



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



**MODELOS SEBAL E METRIC PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
DA CULTURA DA BANANA IRRIGADA**

DISSERTAÇÃO

RENATA RICHELLE SANTOS DINIZ

Campina Grande - PB

Julho- 2021

RENATA RICHELLE SANTOS DINIZ

**MODELOS SEBAL E METRIC PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
DA CULTURA DA BANANA IRRIGADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:**

Engenharia de Irrigação e Drenagem

**ORIENTADOR:**

Prof. Ph.D. Hugo Orlando Carvallo Guerra

Campina Grande

Julho- 2021

D585m Diniz, Renata Richelle Santos.  
Modelos SEBAL e METRIC para estimativa da  
evapotranspiração da cultura da banana irrigada / Renata Richelle  
Santos Diniz. – Campina Grande, 2021.  
92 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –  
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e  
Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Hugo Orlando Carvallo Guerra".

Referências.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Balanço de Energia. 3. Saldo de  
Radiação. I. Nascimento, José Wallace Barbosa do. II. Título.

CDU 528.8(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA

Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900.

**FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES**

**RENATA RICHELLE SANTOS DINIZ**

**MODELOS SEBAL E METRIC PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
DA CULTURA DA BANANA IRRIGADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 28/07/2021

Hugo Orlando Carvallo Guerra – Orientador –PPGEA/CTRN/UFCG

Vera Lucia Antunes de Lima – Examinadora Interna UAEA/CTRN/UFCG

Maria Leide da Silva Alencar - Examinador Externo - UATEC/CDSA/UFCG

Jorge Alves de Sousa - Examinador Externo - CES/UAFM/UFCG



Documento assinado eletronicamente por **MARIA LEIDE SILVA DE ALENCAR, PROFESSOR 3 GRAU**, em 30/07/2021, às 15:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JORGE ALVES DE SOUSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/07/2021, às 15:51,

conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art.8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/08/2021, às 15:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/08/2021, às 18:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1672313** e o código CRC **312F7FB2**.

---

*Dedico este trabalho aos meus pais Marileide e Joacil, pelo amor incondicional, compreensão nos momentos em que à distância é inevitável e ao esforço destinado à minha formação.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre comigo nos momentos bons e ruins, guiando os meus passos me dando força em cada obstáculo posto à minha frente.

A nossa senhora desatadora de nós pela sua imensa misericórdia para comigo, que por tantas vezes voltou o seu olhar compassivo sobre mim, me protegendo.

Aos meus pais, Joacil Marcos dos Santos e Marileide Diniz dos Santos, que foram os principais motivos para que eu pudesse chegar até aqui, que sempre acreditaram em mim por sempre confiarem nas minhas decisões e por serem os melhores exemplos de seres humanos e profissionais que eu poderia ter. Ao meu irmão, pai e amigo Riosny Rennan, pela força, amizade e companheirismo durante essa minha jornada, por sempre diante de qualquer problema estar disposto a me ajudar tornando possível a realização de tantas coisas.

A minha irmã e aos meus cunhados Rennale Rayane, Renato César e Sylvia Raphaela por sempre estarem presente, pela força e pela ajuda sempre que precisei.

Aos meus sobrinhos Rafael, Samuel e Lucas por serem minha fonte de alegria, por me darem vontade de continuar na caminhada e ser um futuro exemplo.

À Universidade Federal de Campina Grande, em particular à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante o curso de Mestrado.

Ao Professor Hugo Orlando Carvallo Guerra, pela orientação, pela gentileza diária e confiança em mim depositada e incansável dedicação em todos os momentos.

A todos os professores e os funcionários do departamento e da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFCG, pela atenção dispensada e pela disponibilidade em ajudar e também aos técnicos e terceirizados que colaboraram de forma direta e indireta para que pudesse desenvolver como profissional e chegar onde cheguei.

A colaboração fundamental de Mailson Cordão, que da forma que pôde se fez presente, colaborando e contribuindo para obtenção de bons resultados, dividindo comigo o êxito dessa pesquisa.

Ao meu noivo e amigo Lucas Wagner que por muitas vezes me incentivou e me proporcionou forças e meios para ajudar-me a concluir essa etapa, por sempre acolher-me com palavras de conforto e mostrando que tudo iria dar certo.

A minha sogra, Geane Costa e minhas cunhadas, Larissa e Letícia que me acolheram por esses anos e por terem sido família quando a minha estive longe.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelo companheirismo: Júlio Cesar e, em especial, a Shayenny Alves que compartilha momentos de luta a longos anos, dividindo comigo momentos de tribulações e vitórias, sendo força e apoio sempre que possível.

Por fim, o meu reconhecimento e gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **MODELOS SEBAL E METRIC PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA BANANA IRRIGADA**

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo estimar a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) diária através da aplicação dos algoritmos Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), e do Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration (METRIC), a partir de produtos de sensoriamento remoto, em área irrigada com cultivo de banana-nanica no município de Barbalha- CE e compará-la com a evapotranspiração estimada através do método de Penman-Monteith, em datas distintas no ano de 2016. Para isso, foram utilizadas às imagens do satélite Landsat-8 OLI/TIRS, e os dados complementares de superfície da estação meteorológica automática situada no próprio município de Barbalha- CE. Os processos de empilhamento das bandas, recorte das imagens empilhadas, e o processamento das imagens se deu por software ERDAS imagine, em que se realizaram as operações matemáticas de determinação das evapotranspirações. Os valores de evapotranspiração real diária da bananeira estimados pelos algoritmos SEBAL e METRIC seguiram os encontrados na bibliografia. Na área cultivada os valores de evapotranspiração diária pelo SEBAL variaram entre 4,40 e 6,5 mm dia<sup>-1</sup>. Já pelo METRIC, a variação ocorreu entre 5,0 a 6,8 mm dia<sup>-1</sup>. Através dos erros absolutos e relativos utilizados para comparar a evapotranspiração real estimados pelo SEBAL com o método de Penman- Monteith as diferenças são insignificantes entre as evapotranspirações para os dias 22 de Maio, 10 de agosto e 29 de outubro de 2016 (6,0; 7,4 e 8,4%, respectivamente). Já entre o algoritmo METRIC e Penman- Monteith essas diferenças de evapotranspiração foram pela ordem de 6,0, 7,4 e 4,4% para os dias 22 de Maio, 10 de agosto e 29 de outubro de 2016. Sendo assim, ambos os algoritmos exibiram erros basicamente iguais e inferiores a 9%. O que se considera com nível de precisão satisfatório e aceitável. Não apresentando assim, um melhor desempenho entre eles para estimar os valores de evapotranspiração diária.

**PALAVRAS-CHAVE:** sensoriamento remoto, balanço de energia, saldo de radiação.

## **SEBAL AND METRIC MODELS FOR ESTIMATING THE EVAPOTRANSPIRATION OF THE IRRIGATED BANANA CROPS**

**ABSTRACT:** This work aimed to estimate the daily real evapotranspiration (E<sub>Tr</sub>) through the application of Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration (METRIC) algorithms from remote sensing products, in an irrigated area with dwarf banana cultivation in the municipality of Barbalha-CE and compare it with the evapotranspiration estimated through the Penman-Monteith method, on different dates in 2016. For this, the Landsat- satellite images were used. 8 OLI/TIRS, and additional surface data from the automatic meteorological station located in the municipality of Barbalha-CE. The processes of stacking the bands, cutting the stacked images, and processing the images were carried out by ERDAS imagine software, in which the mathematical operations to determine the evapotranspirations were carried out. The real daily evapotranspiration values of the banana tree estimated by the SEBAL and METRIC algorithms followed those found in the bibliography. In the cultivated area, the values of daily evapotranspiration by SEBAL ranged between 4.40 and 6.5 mm day<sup>-1</sup>. As for the METRIC, the variation occurred between 5.0 to 6.8 mm day<sup>-1</sup>. Through the absolute and relative errors used to compare the actual evapotranspiration estimated by SEBAL with the Penman-Monteith method, the differences are insignificant between the evapotranspirations for May 22, August 10 and October 29, 2016 (6.0; 7.4 and 8.4%, respectively). Between the METRIC and Penman-Monteith algorithm, these evapotranspiration differences were in the order of 6.0, 7.4 and 4.4% for May 22, August 10 and October 29, 2016. Thus, both the algorithms exhibited errors basically equal to and less than 9%. What is considered a satisfactory and acceptable level of accuracy. Thus, not showing a better performance among them to estimate the daily evapotranspiration values.

**KEYWORDS:** remote sensing, energy balance, radiation balance.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da área experimental de Barbalha- CE, destacando a parcela amostral com o cultivo irrigado da banana nanica (em vermelho).....	33
<b>Figura 2.</b> Diagrama de etapas computacionais no processamento para obtenção do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) por meio do algoritmo SEBAL.....	39
<b>Figura 3.</b> Diagrama de etapas computacionais no processamento para obtenção do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) por meio do algoritmo METRIC.....	44
<b>Figura 4.</b> Cartas temáticas do albedo da superfície no município de Barbalha – CE (SEBAL): 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	58
<b>Figura 5.</b> Cartas temáticas do albedo da superfície no município de Barbalha – CE (METRIC): 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.....	59
<b>Figura 6.</b> Cartas temáticas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI-SEBAL), no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	61
<b>Figura 7.</b> Cartas temáticas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI-METRIC), no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.....	62
<b>Figura 8.</b> Cartas temáticas do Índice de Área Foliar (IAF- SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	63
<b>Figura 9.</b> Cartas temáticas do Índice de Área Foliar (IAF- METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.....	64
<b>Figura 10.</b> Cartas temáticas da temperatura da superfície do solo ( $T_s$ - SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	65
<b>Figura 11.</b> Cartas temáticas da temperatura da superfície do solo ( $T_s$ - METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.....	66
<b>Figura 12.</b> Cartas temáticas do saldo de radiação da superfície ( $R_n$ - SEBAL) o município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	68
<b>Figura 13.</b> Cartas temáticas do saldo de radiação da superfície ( $R_n$ - METRIC) o município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.....	69
<b>Figura 14.</b> Cartas temáticas do fluxo de calor no solo (G- SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	70

<b>Figura 15.</b> Cartas temáticas do fluxo de calor no solo (G- METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.....	72
<b>Figura 16.</b> Cartas temáticas da evapotranspiração real diária (ETr <sub>24h</sub> - SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	73
<b>Figura 17.</b> Cartas temáticas da evapotranspiração real diária (ETr <sub>24h</sub> - METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Coeficientes de calibração para as bandas do satélite Landsat 8 (OLI).....	35
<b>Tabela 2.</b> Dados para obtenção da evapotranspiração real de Penman- Monteith para Barbalha- CE.....	76
<b>Tabela 3.</b> Comparação entre a evapotranspiração de referência diária obtida pelo algoritmo SEBAL e a evapotranspiração real diária pelo modelo de Penman- Monteith, para a área de bananeira em Barbalha- CE.....	76
<b>Tabela 4.</b> Comparação entre a evapotranspiração de referência diária obtida pelo algoritmo METRIC e a evapotranspiração real diária pelo modelo de Penman- Monteith, para a área de bananeira em Barbalha- CE.....	77
<b>Tabela 5.</b> Comparação entre os erros (absoluto e relativo) calculados com relação à evapotranspiração real diária obtida pelo modelo de Penman- Monteith e a evapotranspiração real diária média obtida pelos algoritmos SEBAL e METRIC, para a área de bananeira em Barbalha- CE.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
METRIC	Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration
ET	Evapotranspiração
DN	Digital Number
NDVI	Índice de vegetação da diferença normalizada
SAVI	Índice de vegetação ajustado aos efeitos do solo
IAF	Índice de área foliar ( $m^{-2} m^{-2}$ )
NOAA	National Oceanic and Atmosphere Administration
AQUA	Aqua Project Science
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OLI	Operational Land Imager
TIRS	Sensor Infravermelho Termal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
USGS	United States Geological Survey
TOA	Topo da Atmosfera
TM	Thematic Mapper
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
DSA	Dia sequencial do ano

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta$	Declividade da curva de pressão de vapor na saturação ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
$R_n$	Radiação líquida na superfície ou saldo de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ )
$G$	Fluxo de calor do solo ( $\text{W m}^{-2}$ )
$\gamma$	Constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
$T_{\text{ar}}$	Temperatura média diária do ar ( $^\circ\text{C}$ )
$U_2$	Velocidade do vento média diária a 2 m de altura ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água ( $\text{kPa}$ )
$e_a$	Pressão atual de vapor média diária ( $\text{kPa}$ )
$ET_{\text{r FAO}}$	Evapotranspiração real da cultura
$K_c$	Coefficiente de cultura médio
$L_{\text{mín}}$	Radiância espectral mínima
$L_{\text{máx}}$	Radiância espectral máxima
$ET_{\text{r}}$	Evapotranspiração real
$LE$	Fluxo instantâneo de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ )
$H$	Fluxo de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ )
$R_{\text{s,inc}}$	Radiação de onda curta incidente na superfície de cada pixel ( $\text{W m}^{-2}$ )
$\alpha_s$	Albedo corrigido ou albedo superficial de cada pixel
$R_{\text{ol,emi}}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície de cada pixel ( $\text{W m}^{-2}$ )
$R_{\text{ol,atm}}$	Radiação de onda longa incidente pela atmosfera na direção da superfície de cada pixel ( $\text{W m}^{-2}$ )
$\epsilon_o$	Emissividade de cada pixel
$R_n_{24\text{h}}$	Saldo de radiação diária à superfície ( $\text{W m}^{-2}$ )
$R_{\text{s}24\text{h}}$	Radiação solar global diária ( $\text{W m}^{-2}$ )
$\tau_{\text{sw }24\text{h}}$	Transmissividade atmosférica média diária ( $\text{MJ m}^{-2}$ )
$L_b$	Radiância espectral ou Calibração Radiométrica
$Add_{\text{rad}}$ e $Add_{\text{ref}}$	Termo aditivo do satélite Landsat 8 OLI para radiância e refletância, respectivamente
$Mult_{\text{rad}}$ e $Mult_{\text{ref}}$	Termo multiplicativo do satélite Landsat 8 OLI para radiância e refletância, respectivamente
$ND_b$	Intensidade de cada pixel
$r_b$	Refletância Monocromática Planetária ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )
$Z$	Ângulo de elevação do Sol

$d_r$	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol
$E$	Ângulo de elevação do Sol
$\rho_b$	Pesos para cada banda do Landsat 8 OLI
$K_b$	Irradiância solar espectral de cada uma das bandas refletivas ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ )
$UR$	Umidade relativa do ar instantânea (%)
$P_o$	Pressão atmosférica instantânea medida na estação meteorológica automática da área em estudo (kPa)
$\alpha_{toa}$	Albedo planetário de cada pixel
$\alpha_{atm}$	Refletância da própria atmosfera
$\tau_{sw}$	Transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar para dias de céu claro solar para dias de céu claro
$K_t$	Coefficiente de turbidez da atmosfera
$k$	Constante de Von Karman ( $k = 0,41$ )
$W$	Água precipitável (mm)
$\rho_{IV}$	Refletância do infravermelho próximo
$\rho_V$	Refletância do vermelho
$L$	Constante de ajuste ao solo
$\epsilon_{NB}$	Emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal
$K_1$ e $K_2$	Constantes de calibração das bandas termais do Landsat 5 TM (banda termal 6, $L_{b6}$ ) e do Landsat 8 TIRS (banda termal 10, $L_{b10}$ ), extraídos dos metadados
$L_{b,10}$	Banda termal do Landsat 8 de sensor TIRS
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ )
$S$	Constante solar ( $1367, W m^{-2}$ )
$\epsilon_{atm}$	Emissividade atmosférica do ar
$T_s$	Temperatura da superfície (graus Kelvin)
$\rho_{s,b}$	Refletância de cada banda do TM
$\omega_b$	Peso de cada banda
$R_{out s,b}$	Radiação solar refletida por cada banda
$R_{in s,b}$	Radiação incidente
$\rho_{t,b}$	Refletividade da banda b no topo da atmosfera
$\rho_{a,b}$	Refletância atmosférica
$\tau_{in,b}$	Transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente
$\tau_{out,b}$	Transmissividade para a radiação solar refletida pela superfície

$L_{t,b}$	Energia refletida medida na banda b do satélite ( $Wm^{-2}ster^{-1}\mu m^{-1}$ )
d	Distância Terra-Sol
$ESUN_b$	Média solar radiação exoatmosférica sobre a banda b ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ )
$\theta$	Ângulo zenital solar
$\delta$	Declinação do sol
$\phi$	Latitude central da cena
s	Inclinação do pixel
$\omega$	Ângulo horário em radiano
$C_b, C_1, C_2, C_3$ $C_4$ e $C_5$	Coefficientes derivados de modelo de transferência radiativa
$\eta$	Ângulo de visão do sensor relativo à perpendicular de uma superfície plana e horizontal
$L_{b,10c}$	Radiância da banda termal corrigida ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )
$R_p$	Radiância de trajetória na faixa espectral da banda 6 ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )
$\tau_{NB}$	Transmitância atmosférica da banda termal
$R_{sky}$	Radiância de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície para céu limpo
$dT$	Diferença de temperatura próxima à superfície ( $^{\circ}C$ )
“a” e “b”	Constantes de calibração da diferença da temperatura ( $T_1-T_2$ )
$r_{ah}$	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $m s^{-1}$ )
$Z_1$ e $Z_2$	Alturas em metros acima do dossel da vegetação ( $Z_1 = 0,1 m$ e $Z_2 = 2,0 m$ )
$u_x$	Velocidade do vento ( $m s^{-1}$ )
$Z_x$	Altura acima da superfície (m)
$Z_{om}$	Coefficiente de rugosidade local ao transporte de momentum
h	Altura média da vegetação na estação meteorológica (m)
$C_p$	Calor específico do ar à pressão constante ( $1004 J kg^{-1} K^{-1}$ )
$\rho$	Massa específica do ar ( $kg m^{-3}$ )
$T_{s,q}$	Temperatura da superfície no pixel quente ( $^{\circ}C$ )
$T_{s,f}$	Temperatura da superfície no pixel frio ( $^{\circ}C$ )
$L_{monin}$	Comprimento de Monin-Obukhov (m)
$\psi_m$	Correção da estabilidade atmosférica para o transporte de momentum
$\psi_h$	Correção da estabilidade atmosférica para o transporte de calor
$dT_f$	Diferença de temperatura próxima à superfície no pixel frio ( $^{\circ}C$ )

$r_{ah\ f}$	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor no pixel frio ( $m\ s^{-1}$ )
$\rho_f$	Densidade do ar calculado para o pixel frio
$dT_q$	Diferença de temperatura próxima à superfície no pixel quente ( $^{\circ}C$ )
$FE_{inst.}$	Fração Evaporativa instantânea
$FE_{24h}$	Fração evaporativa diária
$LE_{24h}$	Fluxo de calor latente diário ( $W\ m^{-2}$ )
$ET_{rF}$	Fração de evapotranspiração de referência
$ET_{inst}$	Fração diária instantânea calculada
$\rho_w$	Densidade da água ( $1000\ K\ g\ m^{-3}$ )
$\lambda$	Calor latente de evaporação da água, igual a $2,45\ MJ\ kg^{-1}$ a $20\ ^{\circ}C$
$C_{rad}$	Termo de correção usado em terreno inclinado
EAM	Erro Absoluto Médio
$ET_{r\ Sebal}$	Evapotranspiração real estimada pelo SEBAL ( $mm\ dia^{-1}$ )
ERM	Erro Relativo Médio
$ET_{r\ Metric}$	Evapotranspiração real estimada pelo METRIC ( $mm\ dia^{-1}$ )
K	Graus Kelvin
m	Metro
$m\ s^{-1}$	Metro por segundo
$MJ\ m^{-2}dia^{-1}$	Mega Joule por metro quadrado dia
g	Módulo do campo gravitacional terrestre ( $9,81\ m\ s^{-2}$ )
$mm\ dia^{-1}$	Milímetro por dia
$kg\ m^{-2}$	Quilograma por metro quadrado
km	Quilômetro
$kPa\ ^{\circ}C^{-1}$	Quilo Pascal por grau Celsius
$W\ m^{-2}$	Watts por metro quadrado

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	22
2.	<b>OBJETIVOS</b> .....	24
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	24
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3.	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	25
3.1.	A CULTURA DA BANANA.....	25
3.2.	EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	25
3.2.1.	<b>Determinação da Evapotranspiração</b> .....	26
3.2.2.	<b>Método de Penman – Monteith (PM-FAO 56)</b> .....	26
3.3.	USO DO SENSORIAMENTO REMOTO.....	27
3.2.1.	<b>Imagens orbitais</b> .....	28
3.2.2.	<b>Satélites e Sensores</b> .....	28
3.4.	ALGORITMOS.....	30
4.	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	33
4.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	33
4.2.	IMAGENS OLI/TIRS - LANDSAT 8.....	35
4.3.	ETAPAS.....	36
4.3.1.	<b>Estimativa de parâmetros através do balanço de energia</b> .....	36
4.4.	SALDO DE RADIAÇÃO.....	36
4.4.1.	<b>Saldo de radiação (<math>R_n</math>) – SEBAL</b> .....	39
4.4.1.1.	Albedo Planetário ( $\alpha_{toa}$ ) – SEBAL.....	39
4.4.1.2.	Albedo da Superfície ou albedo corrigido ( $\alpha_s$ ) – SEBAL.....	40
4.4.1.3.	Índices de vegetação (NDVI e IAF)- SEBAL.....	41
4.4.1.4.	Emissividades- SEBAL.....	42
4.4.1.5.	Temperatura da Superfície ( $T_s$ ) – SEBAL.....	43
4.4.1.6.	Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{ol,emi}$ )- SEBAL.....	43
4.4.1.7.	Radiação de Onda Curta Incidente ( $R_{s,inc}$ )- SEBAL.....	43
4.4.1.8.	Radiação de Onda Longa Incidente ( $R_{ol,atm}$ )- SEBAL.....	44
4.4.2.	<b>Saldo de radiação (<math>R_n</math>) – METRIC</b> .....	44
4.4.2.1.	Albedo da superfície ( $\alpha_s$ ) – METRIC.....	45
4.4.2.2.	Índices de vegetação (NDVI e IAF) – METRIC.....	47
4.4.2.3.	Emissividades – METRIC.....	47

4.4.2.4.	Temperatura da Superfície ( $T_s$ )– METRIC.....	47
4.4.2.5.	Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{ol, emi}$ ) – METRIC.....	47
4.4.2.6.	Radiação de Onda Curta Incidente ( $R_{s, inc}$ ) – METRIC.....	47
4.4.2.7.	Radiação de Onda Longa Incidente ( $R_{ol, atm}$ )– METRIC.....	48
4.5.	FLUXO DE CALOR NO SOLO (G).....	48
4.5.1.	<b>Fluxo de calor no solo (G) – SEBAL</b> .....	48
4.5.2.	<b>Fluxo de calor no solo (G) – METRIC</b> .....	48
4.6.	DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO $dT$ E DO CALOR SENSÍVEL (H).....	48
4.6.1.	<b>Determinação da função <math>dT</math> – SEBAL</b> .....	48
4.6.1.1.	Fluxo de calor sensível (H) – SEBAL.....	49
4.6.2.	<b>Determinação das constantes da função <math>dT</math> e H– METRIC</b> .....	54
4.7.	FLUXO DE CALOR LATENTE (LE).....	55
4.7.1.	<b>Fluxo de calor latente (LE)- SEBAL</b> .....	55
4.7.2.	<b>Fluxo de calor latente (LE) – METRIC</b> .....	55
4.8.	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA ( $ET_{r24h}$ ).....	55
4.8.1.	<b>Evapotranspiração diária (<math>ET_{r Sebal}</math>)- SEBAL</b> .....	55
4.8.2.	<b>Evapotranspiração diária (<math>ET_{r Metric}</math>) – METRIC</b> .....	56
4.9.	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	57
4.9.1.	<b>Análise de erros entre <math>ET_{r Sebal}</math> e Método de Penman-Monteith</b> .....	57
4.9.2.	<b>Análise de erros entre <math>ET_{r Metric}</math> e Método de Penman-Monteith</b> .....	57
5.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	59
5.1.	ALBEDO DA SUPERFÍCIE.....	59
5.1.1.	<b>Albedo da superfície- SEBAL</b> .....	59
5.1.2.	<b>Albedo da superfície- METRIC</b> .....	60
5.2.	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	61
5.2.1.	<b>Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)</b> .....	61
5.2.2.	<b>Índice de Área Foliar (IAF)</b> .....	64
5.3.	TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ( $T_s$ ).....	66
5.3.1.	<b>Temperatura de superfície– SEBAL</b> .....	66
5.3.2.	<b>Temperatura de superfície- METRIC</b> .....	67
5.4.	SALDO DE RADIAÇÃO INSTANTÂNEA ( $R_n$ ).....	68
5.4.1.	<b>Saldo de radiação instantânea- SEBAL</b> .....	68
5.4.2.	<b>Saldo de radiação instantânea – METRIC</b> .....	69
5.5.	FLUXO DE CALOR NO SOLO (G).....	71

5.5.1. Fluxo de calor no solo- SEBAL.....	71
5.5.2. Fluxo de calor no solo- METRIC.....	72
5.6. EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ETr <sub>24h</sub> ).....	73
5.6.1. Evapotranspiração- SEBAL.....	73
5.6.2. Evapotranspiração- METRIC.....	75
5.7. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA OBTIDA ATRAVÉS DO MÉTODO DE PENMAN – MONTEITH.....	76
5.8. VALIDAÇÃO ENTRE AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES OBTIDAS COM O ALGORITMO SEBAL E PELO MÉTODO DE PENMAN- MONTEITH.....	77
5.9. VALIDAÇÃO ENTRE AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES OBTIDAS COM O ALGORITMO METRIC E PELO MÉTODO DE PENMAN- MONTEITH.....	78
5.10. VALIDAÇÃO ENTRE ERROS ESTIMADOS ENTRE AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES OBTIDAS PELOS ALGORITMOS SEBAL/METRIC E PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....	79
6. CONCLUSÕES.....	81
7. REFERÊNCIAS.....	82

## 1. INTRODUÇÃO

A água, um bem finito e cada vez mais escasso que está enfrentando problemas de quantidade e de qualidade, não é somente um elemento imprescindível à vida, mas também fator condicionante do desenvolvimento econômico e do bem-estar social (DINIZ, 2018).

