



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**

**FRANZONE DE JESUS FARIAS**

**MODELAGENS DO BALANÇO HÍDRICO EM LARGA ESCALA COM**  
**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS CLIMÁTICOS:**  
**APLICAÇÕES EM ÁREAS DE CRESCIMENTO AGRÍCOLA DA**  
**REGIÃO COSTEIRA DO NORDESTE DO BRASIL**

**São Cristóvão – SE**

**2023**

**FRANZONE DE JESUS FARIAS**

**MODELAGENS DO BALANÇO HÍDRICO EM LARGA ESCALA COM  
USO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS CLIMÁTICOS:  
APLICAÇÕES EM ÁREAS DE CRESCIMENTO AGRÍCOLA DA  
REGIÃO COSTEIRA DO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Heriberto de Castro Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. Inajá Francisco de Souza

**São Cristóvão – SE**

**2023**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

F224m      Farias, Franzone de Jesus  
Modelagens do balanço hídrico em larga escala com uso de  
sensoriamento remoto e dados climáticos: aplicações em áreas de  
crescimento agrícola da região costeira no Nordeste do Brasil /  
Franzone de Jesus Farias; orientador Antônio Heriberto de Castro  
Teixeira. – São Cristóvão, SE, 2023.  
47 f.: il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade  
Federal de Sergipe, 2023.

1. Recursos hídricos. 2. Balanço hidrológico. 3. Precipitação  
(Meteorologia). 4. Evapotranspiração. 5. Plantas – Relações  
hídricas. 6. Modelos matemáticos. 7. Sensoriamento remoto. I.  
Teixeira, Antônio Heriberto de Castro, orient. II. Título.

CDU 556.12/.14

**FRANZONE DE JESUS FARIAS**

**MODELAGENS DO BALANÇO HÍDRICO EM LARGA ESCALA COM USO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS CLIMÁTICOS: APLICAÇÕES EM  
ÁREAS DE CRESCIMENTO AGRÍCOLA DA REGIÃO COSTEIRA DO NORDESTE  
DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

APROVADO: 24/02/2023

**BANCA EXAMINADORA**



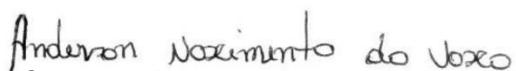
**Prof. Dr. Antônio Heriberto de Castro Teixeira**  
Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos



**Prof. Dr. Marcos Eric Barbosa Brito**  
Universidade Federal de Sergipe – UFS



**Profª. Drª. Heloísa Thaís Rodrigues de Souza**  
Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe – FANESE



**Prof. Dr. Anderson Nascimento do Vasco**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS

**São Cristóvão – SE**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por sempre mostrar que existe a possibilidade de um amanhã melhor mesmo quando o mundo parece desabar sobre mim.

A minha mãe Josefa (Finha), que mesmo perante as suas dificuldades, no momento atual, está sempre me motivando.

As minhas irmãs, Vanecleia (In memoriam), ou simplesmente Cléia, como a chamava, saudades eternas. Sei que se ainda estivesse entre nós, estaria partilhando comigo desta conquista. E, por você, sempre busco forças para sempre continuar. E Verlane, por sempre me ajudar, me motivar nos meus estudos, mesmo não sendo tão presente. Muito obrigado!

Aos meus amigos e colegas de curso, principalmente aos que se tornaram pessoas marcantes para mim: Angelis, Francylle, Jéssica, Kérlen, Marcela, Heitor e Kayc. Por tornarem a rotina da sala de aula em momentos animados e descontraídos.

A todos os professores que colaboraram para a minha formação acadêmica no mestrado. Para representá-los, irei destacar: Adínivia, André Quintão, Inajá ...

A meu também professor e orientador Antônio Heriberto, com quem muito aprendi e tenho grande gratidão, tanto como pessoa como pelo o profissional super dedicado que és. O meu muito obrigado!

A Capes pela bolsa concedida, com certeza ela foi de fundamental importância para minha permanência e conclusão no curso.

Enfim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta colaboraram nesta conquista. Todos os nomes citados tiveram uma significativa colaboração na realização deste. Mais uma vez, meu muito obrigado a todos.

