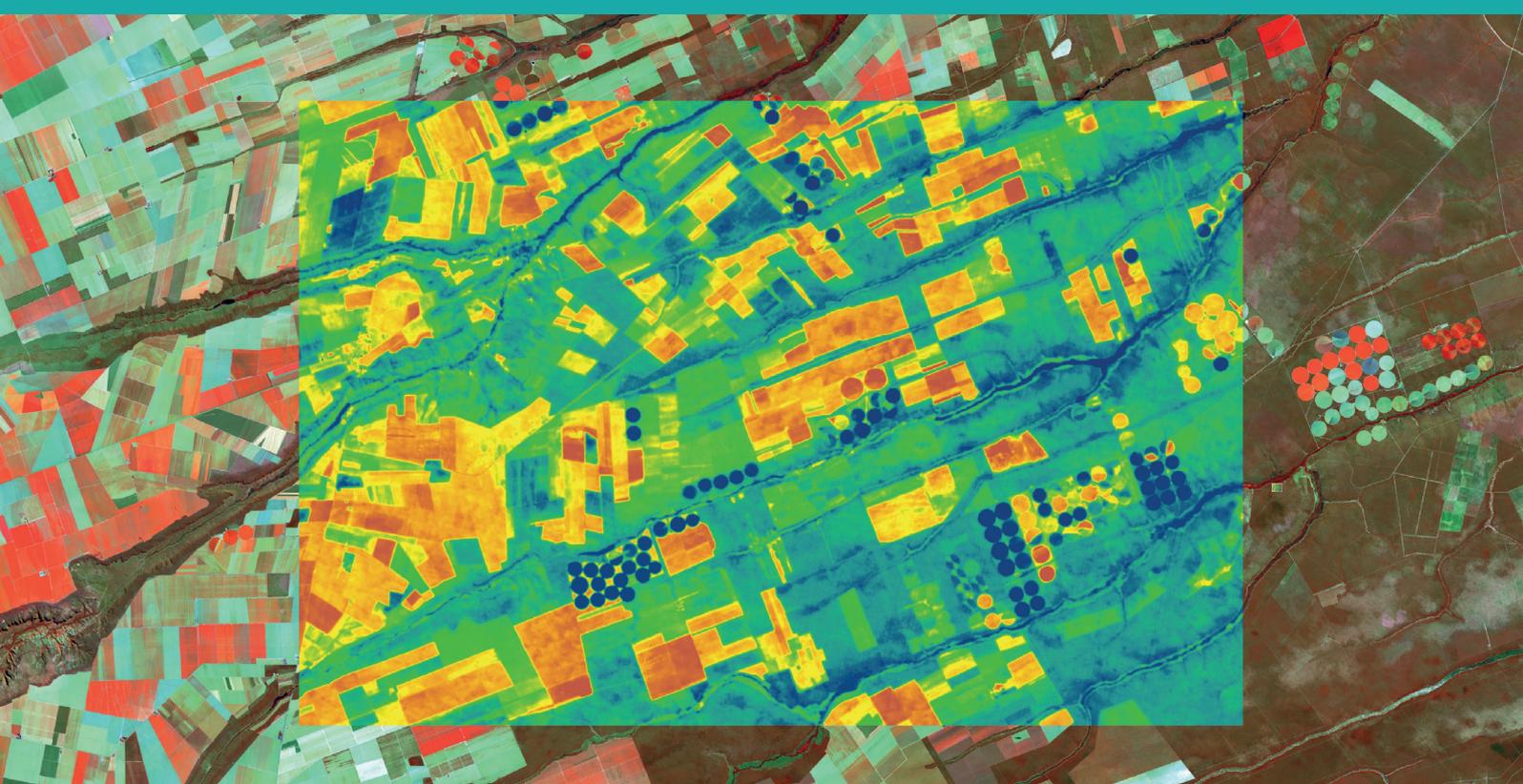


SSEBop^{BR}
Evapotranspiração

Atlas Irrigação

ESTIMATIVAS DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL



POR
**SENSORIAMENTO REMOTO
NO BRASIL**

 **ANA**
AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

República Federativa do Brasil

Jair Bolsonaro

Presidente da República

Ministério do Desenvolvimento Regional

Gustavo Henrique Rigodanzo Canuto

Ministro

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira (Diretora-Presidente)

Ney Maranhão (até 16 de julho de 2019)

Ricardo Medeiros de Andrade

Oscar Cordeiro de Moraes Netto

Marcelo Cruz

Secretaria Geral (SGE)

Rogério de Abreu Menescal

Procuradoria Federal (PF/ANA)

Luís Carlos Martins Alves Júnior

Corregedoria (COR)

Maurício Abijaodi Lopes de Vasconcellos

Auditoria Interna (AUD)

Eliomar Ayres da Fonseca Rios

Chefia de Gabinete (GAB)

Thiago Serrat

Gerência Geral de Estratégia (GGES)

Nazareno Marques de Araújo

Superintendência de Planejamento de

Recursos Hídricos (SPR)

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

**Superintendência de Gestão da
Rede Hidrometeorológica (SGH)**

Marcelo Jorge Medeiros

Superintendência de Operações e

Eventos Críticos (SOE)

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho

Superintendência de Implementação de

Programas e Projetos (SIP)

Tibério Magalhães Pinheiro

**Superintendência de Apoio ao Sistema
Nacional de Gerenciamento de Recursos**

Hídricos (SAS)

Humberto Cardoso Gonçalves

Superintendência de Tecnologia da

Informação (STI)

Sérgio Augusto Barbosa

Superintendência de Regulação (SRE)

Rodrigo Flecha Ferreira Alves

Superintendência de Fiscalização (SFI)

Alan Vaz Lopes

**Superintendência de Administração,
Finanças e Gestão de Pessoas (SAF)**

Luís André Muniz

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

ESTIMATIVAS DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO
REAL POR

SENSORIAMENTO
REMOTO
NO BRASIL

BRASÍLIA - DF
ANA
2020

© 2020, Agência Nacional de Águas – ANA.

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos B,
L, M e T.

CEP: 70610-200, Brasília – DF.

PABX: (61) 2109-5400 | (61) 2109-5252

Endereço eletrônico: www.ana.gov.br

COMITÊ DE EDITORAÇÃO

Diretor

Ricardo Medeiros de Andrade

Superintendentes

Humberto Cardoso Gonçalves

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Secretário Executivo

Rogério de Abreu Menescal

As ilustrações, tabelas e gráficos sem indicação
de fonte foram elaborados pela ANA.

Informações, críticas, sugestões, correções de
dados: cedoc@ana.gov.br

Disponível também em: <http://www.ana.gov.br>

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e de
informações contidos nesta publicação, desde
que citada a fonte.

EQUIPE EDITORIAL

Supervisão editorial

Thiago Henriques Fontenelle

Daniel Assumpção Costa Ferreira

Revisão dos originais

Daniel Assumpção Costa Ferreira

Marcus André Fuckner

Moisés Pereira Galvão Salgado

Diagramação e Capa

Agência Nacional de Águas

Fotografias

Banco de Imagens ANA

Produção e Projeto Gráfico

Agência Nacional de Águas

Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda.

Agência Nacional de Águas

Coordenação Geral

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Coordenação Executiva

Daniel Assumpção Costa Ferreira

Thiago Henriques Fontenelle

Marco Vinícius Castro Gonçalves

Colaboradores

Agência Nacional de Águas

Adalberto Meller

Alexandre Lima de Figueiredo Teixeira

Juliana Dias Lopes

Le-Lyne Paes Leme Nunes Czezcko

Lígia Maria Nascimento de Araújo

Marcus André Fuckner

Marco José Melo Neves

Morris Scherer-Warren

Paulo Marcos Coutinho dos Santos

Raquel Rubstem Sado

Adriano Cesar Pereira de Paula (Estagiário)

Thais da Silva Dornelas (Consultora)

United States Geological Survey

Gabriel Senay

Brian McCallum

Jesslyn Brown

MacKenzie Friedrichs (KBR-Contractor)

Bruce Worstell (KBR-Contractor)

Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda.

Moisés Pereira Galvão Salgado

Marciano Saraiva

Bernardo Friedrich Theodor Rudorff

Daniel Alves de Aguiar

Universidade Federal de Santa Maria

Laboratório de Micrometeorologia

Débora Regina Roberti

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Lineu Neiva Rodrigues

Catálogo na fonte - CEDOC/Biblioteca

A265e	Agência Nacional de Águas (Brasil). Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil/ Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2020. 41 p.: il. 1. Evapotranspiração 2. Sensoriamento Remoto. I. Título. CDU 556.13:528.8(81)
--------------	--

Elaborada por Fernanda Medeiros - CRB-1/1864



SUMÁRIO

Plantações e estradas rurais em Ribeirão Preto (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	7
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	9
2 METODOLOGIA	13
3 APLICATIVO SSEBOP BR	19
3.1 INSTRUÇÕES DE USO	19
3.2 PERGUNTAS FREQUENTES (FAQ)	24
3.3 APLICAÇÕES	26
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39



APRESENTAÇÃO

Mata ciliar, pastagens e plantações às margens do rio Uberaba em Uberaba (MG)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

Apresentação

A agricultura irrigada é o maior e mais dinâmico setor usuário de água no Brasil e no mundo, o que impõe diversos desafios para a gestão dos recursos hídricos. A Agência Nacional de Águas – ANA e seus parceiros, como a Conab e a Embrapa, têm investido esforços na identificação de áreas equipadas para irrigação e no monitoramento da ativação desses equipamentos ao longo do ano, de forma a aprimorar as estimativas de uso da água e de balanço hídrico, as quais possuem diversas aplicações, notadamente no planejamento e na gestão dos recursos hídricos.

O cálculo do uso da água na irrigação baseia-se, em geral, na estimativa do balanço hídrico nas áreas irrigadas, requerendo informações sobre o clima, as culturas e os sistemas de irrigação utilizados. No caso da cana-de-açúcar e do arroz sob inundação a ANA adota métodos complementares de cálculo visando simular as especificidades do manejo dessas culturas. Esses métodos indiretos de estimativa do uso da água apresentam boa precisão, sendo inclusive adotados na escala de propriedade rural para dimensionamento de equipamentos e da infraestrutura associada.

Com o desenvolvimento computacional e das geotecnologias, aplicações com base em sensoriamento remoto têm sido aprimoradas com vistas a diminuir as incertezas associadas ao grande número de variáveis e simplificações requeridas pelos modelos tradicionais. Nesse contexto, modelos baseados em dados de sensoriamento remoto, de complexidade variável, têm se destacado pelos seus bons resultados em diversos locais do planeta. A ANA tem trabalhado, desde 2015, com o *United States Geological Survey* - USGS na implementação e parametrização do modelo SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*) no Brasil, adequando-o à nossa realidade morfoclimática.

Com os recentes avanços no processamento de dados em nuvem e nas interfaces de disponibilização dos resultados, a ANA apresenta na publicação *Estimativas de Evapotranspiração Real por Sensoriamento Remoto no Brasil* um importante registro da metodologia, da ferramenta de cálculo e de aplicações do modelo SSEBop no Brasil. As estimativas de evapotranspiração para qualquer ponto do território são disponibilizadas *online*, por meio do aplicativo SSEBop BR, disponível no portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (www.snirh.gov.br > Usos da Água).

A evapotranspiração compreende tanto a evaporação da água contida na superfície do solo e da vegetação quanto a transpiração das plantas, ou seja, representa o total de água transferida da superfície terrestre para a atmosfera. Cerca de 75% da precipitação retorna para a atmosfera via evapotranspiração no Brasil, realçando sua importância no ciclo hidrológico. Entretanto, devido ao estado gasoso da água, a evapotranspiração é difícil de ser estimada e até mesmo de ser medida em campo.

Diversos fatores influenciam a evapotranspiração, dentre eles o clima, o tipo de solo, o uso da terra e o manejo da água. A radiação, a temperatura, a umidade relativa do ar e o vento são as principais variáveis climáticas intervenientes. Áreas de vegetação nativa, de pecuária ou agrícolas – e as diferentes coberturas do solo associadas – estabelecem diferentes padrões de evaporação e de transpiração, consorciados com diferentes tipos de solos e suas respectivas capacidades de armazenamento de água. A aplicação artificial de água (irrigação) e as práticas que facilitem/difícultem o armazenamento e a manutenção da água no solo também são fatores-chave para determinação do volume de água evapotranspirado. Em áreas de agricultura e silvicultura, influenciam na evapotranspiração desde a variedade e o manejo do cultivo até o espaçamento e a orientação do plantio.