Segundo Bezerra (2016), os fatores de ordem climática condicionados aos fatores ambientais provocados pela falta ou escassez de chuva é o que contribui para a estiagem no semiárido, levando assim, a semiaridez climática ou incidência das secas. O que torna essencial o emprego da irrigação como forma de suprir as necessidades, sejam elas parciais ou totais das culturas.

No estudo de Brasil (2013), com o objetivo de promover a racionalização do uso da água na irrigação, especialmente, nas regiões tidas como prioritárias em escassez hídrica, propõe a adoção de mecanismos que promovam o uso eficiente da água na irrigação como adotar práticas e técnicas de irrigação e drenagem, que promovam a conservação dos recursos ambientais, como o solo e dos recursos hídricos.

Para Silva (2019), a utilização de um método eficiente e confiável para determinar as necessidades hídricas das culturas (evapotranspiração) é essencial para um manejo adequado do uso eficiente da água. A evapotranspiração pode ser determinada com bastante precisão, utilizando métodos diretos tais como lisímetros e balanços de água e indiretos ou empíricos como a correlação de Eddy, Razão de Bowen e Penman-Monteith entre outros, no entanto, todos estes métodos são limitados, pois fornecem valores pontuais de evapotranspiração para uma determinada localidade e assim falham ao fornecer informação a nível regional (ALLEN et al., 2002).

Essas limitações têm motivado a utilização da técnica de sensoriamento remoto, através de dados radiométricos obtidos a partir de imagens de satélites, já que os mesmos são capazes de cobrir grandes áreas e a obtenção da evapotranspiração em escala regional mostrando variações da mesma dentro de uma grande área já é uma realidade (BOEGH et al., 2002; HAFEEZ et al., 2002).

A maioria desses modelos tem como princípio básico o balanço de energia que prevê que do total de energia disponível na superfície, parte é destinada ao aquecimento do solo, parte ao aquecimento do ar e o restante é utilizado na evapotranspiração. Assim, determinando o saldo de radiação de uma superfície cultivada é possível estimar a evapotranspiração (SILVA, 2019). Segundo Allen et al. (2007), o método do balanço de energia por meio de dados radiométricos possibilita a obtenção do fluxo vertical de calor latente (LE) com imagens orbitais, e conseqüentemente, da evapotranspiração, através da

diferença dos fluxos também verticais, de calor no solo ( $G$ ), calor sensível ( $H$ ) e o saldo de radiação ( $R_n$ ).

Existem muitas vantagens ao se fazer uso do sensoriamento remoto orbital com o propósito de identificar alterações no uso da terra e as alterações climáticas advindas de tais mudanças. Destaque-se a grande cobertura espacial, a facilidade de obtenção das imagens e a possibilidade de estimar alguns parâmetros que só seriam obtidos com instrumentos normalmente utilizados em estudos experimentais (SANTOS et al., 2015).

Uma das maneiras mais precisas de se calcular a Evapotranspiração de Referência ( $ET_o$ ) é o método de Penman-Monteith, descrito por Allen et al. (1998). Em regiões áridas e semiáridas e ar seco, o uso de  $ET_o$  calculado pelo método Penman-Monteith padronizado é especialmente útil e necessário (ALLEN et al., 2013).

Nas duas últimas décadas, foram desenvolvidas diferentes técnicas de sensoriamento remoto com vistas à determinação da  $ET_r$ . Entre essas técnicas, destacam-se o “Surface Energy Balance Algorithm for Land” (SEBAL) (BASTIAANSEN et al., 1998) e o “Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration” (METRIC) (ALLEN et al., 2007).

O Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), desenvolvido por Bastiaanssen (1995), é um modelo baseado em imagens de satélites que tem sido amplamente utilizado para obtenção de resultados importantes para grandes áreas, tais como valores de saldo de radiação, fluxo de calor no solo e ET auxiliando assim no gerenciamento e monitoramento de recursos naturais (MATOS et al., 2014).

O algoritmo METRIC (Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration) foi desenvolvido por Allen et al. (2005) e Tasumi et al. (2005), no qual foi destinado à estimativa do balanço de energia e evapotranspiração com procedimentos muito similares ao SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), com algumas particularidades relacionadas à escolha do pixel úmido e ao cálculo da diferença de temperatura nesse pixel. Além disso, outra diferença entre esses dois métodos diz respeito à estimativa da evapotranspiração diária (GIONGO e VETTORAZZI, 2011).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1.OBJETIVO GERAL

Estimar a evapotranspiração com auxílio de dados espectrais de imagens de satélite e elementos meteorológicos, através dos modelos SEBAL e o METRIC que tem como base o balanço de energia e com isso, compará-las com a estimada através do método de Penman-Monteith, numa área de cultivo de banana irrigada no município de Barbalha- CE.

### 2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar e avaliar os parâmetros biofísicos do balanço de radiação: Índice de área foliar, Índice de vegetação da diferença normalizada, Temperatura da superfície e o saldo de radiação medida na área cultivada;
- Determinar a evapotranspiração na área cultivada utilizando o Método de Penman-Monteith e por meio dos algoritmos SEBAL e METRIC em três datas distintas;
- Comparar a evapotranspiração da cultura determinada pelo método de Penman-Monteith e as estimadas pelos modelos separadamente, verificando os erros atrelados a essas estimativas.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1.A CULTURA DA BANANA

A banana é uma das frutas mais consumidas em todo o mundo, sendo cultivada em cerca de 130 países. O Brasil se encontra na quinta colocação entre os maiores produtores de banana. Produziu em torno de 7 milhões de toneladas em 2012, ficando atrás da Índia, China, Filipinas e Equador (CEPEA, 2014).

De acordo com dados do IBGE (2021), a região Nordeste apresentava uma área de produção da bananeira de aproximadamente 214.000 ha, que representa cerca de 45% da área de produção nacional. Os estados que mais se destacam na produção são a Bahia e o Ceará, com 45% e 13%, respectivamente. A produção nessa região é caracterizada pela baixa produtividade, com 14 ton/ha na Bahia e 10 ton/ha no Ceará.

A bananeira planta tipicamente tropical, exige calor constante e elevada umidade. Responde, linearmente, à quantidade de água no solo e à transpiração (COELHO, 2001). Conforme Simão (2002), a quantidade de água necessária à bananeira varia de 3 a 8 mm d<sup>-1</sup>.

#### 3.2.EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um fenômeno físico que transfere grandes volumes de água da superfície terrestre para a atmosfera através da evaporação da água do solo e da transpiração dos vegetais. A quantificação do consumo de água de grandes áreas e projetos de irrigação é importante para utilização e manejo dos recursos hídricos e está sendo cada vez mais aplicada em várias partes do planeta (BASTIAANSSEN et al., 2005; SILVA e BEZERRA, 2006; ALLEN et al., 2007b). Uma vez que, ela é responsável por conectar energia, clima e a hidrologia (BRAUN et. al., 2001).

O conhecimento da evapotranspiração (ET) das culturas e da vegetação em geral é de fundamental importância em atividades ligadas à gestão de bacias hidrográficas, em modelagens meteorológica e hidrológica e, sobretudo, no manejo hídrico da agricultura irrigada (BEZERRA et. al., 2008). Para Allen et al. (1998) e Pereira et al. (2002) a evapotranspiração é fortemente influenciada por fatores da vegetação, de manejo de solo e gestão das condições ambientais e, principalmente, por elementos que dizem respeito ao tempo, tais como: radiação solar, temperatura da superfície, temperatura e umidade relativa do ar e o vento, pois elevadas temperaturas da superfície e do ar, baixa umidade, condições de céu claro e alta velocidade dos ventos são fatores que, quando combinados, contribuem significativamente para a ET (SANTOS, 2009).

No manejo da água do solo, a evapotranspiração passa a ser uma das maiores preocupações, em razão da grande influência da perda de água da superfície terrestre no desenvolvimento das culturas, principalmente, em zona com déficit de água, como é o caso das regiões áridas e semiáridas, pela baixa pluviosidade e escassez de reservas de água (MOURA et al., 2013).

### **3.2.1. Determinação da Evapotranspiração**

Existem vários métodos de determinação da evapotranspiração real, classificados como diretos (lisímetros de pesagem, de drenagem ou medidas de umidade do solo) e indiretos (balanço hídrico, Thornthwaite, a equação de Jensen e Haise, etc.), são métodos de medições pontuais e locais (TUCCI, 2007).

O grupo dos métodos diretos se dá através de um balanço hídrico no solo e pelo controle da umidade do solo, com exceção do método de controle de umidade do solo, são considerados os mais exatos para determinar a evapotranspiração numa determinada área. Já o segundo grupo, os métodos indiretos, se baseiam em dados meteorológicos, avaliados por fórmulas empíricas (CAMARGO e CAMARGO, 2000). As técnicas convencionais que empregam medições pontuais para estimar os componentes do balanço de energia são representativas apenas para escalas locais e não podem ser estendidas para grandes áreas, principalmente devido à heterogeneidade das superfícies e da natureza dinâmica dos processos de transferência de calor (SU, 2002).

Neves et al. (2007) ressaltam que, os métodos para medição da evapotranspiração geralmente, possuem custos elevados e necessitam de pessoas capacitadas no assunto para que sejam eficientes em suas estimativas, demandando tempo e utilização de equipamentos onerosos (BEZERRA, 2013).

Diante desses aspectos, muitas vezes dificultosos, o sensoriamento remoto constitui de uma medida importante e adequada para se estimar a evapotranspiração em escala local e regional (BEZERRA, 2013), além de dispensar a necessidade de dados hidrológicos, que são difíceis de serem obtidos. As técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas em diferentes ecossistemas, demonstrando variações dentro de uma área de superfície heterogênea (BASTIAANSSEN, 2000; SILVA et al., 2005a; BEZERRA, 2013).

### **3.2.2. Método de Penman – Monteith (PM-FAO 56)**

O método de Penman-Monteith FAO56 (PM-FAO 56) é um método complexo e demanda de um grande número de variáveis meteorológicas (temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, saldo de radiação, pressão atmosférica e velocidade do vento) e,

por isso, tem aplicação limitada, sendo mais utilizados em situações de campos experimentais e em áreas agrícolas onde há o emprego de alto padrão tecnológico (ANDRADE JÚNIOR et al., 2003). O método de Penman-Monteith tem embasamento físico e incorpora explicitamente tanto os parâmetros fisiológicos, quanto os aerodinâmicos (ALBUQUERQUE et al., 2002; ALLEN et al., 2006).

### 3.3.USO DO SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta promissora nas aplicações ambientais e vem sendo empregado em diversas partes do mundo. Hoje as aplicações mais importantes do ponto de vista da agrometeorologia estão relacionadas aos satélites *Landsat*, *NOAA*, *Aqua* e *Terra*, tendo em vista que suas imagens são gratuitas e facilmente obtidas na *Internet* (ARAÚJO, 2014).

As técnicas de sensoriamento remoto se constituem em uma ferramenta muito útil para o estudo e pesquisa dos inúmeros problemas relacionados com os recursos naturais, pois através de sua principal característica, a repetitividade, o problema do mapeamento em intervalos curtos de tempo é suprido. Em adição a este fato, nas últimas décadas, o emprego de imagens de satélite vem se estabelecendo como um instrumento de fundamental importância nos estudos sobre o balanço de energia e de água, identificação de áreas em processo de degradação, desmatamento de reservas e monitoramento de rebanhos entre outros (ROMÁN et al., 2010).

Allen et al. (2011) consideram que, os métodos que determinam a ET a partir de imagens de satélite apresentam as vantagens de possibilitar a análise da variação espacial da ET, além de ter menor custo, em comparação aos métodos pontuais de campo. Entretanto, advertem sobre os pixels das imagens de áreas de vegetação esparsa, como pequenos campos agrícolas, podem ser em verdade uma grande mistura de diferentes tipos vegetais e outras superfícies distintas, tornando sua interpretação difícil. O tempo de revisita dos satélites, especialmente daqueles de alta resolução espacial, muitas das vezes é grande, o que causa lacunas entre as estimativas da ET, além da necessidade de imagens sem nuvens, que torna a utilização destes métodos pouco viável em locais costeiros, por exemplo (BORGES, 2011).

Diversos autores já estudaram a evapotranspiração por meio das técnicas de sensoriamento remoto, em especial estudos que envolvem a região Nordeste do Brasil e utilizaram-se de várias plataformas e sensores orbitais (OLIVEIRA et al. 2012; SILVA et al., 2012; BEZERRA, 2013; LIMA et al., 2014). As imagens de sensoriamento remoto, com inúmeras resoluções espacial e temporal, são soluções ideais para a determinação da

distribuição espaço-temporal da evapotranspiração e, principalmente, para à gestão sustentável dos recursos hídricos (BEZERRA, 2013).

### **3.3.1. Imagens orbitais**

O uso de imagens orbitais surge como uma opção a ser explorada, dado o seu caráter multiespectral, que possibilita uma análise aprofundada de componentes agrometeorológicos, como temperatura foliar, situação hídrica regional, entre outros parâmetros (COSTA, 1997).

As imagens de sensoriamento remoto, por sua natureza digital ou discreta, são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou grid. Cada cela desse “grid” tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo “linha e coluna”, representados por “x” e “y”, respectivamente. Por convenção, a origem do “grid” é sempre no seu canto superior esquerdo. O nome dado a essas celas é pixel, derivado do inglês “picture element”. Para um mesmo sensor remoto, cada pixel representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra. Cada cela possui também um atributo numérico “z”, que indica o nível de cinza dessa cela, que obviamente, vai variar do preto ao branco; esse nível de cinza é conhecido em inglês por DN de “digital number” (BRYS, 2008).

O DN de uma cela representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. Deve ser ressaltado que, o DN de um pixel corresponde sempre à média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes nesse pixel. Uma imagem digital pode então ser vista como uma matriz, de dimensões “x linhas” por “y colunas”, com cada elemento possuindo um atributo z (nível de cinza). No caso das imagens de sensoriamento remoto, essas matrizes possuem dimensões de até alguns milhares de linhas e de colunas (CROSTA, 1993).

De acordo com Brys (2008), as imagens de sensores eletrônicos em diferentes canais são individualmente produzidas em preto e branco. A quantidade de energia refletida pelos objetos vai determinar a sua representação nessas imagens em diferentes tons de cinza, entre o branco (quando refletem toda a energia) e o preto (quando absorvem toda a energia).

### **3.3.2. Satélites e Sensores**

Existem várias categorias de satélites, dentre elas os classificados como meteorológicos, são equipados com radiômetros que medem radiação na banda visível e infravermelho, permitindo operar mesmo sob a face escura da Terra, com isso, o sensoriamento remoto está intimamente ligado à medida da radiação eletromagnética, refletida ou emitida pelos alvos da

superfície terrestre, bem como ao tratamento e a disponibilização dessa informação numa forma possível de ser interpretada (MOREIRA, 2011).

A principal função de um sensor remoto consiste em captar e medir a quantidade de energia refletida e/ou emitida pelos alvos, e desta forma obter informações sobre a natureza e/ou condições desses alvos (culturas agrícolas, florestas, rochas, solos, corpos d'água, etc). Da radiação eletromagnética que é refletida pela superfície da Terra, apenas uma porção do espectro eletromagnético é captada pelos sensores (FILHO, 2005).

Para Meireles (2007), existem dois tipos de sensores, os passivos e os ativos. Os sensores passivos são: satélites, máquinas fotográficas, etc. Necessitam de uma fonte natural de energia (Sol) ou artificial (lâmpada) para que possam captar a energia refletida dos alvos em forma de ondas eletromagnéticas. Os sensores ativos são: radar, sonar, etc. Emitem energia em forma de ondas eletromagnéticas, que são refletidas e captadas posteriormente. No entanto, devido às interferências atmosféricas e topográficas, em alguns casos o uso do sensoriamento remoto pode restringir-se a não ter informações provenientes das imagens de sensores orbitais.

Os sensores dos satélites são caracterizados através da resolução, podendo ser espacial e espectral (SILVA, 2019). Florenzano (2011) define que, a resolução espectral tem a capacidade de medir as refletâncias de determinadas faixas em certos comprimentos de ondas eletromagnéticas, com isso, esse tipo de sensor consegue distinguir e discriminar objetos em função de sua sensibilidade espectral.

A série Landsat (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8) foi iniciada no final da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. O primeiro satélite da série começou a operar em 1972 (Landsat 1- foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto no mundo) e a última atualização ocorreu em 2013 com o lançamento do Landsat 8, todos da série foram com imagens multiespectrais (INPE, 2019).

O Landsat 8 é composto de sensores OLI (Mapeador Operacional da Terra) e TIRS (Sensor Infravermelho Termal) é composto por 11 bandas multiespectrais entre os comprimentos de onda 0,43-12,51  $\mu\text{m}$ . Possuem resolução espectral de 12 bits, mas são disponibilizadas em 16 bits nos arquivos GeoTIFFs (arquivo compactado) e TXT (metadados), significando dessa forma, a intensidade de cada pixel entre 0 a 65.535, o que permite assegurar um maior grau de detalhamento das informações a serem geradas (SILVA, 2016).

O sensor OLI fornece as bandas multiespectrais, sendo as bandas 1 a 7 e 9 com resolução espacial de 30 metros e a banda 8 (pancromática), com 15 metros de resolução espacial. As bandas 10 e 11 são obtidas através do sensor TIRS e com resolução espacial de 100 metros, entretanto essas bandas podem ser reamostradas para 30 metros de resolução espacial (HERNANDEZ et. al., 2015).

### 3.4.ALGORITMOS

Os algoritmos utilizados para processar os dados fornecidos pelo Sensoriamento Remoto são compostos por equações ajustadas para adequar técnicas para diferentes escalas, gerando informações aplicáveis, sem a necessidade de contato físico, proporcionando uma melhor compreensão de alvos distintos. Estes algoritmos são usados com diferentes objetivos, existindo um crescente interesse científico nas pesquisas em recursos naturais, envolvendo água, solo e vegetação (PONZONI et al., 2012).

O algoritmo SEBAL foi desenvolvido com o propósito de determinar a evapotranspiração, por meio do balanço completo da radiação, pixel a pixel, no momento do imageamento e da energia incidente sobre a superfície terrestre, utilizando dados de sensoriamento remoto e alguns dados complementares de superfície, vantagens pelas quais se faz um dos algoritmos mais utilizado na atualidade (WELIGEPOLAGE, 2005; UDA, 2012).

O METRIC (Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized Calibration) segue todos os passos do SEBAL e não requer muitas variáveis meteorológicas em nível de superfície onde o pixel frio é selecionado dentro de uma área irrigada (ALLEN et al., 2005; LIRA, 2008; TASUMI et al., 2005).

Segundo Silva (2019), os algoritmos SEBAL e METRIC (ALLEN et al., 2007), são baseados em estimativas e medidas da superfície e por imagens de satélite, e por isso, possibilitam a determinação do saldo de radiação computado pela soma entre o balanço de radiação de onda curta e de onda longa, no qual é possível estimar seguindo uma sequência de etapas lógicas, os diferentes componentes do balanço de energia, etapas que permitem a determinação do albedo da superfície, dos Índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF), temperatura do solo e do saldo de radiação.

O saldo de radiação ou balanço de radiação da superfície representa a principal fonte de energia utilizada pelos processos físicos, químicos, biológicos e meteorológicos à superfície e camadas inferiores da atmosfera, proporcionando informações importantes para o estudo da evapotranspiração da cobertura vegetal. É definido como a diferença entre os fluxos de radiação incidentes, refletidos e/ ou emitidos, incluindo as radiações de onda longa e de onda

curta à superfície da terra (BISHT et al., 2010; BEZERRA, 2013). Sua a quantificação é muito importante pois, representa a entrada e saída de energia, que contribui para o aumento e redução nos fluxos de calor latente e sensível, além de alterar as taxas de evapotranspiração (FOLHES et al.,2019).

O albedo é a razão entre a radiação solar refletida pela superfície e a radiação incidente, sendo a irradiância solar a principal fonte de energia nesse processo, condicionando a temperatura da superfície e a intensidade dos fluxos de energia entre atmosfera e superfície, além de processos como evapotranspiração e produtividade primária. O albedo varia conforme as características físico-químicas das superfícies e com o ângulo zenital. Outro fator que pode promover variações do albedo são as atividades humanas, tais como desflorestamento, agricultura e urbanização. Em superfícies vegetadas, o albedo depende da textura do solo e das condições fisiológicas da copa da planta. Já em solo seco, o albedo é expressivamente maior que o observado em solo úmido, enquanto uma superfície lisa tem albedo maior que uma superfície rugosa (MARTINS et al., 2016).

Os índices de vegetação são obtidos através de medidas radiométricas da vegetação (LIU e HUETE, 1995), potencialmente importantes para observação do comportamento espectral desta. Estes índices resultam de transformações lineares entre as refletâncias da faixa do visível e infravermelho (LIRA et al., 2009). Cabe ressaltar, que estudos indicam que os fatores ligados à vegetação têm grande influência no processo do balanço de radiação à superfície, bem como na evapotranspiração (PEREIRA et al., 2002; SILVA et al., 2005a).

O índice de vegetação da diferença normalizada – NDVI (ALLEN et al., 1998), os valores para um dado pixel variam entre -1 e 1, um bom indicador da quantidade e da condição da vegetação verde (BEZERRA et al., 2014). Valores menores que o normal, são devido às baixas temperaturas, incidência de nuvens no momento da passagem do satélite, o tamanho do pixel considerando o sombreamento provocado pela topografia e por árvores, entre outros fatores podem influenciar (SILVA et al., 2005a; RODRIGUES et al., 2009) e tem uma relação direta com o vigor da vegetação, sendo assim, é possível o mapeamento de áreas com diferentes índices de cobertura vegetal e de biomassa (SILVA, 2009).

O SAVI é um índice que leva em consideração os efeitos do solo exposto, é considerado uma melhoria do NDVI, com a utilização de uma constante L, que minimiza os efeitos da cor do solo nos seus resultados. Está constante varia entre 0 a 1, de acordo com a densidade da vegetação, sendo o valor L= 1 adotado para áreas com pouca cobertura vegetal, já áreas com cobertura intermediária é representada por L=0,5 e em áreas muito densas, geralmente se

utiliza a constante  $L = 0,25$ . Quando o  $L$  é igual a 0, o SAVI é idêntico ao NDVI (HUETE et al., 1988).

Já o índice de área foliar (IAF) é tido como um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, constituindo-se, portanto, em um índice biofísico, que é definido pela razão entre a área foliar de toda vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação (ALLEN et al., 2002).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende uma área cultivada de banana-nanica (*Musa spp*), localizada na divisa dos municípios de Barbalha e Missão Nova (Figura 1), região sul do Estado do Ceará, com a seguinte coordenada geográfica: 07° 17' 07.91" de latitude Sul, 39° 12' 58" de longitude Oeste e elevação de 398 metros em relação ao nível do mar (GOOGLE EARTH PRO, 2020). O solo local é constituído por associação de LATOSSOLOS VERMELHO-Distróficos (ARAÚJO et al., 2013).