## RESUMO

O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi aplicado com imagens de satélite em conjunto com grades de precipitação (P), para testar o monitoramento dos componentes do balanço hídrico (BH) na região de crescimento agrícola do SEALBA, região de crescimento agrícola limitada pelos estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA), na costa do Nordeste do Brasil, classificando-se os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro dessa região. O produto de reflectância MODIS MOD13Q1 e dados climáticos na escala temporal das imagens de 16 dias, foram usados para a obtenção das evapotranspirações atual (ET) e de referência (ET<sub>0</sub>) ao longo dos anos de 2007 a 2021, analisando-se os resultados médios para o período. Diferenças expressivas em P, ET, balanço hídrico (BH = P - ET) e fração evaporativa (ET<sub>f</sub> = ET/ET<sub>0</sub>) foram constatadas ao longo do ano na região e entre os biomas envolvidos. O período de maior P é em maio, quando os valores para 16 dias são acima de 90 mm em FA e maiores que 70 mm em CT. Considerando a escala anual, o total médio de P em CT, com 772 mm, é 83% daquele para FA (927 mm). Com relação a ET, os maiores valores acontecem entre julho e setembro, quando a média para 16 dias supera 2,70 mm d<sup>-1</sup> no bioma FA e 2,90 mm d<sup>-1</sup> em CT. Na escala anual, os totais médios da ET foram de 760 e 601 mm ano<sup>-1</sup> para os biomas FA e CT dentro do SEALBA, respectivamente com as taxas em CT sendo 79% daquelas para FA. Contabilizando-se P e ET, o bioma CT tem uma disponibilidade de água de chuva ligeiramente superior ao bioma FA, com BH na escala anual maior em 2%, pois mesmo que FA tenha maior P, suas maiores taxas da ET reduzem BH. Valores mais elevados de P com taxas mais baixas da ET de março a agosto, aumentando os valores positivos de BH em ambos os biomas, constata-se viabilidade para a agricultura de sequeiro, bem como maiores possibilidades de armazenamento da água da chuva. Entretanto, de julho a dezembro ocorrem os valores negativos de BH (P < ET), indicando a necessidade de irrigação para os períodos críticos das culturas agrícolas de sequeiro. Inferindo as condições de umidade na zona das raízes através dos valores diários da ET<sub>f</sub>, nota-se que os melhores níveis são de abril a outubro em toda a região do SEALBA, com alguns casos as espécies do bioma CT com melhores condições que aqueles para FA. Os valores mais baixos de ET<sub>f</sub> de outubro a abril em CT, quando comparados com aqueles para FA, estão diretamente relacionadas à menores quantidades de chuvas sob uma maior demanda atmosférica. Cruzando-se os valores de WB com ET<sub>f</sub>, evidencia-se um atraso com relação ao momento em que as chuvas atendem os consumos hídricos com aquele em que a umidade na zona das raízes atinge os níveis ótimos após os períodos mais secos. Mesmo que a modelagem tenha sido realizada para uma região específica do Brasil, a aplicabilidade do uso conjunto do produto MOD13Q1 e dados climáticos interpolados apresenta potencial para implementação de um sistema operacional para monitoramento dos componentes do balanço hídrico em qualquer condição ambiental. As quantificações em larga escala da precipitação, da evapotranspiração e das condições de umidade na zona das raízes, se destacam como de grande auxílio para subsídio de políticas públicas com relação ao manejo e conservação dos recursos hídricos, principalmente nos cenários atuais de mudanças climáticas e de uso da terra, com possibilidade de replicação dos métodos para outras regiões do Brasil e do Mundo, após calibrações dos coeficientes de regressão das equações na modelagem.