Tantos fatores intervenientes trazem ainda mais complexidade à estimativa da evapotranspiração. Por outro lado, o aumento na disponibilidade e qualidade de produtos de sensoriamento remoto gratuitos, aliado aos desenvolvimentos tecnológicos no processamento e na análise dos dados, têm permitido o desenvolvimento de ferramentas computacionais eficazes no mapeamento da evapotranspiração real (ETa) em diferentes escalas espaciais (local, regional e global).

A evapotranspiração real (ETa) pode ser medida diretamente por meio de lisímetros, torres de fluxo (*eddy covariance* e escintilômetros), ou indiretamente por meio de painéis de evaporação e estações (razão de Bowen) (McShane et al., 2017), o que exige investimentos e esforços substanciais e equipes bem treinadas, além de resultar em limitada amostragem espacial e temporal.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Uma simples técnica para estimar a ETa é com o coeficiente de cultivo (Kc) (Allen et al., 1998), amplamente utilizada devido à sua simplicidade e à disponibilidade de dados de referência (ETa = ETr x Kc). Este método demanda o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo ou ETr) - em geral por meio de dados de estações climatológicas. Há, entretanto, grande dificuldade na determinação de coeficientes regionais amostrados de acordo com o tipo e o estágio de desenvolvimento das culturas, bem como em identificar a cultura e o estágio em imagens para a aplicação do Kc mais adequado.

Com o desenvolvimento computacional e das geotecnologias, desde os anos 1970 diversas abordagens têm sido desenvolvidas para estimar a ETa com base em dados de campo e de sensoriamento remoto (Li et al., 2009), visando cobrir grandes áreas em curtos intervalos de tempo. Modelos mais complexos inspiram-se no balanço de energia na superfície, onde a energia disponível da radiação de ondas curtas e longas é equilibrada por fluxos do aquecimento da superfície terrestre e mudanças de fase da água, como é o caso da ETa (McShane et al., 2017). A ETa é estimada por meio da solução total ou parcial do modelo de balanço de energia e pela aplicação de abordagens analíticas baseadas em modelos físicos.

Ou seja, os modelos inspirados no balanço de energia fundamentam-se nas premissas de que no processo de ETa parte da energia disponível é utilizada para vaporizar a água, e de que os fluxos de energia e de ETa podem ser mensurados a partir de dados de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície.

Destacam-se no desenvolvimento desta abordagem os modelos: *Surface Energy Balance Index* (SEBI) (Menenti & Choudhury, 1993), *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998), *Atmosphere-Land Exchange Inverse* (ALEXI) (Mecikalski et al., 1999), *Two-Source Model* (TSM) (Norman et al., 1995), *Surface Energy Balance System* (SEBS) (Su, 2002), *Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration* (METRIC) (Allen et al., 2007) e *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) (Senay et al., 2007; 2013; 2016; 2017; 2018). Algumas publicações revisaram estes e outros modelos e métodos de estimativa da ETa (Allen et al., 2011; Glenn et al., 2011; Gowda et al., 2007; Kalma et al., 2008; McShane et al., 2017).

O modelo SSEBop vem sendo utilizado pelo *United States Geological Survey* (USGS) nas estimativas de uso da água pela irrigação nos Estados Unidos e tem sido testado e adaptado pela ANA, desde 2015, para estimativas de uso da água em bacias hidrográficas com vasta área irrigada e de especial importância para a gestão de recursos hídricos. Em comparação a modelos como o METRIC, o SSEBop pode ser considerado uma alternativa mais simples por demandar menos dados e ter parametrização mais objetiva, facilitando sua implementação e sem perda substancial de precisão na estimativa da evapotranspiração real (McShane et al., 2017).

Em áreas irrigadas, a ETa é útil para estimar a água usada pelas plantas, não diferenciando as contribuições das diferentes fontes. Com dados medidos ou estimados do que é suplementado pelas fontes naturais (chuva e solo), é possível estimar a parcela aplicada artificialmente pela

agricultura irrigada. Em regiões com período seco bem definido, as estimativas são facilitadas tanto pela baixa cobertura de nuvens nas imagens de satélite quanto pela baixa ou ausente contribuição de chuvas na oferta hídrica para a agricultura.

Na primeira edição do Atlas Irrigação, em 2017, a ANA apontou a modelagem da evapotranspiração como uma importante linha de atuação na ampliação do conhecimento sobre o uso da água pela agricultura irrigada (Figura 1). Na presente publicação, serão apontados os avanços realizados nessa temática.

A Figura 1 apresenta uma amostra de uma cena com a evapotranspiração calculada no Oeste da Bahia, em dois dias do ano (em maio e agosto), evidenciando evapotranspirações altas em diversos

pivôs centrais, destacando o consumo potencial pela irrigação (cor verde escura). Nas áreas com evapotranspiração baixa (cores amareladas e avermelhadas), evidenciam-se áreas agrícolas não plantadas (solo exposto ou coberto com palha) e também pivôs ociosos (não plantados) ou recém-plantados.

Cabe destacar que embora o modelo SSEBop venha sendo operacionalizado pela ANA no Brasil com foco em estimativas de áreas irrigadas e uso da água pela irrigação, as estimativas de evapotranspiração são calculadas para qualquer alvo, com aplicabilidade em outros temas, como na solução do balanço hídrico em escala de bacia hidrográfica, no monitoramento de estiagens e no manejo agrícola de sequeiro.

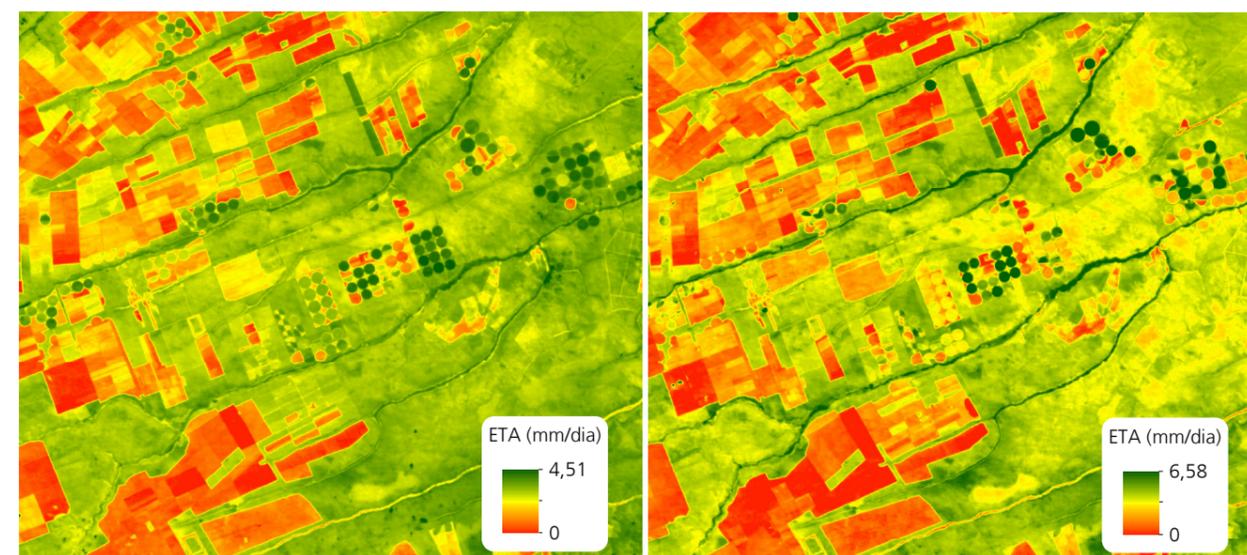


Figura 1. Estimativa de evapotranspiração real (ETa) em uma área do Oeste da Bahia.

Nota: imagens de 20 de maio e 23 de agosto de 2013, respectivamente.



2 METODOLOGIA

Ferrovia sobre o rio Grande em Madre de Deus de Minas (MG)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

Metodologia

Os métodos de cálculo da evapotranspiração real (ET_a) pela solução total ou parcial do balanço de energia superficial utilizam a equação clássica de balanço de energia (Eq. 1), onde o fluxo de calor latente – LE (energia consumida pela evapotranspiração) é calculado como a diferença residual entre o saldo de radiação líquida de superfície – R_n, as perdas decorrentes do fluxo de calor sensível H (energia consumida para aquecer o ar) e o fluxo de calor no solo – G (energia armazenada/transferida para o solo e vegetação).

$$LE = R_n - G - H \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

LE = fluxo de calor latente (energia consumida pela evapotranspiração – W.m⁻²);

R_n = radiação líquida de superfície (W.m⁻²);

G = energia armazenada no solo e vegetação (W.m⁻²); e

H = fluxo de calor sensível H (energia consumida para aquecer o ar – W.m⁻²).

Esta abordagem já foi aplicada com sucesso por diversos pesquisadores para estimar o uso da água em áreas irrigadas (Senay et al., 2007). Embora o método para cálculo de ET_a baseado na equação completa do balanço de energia (Eq. 1) tenha demonstrado ótimos resultados em diversos estudos, a necessidade de muitos dados de entrada de alta qualidade, calibração específica e especialistas treinados requerida para solução das equações têm dificultado sua automação e aplicação em escalas mais amplas de análise (Gowda, et al., 2007; Santos et al., 2008).

O modelo SSEBop utiliza uma versão simplificada da equação do balanço de energia para estimativa de ET_a, mantendo e expandindo as principais premissas descritas nos modelos SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) e METRIC (Allen et al., 2007). Tanto o SEBAL quanto o METRIC assumem que a diferença de temperatura entre a superfície da terra e o ar (diferença de temperatura próximo à superfície) varia linearmente conforme a temperatura de superfície da terra. Ambos os modelos estabelecem essa relação ancorados no conceito de pixel quente e pixel frio, sendo o pixel quente amostrado em uma superfície de solo nu e seco e o pixel frio em área bem vegetada e úmida. Assim, tais métodos baseiam-se na relação linear entre a diferença de temperatura do ar próxima à superfície e a temperatura da superfície para estimar o fluxo de calor sensível (H), que

varia em função da diferença de temperatura próxima à superfície, assumindo que no pixel quente não há fluxo de calor latente ($ET_a = 0$) e no pixel frio o valor de ET_a atinge seu máximo (ET_a próxima à evapotranspiração potencial).

A configuração do SSEBop é baseada na abordagem do modelo *Simplified Surface Energy Balance* (SSEB) (Senay et al., 2007) com parametrização única para aplicações operacionais (Senay et al., 2013). Inicialmente, o SSEB estendeu a premissa adotada pelo METRIC e SEBAL assumindo que o fluxo de calor latente (evapotranspiração real) também varia linearmente entre o pixel quente e frio (Senay et al., 2007). Essa premissa considera que a diferença de temperatura entre a superfície do solo e do ar está linearmente relacionada à umidade do solo (Sadler et al., 2000). Assim, os autores do SSEB argumentam que a ET_a pode ser estimada pela diferença de temperatura próxima à superfície que, por sua vez, pode ser estimada a partir das temperaturas de superfície de um pixel quente e de um pixel frio da área de estudo. Ou seja, enquanto no pixel quente, amostrado em uma área de solo exposto e seco espera-se ET_a próxima a zero, no pixel bem vegetado e úmido há de se encontrar ET_a máxima; nos demais pixels da área de estudo a ET_a variará com a temperatura de superfície proporcionalmente à diferença de temperatura dos pixels quente e frio (Senay et al., 2007).

Muito embora, no modelo SSEB, a quantidade de dados de entrada e expertise necessárias à sua correta implementação tenham sido drasticamente reduzidos em relação aos modelos que utilizam a equação completa do balanço de energia (Eq.1), este ainda requeria uma

parametrização diferente para cada tipologia hidroclimática, onde os valores de pixel quente e frio seriam comparáveis, o que normalmente não excederia uma área de 200 km x 200 km. Cientes de que esta parametrização dificulta bastante o processo de automação, os autores do SSEB simplificaram-na lançando o modelo SSEBop (Senay et al., 2013).

O SSEBop representou um avanço na automação da estimativa da ET_a , uma vez que por meio de condições de contorno baseadas no balanço de energia, a diferença de temperatura entre os pixels de referência quente e frio é predefinida para cada pixel (Senay et al., 2013). Ainda que utilize variáveis do balanço de energia descrito na Eq. 1, o modelo não o resolve de modo completo. Em virtude disso, o modelo foi revisado conceitualmente (Senay, 2018), concluindo que o princípio da psicrometria de satélites explica o SSEBop mais efetivamente do que o princípio do balanço de energia.