**Figura 1.** Localização da área experimental de Barbalha- CE, destacando a parcela amostral com o cultivo irrigado da banana nanica (em vermelho).



Fonte: Google Earth Pro, 2020.

Com base na classificação de Koppen-Geiger, o clima na localidade em estudo é do tipo quente e úmido (Aw). A temperatura média anual próxima de 24,9 °C, umidade relativa superior a 80%, taxa de insolação de 2.848 horas anual e velocidade média do vento próximo a 1,90 ms<sup>-1</sup>, entretanto, a taxa evaporativa supera 2000 mm/ano, reforçando a importância da suplementação hídrica via irrigação (MEDEIROS et al. 2013).

Segundo Silva et al. (2013), a precipitação média anual é de 1.047,9 mm, com 66,3% das chuvas sendo registradas entre os meses de janeiro a abril, período caracterizado por Matos et al. (2015) como o quadrimestre mais chuvoso, iniciando no mês de janeiro (181,3 mm), fevereiro (203,5 mm), março (234,4 mm) e abril (185 mm).

Para realização da pesquisa foram adquiridas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, as informações climáticas coletadas pela estação meteorológica automática em Barbalha- CE (INMET, 2016). A partir dos dados da estação meteorológica, foi determinado a Evapotranspiração de referência diária ( $ET_{\theta 24h}$ , mm dia<sup>-1</sup>) pelo modelo físico de Penman-Monteith da FAO-56, por meio da Equação 1.

$$ET_{\theta 24h} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left( \frac{900}{T_{ar} + 273} \right) \cdot U_2}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \cdot (e_s - e_a) \quad (1)$$

Em que,  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor (kPa/°C);  $R_n$  é o saldo de radiação (MJ.m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);  $G$  o fluxo de calor no solo (MJ.m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), considerado de valor insignificante quando se utiliza de cálculos diários;  $T_{ar}$  a temperatura média diária do ar (°C);  $U_2$  é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura (m.s<sup>-1</sup>);  $e_s$  a pressão de vapor na saturação (kPa);  $e_a$  é a pressão atual de vapor média diária (kPa);  $\gamma$  o coeficiente psicrométrico (kPa/ °C) é considerado constante,  $\gamma = 0,0622$  kPa °C<sup>-1</sup>, pois ele é uma função da pressão atmosférica, a qual varia muito pouco ao longo do ano (95,03 kPa), e também do calor latente de evaporação da água, que é pouco afetado pela temperatura, recomendado um valor médio igual a 2,45 MJ kg<sup>-1</sup>.

A Equação 2 é utilizada para determinação da declividade da curva de pressão de vapor.

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[ 0,6108 \cdot e^{\left( \frac{17,27 \cdot T_{ar}}{T + 237,3} \right)} \right]}{(T_{ar} + 237,3)^2} \quad (2)$$

O método Penman- Monteith permite ainda calcular a evapotranspiração da cultura ( $ET_{c_{FAO}}$ ) multiplicando a  $ET_{\theta 24h}$ , pelo coeficiente de Cultura ( $K_c$ ), segundo as recomendações de Allen et al., (1998)- Equação 3.

$$ET_{c_{FAO}} = ET_{\theta 24h} \cdot K_c \quad (3)$$

Esta relação é um indicador da umidade na zona radicular da cultura, podendo ser utilizada para o gerenciamento da irrigação (TEIXEIRA et al., 2016). Os valores de  $K_c$  variam em função dos estágios da cultura analisada. A bananeira irrigada no semiárido brasileiro, apresenta um coeficiente de cultura médio  $K_c$  de 1,21, valor recomendado por Oliveira et al. (2012) para bananeiras em estado intermediário de crescimento.

#### 4.2. IMAGENS OLI/TIRS - LANDSAT 8

Foram utilizadas três imagens geradas pelo *Operational Land Imager - OLI* e *Thermal Infrared Sensor - TIRS* do satélite Landsat 8, órbita 217 e ponto 65, adquiridas junto ao site americano United States Geological Survey- USGS, já ortorretificadas, ou seja, com suas coordenadas de pixels corrigidas e bastante próximas das coordenadas reais da superfície, correspondentes aos dias: 22 de maio (DSA = dia sequencial do ano), dia 10 de agosto (DSA 223), dia 29 de outubro (DSA 303).

A escolha das imagens se deu de acordo em escolher imagens com baixa cobertura de nuvens, proporcionando uma melhor qualidade de processamento, atendendo os requisitos da pesquisa. A imagem OLI/TIRS é composta de sete bandas espectrais (bandas 2 a 7, e a banda termal 10) cujas principais características estão representadas na Tabela 1, que correspondem à passagem do Landsat 8 às 9:00h.

**Tabela 1.** Coeficientes de calibração para as bandas do satélite Landsat 8 (OLI).

Bandas	Coeficientes de Calibração ( $w m^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$ )		Quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (ND)		Irradiância Espectral ESUN_TOA ( $w m^{-2} \mu m^{-1}$ )
	$L_{min}$	$L_{max}$	$Qcal_{min}$	$Qcal_{max}$	
2	-62.70729	759.3	1	65535	2005.58
3	-57.78423	699.73364	1	65535	1817.87
4	-48.72692	590.05481	1	65535	1553.14
5	-29.81845	361.08414	1	65535	1003.4
6	-7.41558	89.79834	1	65535	250.97
10	0.10033	22.00180	1	65535	1
7	30.26685	-2.49945	1	65535	89.59

O processamento da imagem teve início após a obtenção das imagens junto ao USGS. O software ERDAS Imagine é um modelo que permite graficamente criar um fluxograma de trabalho e executar a partir de dados de entrada, produzindo uma saída, geralmente, uma imagem do tipo Raster, com base em um ou mais dados de entrada. Foi utilizado para realizar os processos de: empilhamento das bandas, recorte das imagens empilhadas, processamento das imagens, através da utilização da ferramenta Model Maker, que é responsável por operações matemáticas para cada etapa atribuída ao estudo, sendo uma ferramenta indispensável para o processamento das imagens e na obtenção das estimativas dos balanços de radiação e energia.

### 4.3. ETAPAS

Para estimativa das diferentes componentes do balanço de energia à superfície utilizou-se os algoritmos SEBAL e o METRIC, no qual apesar de terem muitos aspectos comuns, tem diferenças marcantes que serão explicitadas em cada tópico seguinte.

Os resultados para área de bananeira do Município de Barbalha- CE adquiridos pelo algoritmo SEBAL foram processados e obtidos por Silva et al. (2021). Com uma sequência de etapas que consistem no cálculo do balanço de radiação à superfície, calculado a partir da radiação espectral dos dados orbitais.

#### 4.3.1. Estimativa de parâmetros através do balanço de energia

O método de balanço de energia de superfície vem sendo aplicado para estimar o uso de água pela cultura em áreas irrigadas. Na determinação do balanço de energia ocorreu pela equação do balanço de energia na superfície (Equação 4), onde a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) é calculada como o resíduo de diferença entre a radiação líquida para a superfície e as perdas devido ao fluxo de calor sensível (energia usada para aquecer o ar) e fluxo de calor do solo (energia armazenada no solo e na vegetação).

$$LE = R_n - G - H \quad (4)$$

Sendo  $LE =$  Fluxo de calor latente ( $W / m^2$ );  $R_n =$  radiação líquida na superfície ( $W / m^2$ );  $G =$  Fluxo de calor do solo ( $W / m^2$ ) e  $H =$  Fluxo de calor sensível ( $W / m^2$ ).

Para estimativa de cada um dos termos da equação acima por meio de imagens de sensoriamento remoto é necessário um conjunto de dados de alta qualidade.

### 4.4. SALDO DE RADIAÇÃO

O saldo de radiação -  $R_n$  ( $W m^{-2}$ ) 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, aquecimento do solo e fotossíntese (MACHADO et al., 2014). E pode ser calculado a partir da Equação 5.

$$R_n = R_{s,inc} \cdot (1 - \alpha_s) - R_{ol,emi} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{ol,atm} \quad (5)$$

Onde,  $R_{s,inc}$  é a radiação de onda curta incidente;  $\alpha_s$  o albedo corrigido ou albedo superficial de cada pixel;  $R_{ol,emi}$  a radiação de onda longa emitida por cada pixel;  $R_{ol,atm}$  a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel e  $\epsilon_0$  a emissividade de cada pixel.

Na determinação do saldo de radiação diária à superfície ( $R_{n24h}$ ,  $W m^{-2}$ ), mediante modelo calibrado para condições verificadas no semiárido brasileiro (SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2012), pode ser feito através da Equação 6.

$$R_{n24h} = R_{s24h}(1 - \alpha_s) - 123 \cdot \tau_{sw24} \quad (6)$$

Em que:  $R_{s24h}$  é a radiação solar global diária ( $W m^{-2}$ );  $\alpha_s$  é o albedo superficial;  $\tau_{sw24}$  é a transmissividade média diária utilizada para converter o saldo diário em  $MJ m^{-2}$ . O fator 0,0864 é multiplicado por  $R_{n24h}$ , conforme já usado em várias aplicações por diversos pesquisadores.

Na determinação do saldo de radiação com a utilização do SEBAL e do METRIC algumas das etapas descritas nesses algoritmos são iguais e remetem ao mesmo procedimento. Sendo elas as etapas de: entrada, radiância espectral e a de reflectância monocromática descritas abaixo.

### **1º Etapa: Radiância espectral ou Calibração Radiométrica ( $L_b$ )**

A primeira etapa corresponde a energia solar refletida por cada pixel por unidade de área, de tempo, ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat 8 OLI/TIRS para as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e a banda 10 da termal. A radiância espectral é determinada com base nos termos aditivo e multiplicativo, sendo necessário converter os valores quantizados e calibrados do nível de cinza de cada banda em radiância espectral. Para tanto, foram utilizados coeficientes radiométricos referentes à radiância, disponibilizados nos arquivos de metadados das imagens. Na determinação da radiância espectral em cada banda utiliza-se a Equação 7 (CHANDER e MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2016).

$$L_b = Add_{rad,b} + Mult_{rad,b} \cdot ND_b \quad (7)$$

Em que,  $Add_{rad,b}$  é o termo aditivo e  $Mult_{rad,b}$  é o multiplicativo, relativos à radiância (extraídos do metadados de cada imagem do OLI) e  $ND_b$  é a intensidade de cada pixel e a banda (valores entre 0 e 65.365), observados a partir das imagens.

### **2ª Etapa: Reflectância Monocromática Planetária ( $r_b$ )**

Precisou-se, novamente, converter os valores quantizados e calibrados do nível de cinza de cada banda do OLI, dessa vez para à refletância. Dessa maneira, foram usados os coeficientes radiométricos referentes à refletância, disponibilizados nos metadados das

imagens (CHANDER E MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2016). A reflectância monocromática de cada pixel-  $r_b$  ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) dada pela Equação 8:

$$r_b = \frac{(Add_{ref,b} + Mult_{ref,b} \cdot ND_b)}{\cos Z \cdot d_r} \quad (8)$$

Em que,  $Add_{ref,b}$  o termo aditivo e  $Mult_{ref,b}$  o multiplicativo, relativos à refletância e  $ND_b$  a intensidade de cada pixel, extraídos dos metadados de cada imagem e  $d_r$  conforme a Equação 9:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{DSA \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right) \quad (9)$$

Em que, DSA é o dia sequencial do ano e o argumento da função  $\cos$  em radianos. O valor médio anual de  $d_r$  é igual a 1,00 (variando de 0,97 a 1,03). O cosseno do ângulo zenital solar ( $Z$ , adimensional) é obtido a partir do ângulo de elevação do Sol ( $E$ , graus), disponibilizado nos metadados das imagens, de acordo com a Equação 10:

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \sin(E) \quad (10)$$

Para os cálculos dos pesos foram determinados os coeficientes de cada banda das imagens, seguindo a metodologia (CHANDER & MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2016). Portanto, antes foi necessário estimar a constante solar ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ) associada a cada uma das bandas refletivas do OLI e, para isso, utilizou-se a Equação 11:

$$k_b = \frac{\pi \cdot L_b}{r_b \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (11)$$

Em que,  $k_b$  ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ) foi calculada a irradiância solar espectral de cada uma das bandas refletivas do Landsat 8 OLI no Topo da Atmosfera (TOA). Em seguida, foram calculados os pesos ( $\rho_b$ , adimensional) para cada banda do OLI, onde o valor do  $\rho_b$  de cada banda espectral, se deu através da razão entre o  $k_b$  daquela banda e o somatório de todos os  $k_b$  do Landsat 8 OLI (STARKS et al., 1991; CHANDER & MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2005b; SILVA et al., 2016), a partir da Equação 12.

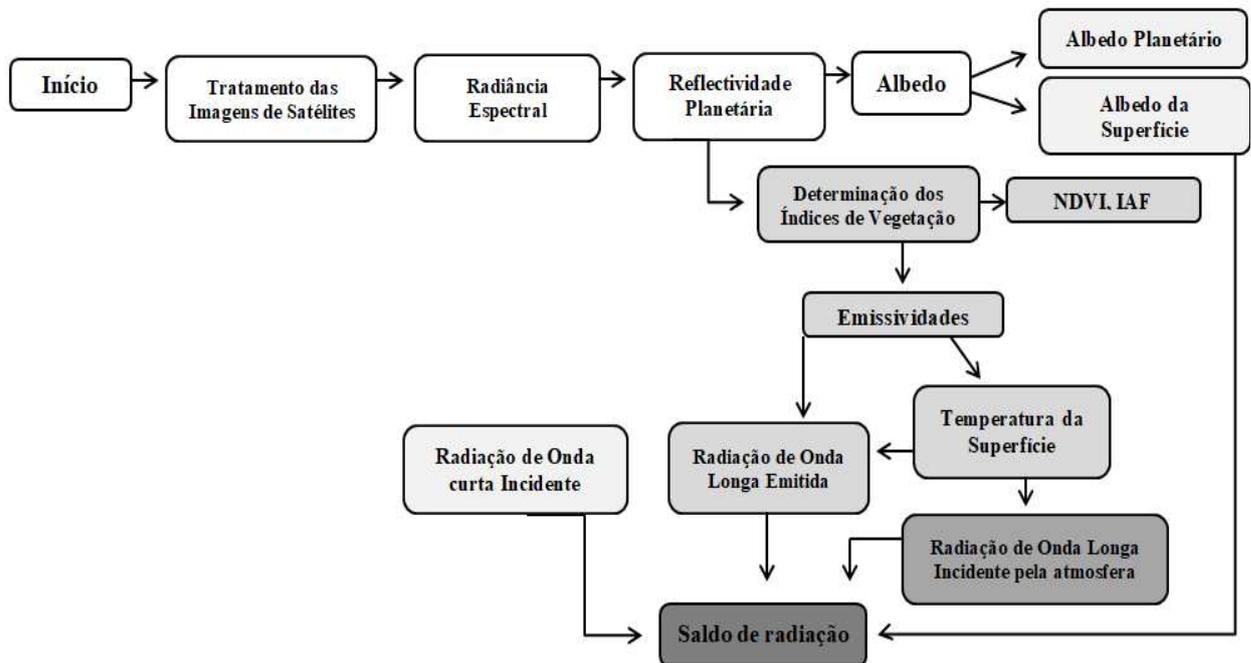
$$\rho_b = \frac{k_b}{\sum k_b} \quad (12)$$

Os pesos calculados foram empregados no cômputo do albedo planetário na etapa seguinte.

#### 4.4.1. Saldo de radiação ( $R_n$ ) - SEBAL

Todas as etapas a serem cumpridas para se chegar no saldo de radiação a partir do algoritmo SEBAL estão dispostas no diagrama da Figura 2.

**Figura 2.** Diagrama de etapas computacionais no processamento para obtenção do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) por meio do algoritmo SEBAL.



Fonte: O autor (2021)

Os dados de entrada do modelo são imagens orbitais, atribuídas a elas dados meteorológicos fornecidos por estação automática ou convencional de temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica e da radiação solar global diária (usada no cômputo do  $R_n$  diário). De um modo geral, o saldo de radiação à superfície pelo SEBAL por meio da Equação 5.

##### 4.4.1.1. Albedo Planetário ( $\alpha_{toa}$ ) - SEBAL

O albedo planetário ou albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) representa a quantidade de radiação refletida de cada pixel sem correção atmosférica, que consiste na combinação das bandas de 2 a 7 do OLI, com os respectivos pesos do OLI ( $\rho_b$ ) calculados na Equação 9. O albedo sem correção foi estimado de modo semelhante ao feito por SILVA et al. (2016), conforme a Equação 13:

$$\alpha_{toa} = \rho_2 \cdot r_2 + \rho_3 \cdot r_3 + \rho_4 \cdot r_4 + \rho_5 \cdot r_5 + \rho_6 \cdot r_6 + \rho_7 \cdot r_7 \quad (13)$$

Em que,  $\alpha_{toa}$  é o albedo planetário de cada pixel ou albedo sem correção atmosférica;  $\rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6$  e  $\rho_7$ , respectivamente, são os pesos de cada uma das bandas e  $r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$  e  $r_7$ , respectivamente, são as refletâncias de cada uma das bandas utilizadas.

#### 4.4.1.2. Albedo da Superfície ou albedo corrigido ( $\alpha_s$ ) - SEBAL

O albedo calculado no topo da atmosfera necessita de correções devido aos processos de absorção e espalhamento, já que a atmosfera terrestre produz interferência na radiação solar e na radiação refletida. Nesta etapa, o albedo de superfície corrige os efeitos atmosféricos ( $\alpha$ ), calculado através da Equação 14:

$$\alpha_s = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (14)$$

Onde,  $\alpha_s$  é o albedo da superfície corrigido para os efeitos atmosféricos;  $\alpha_{atm}$  a refletância da própria atmosfera, que pode ser a partir de um modelo de transferência radiativa (variando entre 0,025 e 0,04) (ALLEN et al., 2002). Alguns pesquisadores recomendam para o modelo SEBAL o valor de 0,03, adotado nesta pesquisa, tendo como base estudos realizados pelos autores (BASTIAANSEN, 2000; SILVA et al., 2005a; SILVA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; SILVA et al., 2016) e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar para dias de céu claro, conforme indicam os autores (ASCE-ERWI, 2005; ALLEN et al., 2002; ALLEN et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2016), por meio da Equação 15:

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \cdot \exp \left[ \frac{-0,00146 \cdot P_0}{K_t \cdot \cos Z} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (15)$$

Em que,  $P_0$  (kPa) é a pressão atmosférica instantânea (medida na estação meteorológica automática da área em estudo);  $K_t$  o coeficiente de turbidez da atmosfera ( $K_t = 1,0$  para céu claro e limpo e  $K_t = 0,5$  para ar extremamente turbido ou poluído, por ALLEN et al., 2002; neste trabalho foi utilizado  $K_t = 1,0$ , conforme pesquisas mais atuais dos autores (OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2016);  $W$  é a água precipitável (mm) conseguida em função da umidade relativa do ar instantânea (medida na estação meteorológica), que em ausência do valor pode ser alcançada por meio da Equação 16 (GARRISON e ADLER 1990).

$$W = 0,14 \cdot e_a \cdot P_0 + 2,1 \quad (16)$$

De acordo com os pesquisadores ASCE-EWRI (2005) e Allen et al. (2002), caso ocorra uma eventual falta de dados de pressão atmosférica ( $P_0$ , kPa) obtêm-se através Equação 17 e pode ser usada nas Equações 15 e 16.

$$P_0 = 101,3 \left( \frac{T_{ar} - 0,0065 \cdot z}{T_{ar}} \right)^{5,26} \quad (17)$$

Onde,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar da estação meteorológica (K) e  $z$  é a altitude (m).

A pressão real de vapor d'água atmosférico ( $e_a$ , kPa), foi calculada pela Equação 18 utilizando dados meteorológicas da estação localizada na área em estudo.

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (18)$$

Onde, UR é a umidade relativa e  $e_s$  (kPa) é a pressão de saturação do vapor d'água obtida por meio de dados da estação automática, a partir da Equação 19.

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right) \quad (19)$$

Onde,  $T_{ar}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura do ar instantânea da estação meteorológica.

#### 4.4.1.3. Índices de vegetação (NDVI e IAF)- SEBAL

O NDVI- Normalized Difference Vegetation Index, é alcançado através da razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho próximo ( $\rho_{IV}$ ) e do vermelho ( $\rho_V$ ), pela soma das mesmas, de acordo com os pesquisadores (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005a; RODRIGUES et al., 2009; ARRAES et al., 2012; CUNHA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; GUSMÃO et al., 2013; BEZERRA et al., 2014; SOUZA, 2014), segundo a Equação 20. As bandas correspondentes no caso do Landsat 8, são as 4 e 5.

$$NDVI = \frac{(\rho_{IV} - \rho_V)}{(\rho_{IV} + \rho_V)} \quad (20)$$

Em 1988, Huete desenvolveu o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo, SAVI- Soil Adjusted Vegetation Index, que é uma melhoria do NDVI. Ele é dado a partir da aplicação da constante L, minimizando os efeitos da cor do solo nos seus resultados. A constante L varia

entre 0 a 1, de acordo com a densidade da vegetação, sendo o valor 1 adotado para áreas com pouca cobertura vegetal, já áreas com cobertura intermediária é representada por  $L=0,5$ , áreas muito densas, geralmente, adota-se a constante  $L= 0.25$ , quando o  $L$  é igual a 0, o SAVI é idêntico ao NDVI (HUETE 1988; QI et al. 1994; MENESES, 2011).

É necessário para se chegar ao Índice de área de Foliar e é determinado (ALLEN et al., 2002; OLIVEIRA, 2012; SOUZA, 2014) pela Equação 21.

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{L + (\rho_{IV} + \rho_V)} \quad (21)$$

$L$  é a constante de ajuste ao solo, que depende do tipo de solo, o valor mais utilizado pelos pesquisadores é 0,5 (ALLEN et al., 2002; ACCIOLY et al., 2002; BOEGH et al., 2002; BRAZ et al., 2015). Utilizou-se nessa pesquisa 0,1 conforme estudos mais recentes (ALLEN et al., 2007; SOUZA, 2014).

O IAF- Índice de Área Foliar é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada e é tido como um indicador da biomassa de cada pixel da imagem (ALLEN et al., 2002). Tem por base em sua equação o cálculo envolvendo o SAVI, utilizando a Equação 22 de Allen et al. (2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (22)$$

#### 4.4.1.4. Emissividades- SEBAL

Como cada pixel por si só não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, existe a necessidade de acrescentar à emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal –  $\epsilon_{NB}$  (10,4 – 12,5  $\mu\text{m}$ ). Dessa forma, para o cálculo da radiação de onda longa emitida por cada pixel considera-se a emissividade no domínio da banda larga –  $\epsilon_0$  (5 – 100  $\mu\text{m}$ ).

Segundo ALLEN et al. (2007), as  $\epsilon_{NB}$  e  $\epsilon_0$  podem ser obtidas e validadas para  $NDVI > 0$  (indicando vegetação) e para  $IAF \leq 3$ , onde se aplica conforme as Equações 23 e 24, descritas abaixo:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (23)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (24)$$

Utilizando as condições sugeridas por Allen et al. (2007), para pixels com valores de  $IAF > 3$ , se considerou  $\epsilon_0 = \epsilon_{NB} = 0,98$ . E quando  $NDVI \leq 0$  (indicando água ou neve) considerar  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,985$ .

#### 4.4.1.5. Temperatura da Superfície ( $T_s$ ) - SEBAL

O cálculo da temperatura de superfície ( $T_s$ ) obtém-se em kelvin pela Equação 25 (ALLEN et al., 2002; RODRIGUES et al., 2009; SILVA et al., 2011; CUNHA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; SOUZA et al., 2016).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} \cdot K_1}{L_{b,10}} + 1\right)} \quad (25)$$

$L_{b,10}$  é a radiância espectral da banda termal do Landsat 8 do sensor TIRS;  $\epsilon_{NB}$  a emissividade obtida anteriormente, e  $K_1$  e  $K_2$  são constantes de calibração da banda termal 10 do Landsat 8 TIRS ( $K_1 = 774,89$  e  $K_2 = 1321,08 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ), extraídos dos metadados das imagens processadas.

#### 4.4.1.6. Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{ol,emi}$ )- SEBAL

Para o cálculo de radiação de onda longa emitida por cada pixel veio de Stefan-Boltzman (Equação 26) de Stefan-Boltzman, segundo ALLEN et al. (2002):

$$R_{ol,emi} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (26)$$

Em que:  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel (Equação 23);  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) e  $T_s$  a temperatura da superfície em Kelvin (Equação 25).