**Palavras-chave:** Precipitação, evapotranspiração, recursos hídricos, SAFER, SEALBA.

## ABSTRACT

The SAFER algorithm (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) was applied with satellite images together with precipitation grids, to test the monitoring of water balance (WB) components in the agricultural growth region of SEALBA, agriculture growing region limited by the states of Sergipe (SE), Alagoas (AL), and Bahia (BA), in the coast of Northeast Brazil, classifying the Atlantic Forest (AF) and Caatinga (CT) biomes inside this region. The MODIS MOD13Q1 reflectance product and weather data upscaled to the 16-days satellite timescale were used to retrieve the actual ( $ET$ ) and reference ( $ET_0$ ) evapotranspiration along the years 2007 to 2021, analyzing the average results for this period. Expressive differences on  $P$ ,  $ET$ ,  $WB$  ( $P - ET$ ), and the evaporative fraction ( $ET_f = ET/ET_0$ ) are noticed along the year in the region and between the biomes. The period of the highest  $P$  is in May, when the 16-day values are above 90 mm in AF and larger than 70 mm in CT. Considering the annual scale, the mean total  $P$  in CT, with 772 mm, is 83% of that for AF (927 mm). Regarding  $ET$ , the highest rates occur between July and September, when the 16-day average exceeds  $2.70 \text{ mm d}^{-1}$  in the FA biome and  $2.90 \text{ mm d}^{-1}$  in CT. At the annual scale, the average  $ET$  totals were 760 and 601  $\text{mm yr}^{-1}$  for the AF and CT biomes within SEALBA, respectively, being the rates in CT being 79% of those for AF. Accounting  $P$  and  $ET$ , the CT biome, the CT biome has a slightly rainfall more water availability than the FA biome, with an annual  $WB$  being 2% larger, because even FA having a higher  $P$ , its higher  $ET$  rates reduce  $WB$ . The highest  $P$  values together with the lowest  $ET$  rates from March to August, increasing the positive  $WB$  values ( $P > ET$ ) in both biomes, confirm suitability for rainfed agriculture, as well as high possibilities for rainfall water storage. However, from July to December happen the negative  $WB$  values ( $P < ET$ ), indicating irrigation needs during the critical crop stages. Inferring the root-zone moisture conditions through the daily values of  $ET_f$ , it is noted that the best levels are from April to September in the whole SEALBA region, with some cases the species of the CT biome with better conditions than those for AF. The lowest  $ET_f$  values from October to April in CT. The lower  $ET_f$  values from October to April in CT, when comparing with AF, are directly related to lower amounts of rainfall under greater atmospheric demand. Crossing the  $WB$  and  $ET_f$  values it is evident a delay regarding the moment when the rains satisfy the water consumptions with that when the root-zone moisture levels reach to optimum levels after the driest periods. Although the modelling being carried out in a specific Brazilian region, the suitability of the joint use of the MOD13Q1 product and gridded Weather data shows potential for implementation of an operational system to monitor the water balance components in any environmental conditions. The large-scale accountings of precipitation, evapotranspiration, and the root-zone moisture conditions are highlighted as of strong support for public policies regarding the management and conservation of water resources, mainly under the actual scenarios of climate and land use changes, with possibility of replication of the methods to other regions from Brazil and the World, after calibrations of the modelling regression coefficients.

**Keywords:** Precipitation, evapotranspiration, water resources, SAFER, SEALBA.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Localização da região SEALBA no Nordeste do Brasil envolvendo os estados de Sergipe - SE, Alagoas - AL e Bahia – BA (1a), com detalhes para os biomas (1b) e altitudes com as estações climáticas (1c) usadas na modelagem dos componentes do balanço hídrico. ....                                                                                                                       | 11 |
| <b>Figura 2</b> - Fluxograma da aplicação do algoritmo SAFER com o produto MODIS MOD13Q1 e dados climáticos, na obtenção dos componentes do balanço hídrico no SEALBA para o período de 2007 a 2021. ....                                                                                                                                                                                                   | 14 |
| <b>Figura 3</b> - Valores médios dos parâmetros climáticos para intervalos das imagens MODIS de 16 dias nos biomas do SEALBA entre 2007-2021, em termos de dias julianos (DJ). P – Totais para a precipitação, ET0 – Totais para evapotranspiração de referência, RG – Média da radiação solar global diária, Ta – Média da temperatura diária do ar. Biomas: Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT). .... | 19 |
| <b>Figura 4</b> - Distribuições espaciais dos totais médios de precipitação (P) em termos de dias julianos (DJ), para intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para região do SEALBA. ....                                                                                                                                  | 21 |
| <b>Figura 5</b> - Valores médios e desvios padrões (DP) de precipitação (P), na escala temporal de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021. ....                                                                                                                                                            | 22 |
| <b>Figura 6</b> - Distribuições espaciais das médias diárias de evapotranspiração atual (ET) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA. ....                                                                                                                                                      | 25 |
| <b>Figura 7</b> - Valores médios e desvios padrões (DP) de evapotranspiração atual (ET) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021. ....                                                                                                                                                      | 26 |
| <b>Figura 8</b> - Distribuições espaciais do balanço hídrico (BH) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA. ....                                                                                                                                                                                 | 29 |
| <b>Figura 9</b> - Valores médios e desvios padrões (DP) do balanço hídrico (BH) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021. ....                                                                                                                                                              | 30 |



**Figura 10** - Distribuições espaciais dos valores diários da fração evaporativa ( $ET_{f_{24}}$ ) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA. .... 32

**Figura 11** - Valores médios diários da fração evapotranspirativa ( $ET_{f_{24}}$ ) e desvios padrão (DP), em intervalos 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período 2007 a 2021. ....33

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> - Rede de estações automáticas do INMET utilizada série histórica de 2007 a 2021.<br>..... | 12 |
| <b>Tabela 2</b> - Características das bandas 1 (B1) e 2 (B2) do produto MODIS MOD13Q1.<br>.....            | 13 |