O modelo SSEBop estima a ET_a em mm/dia, conforme a Equação 2, calculando a fração de evapotranspiração – ET_f (variando de 0 a -1) – com base nos dados de temperatura do ar (T_a) e de temperatura de superfície obtidas por imagens de sensoriamento remoto que possuam banda termal, como MODIS e Landsat (T_s). A ET_f é então multiplicada pela evapotranspiração de referência (ET_r), usualmente estimada pelo método de Penman-Monteith para uma superfície de alfafa na região de interesse. Eventualmente, a ET_o (grama) pode ser ajustada por um fator escalar (k) para um nível máximo de evapotranspiração de referência de uma cultura aerodinamicamente mais rugosa, como a alfafa

(ET_r). A evapotranspiração de referência da alfafa é em geral de 5% a 40% superior à da grama, variando de acordo com a umidade e a velocidade do vento (Senay et al., 2013). Cabe destacar que a aplicação da ANA tem como opção o uso da ET_o (grama) compilada por Xavier et al. (2016), disponível para o período entre 1980 e 2017, com o fator de ajuste (K_r) que compatibiliza os valores para ET_r ($ET_r = ET_o \times K_r$).

$$ET_a = ET_f \times ET_r \quad (\text{Eq. 2})$$

Na Equação 2, a fração da evapotranspiração (ET_f) é calculada a partir da fórmula (Equação 3):

$$ET_f = \frac{Th - Ts}{dT} = \frac{Th - Ts}{Th - Tc} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

ET_f é estimada em determinada data do ano, indicando as condições de umidade da superfície terrestre;

Th é a temperatura estimada do pixel quente/seco no mesmo local e período;

Tc refere-se à estimativa do valor do pixel frio/úmido também na mesma localidade e data;

Ts é a temperatura observada na superfície da terra, obtida por imagens de satélite no pixel; e

dT é a predefinida diferença de temperatura entre Th e Tc para cada pixel em análise.

O valor de referência do pixel frio/úmido (Tc) é calculado a partir da temperatura máxima (Ta) multiplicada por um fator de correção (c -factor) cujo objetivo é correlacionar Ta a Ts em pixels localizados em regiões bem vegetadas. No artigo de lançamento do modelo SSEBop, os autores detalham os procedimentos a serem executados para o estabelecimento do valor de c (Senay et al., 2013). Foi adotada a média de Ts/Ta de todos os pixels da cena cujo valor de NDVI¹ é maior que 0,75. Normalmente, o valor de c está situado

entre 0,96 e 0,99. Já o valor de referência para o pixel quente (Th) é computado somando-se Tc e dT .

O valor de dT para cada pixel da cena é definido a priori, sendo calculado em condições de céu limpo (clear sky), sem cobertura de nuvens, variando em função da localidade e do dia do ano, mas considera-se que não muda de um ano para o outro. A Equação 4 mostra a fórmula de cálculo do dT . Todos são tomados com fatores de multiplicação para compatibilidade das unidades de medida de energia, massa, volume e tempo (Senay et al., 2016).

$$dT = \frac{Rn \times rah}{pa \times Cp} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

Rn ($J.m^{-2}.s^{-1}$) como sendo a média da radiação líquida que chega a terra em condições de céu limpo;

rah é a resistência aerodinâmica à transferência do calor de uma superfície nua e seca, usualmente seu valor é $110 s.m^{-1}$;

pa é a densidade do ar (kg/m^3) estimada em função da temperatura e pressão do ar; e

Cp é o calor específico do ar numa pressão constante ($1.013 kJ kg^{-1}K^{-1}$).

Ao rearranjar algebricamente as Equações 2, 3 e 4 pode-se reformular o cálculo da evapotranspiração real (ET_a) como sendo:

$$ET_a = \frac{pa \times Cp}{Rn \times rah} (Th - Ts) \times k \times ET_r \quad (\text{Eq. 5})$$

¹Nota: o NDVI – Normalized Difference Vegetation Index – varia entre -1 e 1, onde valores abaixo de zero representam água, entre 0 e 0,1 solo exposto, e valores acima de 0,1 área vegetada, crescendo proporcionalmente até o máximo de 1 em função da biomassa foliar e do vigor vegetativo.

A Figura 2 ilustra o diagrama conceitual do modelo SSEBop implementado e modelado para cálculo das estimativas de evapotranspiração em imagens Landsat 5, 7 e 8 no Brasil (imagens de 1984 até o presente). O Quadro 1 sintetiza os dados de entrada necessários para o modelo SSEBop e as respectivas fontes de informação. O Quadro 2 detalha os parâmetros e a definição de pixels para cálculo do fator de correção (c). Referências mais detalhadas sobre o SSEBop podem ser encontradas em Senay et al. (2013), Senay et al. (2017) e Senay (2018).

Para sua operacionalização, inicialmente, o modelo foi implementado em ambiente SIG-Desktop. No entanto, em virtude da capacidade de processamento, da disponibilização de dados de sensores remotos e modelos climatológicos de forma gratuita, além da possibilidade de disponibilização de resultados de forma ampla e interativa, optou-se por implementar o SSEBop na plataforma Google Earth Engine (GEE). A interface amigável disponibilizada no portal do SNIRH permite aos usuários realizar estimativas facilmente e sem a necessidade de softwares.

Etapas de Cálculo da Evapotranspiração com o SSEBop BR

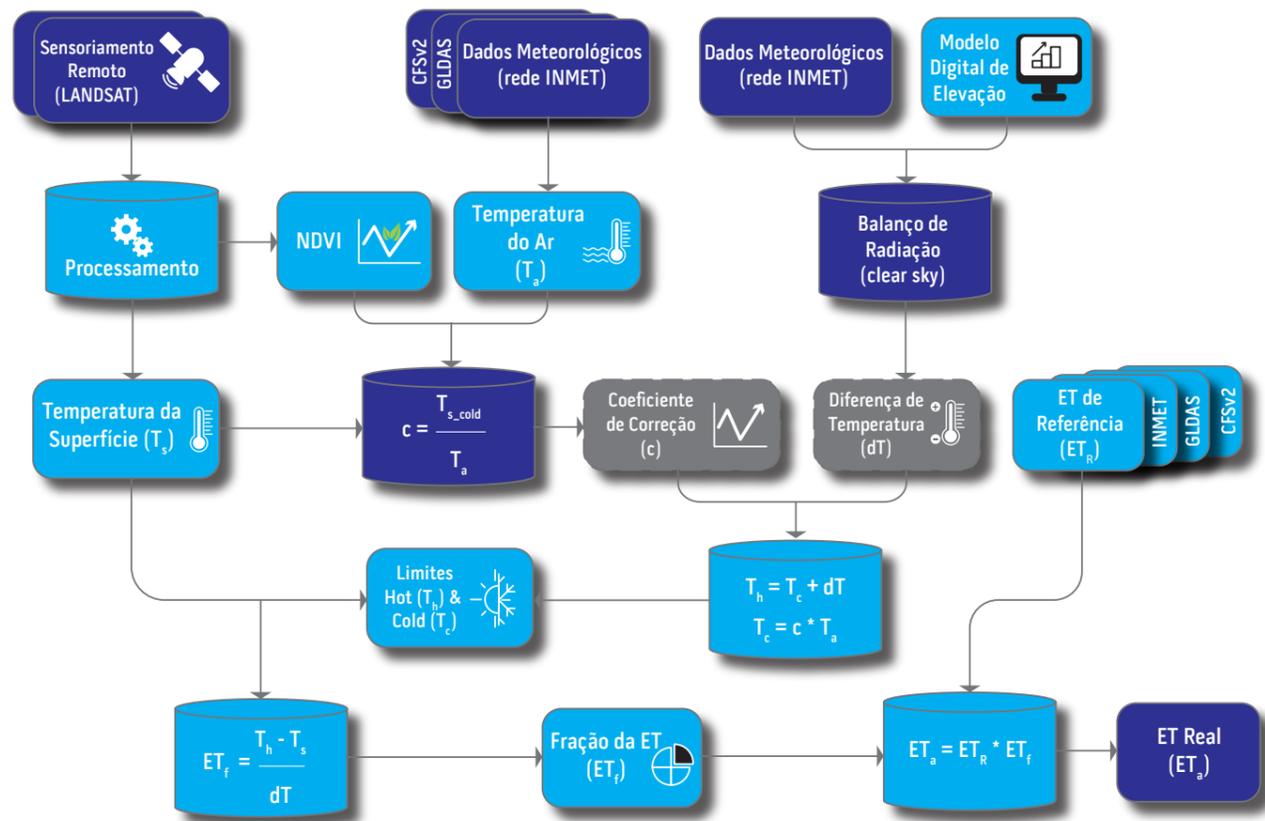


Figura 2. Etapas de cálculo da evapotranspiração real (Eta) com o SSEBop BR.

Fonte: adaptado de Senay et al. (2016).

Quadro 1. Resumo dos tipos de dados, fontes e objetivos da parametrização e operação do modelo SSEBop BR.

DADO	SÍMBOLO	FONTE	OBJETIVO
Elevação da superfície	z	SRTM	Pressão do ar
Fator c: coeficiente de correção de temperatura (Quadro 2)	c	Dado meteorológico ¹	Tc
Temperatura da superfície terrestre	Ts	Landsat	ETf, ETa
Temperatura máxima do ar	Ta	Dado meteorológico ¹	Rn, Th, Tc, dT
Diferença de temperatura	dT	Modelo	dT
Saldo de radiação líquida	Rn	Modelo	dT
ET de referência	Etr	Dados meteorológicos ¹	ETa
Resistência aerodinâmica	rah	Modelo	dT
Albedo	α	Landsat	Ts
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	NDVI	Landsat	c, Tc

¹Nota: Os conjuntos de dados meteorológicos disponíveis são: a) Xavier et al. (2016), cujos grids de ~27km x ~27km são derivados da rede hidrometeorológica nacional (ANA e INMET); b) Global Land Data Assimilation System (GLDAS 2.1); c) National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System (CFSv2).

Quadro 2. Dados e parâmetros para definição de pixels para cálculo do fator de correção (c-factor).

DADO	FONTE	OBJETIVO
NDVI	0.75 ≤ NDVI ≤ 1.0	Pixels representativos de biomassa verde desenvolvida
Ts	> 270 K	Aplicação de máscara em pixels com influência de nuvens
Banda QA	≥ 500 clear pixels	Tamanho mínimo da amostra. Se <500 pixels adequados na cena, utiliza-se valor médio histórico da cena
Tdiff	0 K ≤ (Ta - Ts) ≤ 30 K	Remover diferenças irreais de temperatura
Tcorr	Ta / Ts	Fator c preliminar de pixels de superfícies bem vegetadas, atendendo aos critérios acima
c-factor	Mean Tcorr	Fator c baseado na vegetação mais verde e mais úmida (áreas mais frias)

Nota: Alguns parâmetros foram modificados para o uso do SSEBop em território brasileiro e diferem dos critérios publicados na literatura (Senay et al. 2017).

3.1 INSTRUÇÕES DE USO E DEFINIÇÕES

O aplicativo SSEBop BR, disponível em www.snirh.gov.br > Usos da Água, processa cenas individuais dos satélites Landsat 5, 7 e 8, de qualquer período desde 1984 até o presente, e para quase todas as áreas do globo. Inicialmente, a aplicação do modelo está restrita ao território brasileiro.

A evapotranspiração (ET) de referência (ET_o e ET_r) é calculada independentemente usando os dados meteorológicos disponíveis. O aplicativo SSEBop disponibiliza três fontes de dados para cálculo da ET_o/ET_r: rede brasileira de estações (consolidada por Xavier et al., 2016), GLDAS 2.1 (Rodell et al., 2004) ou CFSV2 (Saha et al., 2011). No aplicativo, a ET_r é calculada usando a “referência da alfafa”, conforme a equação de Penman-Monteith padronizada pela ASCE (Walter et al., 2000).

A abordagem psicrométrica por satélite (Senay 2018) explica o modelo SSEBop de forma mais eficaz do que o princípio do balanço de energia, porque o SSEBop não resolve todos os termos do balanço de energia da superfície, como fluxos sensíveis e de calor no solo. A fração da ET (ET_f) é semelhante ao tradicional “coeficiente de cultivo” ($ET_f = ET_a / ET_r$).