#### 4.4.1.7. Radiação de Onda Curta Incidente ( $R_{s,inc}$ )- SEBAL

A radiação solar de onda curta incidente é o fluxo de radiação solar direta mais a difusa que atinge a superfície terrestre em condições de céu claro (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005a; SILVA et al., 2011), e é dada pela seguinte Equação (27):

$$R_{s,inc} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (27)$$

Onde:  $S$  é a constante solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ ),  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (Equação 9),  $\cos Z$  é o cosseno do ângulo zenital solar (Equação 10),  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica (Equação 15).

#### 4.4.1.8. Radiação de Onda Longa Incidente ( $R_{ol,atm}$ )- SEBAL

A radiação de onda longa incidente pela atmosfera na direção da superfície, também computada pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da emissividade atmosférica do ar, segundo a Equação 28 (BASTIAANSEN, 1995; ALLEN et al., 2002; BASTIAANSEN et al., 2005).

$$R_{ol,atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (28)$$

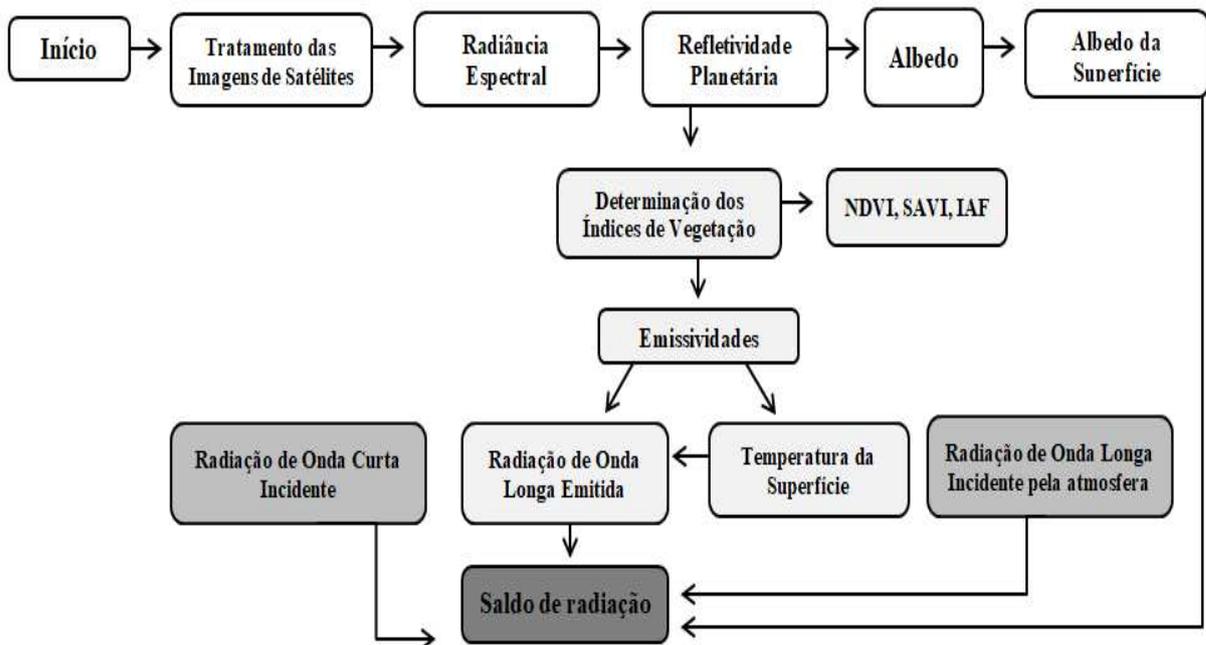
Em que,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ );  $T_{ar}$  a temperatura do ar instantânea na estação meteorológica (K) e  $\varepsilon_{atm}$  a emissividade atmosférica do ar (Equação 29) em função da transmissividade atmosférica instantânea ( $\tau_{sw}$ ) alcançada através da Equação 15.

$$\varepsilon_{atm} = 0,85 \cdot (-\ln \cdot \tau_{sw})^{0,09} \quad (29)$$

#### 4.4.2. Saldo de radiação ( $R_n$ ) - METRIC

A equação de determinação do saldo de radiação é a mesma empregada no SEBAL (Equação 5) e no diagrama da Figura 3 está representado o esquema de etapas para a obtenção do  $R_n$  através do METRIC.

**Figura 3.** Diagrama de etapas computacionais no processamento para obtenção do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) por meio do algoritmo METRIC.



#### 4.4.2.1. Albedo da superfície ( $\alpha_s$ ) - METRIC

O albedo da superfície é dado pela razão entre a radiação solar refletida pela radiação solar global incidente à superfície em todo o domínio da radiação de onda curta à superfície (0,3 a 3,2  $\mu\text{m}$ ). No METRIC o cômputo do  $\alpha_s$  se dá através da Equação 30 com a combinação linear das refletâncias monocromáticas de cada banda:

$$\alpha_s = \sum_{b=1}^n (\rho_{s,b} \cdot \omega_b) \quad (30)$$

Em que  $\rho_{s,b}$  a refletância de cada banda do TM e  $\omega_b$  expressa o peso de cada banda, a refletância de cada banda corrigindo os efeitos atmosféricos é dada pela razão entre a radiação solar refletida-  $R_{ol, emi}$  por cada banda e a radiação incidente-  $R_{s, inc}$  (Equação 31), segundo Allen et al. (2007):

$$\rho_{s,b} = \frac{R_{out\ s,b}}{R_{in\ s,b}} = \frac{\rho_{t,b} - \rho_{a,b}}{\tau_{in,b} \cdot \tau_{out,b}} \quad (31)$$

Em que:  $\rho_{s,b}$  é a refletividade do pixel à superfície,  $\rho_{t,b}$  é a refletividade da banda b no topo da atmosfera,  $\rho_{a,b}$  a refletância atmosférica,  $\tau_{in,b}$  a transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente e  $\tau_{out,b}$  é a transmissividade para a radiação solar refletida pela superfície. Segundo Allen et al., (2007),  $\tau_{in,b}$  e  $\tau_{out,b}$  são responsáveis pela atenuação de ambos os feixes e radiação difusa.

A refletividade da banda b no topo da atmosfera é estimada de acordo com a seguinte Equação 32 (ALLEN et al., 2007):

$$\rho_{t,b} = \frac{\pi L_{t,b} d^2}{ESUN_b \cos \theta_{rel}} \quad (32)$$

Em que:  $L_{t,b}$  é a energia refletida medida na banda b do satélite ( $\text{Wm}^{-2}\text{ster}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ),  $d$  é a distância Terra-Sol em astronômico unidades,  $ESUN_b$  a média solar radiação exoatmosférica sobre a banda b ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ );  $\cos \theta$  é o cosseno do ângulo solar de incidência (ou ângulo do zênite solar) em relação ao normal para a inclinação da superfície da terra e pode ser determinado por meio da Equação 33 (ALLEN et al., 2007).

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(S) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(S) \cos(\gamma) \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
& + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(S) \cos(\omega) \\
& + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(S) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\
& + \cos(\delta) \sin(\gamma) \sin(S) \sin(\omega)
\end{aligned}$$

Em que,  $\delta$  é a declinação do sol,  $\phi$  é a latitude central da cena,  $s$  é a inclinação do pixel ( $s = 0$  para horizontal e  $s = \frac{\pi}{2}$  para declividade vertical);  $\omega$  é o ângulo horário em radiano ( $\omega = 0$  ao meio-dia, negativo de manhã e positivo à tarde);  $\gamma$  o ângulo azimutal da superfície ( $\gamma = 0$  para declividades orientadas para o sul,  $\gamma = -\frac{\pi}{2}$  para declividades orientadas a leste,  $\gamma = +\frac{\pi}{2}$  para declividades a oeste e  $\gamma = \pm \pi$  para declividades orientadas ao norte). A refletância atmosférica-  $\rho_{a,b}$ , dada pela Equação 34 (ALLEN et al., 2007):

$$\rho_{a,b} = C_b(1 - \tau_{in,b}) \quad (34)$$

Em que  $C_b$  é o coeficiente derivado de modelo de transferência radiativa. Os valores das transmitâncias são segundo Allen et al. (2007) determinadas pelas Equações 35 e 36, abaixo:

$$\tau_{in,b} = C_1 \exp \left[ \frac{C_2 P}{K_1 \cos \theta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \theta} \right] + C_5 \quad (35)$$

$$\tau_{out,b} = C_1 \exp \left[ \frac{C_2 P_o}{K_t \cos \eta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (36)$$

Em que  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  e  $C_5$  são os coeficientes derivados de modelo de transferência radiativa, utilizados os indicados por Allen et al. (2007),  $P_o$  é a pressão atmosférica (kPa),  $W$  é a água precipitável (mm),  $K_t$  é o coeficiente de turbidez atmosférica (valor padrão = 1,0),  $\theta$  é o ângulo zenital solar,  $\eta$  é o ângulo de visão do sensor relativo a perpendicular de uma superfície plana e horizontal. No caso do Landsat, o  $\cos \eta = 1$ . O valor do  $\cos \theta$  é obtido pela redução da Equação 33, dando origem a Equação 37.

$$\cos \theta = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (37)$$

#### 4.4.2.2. Índices de vegetação (NDVI e IAF) - METRIC

Na determinação dos índices de vegetação não há diferença no cômputo entre os algoritmos SEBAL e METRIC. Essa etapa utiliza as Equações 20 e 22 descritas anteriormente.

#### 4.4.2.3. Emissividades - METRIC

A determinação as emissividades no METRIC também é um dos aspectos em comum ao SEBAL, que é por meio das Equações 23 e 24.

#### 4.4.2.4. Temperatura da Superfície (Ts)– METRIC

Obtida através da Equação 25.

#### 4.4.2.5. Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{ol,emi}$ ) - METRIC

A expressão de cálculo da  $R_{ol,emi}$  para o METRIC e o SEBAL é a mesma (Equação 26) e o que as diferencia é que o METRIC recomenda que se faça uma correção atmosférica ( $L_{b,10c}$ ) na radiância espectral da banda termal do Landsat 8 do sensor TIRS, o que deve ser feito por meio da Equação 38 (ALLEN et al., 2007):

$$L_{b,10c} = \left( \frac{L_{b,10} - R_p}{\tau_{NB}} \right) - (1 - \epsilon_{NB}) \cdot R_{sky} \quad (38)$$

Em que  $L_{b,10c}$  é a radiância da banda termal corrigida ( $W m^{-2} sr^{-1} um^{-1}$ ),  $L_{b,10}$  é a radiância da banda termal obtida ao nível orbital ( $W m^{-2} sr^{-1} um^{-1}$ ),  $R_p$  é a radiância de trajetória na faixa espectral da banda 6 ( $W m^{-2} sr^{-1} um^{-1}$ ),  $\tau_{NB}$  é a transmitância atmosférica da banda termal,  $\epsilon_{NB}$  é a emissividade de cada pixel (Equação 23) e  $R_{sky}$  é a radiância de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície para céu limpo. Os valores para  $R_p$  e  $\tau_{NB}$  requerem o uso de uma radiação atmosférica modelo de simulação de transferência, como MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Transmission). Na falta de um modelo de correção atmosférica, correções no cálculo de  $L_{b,10c}$  são ignorados definindo  $R_p = 0$ ,  $\tau_{NB} = 1$  e  $R_{sky} = 0$  (ALLEN et al., 2007).

#### 4.4.2.6. Radiação de Onda Curta Incidente ( $R_{s,inc}$ ) - METRIC

A radiação solar de onda curta incidente é obtida por meio da mesma Equação 27 empregada no SEBAL.

#### 4.4.2.7. Radiação de Onda Longa Incidente ( $R_{ol, atm}$ ) – METRIC

Não há diferença na determinação da radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície entre os algoritmos SEBAL e METRIC. É determinada por meio da Equação 28 (BASTIAANSSEN, 1995; ALLEN et al., 2002; BASTIAANSSEN et al., 2005).

#### 4.5.FLUXO DE CALOR NO SOLO (G)

##### 4.5.1. Fluxo de calor no solo (G) – SEBAL

O fluxo de calor no solo é a taxa de calor armazenado pelo solo e pela vegetação, atingido através da Equação 39, desenvolvida por Bastiaanssen (2000).

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha_s} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_s + 0,0074 \cdot \alpha_s^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n \quad (39)$$

$T_s$  é a temperatura da superfície (Equação 25),  $\alpha_s$  é o albedo superficial (Equação 14). Para efeito de correção dos valores de fluxo de calor no solo para corpos de água, onde o  $NDVI < 0$  poderá utilizar a seguinte expressão:  $G = 0,5 \cdot R_n$ , segundo Allen et al. (2002).

##### 4.5.2. Fluxo de calor no solo (G) – METRIC

Também do METRIC se utiliza a proposta de Bastiaanssen (2000) para determinar o fluxo de calor no solo através da Equação 39.

#### 4.6.DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO $dT$ E DO CALOR SENSÍVEL (H)

##### 4.6.1. Determinação da função $dT$ – SEBAL

A função  $\Delta T$  é a diferença de temperatura próxima à superfície, em que são selecionados dois pixels de condições extremas de temperatura e umidade dentro da área de estudo, denominados de pixels âncoras, pixels “quente” e “frio”. A escolha desses pixels será de acordo com o algoritmo utilizado e seus critérios, que é o principal ponto de diferença entre o SEBAL e o METRIC.

A determinação de  $dT$  ( $^{\circ}C$ ) se dá entre a diferença de temperatura da superfície ( $T_s$ ) e a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) utilizando a Equação 40 :

$$dT = a + b \cdot T_s \quad (40)$$

Em que: a e b são coeficientes da relação linear e são obtidos nesse processo através das componentes do balanço de energia nos pixels frio e quente. E  $T_s$  é temperatura de superfície em cada pixel (Equação 25).

Na metodologia tradicional do SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998b) o pixel frio é selecionado num corpo de água (onde  $H=0$  e  $LE$  é máximo), enquanto que o pixel quente é geralmente, selecionado numa área de solo exposto ( $LE=0$  e o  $H$  é máximo).

#### 4.6.1.1. Fluxo de calor sensível (H) – SEBAL

No SEBAL o calor sensível é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis. É um passo que depende de uma maior quantidade de dados de campo, e pode ser considerada a fase mais complexa, que se inicia com a Equação 41 (BASTIAANSEN et al., 1998a):

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{r_{ah}} \quad (41)$$

$\rho$  é a massa específica do ar,  $c_p$  o calor específico do ar,  $dT$  a diferença de temperatura próxima à superfície, e  $r_{ah}$  a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $s^{-1}$ ).

O cálculo de  $r_{ah}$  ( $s^{-1}$ ) utiliza a velocidade do vento extrapolada para 200m acima da superfície do solo. Como  $r_{ah}$  e  $H$  são desconhecidos para cada pixel na imagem realiza-se um processo iterativo. Para primeira iteração  $r_{ah}$  é estimado assumindo uma condição de estabilidade neutra da atmosfera, dada pela Equação 42:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (42)$$

Sendo  $Z_1$  e  $Z_2$  as alturas acima da superfície (0,1 e 2,0 m);  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $m s^{-1}$ ) e  $k$ , a constante de Von Karman (0,41). Para a Equação 42 e as seguintes, os dados de velocidade do vento ( $u_*$ ) e da altura média da vegetação ( $h$ ) foram utilizados dados da estação meteorológica.

A velocidade de fricção foi calculada usando o perfil logaritmo do vento, por meio da Equação 43 para condição de estabilidade neutra.

$$u_* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{om}}\right)} \quad (43)$$

Onde:  $u_x$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) na altura  $Z_x$  (m) e  $Z_{om}$  o coeficiente de rugosidade dado e obtido pela Equação 44 em função da altura média da vegetação na estação (h), segundo Brutsaert (1982), considerando um raio igual à metade da resolução espacial do Landsat 8 OLI/TIRS e a altura de obtenção da velocidade do vento.

$$Z_{om} = 0,12 \cdot h \quad (44)$$

Assumindo que a atmosfera esteja em equilíbrio neutro, estimando que a velocidade do vento ao nível de  $Z_x = 200$  m situação essa chamada de “*blending height*”, admite-se que os efeitos da rugosidade da superfície foram desprezíveis, assim, a velocidade do vento ao nível de 200 m é espacialmente constante calculada através da Equação 45:

$$u_{200} = \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)}{k} \quad (45)$$

Ainda considerando  $u_{200}$  constante em toda a área estudada, se obteve a velocidade de fricção ( $u_*$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) através da Equação 46:

$$u_* = \frac{k \cdot u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)} \quad (46)$$

Para o  $Z_{om}$  (m) é obtido pixel a pixel e em função do SAVI, utilizando a velocidade do vento a 200 m ( $u_{200}$ ) e  $Z_x = 200$ , segundo Bastiaanssen (2000), através da Equação 47:

$$Z_{om} = \exp(-5,809 + 5,62 \times SAVI) \quad (47)$$

Admitindo a condição estabelecida para o SEBAL que para o pixel frio é selecionado num corpo de água (onde  $H=0$ ), logo  $dT=0$ , tem-se Equação 48:

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{r_{ah}} = 0 \quad (48)$$

Já no pixel quente assumiu-se que o calor latente é nulo ( $LE = 0$ ). É geralmente selecionado em uma área de solo exposto de  $H$  máximo. Dessa maneira, pela Equação 49 se determina o valor do fluxo de calor sensível no pixel quente ( $H_q$ ) pela união das Equações (4 e 41):

$$H_q = R_n - G = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{r_{ah}} \quad (49)$$

$R_n$  o saldo de radiação ( $W m^{-2}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ),  $\rho$  ( $kg m^{-3}$ ) é a massa específica do ar,  $c_p$  o calor específico do ar, a pressão constante ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ) que foram obtidos exatamente na coordenada do pixel quente da imagem,  $dT$  diferença de temperatura próxima à superfície e  $r_{ah}$  a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $s m^{-1}$ ).

Após a obtenção dos valores dos pixels quente e frio, são obtidos os coeficientes da equação linear envolvendo  $dT$  e a temperatura da superfície (OLIVEIRA, 2012), assim, se originam as Equações 50 e 51:

$$a + b \cdot T_{S_f} = 0 \quad (50)$$

$$a + b \cdot T_{S, pixel\ frio} = \frac{(R_n - G)_{pixel\ quente} \cdot r_{ah\ pixel\ quente}}{\rho \cdot c_p} \quad (51)$$

Como no pixel frio  $dT = 0$ , ou seja,  $dT = a + b T_{ar} = 0$ , tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, possibilitando a determinação de  $a$  e  $b$  por meio das Equações 52 e 53:

$$b = \frac{(R_n - G) \cdot r_{ah}}{\rho \cdot c_p \cdot (T_{S_q} - T_{S_f})} \quad (52)$$

$$a = -b \cdot T_{S_f} \quad (53)$$

Os valores coletados no pixel quente do saldo de radiação instantâneo-  $R_n$  ( $W m^{-2}$ ), fluxo de calor no solo instantâneo-  $G$  ( $W m^{-2}$ ) e resistência aerodinâmica ao fluxo de calor sensível-  $r_{ah}$  ( $s m^{-1}$ );  $T_{S_q}$  é a temperatura da superfície no pixel quente ( $^{\circ}C$ ) e  $T_{S_f}$  é a temperatura da superfície no pixel frio ( $^{\circ}C$ ).

É necessário identificar a condição de estabilidade atmosférica, já que os valores de H obtidos não representam adequadamente o fluxo de calor sensível de cada pixel. A teoria da similaridade de Monin-Obukhov é utilizada para identificar a condição de estabilidade atmosférica de cada pixel e efetivar a correção da estabilidade para o transporte de momentum e calor sensível. Utilizou-se a Equação 54 para identificar as condições de estabilidade da atmosfera o comprimento de Monin-Obukhov-  $L_{\text{monin}}$  (m), com o cálculo em função dos fluxos de calor e de momentum.

$$L_{\text{monin}} = - \frac{\rho \cdot c_p \cdot u_*^3 \cdot T_s}{k \cdot g \cdot H} \quad (54)$$

Em que,  $g$  é o módulo do campo gravitacional terrestre ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ );  $H$  o fluxo de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade e  $\rho$  a massa específica do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ), calculada conforme Equação 55.

$$\rho = 3,486 \cdot \frac{P_o}{T_s \cdot \left(1 - 0,378 \cdot \frac{e_a}{P_o}\right)} \quad (55)$$

Em que:  $e_a$  é a pressão real de vapor d'água atmosférico (kPa), de acordo com Allen et al. (1998).

Os valores de  $L_{\text{monin}}$  definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se  $L_{\text{monin}} < 0$ , a atmosfera é considerada instável; se  $L_{\text{monin}} > 0$ , a atmosfera é considerada estável e se  $L_{\text{monin}} = 0$ , a atmosfera é considerada neutra.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\psi_m$ ) e de calor ( $\psi_h$ ) devem ser considerados. Para isto, foram utilizadas as formulações de Paulson (1970) e Webb (1970), Equações 56 e 60b.

i) Condição de instabilidade I (se for  $L_{\text{monin}} < 0$ ):

$$\Psi_{m(100m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}^2}{2}\right) - 2\text{arctg}(x_{(200m)}) + 0,5 \cdot \pi \quad (56)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (57a)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2}\right) \quad (57b)$$

Em que:

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 \frac{200}{L_{\text{monin}}}\right)^{0,25} \quad (58a)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L_{\text{monin}}}\right)^{0,25} \quad (58b)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L_{\text{monin}}}\right)^{0,25} \quad (58c)$$

ii) Condição de estabilidade II (se for  $L_{\text{monin}} > 0$ ):

$$\Psi_{m(200m)} = -5 \cdot \left(\frac{2}{L_{\text{monin}}}\right) \quad (59)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \cdot \left(\frac{2}{L_{\text{monin}}}\right) \quad (60a)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \cdot \left(\frac{0,1}{L_{\text{monin}}}\right) \quad (60b)$$

iii) Condição de neutralidade (se for  $L_{\text{monin}} = 0$ ):  $\Psi_m = 0$  e  $\Psi_h = 0$ .

O valor corrigido para a velocidade de fricção ( $u_*$ ,  $m s^{-1}$ ) é dado pela Equação 61.

$$u_* = \frac{k \cdot u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right) - \Psi_{m(200m)}} \quad (61)$$

Em que,  $k$  a constante de Von Karman (0,41),  $u_{200}$  é a velocidade do vento a 200 m ( $m s^{-1}$ );  $Z_{om}$  é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e  $\Psi_{m(200m)}$  a correção da estabilidade para o transporte de *momentum* a 200 m.

O valor corrigido para a resistência aerodinâmica será obtida quando se tem o valor de  $u_*$  corrigido ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ,  $s m^{-1}$ ) a partir da Equação 62.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) - \Psi_{h(Z_2)} + \Psi_{h(Z_1)}}{u_* \cdot k} \quad (62)$$

Sendo  $Z_2 = 2,0$  m,  $Z_1 = 0,1$  m e  $\Psi_{h(Z_2)} = 2,0$  m e  $\Psi_{h(Z_1)} = 0,1$  m são as correções de estabilidade para o transporte de calor.

Corrigidos os valores de  $u_*$  e  $r_{ah}$  retorna a determinação da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente, em que foi ganho,

consequentemente, a estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura ( $dT$ ) e da resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ).

#### 4.6.2. Determinação das constantes da função $dT$ e H– METRIC

Partindo da concepção que para haver uma diferença de temperatura próxima à superfície dois pixels de condições extremas de temperatura e umidade dentro da área de estudo em que se determina  $dT$ , os pixels denominados de âncoras (“quente” e “frio”) devem ser selecionados. A escolha desses pixels no algoritmo METRIC será em: o pixel quente é escolhido em uma área de solo exposto com  $LE = 0$  e  $H_q = (R_n - G)_q - LE_q$ . E o pixel frio em uma área agrícola com cultivo em pleno desenvolvimento, com características similares a cultura de referência em que diferentemente do escolhido no SEBAL, não se considera que  $LE = R_n - G$  e sim  $LE = 1,05 \times ET_r$  (onde  $ET_r$  é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman Monteith ( ALLEN et al., 2007; GIONGO e VETTORAZZI, 2011) e  $H_f = (R_n - G)_f - LE_f$ , e  $dT$  no pixel frio é calculada pela Equação 63.

$$dT_f = \frac{H_f \cdot r_{ah_f}}{\rho_f \cdot C_p} \quad (63)$$

$r_{ah_f}$  é estimado para as condições de estabilidade e para a rugosidade da superfície do pixel frio;  $\rho_f$  é a densidade do ar calculado para o pixel frio,  $C_p$  o calor específico do ar, a pressão constante ( $J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Os coeficientes  $a$  e  $b$  são determinados utilizando dois pares de valores para  $dT$  e  $T_s$ , pelas Equações 64 e 65:

$$a = \frac{dT_q - dT_f}{T_{s_q} - T_{s_f}} \quad (64)$$

$$b = \frac{dT_q - a}{T_{s_q}} \quad (65)$$

$T_{s_q}$  e  $T_{s_f}$  são as temperaturas da superfície nos pixels quente e frio ajustadas ao dado de elevação para cada pixel na imagem usando o modelo digital de elevação.