## **LISTA DE ABREVIações**

**AL** – Alagoas

**BA** – Bahia

**BH** – Balanço Hídrico

**CT** – Caatinga

**DJ** – Dias Juliano

**FA** – Floresta Atlântica

**I** – Irrigação

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia

**ISNA** - Índice de Satisfação das Necessidades de Água

**METRIC** – Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration

**MODIS** - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

**NDVI** – Índice da Diferença de Vegetação Normalizado.

**PM** – Penman-Monteith.

**RH** - Requerimento Hídrico

**SAFER** – Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving.

**SD** – Desvios Padrão

**SE** – Sergipe

**SEALBA** – Sergipe, Bahia e Alagoas

**SEBAL** – Surface Energy Balance Algorithm

**SIG** – Sistemas de Informação Geográfica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_0$  – Albedo da superfície

$\Delta$  – Inclinação da relação entre a pressão de saturação do vapor com temperatura do ar

$ET$  – Evapotranspiração Atual

$ET_f$  – Fração evaporativa

$ET_{eq}$  – Evapotranspiração de equilíbrio

$ET_p$  – Evapotranspiração potencial

$ET_0$  – Evapotranspiração de referência

$\epsilon_0$  – Emissividade da superfície

$\epsilon_A$  – Emissividade atmosférica

$G$  – Fluxo de Calor do solo

$\gamma$  – Constante psicrométrica

$GD_{ac}$  – Graus dias acumulados

$e_s$  – Pressão de saturação do vapor

$R_n$  – Saldo de radiação

$T_a$  – Temperatura do ar

$T_0$  – Temperatura da superfície

$\tau_{sw}$  – Transmissividade atmosférica

$R_a$  – Radiação solar no topo da atmosfera

$\rho$  – Reflectância

$u_2$  – Velocidade do vento à 2m de altura

$UR$  – Umidade relativa do ar

## SUMÁRIO

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>                                                              | <b>4</b>  |
| 2.1. Efeito das mudanças climáticas e de uso da terra sobre os Recursos Hídricos.....      | 4         |
| 2.2. Balanço hídrico em larga escala.....                                                  | 6         |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>                                                                 | <b>11</b> |
| 3.1. Área de estudo e estações climáticas.....                                             | 11        |
| 3.2. Características das imagens utilizadas .....                                          | 13        |
| 3.3. Modelagem do balanço hídrico na região do SEALBA.....                                 | 14        |
| 3.3.1. Cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada / Albedo da Superfície ... | 15        |
| 3.3.2. Estimativa da Temperatura da Superfície.....                                        | 15        |
| 3.3.3. Estimativa da Evapotranspiração Atual.....                                          | 17        |
| 3.3.4. Balanço hídrico .....                                                               | 18        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                     | <b>19</b> |
| 4.1. Condições climáticas.....                                                             | 19        |
| 4.2. Dinâmica espacial e temporal da precipitação .....                                    | 20        |
| 4.3. Dinâmica espacial e temporal da evapotranspiração.....                                | 23        |
| 4.4. Dinâmica espacial e temporal dos componentes do balanço hídrico .....                 | 28        |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                                                  | <b>36</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                   | <b>38</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Hodiernamente, observações históricas e modelos, têm demonstrado evidências das alterações nos sistemas climáticos, em várias regiões do mundo, as quais têm sido atribuídas às atividades humanas (IPCC, 2014). Em adição, a expansão da fronteira agrícola vem causando grandes mudanças no uso da terra, nos cursos de água e nos lençóis freáticos (TEIXEIRA et al., 2021a, b). Considerando-se estes cenários, a exploração dos recursos hídricos não deve mais ser considerado apenas sob a ótica local. O uso de sensoriamento remoto com imagens de satélites em conjunto com dados climáticos se destaca para monitoramento dos impactos nesses recursos, quando se almeja o desenvolvimento sustentável (TEIXEIRA et al., 2020a,b, 2021a,b; JARDIM et al., 2022).

As análises dos componentes do balanço hídrico em larga escala, são importantes para o conhecimento físico do meio ambiente, principalmente quando se visa a redução da quantidade adicional na agricultura, proporcionando uma maior disponibilidade de água para manutenção dos agros-ecossistemas (CAI et al., 2002; TEIXEIRA, 2009). Entender as dinâmicas desses componentes é crucial para a restauração ecológica e acesso aos impactos das mudanças climáticas e de uso da terra (YANG et al., 2016; ZHANG et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020a, b). Esse entendimento envolvendo séries de anos destes componentes através das geotecnologias, é relevante para avaliação de anomalias climáticas (VICENTE-SERRANO et al., 2010; LEIVAS et al., 2014; BEGUERÍA et al., 2014; WANG et al., 2016; GOUVEIA et al., 2017; BENTO et al., 2018; ZHANG et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2021a).