Para usar o aplicativo SSEBop BR, os usuários devem especificar as datas de início e de fim no campo de data (aaaa/mm/dd) e em seguida mover o cursor no *Google Maps* para a área de interesse. Ao pressionar o botão “procurar imagens no centro do mapa” localizado na aba esquerda do aplicativo, será realizada uma pesquisa no catálogo de imagens Landsat disponíveis no *Google Earth Engine* para o período e a cena (órbita/ponto) indicada no mapa. Para áreas cobertas por duas cenas vizinhas, o aplicativo apresentará ambas. Com a lista de imagens fornecida no local desejado, o usuário deverá selecionar uma imagem para processar. O aplicativo SSEBop BR processa uma cena de cada vez. A lista de imagens disponíveis inclui uma avaliação da porcentagem de cobertura de nuvens extraída dos metadados de cada cena (Figura 3).

3 APLICATIVO SSEBOP BR

Fonte de dados meteorológicos Pesquisar endereços, cidades etc.

Período de interesse

Imagens disponíveis

ANA
AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
www.ana.gov.br

2016-04-09	LC82200692016100LGN01	Cloud 22.18%	Tier T1
2016-04-17	LE72200682016108CUB00	Cloud 5%	Tier T1
2016-04-25	LC82200682016116LGN01	Cloud 3.51%	Tier T1
2016-04-25	LC82200692016116LGN01	Cloud 24.12%	Tier T1
2016-05-11	LC82200682016132LGN01	Cloud 0.1%	Tier T1
2016-05-11	LC82200692016132LGN01	Cloud 0.01%	Tier T1
2016-05-19	LE72200682016140CUB00	Cloud 46%	Tier T1
2016-05-27	LC82200682016148LGN01	Cloud 0.06%	Tier T1
2016-05-27	LC82200692016148LGN01	Cloud 0%	Tier T1
2016-06-04	LE72200682016156CUB00	Cloud 16%	Tier T1
2016-06-12	LC82200682016164LGN01	Cloud 21.28%	Tier T1
2016-06-12	LC82200692016164LGN01	Cloud 79.29%	Tier T1
2016-06-20	LE72200682016172CUB00	Cloud 0%	Tier T1

Data Cobertura de nuvens - 0%

LE7 - Landsat 7
LC8 - Landsat 8
path/row - 220/068

Click anywhere point on the map to see the evapotranspiration time series.

Mova o mapa ou pesquise o local de interesse

Selecione a data de interesse

Selecione o produto desejado para visualização no mapa ou faça o download em .tiff

Location Information

Move the map and put the region of interest in the center of the map.

SEARCH IMAGES IN THE CENTER OF MAP

2016-05-11 / LC82200682016132LGN01 / Cloud 0.1% / Tier T1

Products

TRUE COLOR (RED, GREEN, BLUE)	DOWNLOAD
FALSE COLOR (NIR, SWIR1, RED)	DOWNLOAD
CLOUD MASK	DOWNLOAD
VEGETATION INDEX (NDVI)	DOWNLOAD
ELEVATION (DEM)	DOWNLOAD
SURFACE TEMPERATURE (Ts)	DOWNLOAD
GRASS REFERENCE ET (ET _g)	DOWNLOAD
ALFALFA REFERENCE ET (ET _r)	DOWNLOAD
TEMPERATURE DIFFERENCE (dT)	DOWNLOAD
ET FRACTION (ET _f)	DOWNLOAD
ACTUAL ET (ET _a)	DOWNLOAD

0 5 10

Imagem selecionada

LC82200682016132LGN01 - ACTUAL ET (ET_a)

Click [here](#) to download this product.

Close

A janela de download será exibida no centro do mapa

Figura 3. Instruções básicas de uso do aplicativo SSEBop BR (www.snirh.gov.br > Usos da Água).

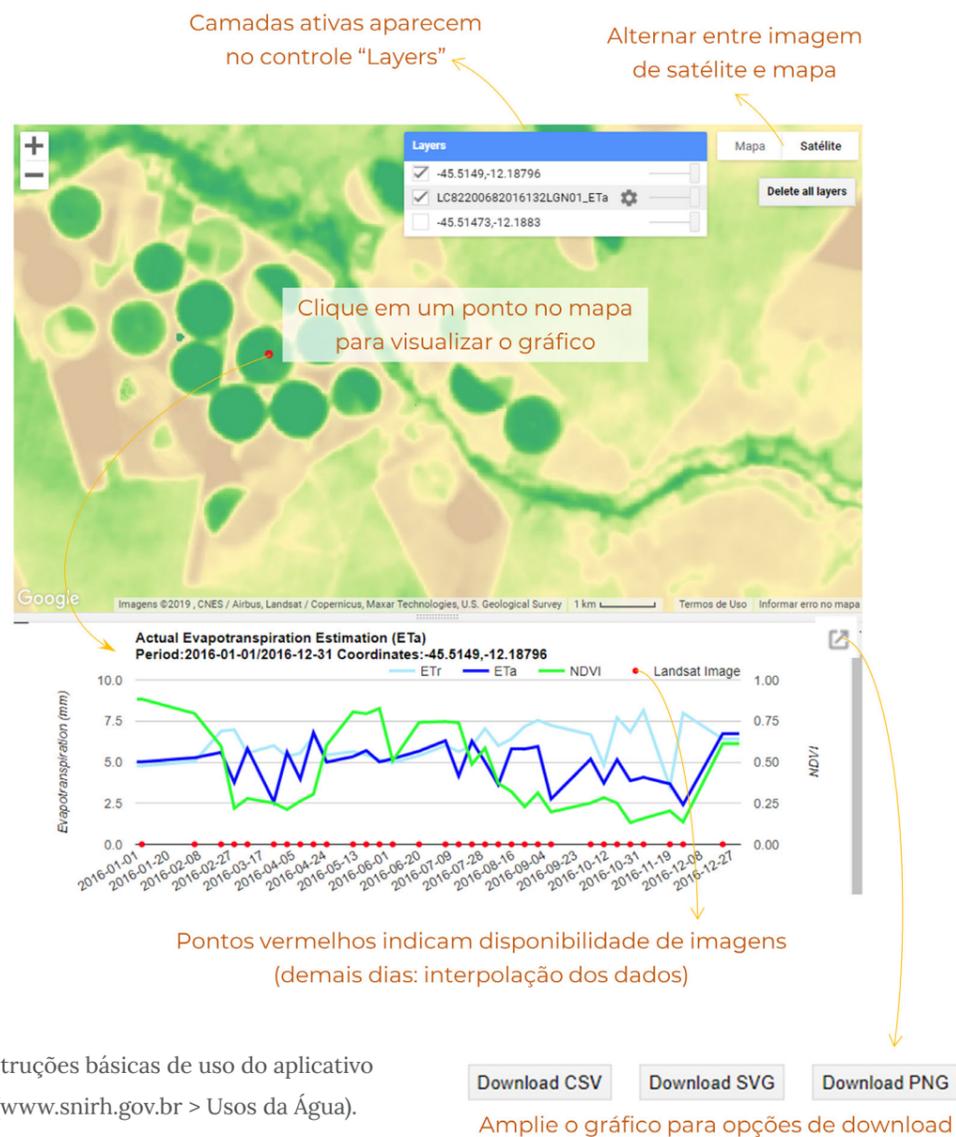


Figura 4. Instruções básicas de uso do aplicativo SSEBop BR (www.snirh.gov.br > Usos da Água).

Depois que uma imagem é selecionada, o aplicativo SSEBop apresentará uma lista de camadas de dados que podem ser exibidas na janela do mapa (Figura 3). As imagens da fração ET (ETf) e ET real (ETa) podem ser baixadas como arquivos GeoTIFF usando os links ativos (em *download*).

Além da visualização e do download de todas as camadas de dados de entrada do modelo e de resultados de saída no período desejado, os usuários também podem clicar com o botão esquerdo no mapa e o SSEBop BR gerará um gráfico contendo

a série temporal de ETr, ETa e NDVI (Figura 4). Ao clicar na pequena seta localizada no canto superior direito do gráfico, os usuários também terão acesso à tabela em formato .csv com os dados, bem como poderão realizar o download da imagem do gráfico em .png ou .svg.

DEFINIÇÕES

TRUE COLOR (RED, GREEN, BLUE) – COR VERDADEIRA (VERMELHO, VERDE, AZUL): composição das bandas vermelha, verde e azul da imagem Landsat.

FALSE COLOR (NIR, SWIR1, RED) – FALSA COR (NIR, SWIR1, VERMELHO): composição das bandas Landsat 5 e 7 (bandas 4, 5 e 3). No Landsat 8, são as bandas 5, 6, 4, respectivamente.

CLOUD MASK – MÁSCARA DE NUVEM: máscara de nuvem baseada na banda de avaliação de qualidade do Landsat.

VEGETATION INDEX (NDVI) – ÍNDICE DE VEGETAÇÃO (NDVI): índice de vegetação com diferença normalizada, calculado a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho usando a reflectância da superfície.

ELEVATION (DEM) – ELEVAÇÃO (DEM): modelo digital de elevação em metros. É adotado o modelo SRTM, com resolução espacial de 30 m.

SURFACE TEMPERATURE (Ts) – TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (Ts): temperatura da superfície do solo derivada das imagens do Landsat Collection 1, nível 1. A resolução nativa do Landsat 5 é de 120 m, do Landsat 7 é de 60 m e do Landsat 8 é de 100 m. Todos estes são reamostrados para 30 m pelo USGS-EROS usando convolução cúbica. As unidades estão em Kelvin (K).

GRASS REFERENCE ET (ETo) – ET POTENCIAL (ETo, grama): ET de referência padronizada pela ASCE para a equação de referência diária de Penman-Monteith para grama cortada diariamente (Walter et al., 2000; Allen et al., 1998). Representa uma taxa

média máxima de ET para grama. A ETo tende a ser 5% a 40% menor que o ETr de referência (alfafa). As unidades estão em milímetros (mm) por dia.

ALFALFA REFERENCE ET (ETr) – ET DE REFERÊNCIA (ETr, alfafa): ET de referência padronizada pela ASCE para a equação de referência diária de Penman-Monteith (Walter et al., 2000) para alfafa alta. Representa uma taxa de ET quase máxima. A ETr tende a ser 5% a 40% maior que a ETo. As unidades estão em milímetros (mm) por dia.

TEMPERATURE DIFFERENCE (dT) – DIFERENÇA DE TEMPERATURA (dT): define a diferença de temperatura (dT) em Kelvin (K) entre os valores de referência “quentes” (áreas nuas – solo exposto) e “frios” (áreas bem vegetadas) para cada pixel. Espera-se que a temperatura-limite fria seja igual à temperatura do ar no nível do dossel, fazendo da dT a diferença entre a temperatura da superfície e a do ar sobre a superfície nua/seca. A novidade no modelo SSEBop é que a dT é predefinida para um determinado pixel, ao contrário da formulação original do SSEB ou modelos similares de balanço de energia que usam um conjunto de pares de pixels quentes e frios de referência aplicáveis a uma região hidroclimática uniforme.

ET FRACTION (ETf) – FRAÇÃO DA ET (ETf): fração da ET de referência estimada pelo modelo SSEBop. É semelhante ao coeficiente de cultura baseado em referência de alfafa em condições observadas. A ETf geralmente varia de 0 a 1,05 (adimensional).

ACTUAL ET (ETa) – ET REAL (ETa): a ET real é calculada usando a fração da ET (ETf) multiplicada pela ET de referência (ETa = ETf x ETr). As unidades estão em milímetros (mm) por dia.

3.2 PERGUNTAS FREQUENTES (FAQ)

As questões a seguir e suas respostas procuram esclarecer as principais dúvidas no manuseio do aplicativo SSEBop BR.

Por que meus downloads não estão funcionando?

Existem duas situações comuns. Se o download nem começar, seu bloqueador de pop-ups pode estar bloqueando o download. Simplesmente desative-o e tente novamente. Se você obtiver uma imagem baixada, mas ela não abrir ou estiver corrompida, é provável que sua conexão à Internet tenha sido interrompida durante o download. Estamos pesquisando métodos mais estáveis para fornecer downloads.

Mais de uma cena e data do Landsat podem ser processadas ao mesmo tempo?

Não. Cada data e cena são processadas independentemente. No entanto, diferentes cenas podem ser baixadas e unidas em *softwares* de processamento de imagens.

Quais são as diferenças entre os conjuntos de dados meteorológicos disponíveis?

O conjunto de dados do Brasil (Xavier et al, 2016) é baseado em estações meteorológicas brasileiras, com dados diários consistidos e interpolados para um grid regular de 0,25 x 0,25 grau e compreende o período de 1985 a 2017. Para anos subsequentes, é adotada a mediana diária dos valores observados

entre 2005 e 2017. O CFSV2 é uma agregação diária baseada em um modelo totalmente acoplado que representa a interação entre atmosfera, oceanos, terra e gelo marinho com um tamanho de pixel de 0,2 x 0,2 grau de arco e compreende o período de 1979 até o presente. O GLDAS acopla produtos de satélite e de estações em terra para gerar campos ideais de estados e fluxos da superfície terrestre usando técnicas avançadas de modelagem e assimilação de dados da superfície terrestre. Possui um tamanho de pixel de 0,25 x 0,25 grau de arco e compreende o período de 2000 até o presente.