Com a expressão do  $dT$  e o mapa da resistência  $r_{ah}$ , pode-se obter um mapa inicial de H. Os valores não representam adequadamente o H de cada pixel e servem apenas como valores iniciais de um processo de etapas repetitivas, em que nas subsequentes são consideradas, efetivamente em condições de estabilidade de cada pixel. Nesse sentido, o comprimento de

Monin-Obukhov –  $L_{\text{monin}}(m)$  é utilizado assim como no SEBAL para identificar as condições de estabilidade da atmosfera, sendo computado pela Equação 45 e utilizando suas condições de estabilidade, já explicitadas antes.

Uma vez identificada à condição de estabilidade atmosférica referente, o próximo passo é corrigir os valores da velocidade de fricção e, em seguida, da resistência aerodinâmica de cada pixel, o que é efetuada por meio das Equações 61 e 62.

Com os dados das variáveis é possível retornar ao cômputo da função da diferença de temperatura  $dT$ , por meio da repetição dos cálculos até que se obtenha uma estabilidade nos valores sucessivos de  $dT$  e da  $r_{\text{ah}}$  em cada pixel da imagem.

#### 4.7.FLUXO DE CALOR LATENTE (LE)

##### 4.7.1. Fluxo de calor latente (LE)- SEBAL

O fluxo de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) compreende o fluxo de massa na atmosfera que provém da evaporação das superfícies e da transpiração das plantas. Obtendo os valores das quatro componentes determinantes do balanço de energia ( $R_n$ ,  $G$ ,  $H$  e  $LE$ ) dado pela Equação 4, utilizada nesta fase do SEBAL para determinação da evapotranspiração diária.

##### 4.7.2. Fluxo de calor latente (LE) – METRIC

O fluxo de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) no METRIC é dado também pela Equação 4.

#### 4.8.EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA ( $ET_{R24H}$ )

##### 4.8.1. Evapotranspiração diária ( $ET_{r\text{ Sebal}}$ )- SEBAL

A evapotranspiração diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) foi determinada com base na fração evaporativa instantânea ( $FE_{\text{inst}}$ ), definida pela razão entre  $LE$  e  $(R_n - G)$ . Considerando que a  $FE_{\text{inst}}$  é aproximadamente igual a  $FE_{24h}$  por se manter constante durante todo o dia (BASTIAANSEN et al., 1998a; BEZERRA, 2013), Equação 66.

$$FE_{\text{inst}} = \left( \frac{LE}{R_n - G} \right) = FE_{24h} = \left( \frac{LE_{24h}}{R_{n24h} - G_{24h}} \right) \quad (66)$$

Admitiu-se que  $G_{24h} = 0$ . E o fluxo de calor latente diário,  $LE_{24h}$  dado pela Equação 67.

$$LE_{24h} = FE_{\text{inst}} \cdot R_{n24h} \quad (67)$$

Em que,  $FE_{inst}$  a fração evaporativa instantânea,  $R_{n24h}$  ( $W m^{-2}$ ) o saldo de radiação diário (Equação 6). Para fazer a conversão do fluxo de calor latente diário ( $LE_{24h}$ ) em evapotranspiração diária ( $ET_{r24h}$ ) foi utilizando a Equação 68.

$$ET_{r24h} = \frac{86400 \cdot FE_{inst} \cdot R_{n24h}}{2450000} \quad (68)$$

Os valores empregados de 86400 e 2450000 são utilizados na conversão do LE em ( $mm dia^{-1}$ ) em evapotranspiração diária ( $ET_{r24h}$ ).

#### 4.8.2. Evapotranspiração diária ( $ET_r$ Metric) – METRIC

A determinação da evapotranspiração diária é uma das diferenças mais marcantes entre o SEBAL e METRIC, conforme podem ser observadas nas equações envolvidas em sua determinação.

A evapotranspiração ( $ET_{ins}$ ) no instante da imagem de satélite é calculado para cada pixel dividindo LE pelo calor latente de vaporização, originando a Equação 69:

$$ET_{ins} = 3,600 \cdot \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad (69)$$

Onde  $ET_{inst}$  = evapotranspiração diária ( $mm h^{-1}$ ); 3,600 conversão de segundos a horas,  $\rho_w$  é a densidade da água ( $1000Kgm^{-3}$ ) e  $\lambda$  o calor latente de vaporização ( $JKg^{-1}$ ) que é calculado através da Equação 70:

$$\lambda = [2,501 - 0,00236(T_s - 273,15)] \cdot 10^6 \quad (70)$$

A fração de evapotranspiração de referência ( $ET_r F$ ) é calculada como a razão da ET diária instantânea calculada ( $ET_{inst}$ ) de cada pixel com a evapotranspiração de referência ( $ET_r$ ), calculada a partir de dados meteorológicos aplicados a Equação 71, segundo Allen et al. (2007) dizem que a  $ET_r F$  permanece constante durante todo o dia.

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (71)$$

$ET_{inst}$  é da Equação 69 ( $mm h^{-1}$ ) e  $ET_r$  é a evapotranspiração de referência horária segundo FAO-56 (ALLEN et al., 1998). No cálculo de  $ET_r F$  na acima, cada pixel refere-se a um único valor para  $ET_{inst}$ , que é derivado de um valor comum para  $ET_r$ , originário do

representante dados da estação meteorológica. Finalmente, o  $ET_{r24h}$  (mm / dia) é calculado pela Equação 72, para cada pixel da imagem:

$$ET_{r24h} = C_{rad} (ET_r F)(ET_{rFAO}) \quad (72)$$

O  $ET_r F$  é determinado no momento de passagem do satélite;  $ET_{rFAO}$  a evapotranspiração de referência diária; e  $C_{rad}$  é o termo de correção usado em terreno inclinado para correto para variação em 24h versus disponibilidade instantânea de energia (Allen et al., 2007).

#### 4.9.VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

##### 4.9.1. Análise de erros entre $ET_{rSebal}$ e Método de Penman-Monteith

Para análise da precisão das estimativas das evapotranspirações obtidas pelo SEBAL e pelo modelo de Penman- Monteith, foram utilizados o erro absoluto médio (EAM) e o erro relativo médio (ERM), calculados pelas Equações 72 e 73, respectivamente.

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_{rSebal} - ET_{rFAO}| \quad (72)$$

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{ET_{rSebal} - ET_{rFAO}}{ET_{rFAO}} \right| \quad (73)$$

Em que:  $ET_{rSebal}$  e  $ET_{rFAO}$  correspondem, respectivamente, aos valores da evapotranspiração através do SEBAL e do método de Penman-Monteith.

##### 4.9.2. Análise de erros entre $ET_{rMetric}$ e Método de Penman-Monteith

Já na análise da precisão das estimativas das evapotranspirações obtidas pelo METRIC e pelo de Penman- Monteith foram utilizados o erro relativo médio (ERM) e o erro absoluto médio (EAM), através das Equações 74 e 75 descritas abaixo:

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_{rMetric} - ET_{rFAO}| \quad (74)$$

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{ET_{rMetric} - ET_{rFAO}}{ET_{rFAO}} \right| \quad (75)$$

Em que:  $ET_{rMetric}$  e  $ET_{rFAO}$  correspondem, respectivamente, aos valores da evapotranspiração através do METRIC e do método de Penman-Monteith.

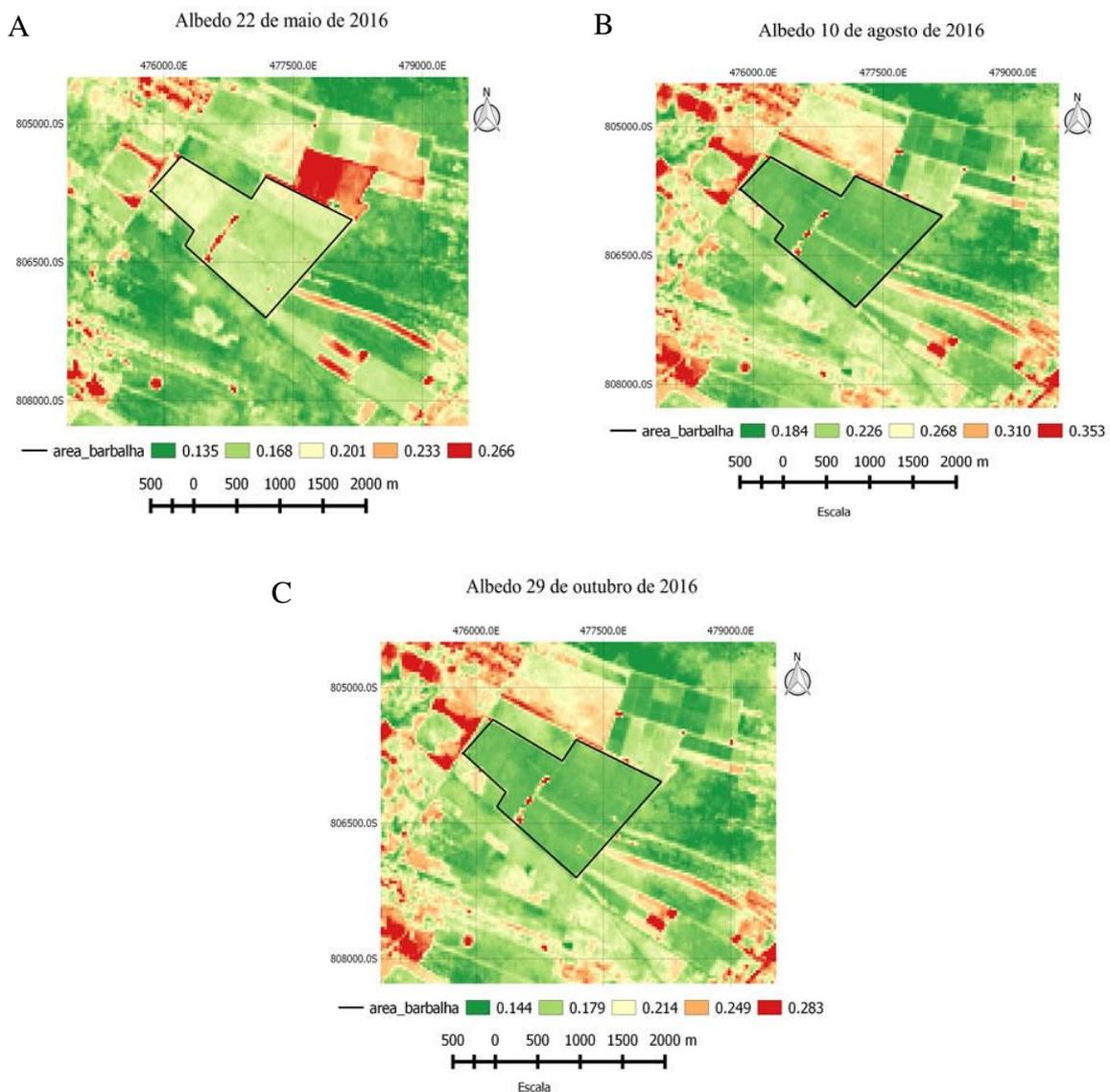
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. ALBEDO DA SUPERFÍCIE

#### 5.1.1. Albedo da superfície- SEBAL

Na Figura 4 podemos observar as cartas temáticas do albedo da superfície determinado pelo Algoritmo SEBAL no município de Barbalha – CE, por Silva et al. (2021), nas datas de 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016. Os valores de albedo estão entre 0,16 e 0,20 em 22 de maio, de 0,18 em 10 de agosto, e entre 0,14 e 0,17 no dia 29 de outubro.

**Figura 4.** Cartas temáticas do albedo da superfície no município de Barbalha – CE (SEBAL): 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.



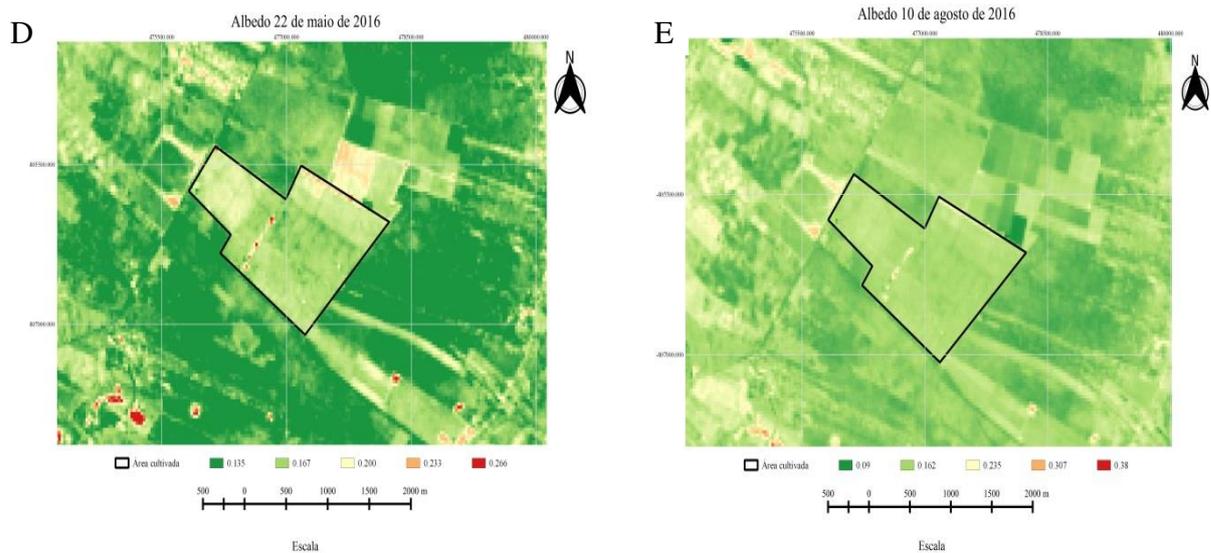
Fonte: Silva et al. (2021).

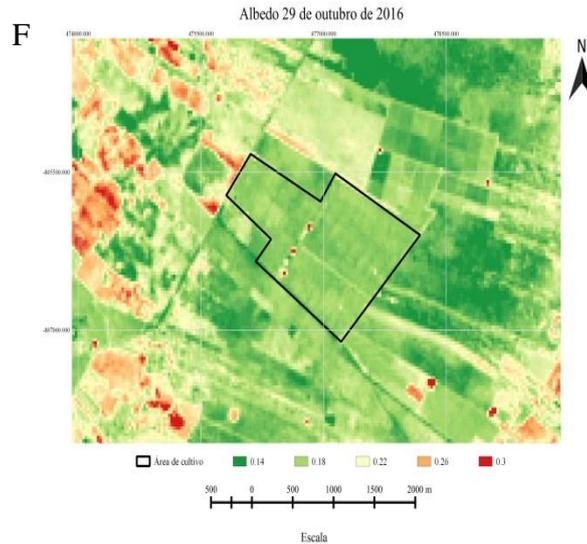
Embora os albedos estimados não possuam grande variabilidade temporal, sua variabilidade espacial foi pequena em seus valores, variando de 0,13 a 0,35 (em média) e os valores de  $\alpha_{\text{sup}}$  estimados maiores na área quando se tinha menos vegetação, ou seja, o solo estaria mais exposto.

### 5.1.2. Albedo da superfície- METRIC

A Figura 5 mostra as cartas temáticas do albedo da superfície- METRIC no município de Barbalha – CE nas datas de 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016. Na área cultivada (destacada em linha preta) apresenta albedo de 0,16 para o dia 22 de maio, de 0,16 em 10 de agosto, e de 0,18 em 29 de outubro. Os maiores valores obtidos pelo METRIC variaram entre 0,26 a 0,38 e os menores entre 0,09 e 0,14.

**Figura 5.** Cartas temáticas do albedo da superfície no município de Barbalha – CE (METRIC): 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.





Fonte: O autor (2021).

## 5.2.ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

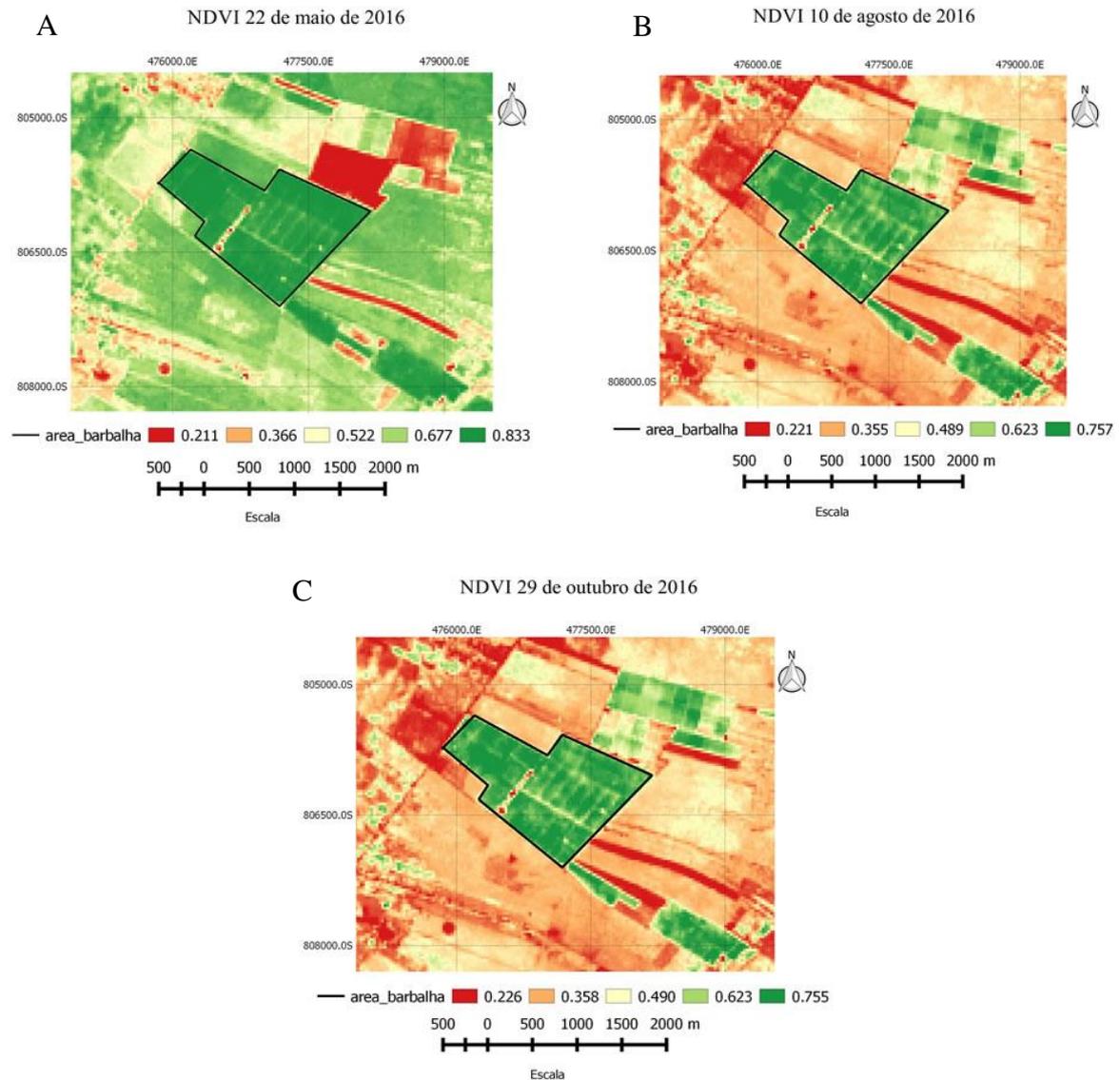
### 5.2.1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

- NDVI- SEBAL

Vê-se na Figura 6 as cartas temáticas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), no município de Barbalha – CE, pelo algoritmo SEBAL para os dias 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016. Na área cultivada com banana, os valores de NDVI encontrados por Silva et al. (2021) foram de 0,83, entre 0,62 e 0,75 e 0,75, respectivamente.

Em estudo numa área também no estado do Ceará, os autores Gameiro et al. (2016), constataram que, os valores mais altos de NDVI sucedeu em períodos que havia presença de vegetação com mais folhas, resultado da boa disponibilidade de água no solo, que proporcionou melhores condições no desenvolvimento da vegetação nativa e das áreas agricultáveis.

**Figura 6.** Cartas temáticas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI-SEBAL), no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.

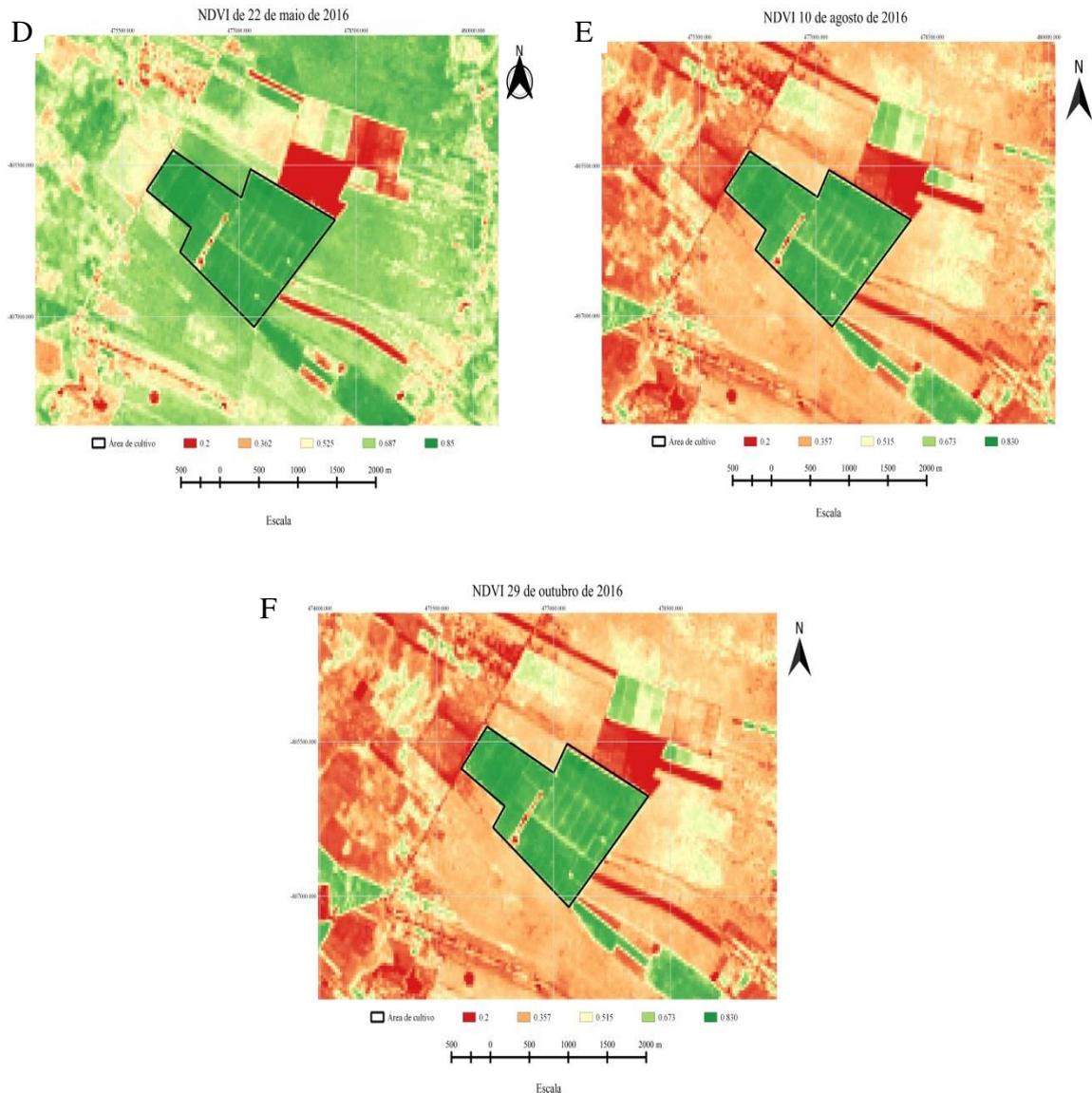


Fonte: Silva et al. (2021).