As mudanças climáticas e de uso da terra vêm afetando o balanço hídrico em várias bacias hidrográficas, fazendo com que a quantificação da dinâmica dos componentes desse balanço seja crucial para o manejo racional dos recursos hídricos. Os biomas brasileiros Floresta Atlântica e Caatinga, por exemplo, estão sofrendo vários impactos nestes recursos, resultantes de desflorestamentos, queimadas, poluições da água, e agricultura intensiva. Os fatores que afetam o balanço hídrico são precipitação, irrigação, escoamento superficial, infiltração, drenagem, evapotranspiração, a variação do armazenamento da água no solo (RAES et al., 2009).

Alguns estudos de balanço hídrico foram conduzidos através de medições pontuais nos biomas Floresta Atlântica e Caatinga (PEREIRA et al., 2010; SILVA et al., 2017; MARQUES et al., 2020; RODRIGUES et al., 2021), mas poucos esforços têm sido realizados com uso de sensoriamento remoto para comparações entre esses biomas situados dentro da região de crescimento agrícola na costa do Nordeste do Brasil limitadas pelos estados de Sergipe (SE),

Alagoas (AL) e Bahia (BA), denominada SEALBA. Em adição, medições pontuais não são viáveis para comparações dos parâmetros hídricos nessa região, devido à largas variações das condições ambientais, dificultando a implementação de um sistema de monitoramento com uso de uma longa série histórica de dados.

Na zona litorânea do Nordeste do Brasil estão áreas de grande importância hidrológica. Entretanto, intervenções humanas em algumas bacias hidrográficas têm gerado alterações nos fluxos dos rios para o oceano. Estas intervenções afetam os balanços hídricos nos agroecossistemas, proporcionando conflitos entre os diferentes setores, o que têm demandado pesquisas para quantificações dos componentes desses balanços (TEIXEIRA et al., 2020a). Por outro lado, eventos de escassez hídrica impactam a assimilação de carbono pelo aumento da taxa de mortalidade e mudança na composição das espécies vegetais (ZHAO e RUNNING, 2010).

Logo, a produção agrícola nas condições ambientais da região do SEALBA tem ganhado espaço ao longo dos últimos anos na economia, no entanto, apesar do clima favorável tanto para a agricultura irrigada como de sequeiro, a rápida expansão da atividade agropecuária, substituindo os ecossistemas naturais, em conjunto com as mudanças climáticas, pode aumentar os desequilíbrios ambientais. Na porção mais próxima do litoral predomina o bioma Floresta Atlântica e mais para o interior o bioma Caatinga. As áreas de crescimento agrícola substituindo as espécies naturais desses biomas são formadas por propriedades de até 500 hectares, sendo que a faixa de 10 a 50 hectares a classe mais representativa (PROCÓPIO et al., 2019).

A delimitação da aptidão agrícola para o SEALBA se baseou nas ocorrências de médias de precipitações entre 450 mm e 1.400 mm, no período de abril a setembro. As áreas com maior quantidade de chuvas (região litorânea) são ocupadas pelo bioma Floresta Atlântica, enquanto aquelas com menores precipitações (região semiárida) comportam o bioma Caatinga. De acordo com Procópio et al. (2019), esse volume de precipitação foi considerado satisfatório para o cultivo de diversas culturas de grãos (milho, feijão, sorgo, arroz entre outros), com potencial de expansão racional de outras culturas agrícolas. Entretanto, para se saber as reais disponibilidades hídricas, além da precipitação como entrada de água na superfície vegetada, a saída, representada pela evapotranspiração, deve que ser contabilizada.

Tanto no bioma Floresta Atlântica como no bioma Caatinga dentro da região do SEALBA, vêm ocorrendo mudanças climáticas e de uso da terra, sendo que o primeiro apresenta clima tropical úmido, mas com microclimas contrastantes entre vegetação natural e áreas antropizadas (RIBEIRO et al. 2009), enquanto as espécies do bioma Caatinga sofrem períodos mais frequentes de estiagem durante o ano, desenvolvendo resiliência com aumento

das condições de aridez (JARDIM et al. 2022). Para subsídio à expansão racional da agricultura em áreas com potencial agrícola, como no caso do SEALBA, podem ser usados métodos com aplicações de sensoriamento remoto e dados climáticos através de algoritmos.