Como foi estimado o dT?

Ele usa uma média diária de 1980 a 2013 com base no conjunto de dados meteorológicos para o Brasil (Xavier et al, 2016) sob condições de céu claro (Senay, 2013).

O que faço com uma imagem ETf após o download?

Você pode usar a imagem da fração da evapotranspiração (ETf) para mostrar áreas de ET relativamente altas e baixas. Isso pode ser útil para avaliar áreas de estresse hídrico, áreas de irrigação e distribuição espacial de ET. A imagem ETf pode ser 'colorida' usando sistemas de processamento de imagem. As imagens de ETf podem ser usadas para desenvolver curvas de coeficiente de cultura e derivar estimativas da umidade do solo. O coeficiente de cultura deste exercício pode ser menor do que os valores publicados, que são

determinados em condições agronômicas ideais, refletindo o tipo e o estágio da cultura, mas não sob condições de estresse. Se a ET total (integrada) ao longo de um período de tempo, como um mês ou um período de crescimento ou um ano, for desejado, será necessário processar várias imagens e, em seguida, realizar uma integração. Os valores diários de ET são somados durante o período de interesse. A ETf também é útil caso o usuário deseje estimar a ETa com dados de ETr ou ETo de outras fontes de informação.

Quais são as áreas sem dados nas imagens?

Essas áreas são mascaradas pelo filtro de nuvens e sombras aplicado às imagens do Landsat. Não é possível calcular a ETa para pixels sob influência de nuvens/sombras.

E se o aplicativo SSEBop não produzir com êxito uma imagem de ETa com mensagens do tipo: 'times out' ou 'Something went wrong on the server. Please try again'?

Isso pode ser um bug ou o aplicativo pode estar em manutenção. Se, após várias tentativas, você ainda receber esta mensagem, tente novamente após um período de 24 horas.

Como é realizada a calibração do modelo SSEBop para correção de temperatura (fator c ou c-factor)?

O fator c do SSEBop é calculado exclusivamente para cada cena do Landsat a partir de pixels úmidos (bem vegetados). Esse componente de correção de temperatura é baseado em uma proporção entre a temperatura máxima do ar e a temperatura da superfície do solo que passou por vários filtros, como os limites de NDVI. Os usuários são aconselhados a consultar a metodologia geral no item Metodologia e no artigo original (Senay et al., 2017). Os parâmetros específicos do c-factor no SSEBop BR são detalhados no Quadro 2 deste documento.

Como devo citar o uso do aplicativo SSEBop e os dados baixados deste aplicativo?

Você deve citar este documento, cuja referência completa é: Agência Nacional de Águas (ANA). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília: ANA, 2020. Acessível em www.snirh.gov.br > Usos da Água.

3.3 APLICAÇÕES

O SSEBop BR retrata a variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração e apresenta valores consistentes com dados medidos em campo e estimativas indiretas, conforme será detalhado a seguir.

As estimativas de evapotranspiração real possuem diversas aplicações – desde a análise de coeficientes de cultivo em escala local até o cálculo de balanço hídrico em escala de bacia. Monitoramento de estiagens, manejo agrícola e modelagem hidrológica superficial e subterrânea são outras aplicações comuns desse tipo de estimativa.

Para a gestão dos recursos hídricos, além da modelagem hidrológica, uma importante aplicação das estimativas é para a identificação de áreas irrigadas e do uso da água associado.

Uma avaliação expedita dos resultados foi realizada no Oeste da Bahia, nas bacias dos rios Grande e Correntes – maior polo de área irrigada por pivôs centrais no Brasil (ANA, 2019). Essa região é a mais importante produtora do MATOPIBA – área de expansão da fronteira agrícola brasileira entre os Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, caracterizada por extensas áreas em regime de sequeiro e, também, pela forte irrigação por pivôs centrais. Os irrigantes concentram suas atividades nos períodos de maior oferta hídrica, utilizando a irrigação como fonte suplementar de água. Dessa forma, muitos equipamentos ficam inativos durante o período de estiagem (maio a setembro). O percentual de atividade/inatividade de pivôs é,

entretanto, bastante variável, sendo influenciado pelo mercado de alimentos, políticas setoriais e disponibilidade hídrica, dentre outros fatores.

No Oeste da Bahia foram realizadas estimativas de evapotranspiração (ETa) entre maio e setembro de 2013 (período seco). Nesse ano foram registradas precipitações médias na bacia próximas a zero (9, 3, 0, 0 e 6 mm, respectivamente). Nesse sentido, a precipitação foi considerada nula, sendo os valores consumidos pela evapotranspiração (ETa) atribuídos à irrigação.

A Figura 5 mostra em detalhe a variação de ETa, temperatura (LST) e NDVI em área de pivôs em duas épocas – antes do plantio (19/05/2013) e com cultivo irrigado (24/09/2013). Nota-se uma relação entre as variáveis – os valores de NDVI mais altos estão onde a temperatura de superfície (LST) é mais baixa e onde é maior a evapotranspiração real, uma relação que se mantém nas duas datas. Observa-se ainda que na área do pivô de menor NDVI, em maio, a temperatura de superfície é baixa e a ETa é mais alta, o que corresponde à presença de umidade no solo, possivelmente devido à irrigação pré-plantio.

Com a finalidade de avaliar as estimativas de ETa pelo SSEBop, foram comparados os valores mensais de ETa estimados com as vazões médias mensais de outorga para irrigação na região e com os valores de estimativas indiretas com base no balanço hídrico nas áreas irrigadas (ANA, 2019), todos expressos em l/s.ha, conforme ilustra a Figura 6. Esses cálculos foram realizados para a

área total irrigada por 1.275 pivôs centrais, que somam cerca de 137 mil hectares.

Do universo de 1.275 pivôs centrais nas áreas agrícolas irrigadas, foram selecionados para a análise aqueles com NDVI médio mensal superior a 0,5, em cada mês, ao longo do período de maio

a setembro, visando a selecionar os de maior probabilidade de estarem plantados. No mesmo gráfico da Figura 6 são mostrados ainda os valores de NDVI médio dos pivôs selecionados e a respectiva quantidade de pivôs. Verifica-se a redução progressiva de pivôs potencialmente ativos na região (NDVI > 0,5), passando de 50% do

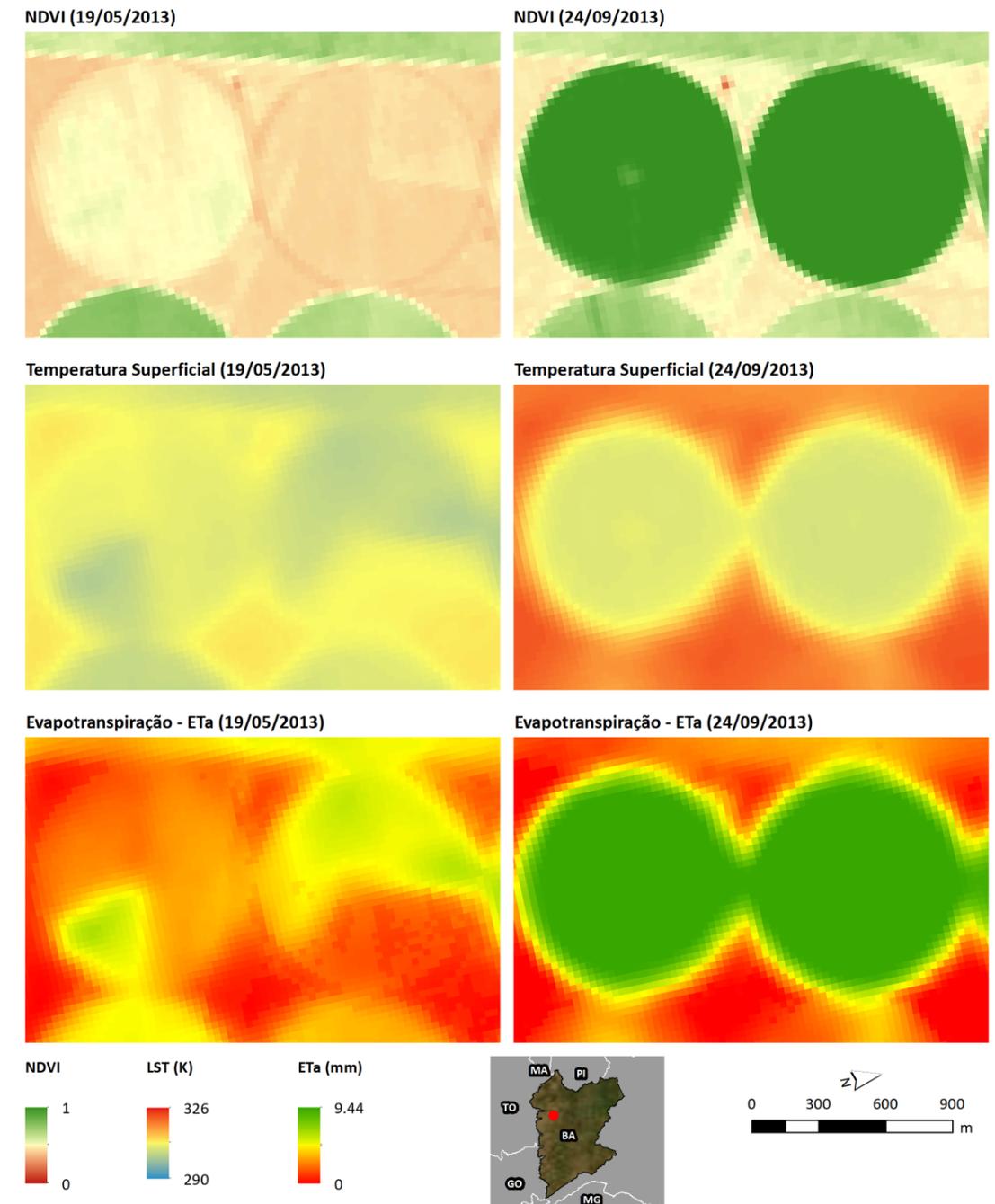


Figura 5. Comparação de ETa, NDVI e LST em área de pivôs, em maio, antes do plantio predominando solo nu, e em setembro com cultivo irrigado em estágio avançado.

total em maio para 25% do total em setembro de 2013.

Os valores de vazão média de outorga são oriundos da ANA sobre uma extensão de 24 mil hectares na região e refletem condições de clima médio com nível de garantia da precipitação de 80%. A estimativa de evapotranspiração real com base na metodologia do Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil (ANA, 2019) baseia-se em maior número de estações meteorológicas e considera as principais culturas plantadas no ano de 2013. A ETR de todas as estimativas foi calculada utilizando a equação de Penman-Monteith.

Inicialmente, observa-se que o modelo SSEBop retrata bem as tendências de necessidade de irrigação, mas também ressalta que há heterogeneidade importante em relação às lâminas de água diariamente aplicadas pelos pivôs centrais. O desvio padrão é relativamente alto ($\sigma = 0,09$ a $0,17$ l/s/ha) em relação à média mensal ($\mu = 0,43$ a $0,54$ l/s/ha).

Os valores estimados pelo SSEBop são bastante próximos à estimativa indireta para o ano de 2013, com variações da ordem de 5% em maio, julho e agosto; de 11% em junho; e de 19% em setembro. A comparabilidade dos resultados em setembro fica prejudicada por conta do processo de interpolação nesse mês, pois não foram utilizadas imagens do mês seguinte (outubro), sendo adotados até o final do mês os últimos valores disponíveis de setembro.

Já com relação à outorga, as diferenças a mais em relação ao estimado com o modelo SSEBop variam de 11% em setembro a cerca de 27% em maio, julho e agosto, sendo de 15% em junho. Considerando que as outorgas concedidas são relativas a um plantio máximo por área com elevada garantia hídrica, os valores são consistentes entre si guardando a mesma tendência mensal de aumento/diminuição.