#### • NDVI- METRIC

A Figura 7 apresenta as cartas temáticas do NDVI- METRIC no município de Barbalha – CE nas datas de 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016. Na área destacada em linha preta os valores de NDVI foram de 0,85 em 22 de maio, de 0,83 para os dias 10 de agosto e 29 de outubro.

**Figura 7.** Cartas temáticas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI-METRIC), no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.



Fonte: O autor (2021).

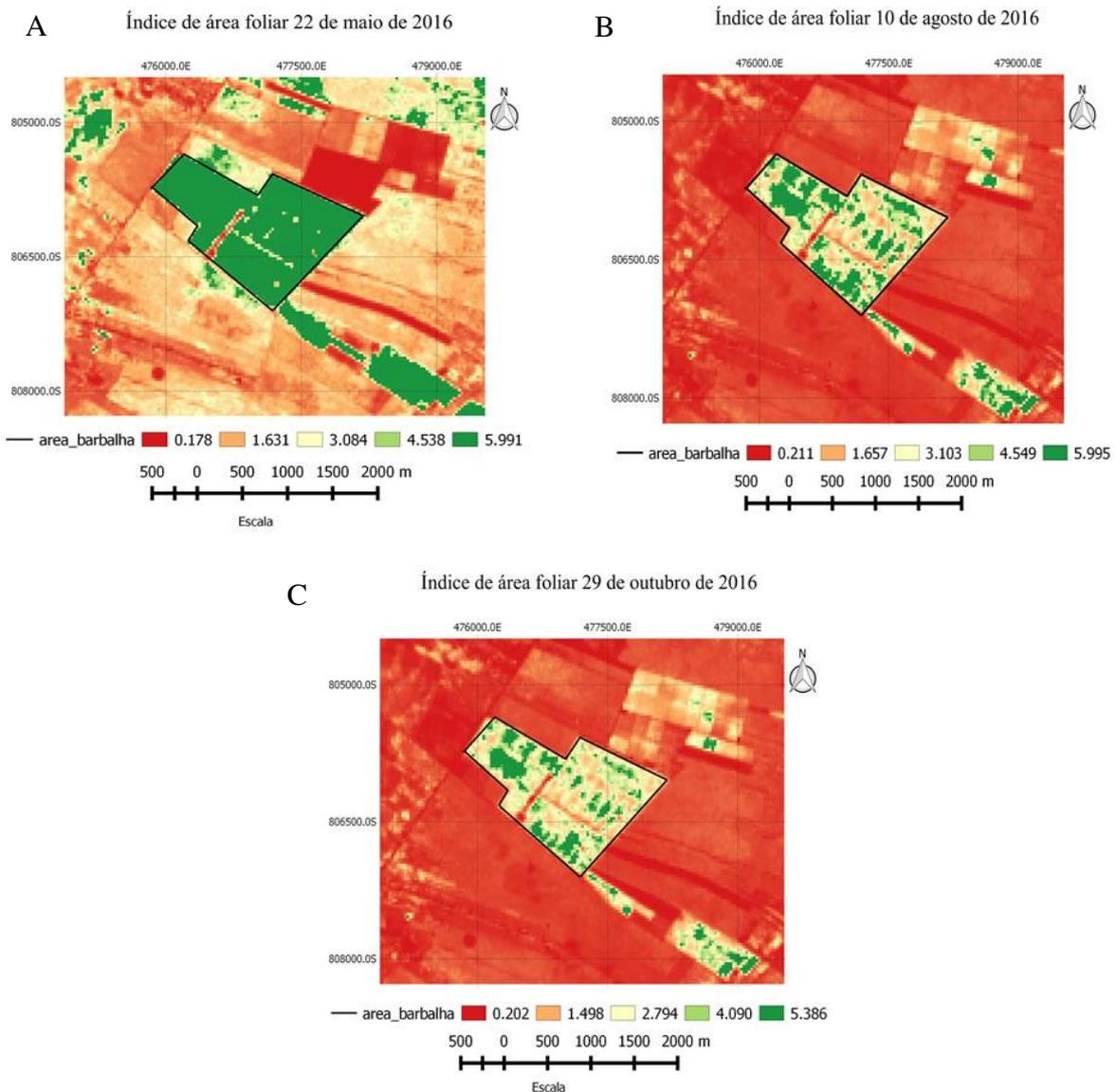
Os maiores valores das cartas temáticas do NDVI- METRIC variaram entre 0,83 a 0,85, já os menores foram encontrados em torno da área de cultivo, principalmente, para as datas de 10 de agosto e 29 de outubro (0,20), não influenciando os altos valores dentro da área plantada pela condição de irrigação adotada para cultura.

### 5.2.2. Índice de Área Foliar (IAF)

#### • Índice de Área Foliar - SEBAL

Nas cartas temáticas apresentadas na Figura 8, do Índice de Área Foliar- SEBAL para as datas de 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016, os maiores valores de IAF foram estimados dentro da área cultivada, em tonalidades do verde. Destacou-se que, o IAF na área de bananeira em 22 de maio de 2016 foi de aproximadamente 6,00. Já em 10 de agosto e 29 de outubro do mesmo ano, o IAF foi de 1,65 a 5,99 e entre 1,48 e 5,38 respectivamente, esses dias são considerados os de menores índices observados por Silva et al. 2021.

**Figura 8.** Cartas temáticas do Índice de Área Foliar (IAF- SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.

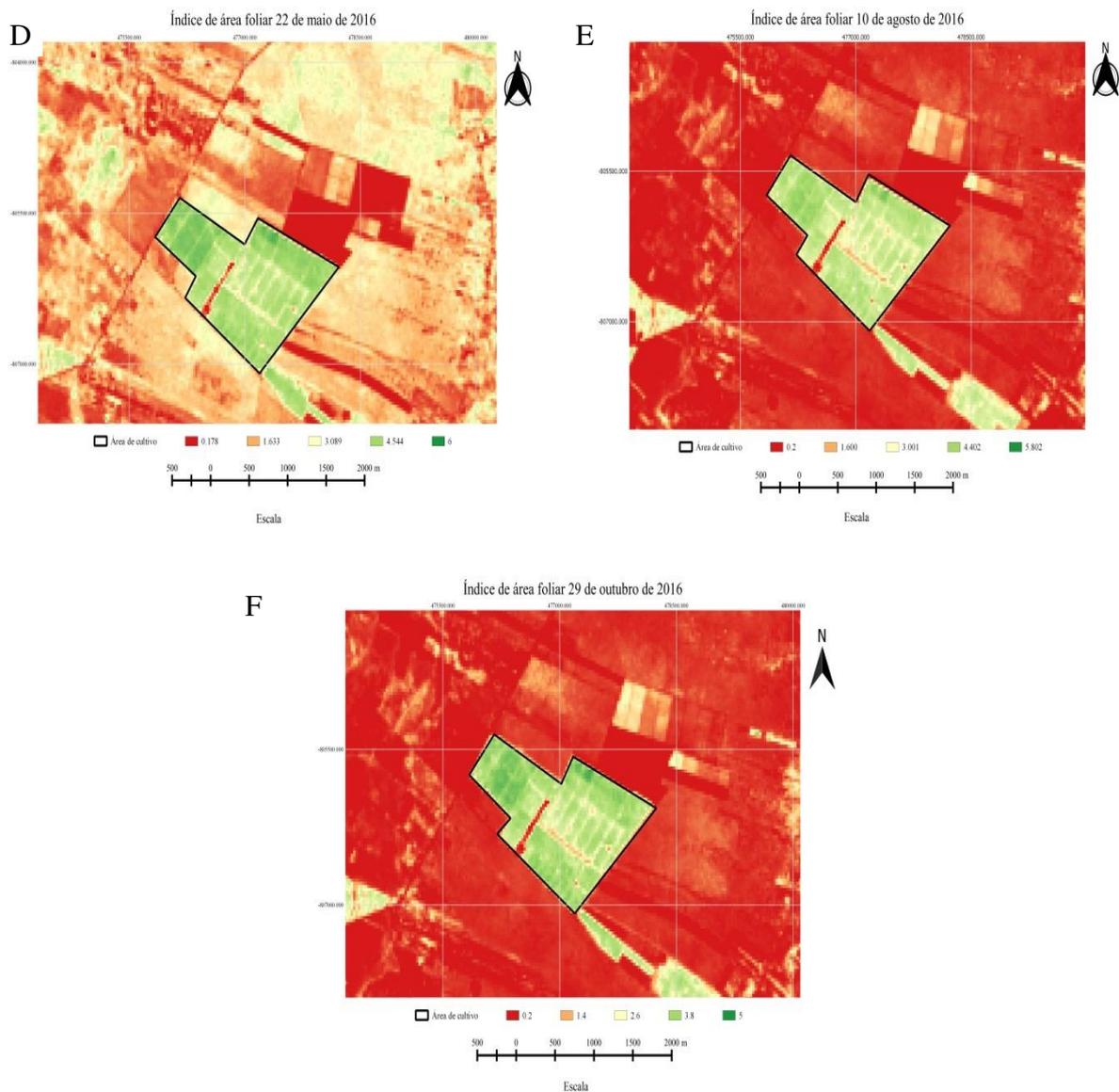


Fonte: Silva et al. (2021).

- **Índice de Área Foliar - METRIC**

Na Figura 9, as cartas temáticas do IAF-METRIC, para as datas de 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016. Com maiores valores de IAF na área agrícola irrigada, que oscilaram entre 4,0 e 6,0, considerados altos quando comparados aos encontrados por Gameiro et al. (2016) que em área com irrigação natural de fruticultura, em região litorânea do Ceará identificaram IAF de 0,11 em período úmido e por Oliveira (2012) que obteve resultados médios instantâneos de IAF entre 0,40 a 2,47.

**Figura 9.** Cartas temáticas do Índice de Área Foliar (IAF- METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.



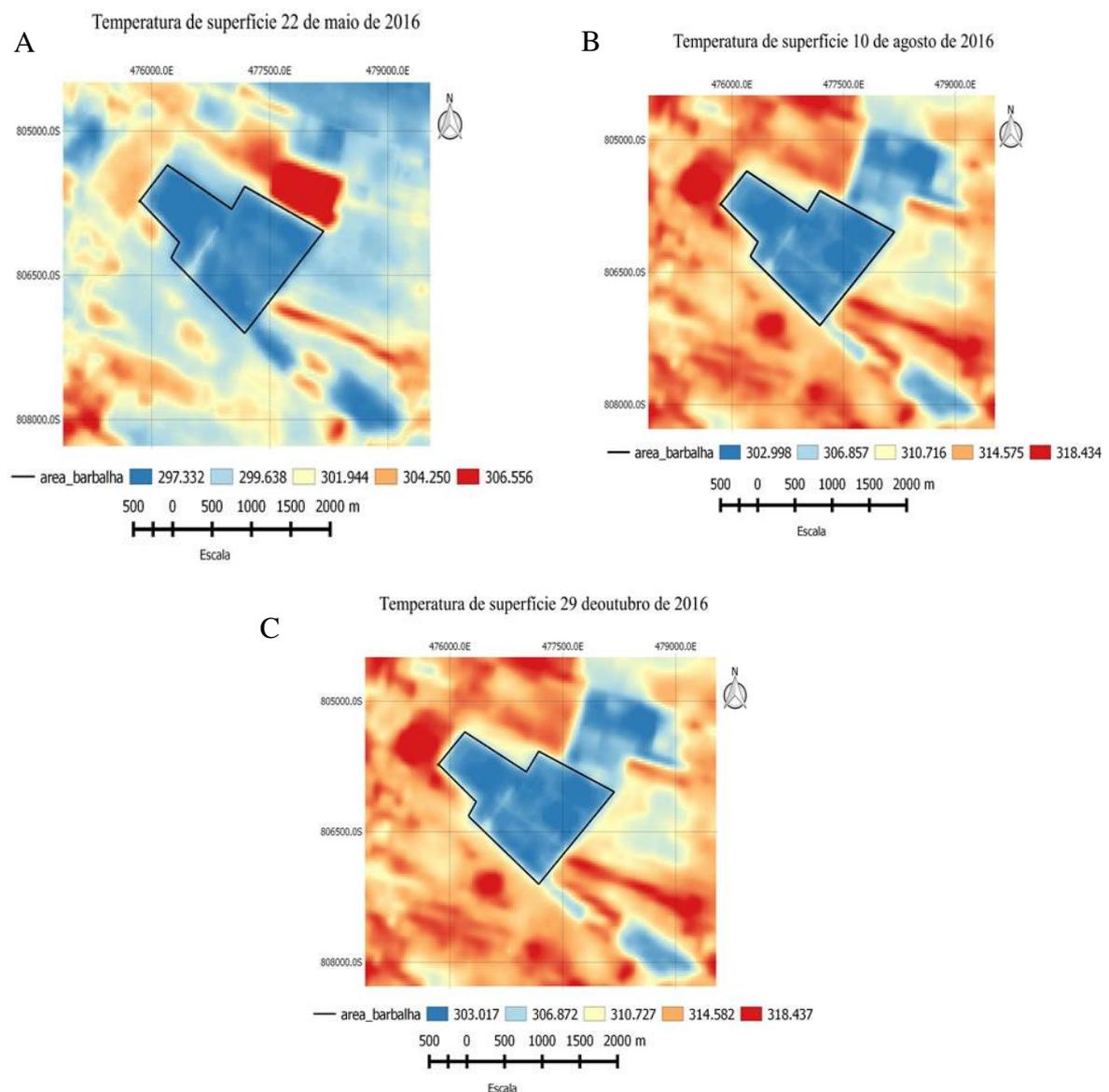
Fonte: O autor (2021).

### 5.3. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ( $T_s$ )

#### 5.3.1. Temperatura de superfície– SEBAL

Observa-se na Figura 10, as cartas temáticas da temperatura da superfície do solo determinadas pelo algoritmo SEBAL ( $^{\circ}\text{C}$ ) no município de Barbalha – CE nos dias 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016. As temperaturas da superfície do solo na área de banana foram de aproximadamente 24, 29 e  $30^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Sendo os menores valores de temperatura de superfície do solo nas cenas em áreas vegetadas (SILVA et al., 2021).

**Figura 10.** Cartas temáticas da temperatura da superfície do solo ( $T_s$ -SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.



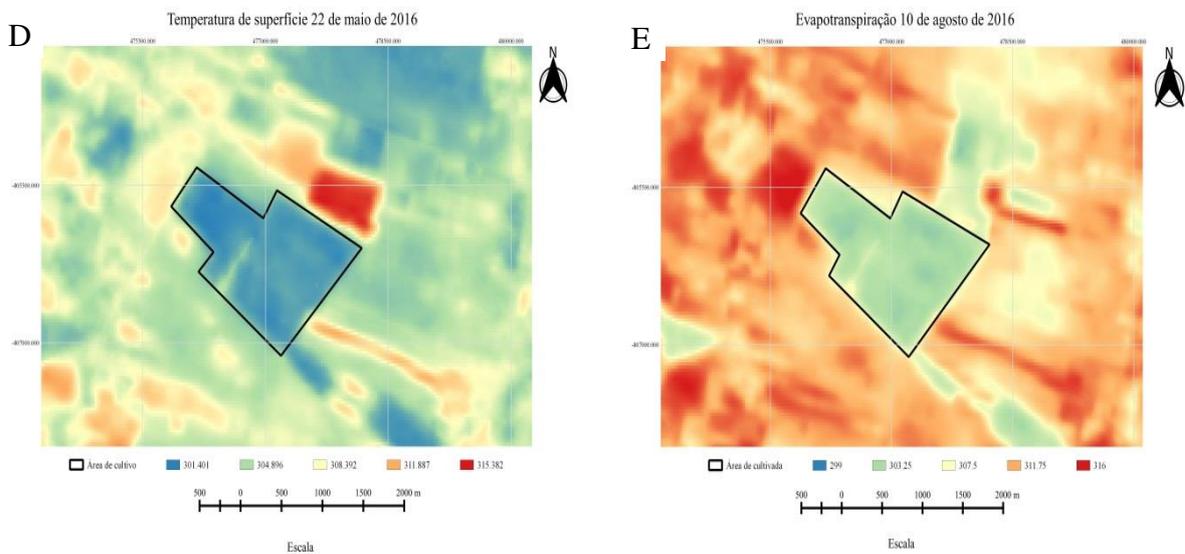
Fonte: Silva et al. (2021).

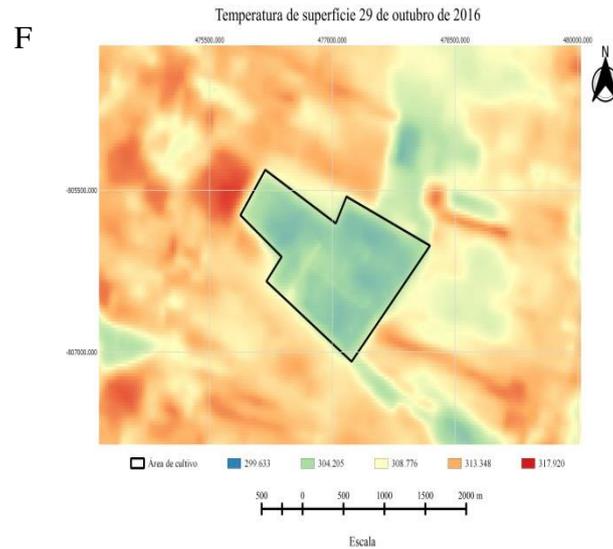
### 5.3.2. Temperatura de superfície- METRIC

Na área de cultivo de banana as temperaturas foram de 28, 30 e 31°C, para as datas de 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016, respectivamente (Figura 11). Os tons mais escuros em vermelho estão as maiores representando às áreas de pouca vegetação e solo exposto. Já os menores valores encontram-se nas áreas vegetadas em tons de azul. Silva et al. (2015), analisando a temperatura de uma área na região semiárida no Estado da Paraíba, também perceberam que as menores temperaturas eram de área de vegetação de porte mais elevado, que oscilaram entre 21,8 e 34,76° com média de 31,5°C e com maior valor de temperatura estimada no mês de outubro.

Como esperado, de forma geral, as temperaturas mais altas foram em superfícies com pouca ou nenhuma vegetação e nos meses de agosto e outubro, pertencentes ao período de seca da região.

**Figura 11.** Cartas temáticas da temperatura da superfície do solo ( $T_s$ - METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.





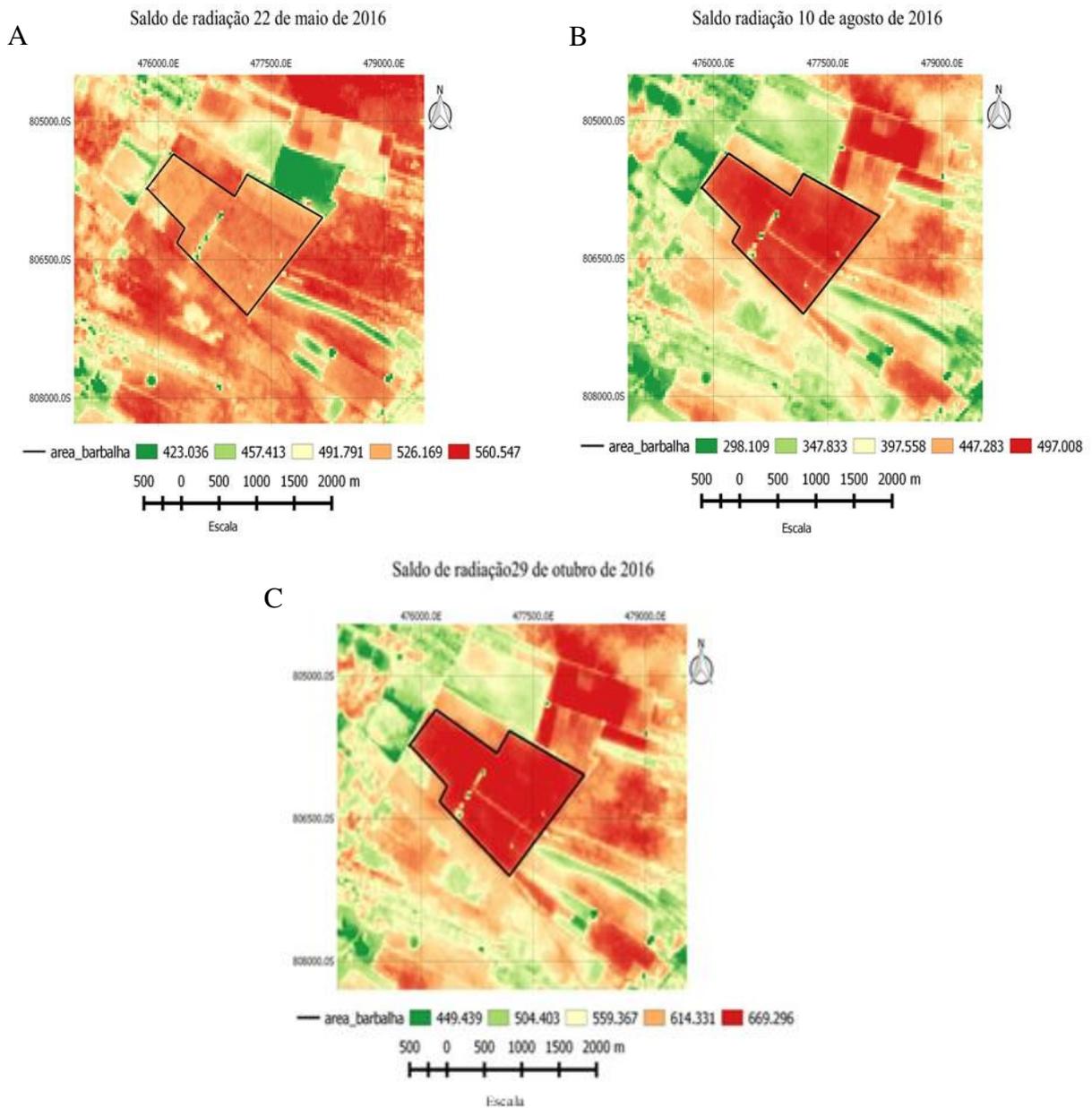
Fonte: O autor (2021).

## 5.4. SALDO DE RADIAÇÃO INSTANTÂNEA ( $R_n$ )

### 5.4.1. Saldo de radiação instantânea- SEBAL

As cartas temáticas do saldo de radiação instantâneo à superfície determinadas pelo Algoritmo SEBAL para 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016 estão na Figura 12, em que nesta ordem os valores de saldo de radiação instantâneo foram de 526,1, de 497 e de 669,2  $W m^{-2}$ . Os menores valores de  $R_n$  (tons em verde) foram nas áreas com os maiores valores de albedo e temperatura da superfície, áreas impermeabilizadas e de solo exposto, evidenciando que são regiões com perda maior de energia solar, tanto por emissão quanto por reflexão. Os maiores valores de  $R_n$  (tons alaranjados a vermelhas), encontram-se áreas com vegetação, resultantes de menor reflexão por parte das ondas curtas, que por sua vez, ocorre menor emissão das longas (SILVA et al., 2021).

**Figura 12.** Cartas temáticas do saldo de radiação da superfície (Rn- SEBAL) o município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.