Devido à sua operacionalidade, a equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) tem sido inserida em algoritmos para quantificação dos componentes do balanço hídrico em distintos ecossistemas (CLEUGH et al., 2007; NAGLER et al., 2013; CONSOLI e VANELA, 2014; CONSOLI et al., 2016; OLIVERA-GUERRA et al., 2018). Quando aplicada com dados climáticos interpolados, a equação apresenta potencial para uso com imagens de satélites com baixas resoluções espaciais (MATEOS et al. 2013; VANELLA et al. 2019). Considerando estes aspectos, o algoritmo SAFER (*Simply Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido com medições simultâneas em campo e por sensoriamento remoto no Nordeste do Brasil, para determinação dos componentes do balanço hídrico (TEIXEIRA 2010).

Após elaboração na região Nordeste do Brasil, o SAFER vem sendo validado em diferentes agros-ecossistemas brasileiros (HERNANDEZ et al., 2014; LEIVAS et al., 2015; 2016a,b; 2017a,b,c; TEIXEIRA et al., 2018 a, b; SILVA et al., 2018 a, b, 2019; ARAÚJO et al., 2019; ALTHOFF et al., 2019; LIMA et al., 2019; SANTOS et al., 2020, VENÂNCIO et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2021a, b). O motivo da escolha do SAFER na pesquisa corrente é que, além da operacionalidade do algoritmo, uma outra importante vantagem com relação a outros, é que para sua aplicação na sua versão mais nova, não há necessidade das bandas termais dos satélites, podendo ser usadas apenas as bandas no visível e infravermelho próximo, mais facilmente disponíveis que as termais (CONSOLI e VANELLA, 2014). Em adição, o uso das bandas termais do sensor MODIS possuem uma resolução espacial de 1 km, cobrindo mais pixels contendo misturas de tipos de superfícies e com maiores contaminações por nuvens.

Objetivando a implementação de um sistema operacional de monitoramento dos componentes do balanço hídrico em áreas de crescimento agrícola, tomando a região do SEALBA como referência, é testada a última versão do algoritmo SAFER com o uso do produto reflectância MODIS MOD13Q1 em conjunto com dados climáticos médios no período de 15 anos (2007 a 2021). A pesquisa, além de contribuir para a disponibilização das informações geradas na escala espacial das imagens de 250 m e temporal de 16 dias, subsidiará o conhecimento das condições hídricas médias e a implementação, refinamento e expansão de sistemas de observação e monitoramento recursos hídricos da região. Espera-se que com o sucesso das aplicações nesta região específica do Nordeste do Brasil replicações dos métodos sejam encorajadas em outras condições ambientais no país e no mundo, através de calibrações simples dos coeficientes de regressão das equações de modelagem.



## **2. ESTADO DA ARTE**

### **2.1. Efeito das mudanças climáticas e de uso da terra sobre os Recursos Hídricos**

Mudanças nos processos que mantêm a estrutura e o funcionamento dos agroecossistemas, como nos fluxos hídricos e nas transferências de energia e de massa podem trazer consequências ambientais negativas ao meio ambiente (TEIXEIRA, 2012). Esforços consideráveis têm sido realizados para assegurar as produções agrícolas sem comprometendo dos suprimentos de água para outros setores (VÖRÖSMARTY et al., 2005). A substituição da vegetação natural por culturas agrícolas promove perdas da biodiversidade, o que tem levado as ações de manejo e conservação dos recursos hídricos associadas com estas perdas (ADAMS et al., 2004). Um agroecossistema diversificado contribui para uma produtividade mais estável, principalmente onde trabalhadores rurais dependem de atividades de subsistência. Por outro lado, o aumento da pobreza pode intensificar a pressão nos recursos hídricos, tendendo a haver uma extrapolação no uso destes recursos (WRI et al., 2005).

Diante dos atuais cenários de mudanças climáticas e de uso da terra, os planos de uso racional dos recursos hídricos devem considerar diagnósticos da situação atual e das tendências de longo prazo, em relação aos componentes do balanço hídrico. Estes diagnósticos são úteis para outorgas dos recursos hídricos, particularmente através da estimativa do uso da água de irrigação em diferentes talhões agrícolas, sendo uma etapa prévia à fiscalização em campo (WARREN et al., 2014). O manejo dos recursos hídricos inadequado, aliado às mudanças climáticas e de uso da terra, pode provocar alterações nas características físicas e químicas da água; bem como biológicas diretas e indiretas (GUNKEL et al., 2007), afetando também o balanço hídrico em larga escala (FOLEY et al., 2005). Estes efeitos podem variar em intensidade, e, em alguns casos, são irreversíveis, como no caso do Mar Báltico (DYBAS, 2005).