Os valores médios mensais estimados pelo SSEBop retratam a tendência de intensificação do uso da água no período mais seco, por outro lado, o desvio padrão dos valores diários em relação à média é

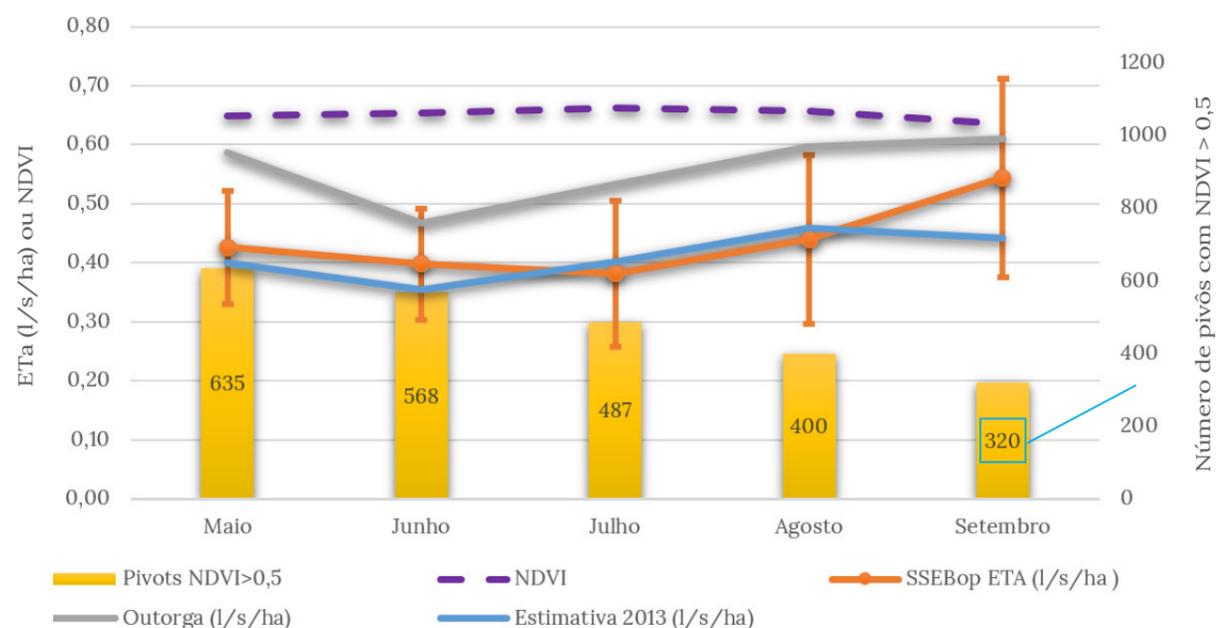


Figura 6. Avaliação da estimativa de ETa pelo SSEBop no Oeste Baiano.

elevado em todos os meses, sendo superiores no auge do período seco. Essa tendência, mostrada na Figura 6, é compatível com levantamentos de campo na região (ANA, 2005) que concluíram que o manejo da água é pouco adequado, com poucos produtores aplicando as quantidades necessárias de água, sendo mais comum o uso inferior à necessidade hídrica (em 68% dos projetos por aspersão analisados).

Já com relação ao consumo total de água nos pivôs analisados, observa-se que embora a área irrigada e o número de pivôs potencialmente ativos decresçam de forma acentuada conforme se avança no período seco, o consumo decresce pouco em função da maior necessidade de irrigação. Entre julho e agosto, o consumo de água decresce 10% enquanto a área irrigada decresce 22%. Entre agosto e setembro, o consumo decresce apenas 5% enquanto a área irrigada diminui 24%.

Ainda para avaliar os resultados das estimativas do SSEBop, a Figura 7 apresenta uma síntese com as

tendências dos valores de ETa para os 322 pivôs que em setembro possuíam NDVI $\geq 0,5$. Verifica-se a coerência da tendência dos valores médios das variáveis (ETa e NDVI), sendo a dispersão dos valores de NDVI maior ao longo dos três primeiros meses e bem reduzida no mês de setembro, quando ocorrem os maiores valores de ETa.

A aplicação do modelo SSEBop no Oeste da Bahia demonstra capacidade de retratar a variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração real. As análises foram aprofundadas em áreas de irrigação por pivôs centrais e o modelo foi capaz de retratar as principais tendências de consumo de água pela irrigação, aderentes com outras estimativas indiretas de referência. O modelo retratou ainda a grande variabilidade de manejo do uso da água entre pivôs, com desvios-padrão elevados, o que é compatível com o manejo altamente variável na região e os diferentes estágios de desenvolvimento das culturas no momento de passagem dos satélites.

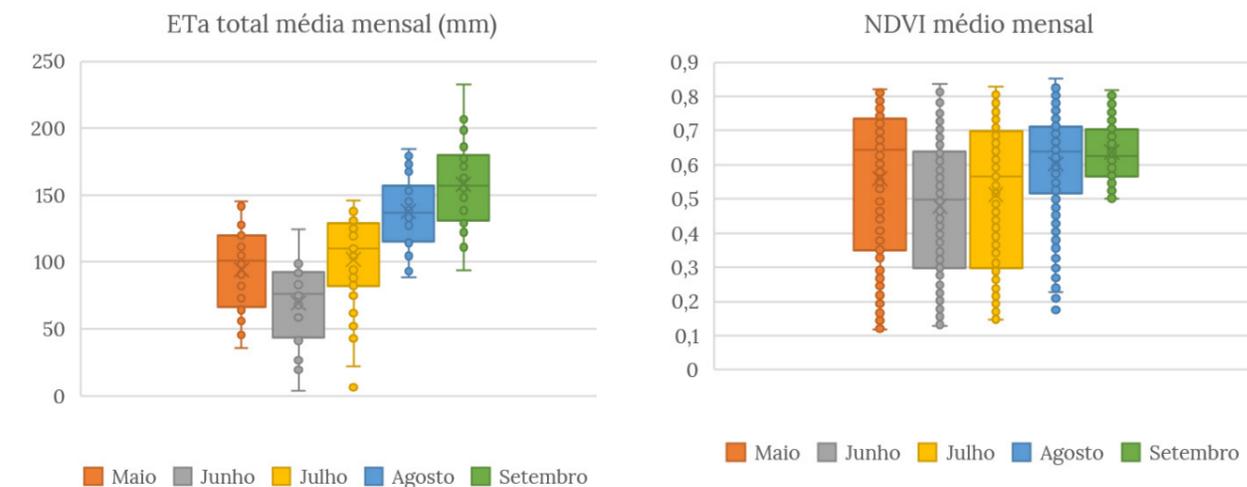


Figura 7. Comparação do comportamento de ETa (mm) e NDVI nas áreas dos 322 pivôs com NDVI $\geq 0,5$ em setembro.

O comparativo das estimativas do SSEBop com outras fontes indiretas permite verificar a aderência dos valores com valores esperados localmente.

Uma outra forma de avaliar os resultados do modelo foi realizada com dados de campo. Para essa análise, foram obtidas 37 observações de Eta pelos métodos de Razão de Bowen (RB) e outras 85 observações mensuradas por torres de fluxo (*Eddy Covariance* - EC), totalizando 122 observações diárias. As observações foram realizadas em sete localidades de cinco unidades da federação (GO, DF, RS, MG e RS) e em cinco diferentes culturas - soja, feijão, trigo, arroz e cenoura (Diaz et al., 2019; Lopes et al., 2019; Paula et al., 2019).

Cabe destacar que as estimativas de campo não são triviais, persistindo algum grau de incerteza em função dos sensores utilizados, rotinas de processamento e cálculo dos dados e condições ambientais e de operação.

A Figura 8 apresenta gráficos comparativos dos resultados da estimativa de evapotranspiração real estimados pelo SSEBop BR com os dados estimados em campo. A Figura 8 também apresenta informações adicionais sobre a localidade analisada, o método de estimativa e os resultados. Embora todos os gráficos refiram-se aos resultados do SSEBop BR utilizando a rede de estações do INMET (consolidadas por Xavier et al., 2013), são também apresentadas estatísticas com o uso das fontes de dados meteorológicos GLDAS e CFSv2.

Em todos os resultados está expresso o coeficiente de determinação R^2 , que indica percentualmente

o quanto o modelo consegue explicar valores observados. Quanto mais próximo de 1 (=100%), melhor é o ajuste do modelo aos dados observados.

Em todas as culturas analisadas ao menos uma, e, na maioria das vezes, duas das fontes dados meteorológicos supracitadas obtiveram R^2 acima de 0,7, sendo frequentes valores de R^2 superiores a 0,8. Em alguns casos, os modelos globais GLDAS e/ou CFSv2 apresentaram coeficientes de determinação superiores em relação ao dado consolidado a partir de estações do INMET.

No caso de culturas temporárias no Cerrado (Figura 8 - a, b, c, d e g), o modelo SSEBop BR é capaz de representar bem o comportamento da evapotranspiração real. Com os dados meteorológicos de estações do INMET, os valores de R^2 variaram entre 0,74 (Figura 8c) e 0,88 (Figura 8a). Com o CFSv2, foram obtidos R^2 superiores de 0,95 e 0,94, em (a) e (g), respectivamente (Figura 8).

Nos dois casos onde há maior volume de dados na mesma região, caso das torres de fluxo nos campos de arroz do Rio Grande do Sul (Figura 8e e 8f), o coeficiente de determinação variou entre 0,58 e 0,8, de acordo com a fonte de dados meteorológicos. Na torre de fluxo localizada em Cachoeira do Sul/RS, foi obtido R^2 de 0,72 (com CFSv2); e na torre em Paraíso do Sul/RS foi obtido R^2 de 0,8. Dessa forma, infere-se um bom desempenho do modelo quando comparado a séries extensas e consistentes de dados de campo também em campos de arroz sob inundação, embora os modelos de evapotranspiração possam apresentar maiores limitações no período de exposição da lâmina d'água.

(a)
 Coordenadas: -16,1937; -47.47335
 Município/UF: Cristalina/GO
 Cultura: Soja
 Período: 11/2014 a 02/2015
 Observações (n°): 4
 Método Eta (campo): Razão de Bowen
 BR-MetData R^2 0,88
 GLDAS R^2 0,92
 CFSv2 R^2 0,95
 Nota: gráfico comparativo com BR-MetData

(b)
 Coordenadas: -16.2049; 47.4587
 Município/UF: Cristalina/GO
 Cultura: Soja
 Período: 01/2015 a 02/2015
 Observações (n°): 4
 Método Eta (campo): Razão de Bowen
 BR-MetData R^2 0,84
 GLDAS R^2 0,85
 CFSv2 R^2 0,78
 Nota: gráfico comparativo com BR-MetData

(c)
 Coordenadas: -15.909910°; -47.419410°
 Município/UF: Distrito Federal / DF
 Cultura: Feijão
 Período: 05/2015 a 08/2015
 Observações (n°): 8
 Método Eta (campo): Razão de Bowen
 BR-MetData R^2 0,74
 GLDAS R^2 0,52
 CFSv2 R^2 0,37
 Nota: gráfico comparativo com BR-MetData

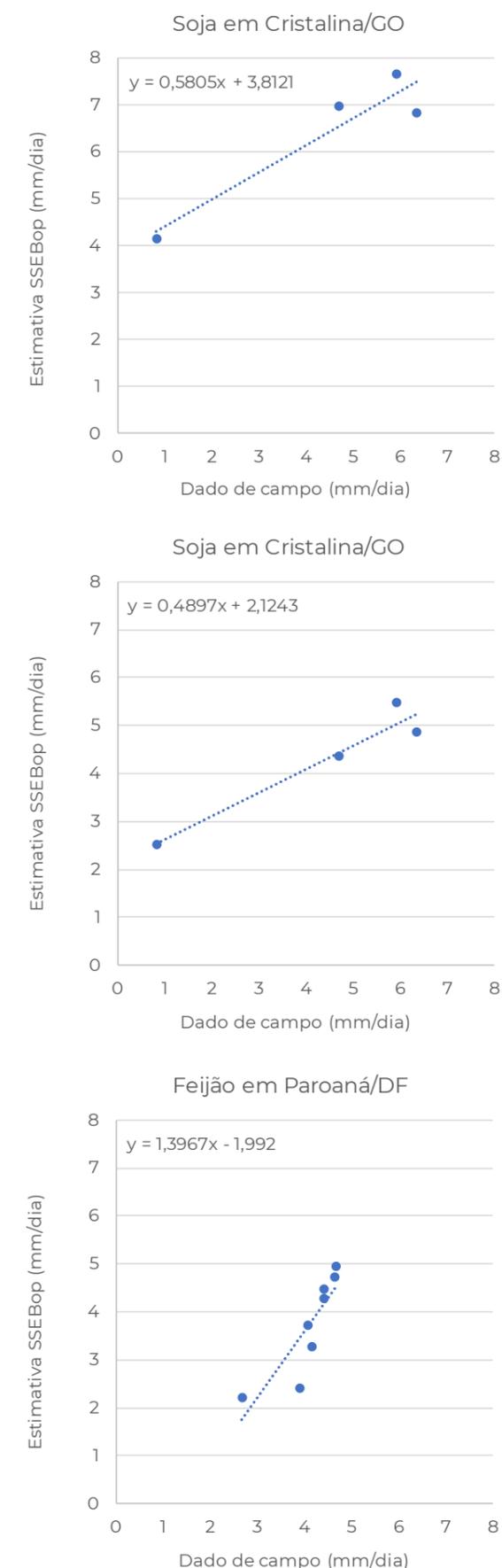


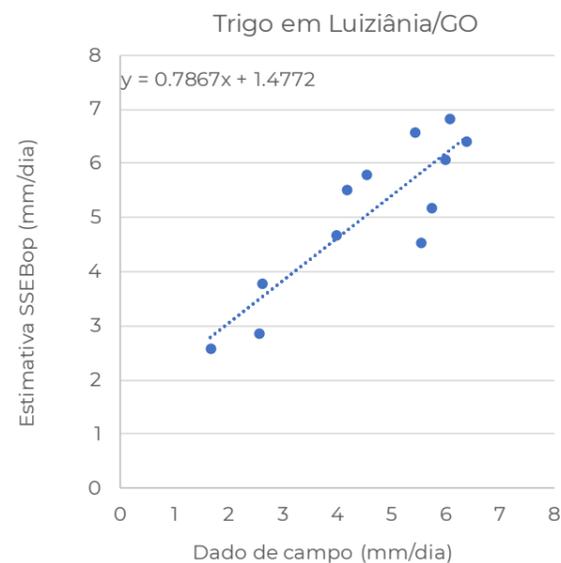
Figura 8 (a), (b) e (c). Comparativo dos resultados do modelo SSEBop BR com dados de campo.