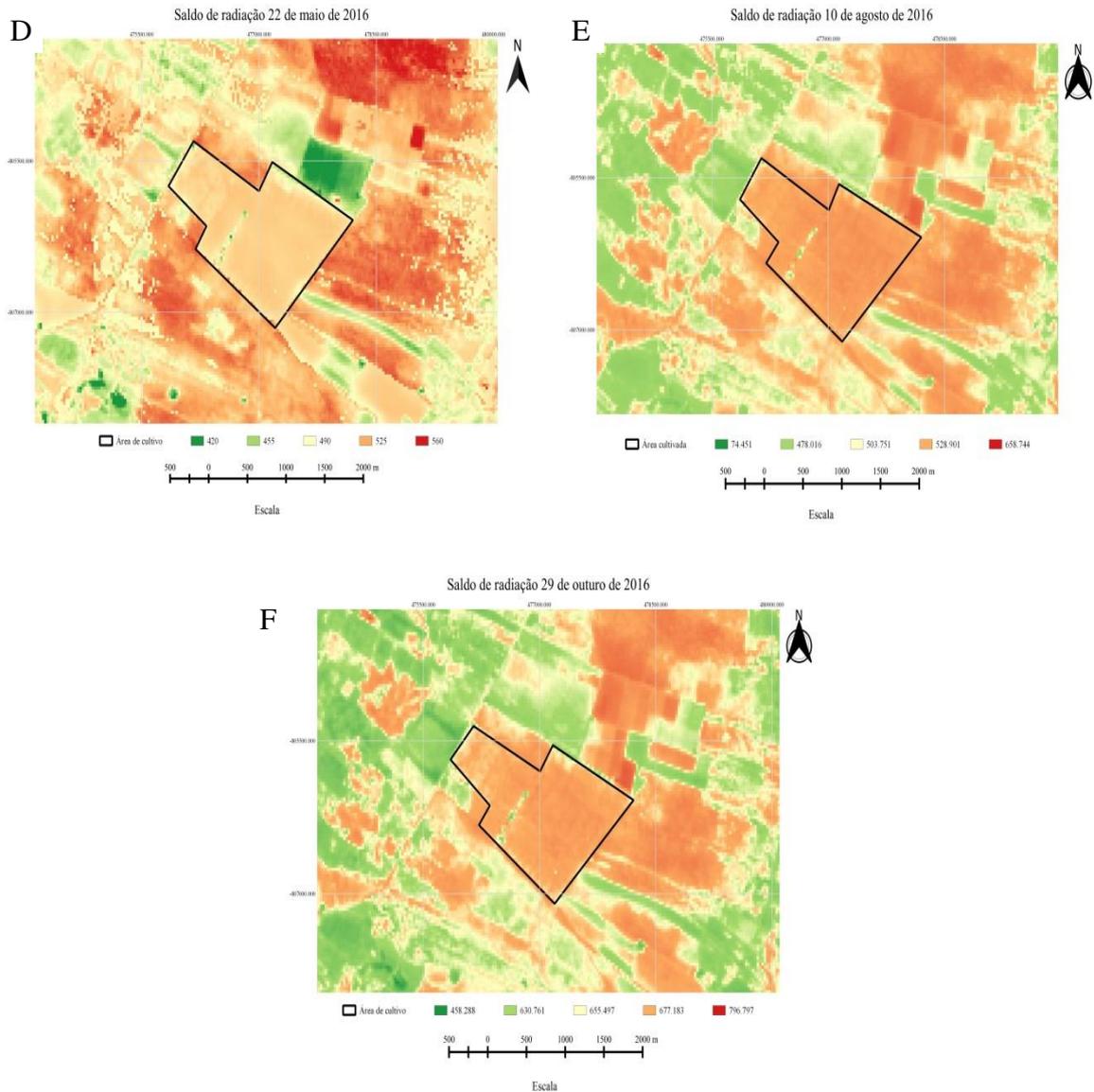


Fonte: Silva et al. (2021).

#### 5.4.2. Saldo de radiação instantânea - METRIC

Na Figura 13 estão representadas as cartas temáticas do saldo de radiação instantâneo à superfície elaboradas a partir do modelo METRIC, referente às datas 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016. Os valores de Rn se situaram entre 420 e 797,8  $W m^{-2}$ . Com maiores valores dentro da área cultivada, de 525  $W m^{-2}$  em 22 de maio, de 528,9  $W m^{-2}$  em 10 de agosto e de 677,2  $W m^{-2}$  em 29 de outubro.

**Figura 13.** Cartas temáticas do saldo de radiação da superfície (Rn- METRIC) o município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.



Fonte: O autor (2021).

Silva et al. (2015) em região semiárida no estado da Paraíba, também evidenciaram os maiores valores para Rn em áreas com presença de vegetação de maior porte, com valor médio de  $618,94 \text{ W m}^{-2}$ , mínimo de  $532,21 \text{ W m}^{-2}$  e valor máximo de  $732,65 \text{ W m}^{-2}$ . E Santos e Silva (2010), em estudo realizado em áreas irrigadas também com o cultivo de bananeiras, o Rn variou entre  $600$  e  $780 \text{ W m}^{-2}$ .

Os valores de  $R_n$  apresentam padrões semelhantes, mas os valores do METRIC em maior parte se mostraram superiores aos do SEBAL. Isso se explica pelo fato do albedo METRIC ser visivelmente inferior aos estimados pelo do SEBAL.

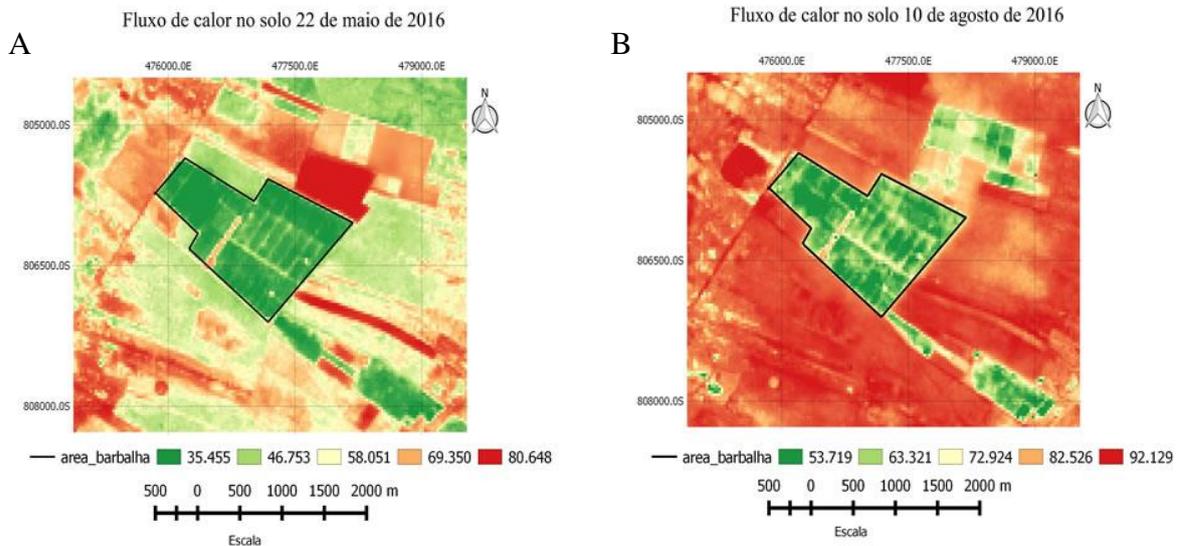
## 5.5.FLUXO DE CALOR NO SOLO (G)

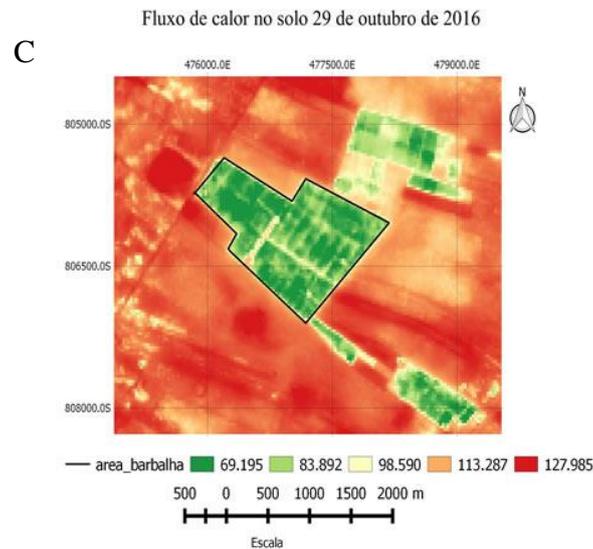
### 5.5.1. Fluxo de calor no solo- SEBAL

Nas cartas temáticas do fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ) no município de Barbalha – CE, expostas na Figura 14, observou-se para a área de bananeira, para os dias 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016, um fluxo de calor de  $35,4 W m^{-2}$ , entre  $53,7$  e  $63,3 W m^{-2}$  e entre  $69,2$  e  $83,9 W m^{-2}$ , respectivamente (SILVA et al. 2021).

Os menores valores de fluxo de calor no solo na área com vegetação de bananeiras mais densa e com maiores valores de índice de área foliar (Figura 8) e menores temperaturas da superfície do solo (Figura 10) encontrados por Silva et al. (2021).

**Figura 14.** Cartas temáticas do fluxo de calor no solo (G- SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.





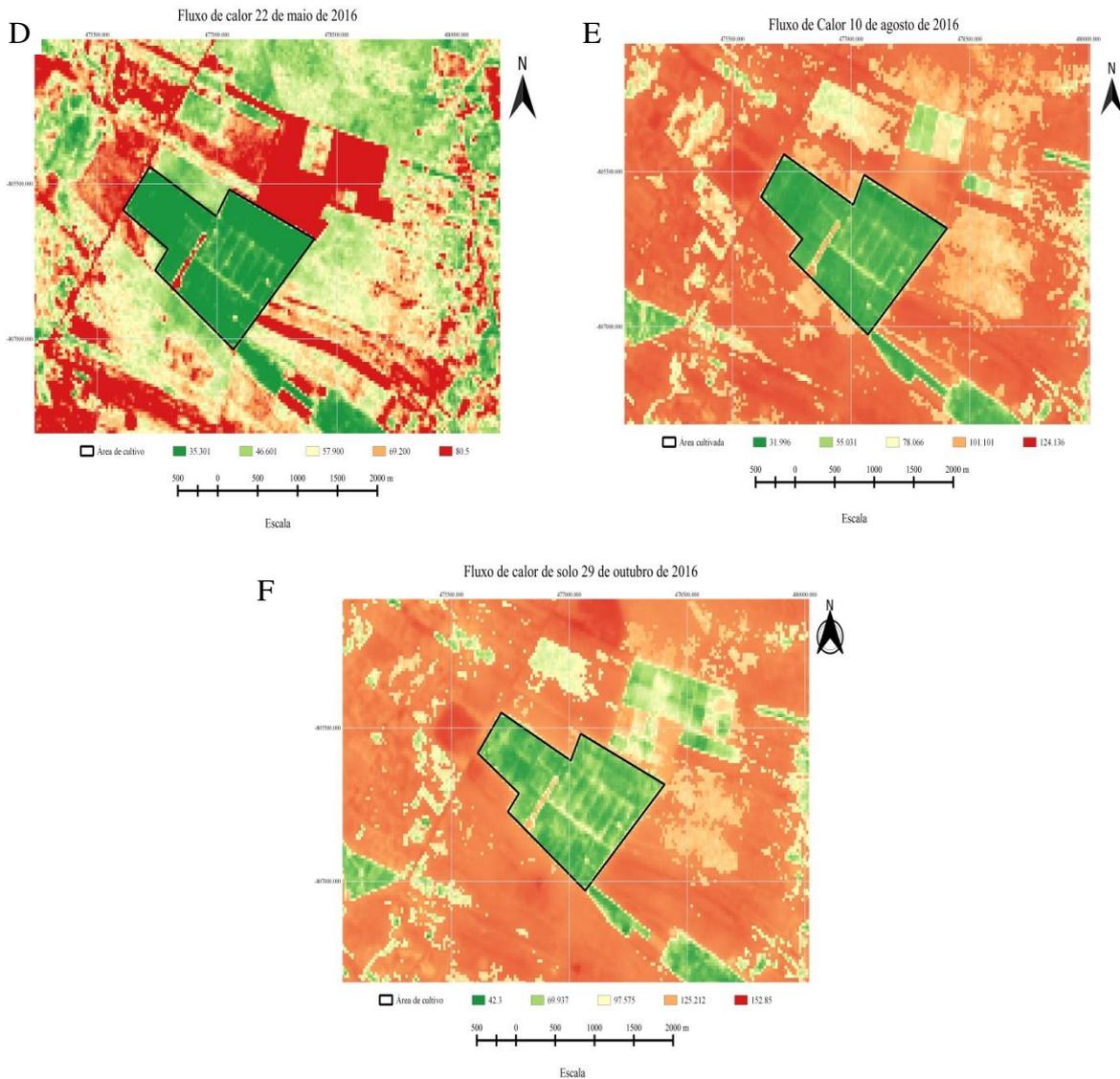
Fonte: Silva et al. (2021).

### 5.5.2. Fluxo de calor no solo- METRIC

A Figura 15 representa as cartas temáticas de fluxo de calor no solo para as datas de 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016, Barbalha – CE. Percebe-se claramente em ambas as cartas ampla predominância da tonalidade verde na área de cultivo, para três datas trabalhadas na pesquisa, em que os valores de  $G$  em área cultivada foram de 35,3 em 22 de maio, 31,9 no dia 10 de agosto e entre 42,3 e 69,9  $W m^{-2}$  para data de 29 de outubro.

As tonalidades laranja e avermelhada correspondem aos maiores valores (entre 80,5 e 152,8  $W m^{-2}$ ) de  $G$  encontrados. Com valores mais altos de  $G$  entorno a área de cultivo nos dias de 10 de agosto e 29 de outubro, caracterizando áreas com pouca cobertura vegetal e solo exposto.

**Figura 15.** Cartas temáticas do fluxo de calor no solo (G- METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016.



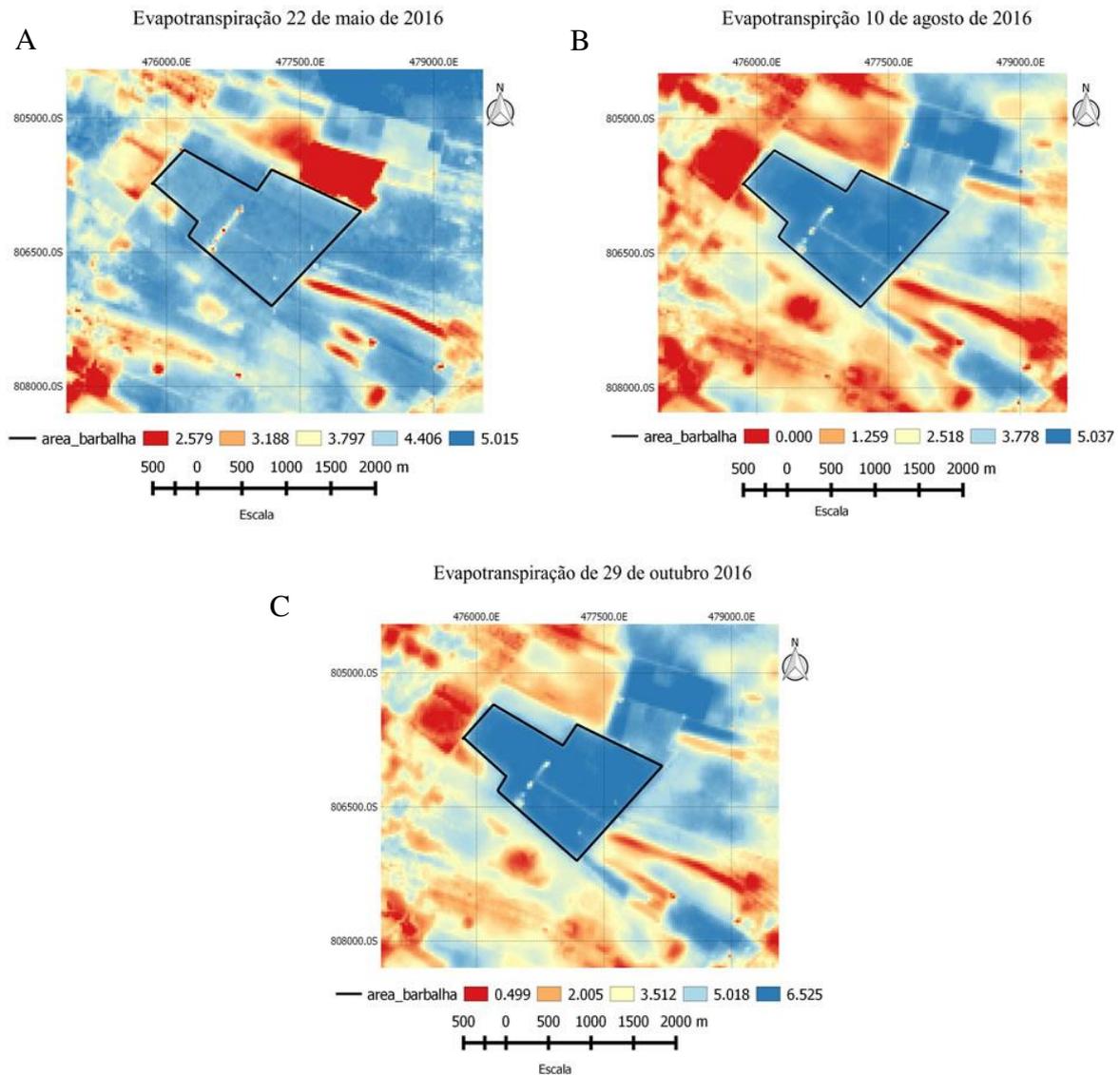
Fonte: O autor (2021).

## 5.6. EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ETR<sub>24H</sub>)

### 5.6.1. Evapotranspiração- SEBAL

A Figura 16 mostra as cartas temáticas da ETr<sub>Sebal</sub> (mm dia<sup>-1</sup>) elaboradas com valores estimados pelo algoritmo SEBAL, no município de Barbalha– CE para os dias 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016. A evapotranspiração real diária do bananal foi de 4,71 mm dia<sup>-1</sup> para o dia 22 de maio, em 10 de agosto de aproximadamente 5,00 mm dia<sup>-1</sup> e para o dia 29 de outubro de 2016 de 6,52 mm dia<sup>-1</sup>. Com menores valores entre 0 e 0,499 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas de solo exposto, e os maiores entre 5,0 e 6,5 mm dia<sup>-1</sup> em áreas vegetadas (SILVA et al., 2021).

**Figura 16.** Cartas temáticas da evapotranspiração real diária (ET<sub>24h</sub>- SEBAL) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.



Fonte: Silva et al. (2021).

Valores parecidos a Silva et al. (2021) também foram estimados por Barroso et al. (2010), com evapotranspiração de 5,68 mm dia<sup>-1</sup> pelo método do lisímetro de drenagem, em Limoeiro do Norte- CE, em trabalho com a banana *Pacovan Apodi* no seu terceiro ciclo de produção.

Já Silva (2004) obteve uma evapotranspiração de 5,8 mm dia<sup>-1</sup> para *Pacovan* e de 4,79 mm dia<sup>-1</sup> para *Prata Anã*, ambas no município de Pentecoste também no Ceará.

### 5.6.2. Evapotranspiração- METRIC

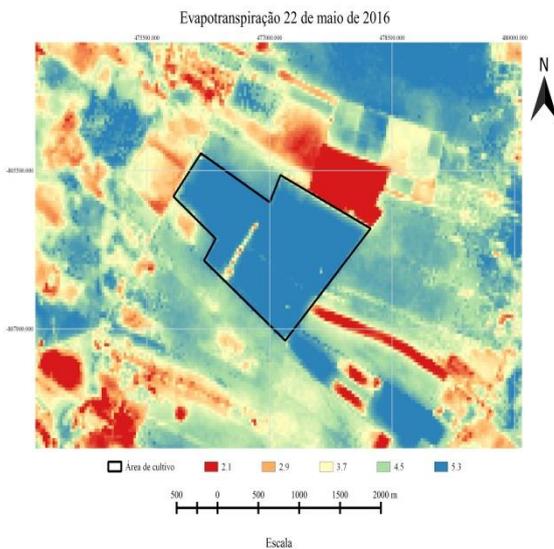
Na Figura 17 estão as cartas temáticas da evapotranspiração real diária  $ET_{r_{Metric}}$  ( $mm\ dia^{-1}$ ) no município de Barbalha- CE para os datas 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016, confeccionadas utilizando o METRIC.

A evapotranspiração diária da área de cultivo de banana foi de  $5,3\ mm\ dia^{-1}$  em 22 de maio, de  $5,0\ mm\ dia^{-1}$  em 10 de agosto e de  $6,8\ mm\ dia^{-1}$  29 de outubro de 2016.

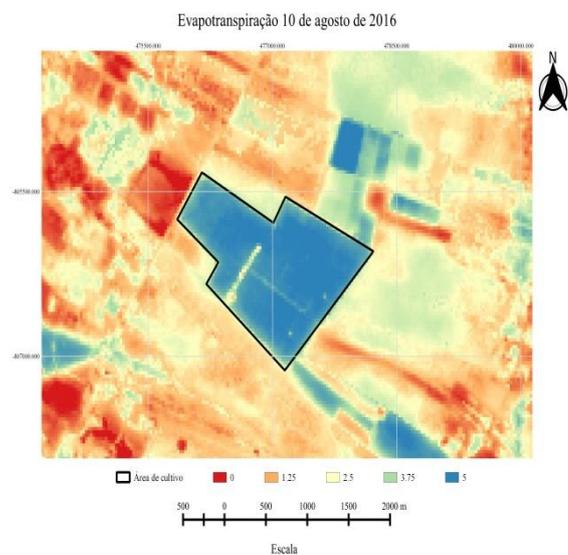
Os valores de evapotranspiração para as imagens nesse estudo foram semelhantes às de Bezerra et al. (2008) que obtiveram na ordem de  $7,0\ mm\ dia^{-1}$  em áreas de vegetação na reserva florestal do Araripe, CE. Santos et al. (2010) estudando a evapotranspiração da bananeira em região semiárida, encontraram valores diários da ordem de  $5,81$  a  $7,81\ mm\ dia^{-1}$ .

**Figura 17.** Cartas temáticas da evapotranspiração real diária ( $ET_{r_{24h}}$ - METRIC) no município de Barbalha – CE: 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016.

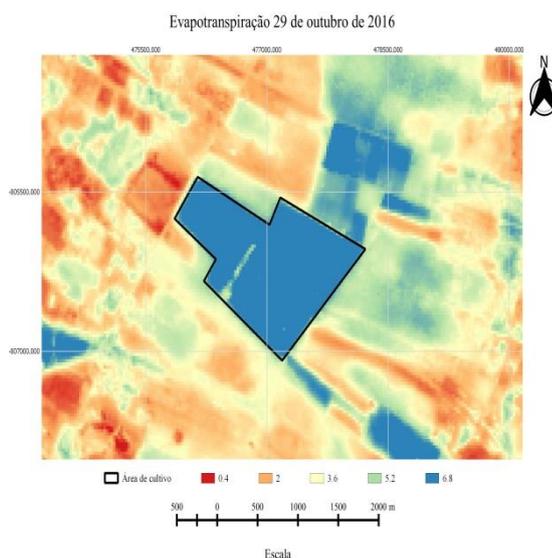
D



E



F



Fonte: O autor (2021)

Sabendo que o aumento da precipitação no período chuvoso antecedente ao mês de maio, proporcionou uma maior disponibilidade hídrica e temperaturas mais amenas, isso significa que levaria a uma maior taxa de evapotranspiração, no entanto, os meses de maio e agosto apresentaram menores taxas de evapotranspiração real diária para os dois algoritmos utilizados (SEBAL e METRIC), e as menores temperaturas de superfície.

Já no mês de outubro que é um mês contido dentro o período seco, de déficit pluviométrico, deveria ocorrer uma redução da umidade do solo, o que acarretaria uma redução na taxa evaporativa das plantas. No entanto, no dia 29 de outubro a evapotranspiração real diária foi a maior dentre as datas analisadas, para ambos os modelos, isto provavelmente devido as altas temperaturas do ar estimada de 30 e 31°C para o SEBAL e METRIC, respectivamente, mesmo com a área irrigada.

### 5.7.EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA OBTIDA ATRAVÉS DO MÉTODO DE PENMAN – MONTEITH

Estão descritas na Tabela 2, os valores da evapotranspiração de referência diária ( $ET_0$  24h), e da evapotranspiração diária ( $ET_r$  FAO) obtidas pelo modelo físico padrão da FAO-56, para as datas de 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.

**Tabela 2.** Dados para obtenção da evapotranspiração diária de Penman- Monteith para Barbalha- CE.

Data das imagens	Temperatura (°C)		U. relativa (%)		Velocidade do Vento (m/s)	Radiação Global (MJ/m <sup>2</sup> /d)	ET <sub>0 24h</sub> Referencia (mm)	ET <sub>rFAO</sub> Atual* (mm)
	Máx	Mín	Máx	Min				
22/05/2016	28,4	26,7	75,0	71,0	2,1	22,9	4,1	5,0
10/08/2016	23,3	19,6	69,0	63,3	2,2	23,5	4,5	5,4
29/10/2016	24,8	21,0	57,6	51,3	2,1	27,9	5,9	7,1

\*  $ET_{rFAO} = ET_{0 24h} (\text{Penman}) * \text{Coeficiente de Cultivo Kc} (1,21)$

### 5.8.VALIDAÇÃO ENTRE AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES OBTIDAS COM O ALGORITMO SEBAL E PELO MÉTODO DE PENMAN- MONTEITH

A Tabela 3 expõe a comparação da evapotranspiração real diária (ET<sub>r SEBAL</sub>, mm dia<sup>-1</sup>) determinadas pelo algoritmo SEBAL e da evapotranspiração diária (ET<sub>r FAO</sub>, mm dia<sup>-1</sup>) determinada pelo modelo físico padrão da FAO-56 na área de bananeira em Barbalha-CE, para as datas de 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.

**Tabela 3.** Comparação entre a evapotranspiração obtida pelo modelo de Penman- Monteith e a evapotranspiração real diária obtida pelo algoritmo SEBAL.

