. Acesso em 10 de Outubro de 2017.

USGS. – United States Geological Survey. EarthExplorer -Disponível [https://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) Acesso em 20 de Janeiro de 2018.

VELOSO, G.A., **Análise espaço temporal dos componentes do balanço de radiação, energia e evapotranspiração, usando técnicas de sensoriamento remoto em áreas irrigadas do projeto Jaíba/MG**. 136 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Uberlândia, UFU - 2014.

VELOSO, G.V.; FERREIRA, M. E.; SILVA, B. B. Determinação da evapotranspiração real diária em Áreas irrigadas do projeto jaíba (Minas Gerais, Brasil), Mediante imagens Landsat 5 – TM. **Revista Cerrados**. v.15, n.1, p.53-76, 2017.

VISWANADHAMA, Y.; SILVA FILHO, V. P.; ANDRÉ, R. G. B The Priestley-Taylor parameter  $\alpha$  for the Amazon Forest, **Forest Ecology and Management**, v. 38, n.3-4, p.211-225, 1991.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.142, p.133-142, 2007.

WONG SAK HOI, L.; MARTINCIGH, B. S. Sugar cane plant fibres: Separation and characterisation. **Industrial Crops and Products**, v. 47, p. 1-12, 2013.

XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; BERKA, L.M.S.& MOREIRA, M.A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p.755-768, 2006.

XU, C. Y.; SINGH, V. P. Evolution and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. **Hydrology Processes**, v.14, p.339-349, 2000.