(d)

Coordenadas: -16.252260°;-47.683750°
 Município/UF: Luziânia/GO
 Cultura: Trigo
 Período: 06/2017 a 09/2017
 Observações (n°): 12
 Método Eta (campo): Razão de Bowen

BR-MetData	R ² 0,77
GLDAS	R ² 0,81
CFSv2	R ² 0,73

Nota: gráfico comparativo com BR-MetData

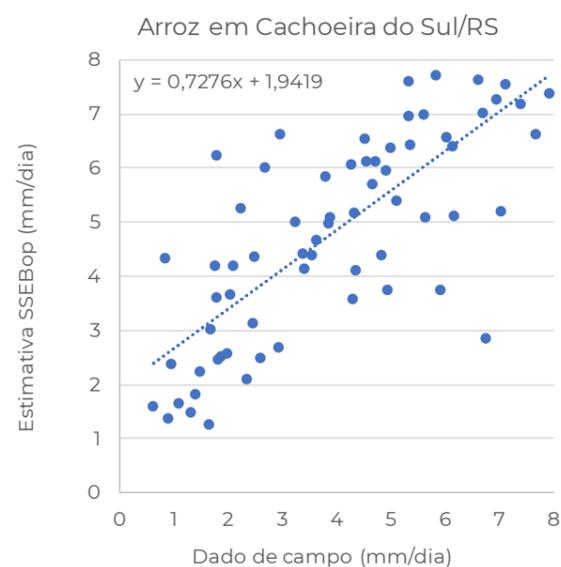


(e)

Coordenadas: -30.277082°; -53.14847°
 Município/UF: Cachoeira do Sul /RS
 Cultura: Arroz
 Período: 12/2010 a 03/2015
 Observações (n°): 68
 Método Eta (campo): Eddy Covariance

BR-MetData	R ² 0,58
GLDAS	R ² 0,65
CFSv2	R ² 0,72

Nota: gráfico comparativo com BR-MetData



(f)

Coordenadas: -29.744333°;-53.149944°
 Município/UF: Paraíso Sul /RS
 Cultura: Arroz
 Período: 08/2003 a 07/2004
 Observações (n°): 17
 Método Eta (campo): Eddy Covariance

BR-MetData	R ² 0,8
GLDAS	R ² 0,63
CFSv2	R ² 0,77

Nota: gráfico comparativo com BR-MetData

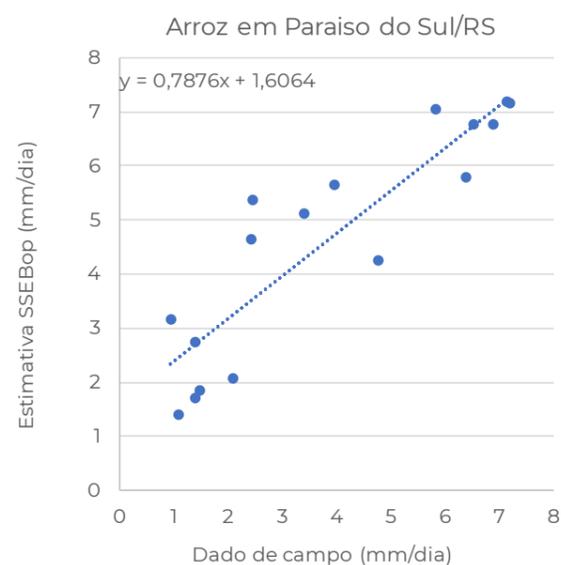


Figura 8 (d), (e) e (f). Comparativo dos resultados do modelo SSEBop BR com dados de campo.

(g)

Coordenadas: -16.163830°;-47.481830°
 Município/UF: Cistalina/DF
 Cultura: Cenoura
 Período: 07/2014 a 10/2014
 Observações (n°): 9
 Método Eta (campo): Razão de Bowen

BR-MetData	R ² 0,86
GLDAS	R ² 0,7
CFSv2	R ² 0,94

Nota: gráfico comparativo com BR-MetData

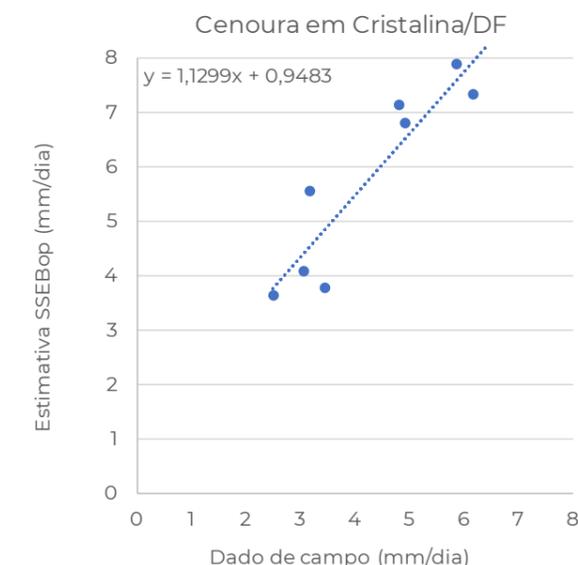


Figura 8 (g). Comparativo dos resultados do modelo SSEBop BR com dados de campo.

Nota: em (d), o BR-MetData representa a média diária histórica a partir de 01/08/2019.

Fontes: Estimativa SSEBop (eixo y): aplicativo SSEBop BR

Dados de campo (eixo x) e agradecimentos:

- (a) Paula et al. (2019). Adriano Cesar Pereira de Paula (UnB) e Morris Scherer-Warren (ANA).
- (b) Paula et al. (2019). Adriano Cesar Pereira de Paula (UnB) e Morris Scherer-Warren (ANA).
- (c) Paula et al. (2019). Adriano Cesar Pereira de Paula (UnB) e Morris Scherer-Warren (ANA).
- (d) Lopes et al. (2019). Juliana Dias Lopes (ANA).
- (e) Diaz et al. (2019) e Souza et al. (2019). Débora Regina Roberti (UFESM) e equipe do Laboratório de Micrometeorologia da UFESM.
- (f) Souza et al. (2019). Débora Regina Roberti (UFESM) e equipe do Laboratório de Micrometeorologia da UFESM.
- (g) Dados cedidos por Morris Scherer-Warren (ANA).

Outras avaliações foram realizadas na bacia do rio São Marcos (GO/MG/DF), utilizando dados medidos em campo e acumulados sazonalmente. As captações de água foram associadas às respectivas áreas irrigadas por pivôs centrais na bacia. Os volumes medidos por hidrômetros/horímetros foram somados à chuva incidente nas áreas irrigadas, estimada pelo modelo *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations - CHIRPS/USGS* (Funk et al., 2015). Foi adotada eficiência de 85% para comparação entre os dados {Eta vs ((Vol Medido + Precipitação)*0,85)}.

A ETa com o SSEBop BR foi estimada para os pixels Landsat 7 e 8 nas datas de passagem do satélite dentro dos pivôs centrais avaliados. Para dias sem imagens ou com nuvens/sombras, foi realizada interpolação linear simples entre dias com imagens para obtenção das ETa diárias sem falhas, sendo

Municípios/UF: Cistalina-GO, Paracatu-MG e Unaí-MG
 Cultura: Grãos
 Período: 2018/2019
 Observações (n°): 9
 Método (campo): Hidrômetro ou Horímetro
 BR-MetData R² 0,94

Período acumulado:
 Maio a Agosto / 2018
 Maio a Setembro / 2018
 Outubro/2018 a Janeiro / 2019

Fontes:
 Estimativa SSEBop (eixo y): aplicativo SSEBop BR
 Dados de campo (eixo x): declarações mensais de uso da água de usuários selecionados, acompanhadas de registros fotográficos, e consistidas pela ANA.

posteriormente somadas nos períodos indicados para as respectivas áreas de estudo (Figuras 9 e 10).

Na Figura 9 são apresentados os resultados para 09 captações de água que abastecem 11 pivôs centrais (1.095 ha), em três períodos distintos (indicados pelas cores). Os dados de campo são provenientes de ações de fiscalização da ANA que consolidou e consistiu dados mensais de captação de água enviados por usuários e acompanhados de registros fotográficos dos respectivos hidrômetros/horímetros.

Os dados estimados pelo modelo SSEBop apresentaram boa aderência com os volumes mensais medidos somados à precipitação incidente em todas as captações - o coeficiente de determinação R² foi de 94% (0,94).

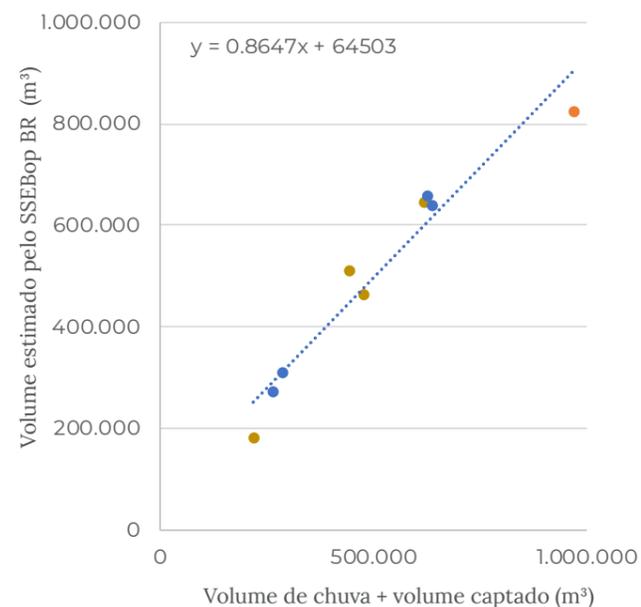


Figura 9. Comparativo dos resultados do modelo SSEBop BR com dados medidos de usuários selecionados

Adotando o mesmo procedimento, na Figura 10 são apresentados os resultados para 13 captações de água que abastecem 25 pivôs centrais e totalizam 2.015 hectares (Sado et al., 2018). O período analisado foi de julho de 2015 a maio de 2016.

O coeficiente de determinação R² foi de 97% (0,97), com boa aderência em todas as captações entre as estimativas do SSEBop BR e as que incorporaram dados medidos.

Municípios/UF: Cistalina-GO e Paracatu-MG
 Cultura: Feijão e Soja
 Período: 07/2015 a 05/2016
 Observações (n°): 13 captações / 25 pivôs
 Método (campo): Hidrômetro
 BR-MetData R² 0,97

Fontes:
 Estimativa SSEBop (eixo y): aplicativo SSEBop BR
 Dados de campo (eixo x): Sado et al. (2018).

Essas avaliações expeditas expressas nos resultados das Figuras 09 e 10 demonstram que o modelo SSEBop BR também tem potencial de aplicação em análises sazonais para fins de balanço hídrico e de regulação e fiscalização de uso da água. Quanto maior o número de imagens e menor a influência da precipitação incidente na ETa - situação mais comum no período seco no Cerrado, maior será a precisão dos resultados.