Data	ET <sub>r SEBAL</sub>	ET <sub>rFAO</sub> (Penman)	Erro absoluto (mm dia <sup>-1</sup> )	Erro relativo (%)
22/05/2016	4,7	5,0	0,3	6,0
10/08/2016	5,0	5,4	0,4	7,4
29/10/2016	6,5	7,1	0,6	8,4

Observa-se que, as evapotranspirações reais diárias obtidas pelo algoritmo SEBAL, apresentaram valores inferiores para todas as datas analisadas ao comparar com as calculadas pelo modelo de Penman-Monteith.

Apesar da dificuldade em estimar evapotranspirações no caso de plantas isoladas, como a banana, pela difícil caracterização da rugosidade da vegetação, e em estabelecer a espessura da camada limite interna nesta situação, conseqüentemente no cálculo da transferência de calor sensível para a atmosfera (H) à medida que aumenta a rugosidade da vegetação, aumenta a estimativa de H, diminuindo a estimativa da evapotranspiração, com isso, os valores estimados foram bem similares.

A variação do erro absoluto foi, em geral, inferior a 1,0 mm dia<sup>-1</sup>, variando entre 0,3 e 0,6 mm dia<sup>-1</sup>. Santos et al. (2010) e Sobrino et al. (2005) obtiveram valores parecidos de erro

absoluto de  $0,3 \text{ mm dia}^{-1}$  e valores inferiores a  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  respectivamente, em comparação da  $ET_{r \text{ SEBAL}}$  com medições com balanço de energia baseado na Razão de Bowen – BERB e, para avaliação do desempenho do S-SEBI.

Oliveira et al. (2014) avaliando a evapotranspiração real diária por meio do SEBAL e comparando os resultados com a  $ET_r$  obtida com a técnica de razão de Bowen na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá- PE, encontraram valores de erro absoluto que variaram entre  $0,10$  a  $1,20 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Ao comparar os valores de evapotranspiração real determinados pelo algoritmo SEBAL com aqueles inferidos empiricamente pelo método de Penman- Monteith na área de bananeiras no Município de Barbalha, as diferenças encontradas entre os valores de evapotranspiração menores que  $9 \%$ , estão dentro dos intervalos indicado por Glenn et al. (2007), que admite que serão erros com um nível de precisão satisfatório e aceitável, menores que  $10\%$ .

#### 5.9.VALIDAÇÃO ENTRE AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES OBTIDAS COM O ALGORITMO METRIC E PELO MÉTODO DE PENMAN- MONTEITH

Os valores utilizados para comparação da evapotranspiração real diária ( $ET_{r \text{ METRIC}}$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) determinados pelo algoritmo METRIC e da evapotranspiração diária ( $ET_{r \text{ FAO}}$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) pelo físico padrão da FAO-56 na área de bananeira em Barbalha-CE, para as datas de 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016, estão descritos na Tabela 4.

**Tabela 4.** Comparação entre a evapotranspiração real obtida pelo modelo de Penman-Monteith e a evapotranspiração real diária média obtida pelo algoritmo METRIC.

Data	$ET_{r \text{ METRIC}}$	$ET_{r \text{ FAO}}$ (Penman)	Erro absoluto ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	Erro relativo (%)
22/05/2016	5,3	5,0	0,3	6,0
10/08/2016	5,0	5,4	0,4	7,4
29/10/2016	6,8	7,1	0,3	4,4

Percebe-se que, com exceção do dia 22 de maio de 2016, as estimativas das evapotranspirações reais diárias do algoritmo METRIC foram inferiores, quando comparadas a evapotranspiração diária calculada pelo modelo de Penman-Monteith.

Na avaliação das estimativas de  $ET_r$  diária pelo algoritmo METRIC com a  $ET_r$  diária inferida por Penman-Monteith, observou-se no dia 22 de maio de 2016, uma diferença de  $0,3 \text{ mm dia}^{-1}$ , com erro relativo de  $6,0\%$ . Já para o dia 10 de agosto de 2016, diferença de  $0,4 \text{ mm}$

dia<sup>-1</sup> ou um relativo equivalente a 7,4%. Para o dia 29 de outubro de 2016 obteve-se os valores de 6,8 e 7,1 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente de ET<sub>r</sub> (METRIC) com a ET<sub>r</sub> (Penman-Monteith) com uma diferença de 0,3 mm dia<sup>-1</sup> ou uma diferença percentual de 4,4%. Valores aproximados foram obtidos por Silva et al. (2010), utilizando imagens TM – Landsat 5, na Bacia do Mogi-Guaçu, com variação na ET<sub>r</sub> de 3,7 a 6,0 mm dia<sup>-1</sup>.

Ao comparar os valores de evapotranspiração real determinados pelo algoritmo METRIC com aqueles inferidos empiricamente pelo método de Penman-Monteith na área irrigada, as diferenças também permaneceram dentro dos intervalos aceitos e indicados por Glenn et al. (2007), assim como o algoritmo SEBAL os valores também foram a 10%.

#### 5.10. VALIDAÇÃO ENTRE ERROS ESTIMADOS ENTRE AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES OBTIDAS PELOS ALGORITMOS SEBAL/METRIC E PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Os dados resumidos na Tabela 5 demonstram a sensível diminuição do Erro Relativo Médio- METRIC/PM em relação ao Erro Relativo Médio- SEBAL/PM, para a data de 29 de outubro de 2016, e para demais datas não houve variação nos erros determinados.

**Tabela 5.** Comparação entre os erros relativos calculados com relação às evapotranspições reais diárias obtidas pelos algoritmos SEBAL e METRIC e a evapotranspiração obtida pelo modelo de Penman-Monteith, para a área de bananeira.

Data	ET <sub>r</sub> SEBAL	ET <sub>r</sub> METRIC	ET <sub>r</sub> FAO (Penman)	Erro relativo SEBAL/ PM (%)	Erro relativo METRIC/ PM (%)
22/05/2016	4,7	5,3	5,0	6,0	6,0
10/08/2016	5,0	5,0	5,4	7,4	7,4
29/10/2016	6,5	6,8	7,1	8,4	4,4

A variação de erro relativo percentual respectivo para SEBAL/PM foi de 6,0 a 8,4 % e de METRIC/PM de 4,4 a 7,4 %, estão dentro da faixa dos valores descritos por Oliveira et al. (2014) para as culturas de algodão e mamona em área localizada no Cariri cearense, cujo Erro Relativo variou de 3,80 a 9,60%.

Entre SEBAL e Penman-Monteith, Machado et al. (2014) encontraram boa concordância das estimativas dessa relação, pra cultura de cana-de-açúcar, ainda justificam que as variações aceitáveis são de até 10% entre os métodos analisados, evidenciando uma relativa concordância nos resultados desse estudo, que apresentaram erros relativos menores

que o aceitável. Embora as estimativas de evapotranspirações do METRIC tenham sido relativamente maiores que o SEBAL e mais próximas das inferidas com o Método de Penman Monteith, os erros atrelados à comparação METRIC e Penman Monteith, também podem ser considerados aceitáveis.

Segundo De Paula (2018), as melhores estimativas são dadas por aqueles menores erros relativos percentuais. Logo observa-se que dentre as datas trabalhadas não ocorreu essa diferença entre os dias 22 de maio e 10 de agosto de 2016, considerando assim, uma melhor estimativa para o dia 29 de outubro de 2016 entre as estimativas METRIC e Penman-Monteith.

## 6. CONCLUSÕES

Os valores de albedo foram consistentes com os encontrados na literatura, sendo mais expressivos sobre solo exposto, não tendo variações significativas, entre os valores obtidos pelo METRIC e pelo SEBAL.

Os índices de vegetação (NDVI e IAF) quando relacionados com as precipitações pluviométricas, o mês de maio é o que antecede o período chuvoso da região do Ceará, o que resulta numa melhoria nas condições da cultura, levando aos valores mais expressivos destes índices.

Os valores da temperatura da superfície gerados com o algoritmo METRIC se mostraram superiores aos do SEBAL. Por outro lado, ocorreu uma correlação inversa entre o NDVI e a  $T_s$  para todas as datas avaliadas.

O saldo de radiação-  $R_n$  apresentou uma relação e dependência com alguns parâmetros analisados, principalmente, com o albedo e a temperatura da superfície. No SEBAL as datas com maiores valores de albedo apresentaram os menores valores estimados de temperaturas e de saldo de radiação. Já no algoritmo METRIC, nas datas com menores valores de albedo, estimou-se as menores temperaturas e os menores valores de  $R_n$ .

Os menores valores de fluxo de calor no solo foram obtidos na área com vegetação mais densa como indicado pelo maior índice de área foliar, apresentando resultados consistentes.

As evapotranspirações reais diárias estimadas pelos algoritmos SEBAL e METRIC, na área de bananeira em Barbalha- CE corroboram com os resultados científicos encontrados na bibliografia.

Ao comparar a evapotranspirações determinada pelos algoritmos SEBAL e METRIC observaram-se diferenças foram basicamente inferiores a 9%, consideradas um nível de precisão satisfatório e aceitável, não sendo possível identificar um melhor desempenho de qualquer um deles, na estimativa da Evapotranspiração diária.

Conclui-se, assim, que ambos os algoritmos SEBAL e METRIC são ferramentas econômicas e eficientes na determinação do consumo de água das culturas e conseqüentemente, na geração de subsídios à adequada gestão e tomadas de decisões dos recursos hídricos.

## 7. REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, L. J. D. O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.492-498, 2002.
- ALBUQUERQUE, P. E. P.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; SOUZA, F.; SEDIYAMA, G. C.; BEZERRA, J. R. C.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Coeficientes de cultivos das principais culturas anuais. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, n.52/53, p.49-57, 2002.
- ALLEN, R. G.; BURNETT, B.; KRAMBER, W.; HUNTINGTON, J.; KJAERGAARD, J.; KILIC, A.; KELLY, C.; TREZZA, R. Automated calibration of the metric-landsat evapotranspiration process. *Journal of the American Water Resources Association*, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, v.98, p.899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. United Nations FAO, Irrigation and Drainage, N.Y., Paper No. 56, 1998.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua em los cultivos. V. 56, p.298, 2006.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage systems*, v.19, n.3, p.251-268, 2005.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, 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, 2007b.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and User's Manual –Idaho Implementation*, v.1, p.97, 2002.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.133, n.4, p.380-394, 2007.

- ANDRADE JUNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. A. G. Métodos de estimativa da Evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.11, n.1, p.63-68, 2003.
- ARAÚJO, A. L. Operacionalização do balanço de energia e evapotranspiração em escala regional com dados de sensores orbitais. 101f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.
- ARAÚJO, A. O.; MENDONÇA, L. A. R.; LIMA, M. G. S. L.; FEITOSA, J. V.; SILVA, F. J. A.; NESS, R. L. L.; FRISCHKORN, H.; SIMPLÍCIO, A. A. F.; KERNTOPF, M. R. Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe. *Revista Brasileira de Ciência Solo, Visçosa*, v. 37, n. 03, p. 754-762, 2013.
- ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; SILVA, B. B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. *Revista Caatinga*, v.25, n.1, p.119-127, 2012.
- ASCE-EWRI - American Society of Civil Engineers - Environmental and Water Resources Institute. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report, ASCE, 2005.
- BARROSO, A. de A. F. et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira cv. “Pacovan Apodi” no terceiro ciclo de produção. *Rev. Bras. de Agric. Irrig. Fortaleza*, v. 4, n. 1, p. 23–30, fev.2010.
- BASTIAANSSEN, W.G.M. 1995. “Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain.” Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273p.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v.229, n.1, p.87-100, 2000.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, v.212-213, p.213-229, 1998b.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212-213, p.198-212. 1998a.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUN, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, p.85-93, 2005.

- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J.; Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens Digitais TM - LANDSAT 5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, n.3, 305-317, 2008.
- BEZERRA, J. M. Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife – PE, 2013.
- BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. 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. R.A. A seca no Nordeste brasileiro: uma leitura do Jornal Folha de São Paulo. *Temática*, ano XII, n. 08. 2016.
- BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, v.114, n.7, p.1522-1534, 2010.
- BRASIL. Lei no 12.787, de 11 de janeiro de 2013 – Política Nacional de Irrigação. Disponível em:<[goo.gl/fDtOjB](http://goo.gl/fDtOjB)>. Acesso em: 15 set. 2018.
- BRAUN, F.-J., BROAD, L. M., ARMSTRONG, D. L. AND PUTNEY, J. W., Jr (2001). Stable activation of single CRAC-channels in divalent cation-free solutions. *J. Biol. Chem.* 276, 1063-1070.
- BRAZ, A. M; ÁGUAS, T. A; GARCIA, P. H. M. Analysis of contents of vegetation NDVI and SAVI and Folear Area Index (FAI) for comparison of vegetation cover in watershed stream ribeirãozinho county of Selvíria – MS. *Revista Percurso - NEMO Maringá*, v. 7, n. 2, p. 05- 22, 2015. DOI: 10.4025/revpercurso.v7i2.28758.
- BRUTSAERT, W. H. *Evaporation into the Atmosphere*. Reidel, Boston, Massachusetts, p.212, 1982.
- BRYNS, L. M.; Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto. Dissertação de mestrado. UFRS. 2008.
- BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEM, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environmental*. v.79, p.329-343, 2002.

- BORGES, V. P. Necessidades hídricas e produtividade de água da cultura do meloeiro irrigado na região de Mossoró – RN. 138f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2011.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas, v.59, n.2, p. 125-137, 2000.
- CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em: Acesso em: 5 mar. 2021.
- CHANDER, G.; MARKHAN, B. Revised Landsat 5 - TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.
- COELHO, E. F.; OLIVEIRA, S. L. DE; COSTA, E. L. DA. Irrigação da bananeira. In: SIMPÓSIO NORTE MINEIRO SOBRE A CULTURA DA BANANA, 1., 2001, Nova Porteirinha. Anais ... Montes Claros: Ed. Unimontes, 2001. p. 91 – 101.
- COSTA, M. C. Estimativa da evapotranspiração regional por meio de imagens orbitais. 52f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 1997.
- CROSTA, A. P. Processamento digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Ed. Rev. – Campinas, SP: IG/ UNICAMP, 1993.
- CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A.; SILVA, B. B.; CHAVES, I. D. B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.5, p.539 548, 2012.
- DE PAULA, A. C. P. Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2018, 88 p. Dissertação de Mestrado.
- DINIZ, R. R. S. Avaliação dos efeitos do El Niño na pluviometria e nos sistemas hídricos do Cariri Ocidental Paraibano com a utilização de geotecnologia. 2018. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Desenvolvimento sustentável do Semiárido, Sumé – PB, 2018.
- FILHO, J. F.C. Avaliação dos componentes do balanço de energia e evapotranspiração em região semiárida usando imagens orbitais Landsat-5 TM e Terra-Modis.141f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2005.

- FOLHES, M.T.; SOARES, J.V. ; RENNÓ, C.D. Análise da evapotranspiração de culturas irrigadas através de sensoriamento remoto. Tese em Sensoriamento Remoto em andamento, 2019.
- FLORENZANO, T. G; Iniciação ao Sensoriamento Remoto. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- GAMEIRO, S.; TEIXEIRA, C. P. B.; NETO, T. A. S.; LOPES, M. D. L.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; ZIMBACK, C. R. L. 2016. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. *Terræ*, 13(1-2):15-22.
- GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and difuse coponents. *Solar Energy*, v.44, n.4, p.225-241, 1990.
- GIONGO, P. R., VETTORAZZI, C. A. Mapeamento do saldo de radiação e evapotranspiração diária, por meio de imagens TM/LANDSAT-5. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011, INPE p.4663. Anais.
- GLENN, E. P.; HUETE, A. R.; NAGLER, P. L.; HIRSCHBOECK, K. K.; BROWN, P. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v.26, n. 3, p. 139-168, 2007.
- GOOGLE EARTH PRO. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 20 set. 2020.
- GUSMÃO, A. C. V. L.; SILVA, B. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, L. M. M. Índice de vegetação e temperatura da superfície no ecótono Ilha do Bananal por sensoriamento remoto. *Revista de Geografia*, v.30, n.3, p.209-225, 2013.
- HAFEEZ M.M.; CHEMIM, Y.; VAN DE GIESEN, N.; BOUMAN, B.A. M Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: *Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications*, Ottawa, Canadá. Anais... 2002.
- HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Uso do satélite Landsat 8 na determinação da produtividade da água em bacia hidrográfica com predomínio do uso agrícola da cana-de-açúcar. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v.25, n.3, p. 295-309, 1988.
- IBGE. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 6 jun. 2021.
- INPE- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. Landsat. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/capasatelites/dgi/documentacao/satelites/landsat/capa-landsat>. Acesso em: 27 abr. 2019.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 set. 2016.
- LIMA, E. D. P., SEDIYAMA, G. C., ANDRADE, R. G., LOPES, V. D., & SILVA, B. D. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. *Embrapa Territorial-Artigo em periódico indexado (ALICE)*. 2014.
- LIRA, V. M. DE. Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco. TESE. Campo Grande - MS: UFCG, 2008.
- LIRA, V. M.; SILVA, B. B.; NETO, J. D.; FARIAS, M. S. S.; BEZERRA, M. V. C.; FRANCO, E. S.; CENTENO, C. R. M. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v.6, n.1, p.113-120, 2009.
- LIU, H. Q.; HUETE, A. A. Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy IEEE Transactions on Geosciences and background and atmosphere noise. *Remote Sensing*, v.3, n.2, p.457-465, 1995.
- MACHADO, C. C.; SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, M. B.; GALVÍNCIO, 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, n.1, p. 55 – 67, 2014.
- MARTINS, A. P.; ROSA, R. Estimativa do albedo de superfície utilizando imagens Modis/Aqua e o algoritmo SEBAL na Bacia do rio Paranaíba-Brasil. XVII Simposio Internacional SELPER, 2016.
- MATOS, R. C. M.; AZEVEDO, J. R. G.; CANDEIRAS, A. L. B.; Comparação da estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) entre o algoritmo SEBAL e o método padrão de Penman- Monteith FAO-56. XII Simpósio De Recursos Hídricos do Nordeste. Natal-RN, Brasil, 2014.
- MATOS, R. M.; MEDEIROS, R. M.; SILVA, P. F.; FRANCISCO, P. R. M.; SABOYA, L. M. F. Variação climatológica da precipitação no município de Barbalha – CE.

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia- CONTECC 2015- 15 a 18 de setembro de 2015- Fortaleza – CE, Brasil.

- MEDEIROS, R. M. de et al. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para a área produtora da banana do município de Barbalha, CE. doi: 10.7127/rbai.v7n400018 Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, ISSN 1982-7679 (On-line), v.7, nº. 4, p. 258-268, Fortaleza, 2013.
- MEIRELES, M. Estimativa da evaporação real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem landsat 5-TM na Bacia do Acaraú – CE. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE. 89 f. 2007.
- MENESES, P. R. Princípios De Sensoriamento Remoto. In: Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). UnB: Brasília, 2011.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. ed. 4. Viçosa: UFV, 422 p., 2011.
- MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G. de.; SILVA, B. B. da; OLIVEIRA, L. M. M. de.; Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.2, p. 181 - 191, 2013.
- NEVES, B. V. B.; VERSIANI, B. R.; RODRIGUES, P. C. H. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.4, p.87-102, 2007.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, B. B.; MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, n.9, p.1209-1217, 2012.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONIO C. D.; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. 2014. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. v.18, n.10, p.1039–1046.
- PAULSON, C.A. The mathematical representation of wind Speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. Journal of Applied Meteorology, v.9, n.6, p.857-861, 1970.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia Fundamentos e Aplicações Práticas. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária LTDA, 2002.

- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Sensoriamento Remoto da Vegetação. [s.l.] oficina de textos, 2012.
- QI, J. CHEHBOUNI A., HUETE A.R., KERR Y.H., Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI. 1994. Remote Sens Environment. 48:119-126.
- RODRIGUES, J. D.; ANDRADE, E. D.; TEIXEIRA, A. D. S.; SILVA, B. D. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. Engenharia Agrícola, v.29, n.3, p.452-465, 2009.
- ROMÁN, M. O.; SCHAAF, C. B.; LEWIS, P.; GAO, F.; ANDERSON, G. P. PRIVETTE, J. L.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; BARNSLEY, M. Assessing the coupling between surface albedo derived from MODIS and the fraction of diffuse skylight over spatially-characterized landscapes. Remote Sensing of Environment, v.114, n.4, p.738-760, 2010.
- SANTOS, C. A. C. Estimativa da evapotranspiração real diária através de análises micrometeorológicas e de sensoriamento remoto. 134f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2009.
- SANTOS, C. A.; SILVA, B. B. Estimativa da evapotranspiração da bananeira em região semi-árida através do algoritmo S-SEBI. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.16, p.9-20, 2010.
- SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.45, n.5, p.488-496, 2010.
- SANTOS, F. A. C. S.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B.; ARAÚJO, A. L.; CUNHA, J. E. B. L. C. Desempenho de metodologias para estimativa do saldo de radiação a partir de imagens MODIS. Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 30, n. 3, 295 – 306, 2015.
- SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. 2015. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, N0 67/6, p. 1203-1216,
- SILVA, B. B. da; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM – Landsat -5. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.14, p.174-186, 2006.

- SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga*, v.24, n.3, p.145-152, 2011.
- SILVA, B. B. da ; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.47, n.9, p.1218-1226, 2012.
- SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, 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*, v.20, n.1, p.3-8, 2016.
- SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.2, p.243-252, 2005a.
- 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*, v.13, n.2, p.201-211. 2005b.
- SILVA, B.B. da; SILVA, S.T.A. da; GOMES, H.B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. *Mercator*, v.9, p.91-106, 2010.
- SILVA, E. N. da. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da bananeira pelo método do balanço hídrico vale do Curu, Ceará. 2004. 68 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza- CE.
- SILVA, H.D.B. Estudo do Índice de Vegetação no Município de Floresta - PE, utilizando técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Rural de Pernambuco – UFRPE. Recife-PE, 2009.
- SILVA, J. A. S.; MEDEIROS, R. M.; SILVA, A. O.; SILVA, J. W. O. S.; MATOS, R. M. 2012. Oscilações no regime da precipitação pluvial no município de Barbalha- CE. I Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS. 22 a 24 de maio de 2013 – Iguatu – CE, Brasil.
- SILVA, J. L. B.; Monitoramento espaço-temporal da cobertura vegetal do bioma caatinga no Ceará mediante imagens orbitais. Dissertação de mestrado. UFRPE. Recife, 2016.
- SILVA, T. T. S. Estimativa de evapotranspiração em regiões do semiárido brasileiro utilizando o algoritmo SEBAL. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2019.

- SILVA, T. T. S. GUERRA, H. O. C., SILVA, B.B., SANTOS, C. L. M., GUIMARÃES J.P. & SANTOS J. Evapotranspiration of banana tree using the SEBAL algorithm in an irrigated perimeter from the Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, Campina Grande, PB. v.25, n.3, p.149-155, 2021.
- SIMÃO, A. H. Influência da percentagem de área molhada no desenvolvimento da cultura da bananeira irrigada por microaspersão. Viçosa: UFV, 2002. 80p. Dissertação Mestrado.
- SOBRINO, J. A., GÓMEZ, M., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., OLIOSO, A., CHEHBOUNI, G.(2005). A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data:Application
- SOUZA, J. F. Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB. Dissertação. Universidade Federal da Paraíba, 130f, 2014.
- SOUZA, J. F.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB. *Ambiente Construído*, v.16, n.1, p.21-37, 2016.
- STARKS, P. J.; NORMAN, J. M.; BLAD, B. L.; WALTER-SHEA, E. A.; WALTHALL, C. L. Estimation of shortwave hemispherical reflectance albedo from bi-directionally reflected radiance data. *Remote Sensing of Environment*, v.38, n.2, p.123-134, 1991.
- SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, *Hydrology and Earth System Sciences*,v.6, p.85–100, 2002.
- TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of irrigation and drainage engineering*, n.131, v.1, p:94-109, 2005.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state, Brazil. *International Journal of Remote Sensing Applications*, v. 6, p. 84-95, 2016.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4ª edição. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH, p.269-278. 2007.
- UDA, P. K. E. Avaliação da evapotranspiração real da bacia do alto Rio Negro, região sul brasileira, por meio do modelo SEBAL. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

WEBB, E. K. Profile Relationships: The Log-linear Range and Extension to Strong Stability.

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v.96, n.407, p:67-90, 1970.

WELIGEPOLAGE, K. Estimation of spatial and temporal distribution of

evaporatranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek. 114 f.

Dissertation – International Institute for Geo-information Science and Earth

Observation. 2005.