Por um lado, o incremento do consumo de água pelas culturas irrigadas em bacias hidrográficas e as alterações climáticas vêm desacelerando os fluxos hídricos de vários grandes rios do mundo e, em alguns casos, sem descargas para o oceano (HE et al., 2005); por outro lado, o balanço hídrico é modificado com as alterações climáticas e inclusão de novas culturas (TEIXEIRA et al., 2021a, b). A extração da água dos rios pela evapotranspiração incremental e construção de estruturas hidráulicas altera os regimes hídricos, com declínios substanciais das descargas no oceano. Os efeitos negativos incluem a perda das opções do modo de subsistência, fragmentação e destruição dos habitats naturais, mudanças na composição das comunidades

aquáticas, extinção de espécies e problemas de saúde provenientes de água estagnada (VÖRÖSMARTY et al., 2005).

De acordo com Smakhtin et al., (2004), os fluxos requeridos para a manutenção dos ecossistemas aquáticos não estão adequados em muitos rios do mundo. Análises de dados históricos de 145 maiores rios indicaram um declínio destas descargas em um quinto dos casos (WALLING e FANG, 2003). Como resultado há um rápido avanço de uma frente salina do mar para o continente, com consequências negativas na comunidade de manguezais, habitat dos peixes, plantas, e para a subsistência humana que depende destes recursos naturais (RAHMAN et al., 2000). Em regiões de crescimento agrícola, a evapotranspiração tem sido modificada bruscamente com a inclusão de novas cultivos. Por outro lado, a capacidade das mudanças de uso da terra influenciar as condições climáticas através das alterações no balanço hídrico tem sido amplamente reconhecida (GORDON et al., 2005). Por exemplo, Teixeira et al., (2012a), reportaram incrementos dos fluxos hídricos na ordem de 390%, devido à substituição das espécies da Caatinga pelas culturas irrigadas na região semiárida do Nordeste do Brasil.

Para quantificação dos componentes do balanço hídrico, há necessidade de estimativas e/ou medições da precipitação e evapotranspiração. Portanto, para a aplicação dos algoritmos, torna-se importante o conhecimento dos diferentes conceitos de evapotranspiração. A evapotranspiração atual (ET) envolve todas as condições da superfície vegetada. A evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) se refere a culturas em crescimento ativo em largas áreas sob condições ótimas de umidade do solo, atingindo os níveis de produção ideais. A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) representa a transferência de vapor d'água de uma superfície de referência, que pode ser a grama sem restrição hídrica (ALLEN et al., 1998).

Franco et al., (2014) constataram um aumento de 153% na ET em agros-ecossistemas constituídos de pastagens, cana-de-açúcar dependente de chuvas, culturas irrigadas e vegetação natural no Noroeste de São Paulo. Também nessa última região, ÑUNEZ et al., (2016), concluíram que a razão principal da heterogeneidade espacial nos parâmetros hídricos, foram os diferentes graus de ausência da mata ciliar e de nascentes sem proteção.

Andrade et al., (2014), através de medições por sensoriamento remoto, com o produto MODIS MOD13Q1, determinaram a ET sob diferentes graus de degradação em pastagens baseados nas regressões entre os valores máximos e médios do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), para um período de 10 anos, na bacia hidrográfica do Alto Tocantins, estado de Goiás. Os autores concluíram que os fluxos hídricos em pastagens degradadas foram inferiores em até 22,2% quando comparados com aqueles provenientes das pastagens não degradadas.

Assim, para Silva et al., (2017) usando medições por satélites para a estimativa dos parâmetros hídricos em vegetação do bioma Cerrado, reportaram que as áreas antrópicas apresentaram os maiores fluxos hídricos entre a superfície e a baixa atmosfera com a introdução da silvicultura, quando comparadas com aquelas de vegetação natural.

Para mais, Silva et al., (2018a) avaliaram a distribuição espacial e temporal dos parâmetros hídricos com aplicação do SAFER no Aquífero Guarani, estado de São Paulo. Utilizando estações climáticas do INMET e imagens MODIS, constataram impactos na recarga de aquífero e diminuição no nível do lençol freático, sendo maiores na região rural na região de Ribeirão Preto quando comparada à região de Paranapanema, com uma provável explicação o fato da primeira região ter predomínio de plantio de cana-de-açúcar e a segunda de eucaliptos.

Nesta perspectiva, Lopes et al., (2020) aplicaram o SAFER com imagens MODIS para analisar as variações espaço-temporais de parâmetros hídricos em áreas de produção agropecuária do município de Maracaju, MS. Os autores consideraram as seguintes classes amostrais: agricultura, água, mata, pastagem e solo exposto, percebendo variações dos fluxos hídricos tanto dentro de uma classe quanto entre elas.