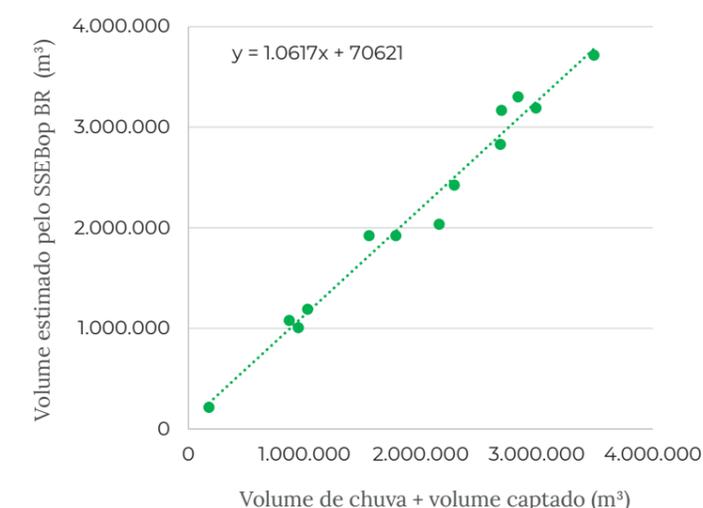
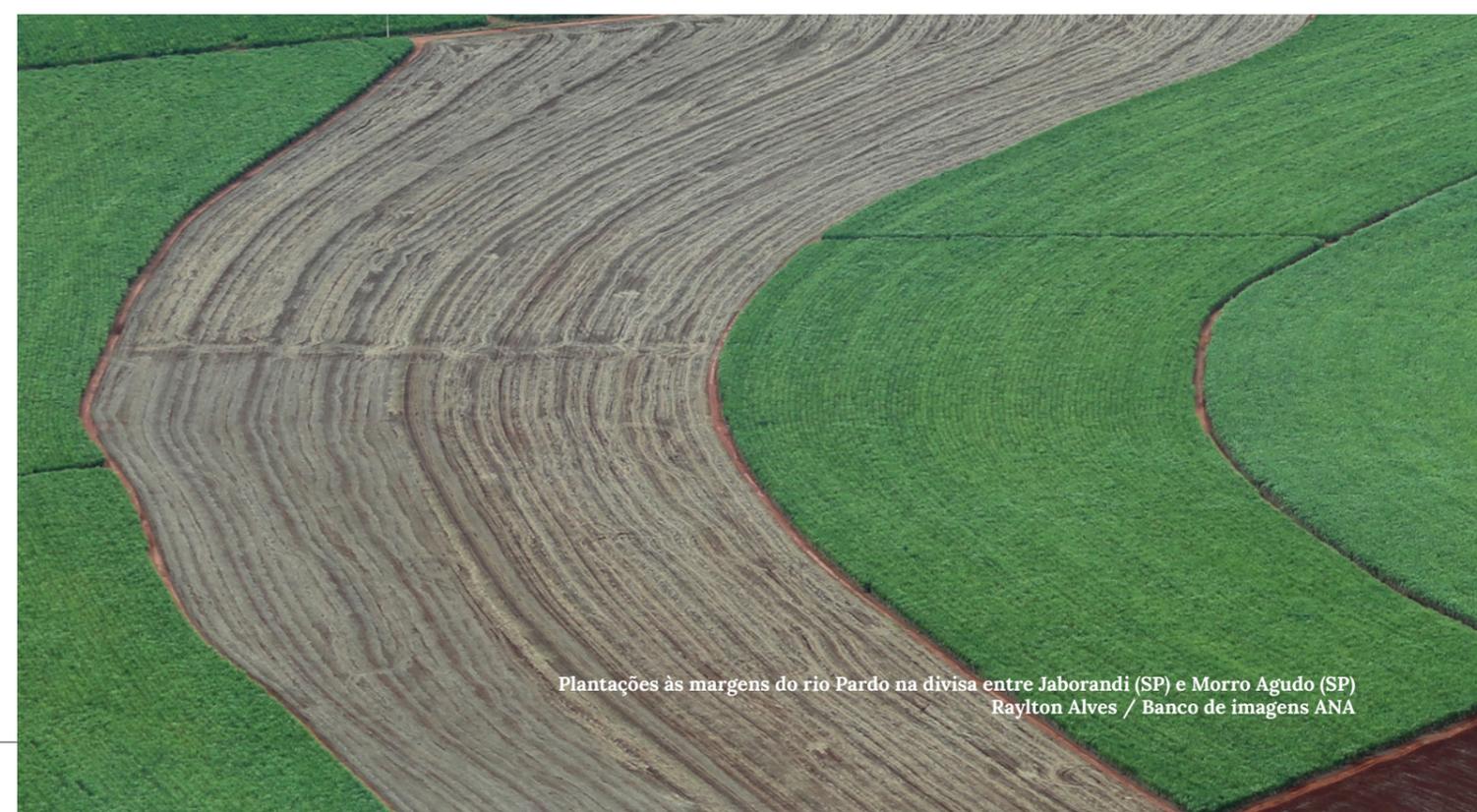


Figura 10. Comparativo dos resultados do modelo SSEBop BR com dados medidos de usuários selecionados



Plantações às margens do rio Pardo na divisa entre Jaborandi (SP) e Morro Agudo (SP)
 Raylton Alves / Banco de imagens ANA

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Reservatório no bacia do rio Paranapanema
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

As estimativas de evapotranspiração possuem diversas aplicações, sendo a modelagem hidrológica e a agricultura irrigada os principais temas na esfera do planejamento e da gestão dos recursos hídricos.

O modelo SSEBop BR se vale de dados sensoriamento remoto orbital para estimar a evapotranspiração real, portanto, possui limitações temporais e é bastante sensível à cobertura de nuvens. Por outro lado, as análises conduzidas demonstram que o modelo é capaz de retratar a variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração com boa precisão. A acurácia e o poder preditivo do modelo aumentam à medida em que há maior quantidade de imagens livres de nuvens, o que também deverá ocorrer com o lançamento de novos sensores orbitais capazes de obter a temperatura de superfície.

O esforço de parametrização e implementação do modelo SSEBop BR para a realidade brasileira, realizado pela ANA em parceria com o USGS, tem demonstrado ótimos resultados quando comparados com dados medidos em campo e com estimativas de balanço hídrico em áreas irrigadas. A disponibilização dos resultados para todo o território nacional, de 1984 até o presente, por meio de uma ferramenta operacional *online* e de fácil manuseio, cumpre o papel de dar transparência e acessibilidade ao público em geral.

Como em qualquer modelagem, novas validações do modelo são desejáveis, podendo resultar em propostas de novas calibrações e de regionalização da parametrização. Para esse desafio, a ANA permanecerá desenvolvendo o modelo e conta também com a colaboração da comunidade científica e de usuários em geral que façam uso da ferramenta, e que possam compartilhar dados e análises que visem o aprimoramento do modelo e de suas aplicações.

O desenvolvimento de ferramentas como o SSEBop BR auxilia na identificação de áreas especiais de gestão e no levantamento de informações mais detalhadas nessas regiões, em especial quanto à oferta e às demandas por água. Dados mais detalhados subsidiam tomadas de decisão para compatibilização dos usos múltiplos e para as estimativas de riscos dos setores usuários, contribuindo, em última instância, para a segurança hídrica da atividade produtiva.

Mais informações sobre a agricultura irrigada brasileira podem ser acessadas em outras publicações da ANA e em conteúdos do portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (www.snirh.gov.br > Usos da Água).



Plantação irrigada próxima a Parnaíba (PI)
Zig Koch/ Banco de imagens ANA

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017.

_____. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. e SMITH, M. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. FAO, Rome, 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M. e TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380–394, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A. e JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n.6, p. 899–920, 2011.

DIAZ, M. B.; ROBERTI, D. R.; CARNEIRO, J. V.; SOUZA, V. de A. e MORAES, O. L. L. de. Dynamics of the superficial fluxes over a flooded rice paddy in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 276–277, 2019.

FARR, T. G. & KOBRICK, M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, n. 81, p. 583–585, 2000.

FUNK, C. PETERSON, P., LANDSFELD, M. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v.2, 150066. DOI <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>, 2015.

GLENN, E. P.; NEALE, C. M.; HUNSAKER, D. J. e NAGLER, P. L. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 4050–4062, 2011.

GOWDA, P.; CHAVEZ, J.; COLAIZZI, P.; EVETT, S.; HOWELL, T. e TOLK, J. Remote sensing-based energy balance algorithms for mapping ET: Current status and future challenges. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 1639–1644, 2007.

IRMAK, A.; ALLEN, R. G.; KJAERGAARD, J.; HUNTINGTON, J.; KAMBLE, B.; TREZZA, R. e RATCLIFFE, I. Operational Remote Sensing of ET and Challenges. **Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling**, DOI: 10.5772 / 25174, 2012.

IRONS, J. R.; DWYER, J. L. e BARSÍ, J. A. The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 11–21, 2012.

KALMA, J. D.; MCVICAR, T. R. e MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, p. 421–469, 2008.

LI, Z.-L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G. e ZHANG, X. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, v. 9, no. 5, p. 3801–3853, 2009.

LOPES, D. J.; RODRIGUES, L. N.; IMBUZEIRO, H. M. A e PRUSKI, F. F. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, p. 6930–6947, 2019.

McSHANE, R. R.; DRISCOLL, K. P.; e SANDO, R. **A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, n. 5087, 2017.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. e VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50 (3): p. 885–900, 2007.

MECIKALSKI, J. R.; DIAK, G. R.; ANDERSON, M. C. e NORMAN, J. M. Estimating fluxes on continental scales using remotely sensed data in an Atmospheric–Land Exchange Model. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, no. 9, p. 1352–1369, 1999.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P. e HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural**

and Forest Meteorology, v. 77, no. 3–4, p. 263–293, 1995.

PAULA, A. C. P. de; SILVA, C. L. da; RODRIGUES, L. N. e SCHERERWARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, e00739, 2019.

RITTER, A. e MUÑOZ-CARPENA, R. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. **Journal of Hydrology**, v. 480 (1), p.33–45, 2013.

RODELL, M. et al. The Global Land Data Assimilation System. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 85(3), p. 381–394, 2004.

SADLER, E. J.; BAUER, P. J.; BUSSCHER, W.J. e MILLEN, J.A. Site-specific analysis of a droughted corn crop: water use and stress. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 403–410, 2000.

SADO, R. R.; WARREN, M. S.; e ROIG, H. L. Estimativa de irrigação por meio de sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Alto São Marcos. **Rev. Bras. de Cartografia**, vol. 70, n. 3, p. 787–802, 2018.

SAHA, S., et al. **NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products**. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>>. Acesso: 03 maio 2019.

SANTOS, C.; LORITE, I. J.; TASUMI, M., ALLEN, R.G. e FERERES, E. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. **Irrigation Science**, v. 26, n. 3, p. 277–288, 2008.

SAVOCA, M.E.; SENAY, G.B.; MAUPIN, M.A.; KENNY, J.F. e PERRY, C.A. **Actual evapotranspiration modeling using the operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) approach**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, n. 5126, 2013.

SENAY, G. B.; BUDDE, M.; VERDIN, J. P. e MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v.7, p. 979–1000, 2007.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; e VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577–591, 2013.

SOUZA, V. A.; ROBERTI, D. R.; RUHOFF, A. L.; ZIMMER, T.; ADAMATTI, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; DIAZ, M. B.; ALVES, R. C. M.; e MORAES, O. L. L. Evaluation of MOD16 algorithm over irrigated rice paddy using flux tower measurements in Southern Brazil. **Water**, v. 11, 1911, 2019.

SENAY, G.B.; FRIEDRICHS, M.; SINGH, R.K. e VELPURI, N.M. Evaluating Landsat 8

evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sens. Environ**, v. 185: p.171–185, 2016.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; FRIEDRICHS, M.; VELPURI, N. M.; e SINGH, R. K. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98–112, 2017.

SENAY, G. B. Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for Quantifying and Mapping Evapotranspiration. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 34, n. 3, p. 555–566, 2018.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, no. 1, p. 85–100, 2002.

TASUMI, M. et al. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of hydrologic engineering**, v. 13, n. 2, p. 51–63, 2008.

WALTER, I. A. et al. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. **Watershed management and operations management 2000**, p. 1–11, 2000.

XAVIER, A. C.; KING, C. W. e SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644–2659, 2016.