Modelagens dos componentes do balanço hídrico, portanto, devem considerar a interação do uso da terra, água e ecossistemas para um conhecimento equilibrado entre os diferentes processos e produtos. Para tal conhecimento, há necessidade do desenvolvimento de ferramentas como o sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (ARAÚJO et al., 2019; SILVA et al., 2019; SANTOS et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2020 a, b; VENÂNCIO et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2021a, b). Diante do exposto, percebe-se a importância da formação de recursos humanos para aplicação de algoritmos em modelagens dos componentes do balanço hídrico em larga escala, visando o manejo racional dos recursos hídricos para subsídio aos órgãos gestores (ANA, 2018).

## **2.2. Balanço hídrico em larga escala**

Os fenômenos do mundo real são armazenados no computador, através de modelagens, cujos dois modelos básicos consistem em entidades ou campos. No primeiro caso, a modelagem é realizada através de objetos de forma descontínua no espaço, descritos por seus atributos ou propriedades. No segundo, a modelagem é baseada em campos, sendo mais adequada a fenômenos de variação contínua no espaço (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Medições de campo visando-se a determinação dos componentes do balanço hídrico em diferentes agros-ecossistemas dos biomas Floresta Atlântica e Caatinga foram realizadas por

diferentes métodos no Brasil (PEREIRA et al., 2010; SILVA et al., 2017; MARQUES et al., 2020; RODRIGUES et al., 2021). Estas, entretanto falham na representação espacial destes componentes, devido a diferentes quantidades de precipitação, irrigação, características hidráulicas dos solos, tipos e densidades da vegetação. Por outro lado, suas mudanças temporais podem ser atribuídas às condições de tempo e ao desenvolvimento das plantas (TEIXEIRA et al., 2021b).

Para análises precisas em largas escalas dos componentes dos balanços hídricos, estas devem se apoiar em técnicas que tenham base física como modelagens através de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas. Todavia, as ferramentas utilizadas devem ser simples o bastante para manter a operacionalidade dos algoritmos, proporcionando uma melhor compreensão da dinâmica dos parâmetros hídricos e de vegetação. Estes algoritmos são usados com diferentes objetivos, com interesse crescente em pesquisas para quantificação de parâmetros biofísicos, envolvendo as relações água-solo-planta-atmosfera (PONZONI et al., 2012).

Os algoritmos desenvolvidos previamente para quantificação dos componentes do balanço hídrico, apresentam vantagens e desvantagens. Os mais amplamente utilizados são o SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (BASTIAANSEN et al., 1998) e o METRIC - *Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration* (ALLEN et al., 2007). Para aplicação destes algoritmos não são necessárias classificações de uso da terra, entretanto a maior dificuldade de aplicação deles para obtenção da dinâmica dos componentes do balanço hídrico ao longo do ano é a dificuldade de evapotranspiração nula durante o período chuvoso, condição necessária para determinação do pixel seco.

A fim de propósitos operacionais, a equação de Penman-Monteith tem sido inserida em algoritmos na determinação dos componentes do balanço hídrico (CLEUGH et al., 2007; NAGLER et al., 2013). O uso de métodos baseados nessa equação em conjunto com processos de interpolação de dados climáticos é um meio apropriado para imagens de satélites com baixas resoluções espaciais, permitindo o acompanhamento dos ciclos das culturas agrícolas.

Considerando a operacionalidade da equação de Penman-Monteith para aplicações em largas escalas, o algoritmo SAFER - *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (TEIXEIRA, 2010), foi usado na atual pesquisa. O algoritmo foi elaborado através de medições simultâneas por sensoriamento remoto e estações climáticas, para determinação dos componentes do balanço hídrico. Na aplicação do SAFER, não há necessidade nem da classificação de uso da terra nem da determinação de pixel seco nas imagens de satélites.

O SAFER foi validado em uma grande faixa de agros-ecossistemas do Brasil, incluindo a região Nordeste do Brasil. Em adição, com a atual versão do algoritmo, é possível a estimativa da temperatura da superfície ( $T_0$ ) com e sem as bandas termais, permitindo o acompanhamento quinzenal dos componentes dos balanços de energia e de água, nos cenários atuais e históricos, na escala espacial de 250 m, usando o produto reflectância do satélite MODIS, com apenas as bandas 1 e 2 do sensor (ARAÚJO et al., 2019; SILVA et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2020a, b; 2021a, b).

Os componentes do balanço hídrico baseados nos diferentes conceitos de evapotranspiração podem ser elaborados através da união de dados obtidos por sensoriamento remoto e por pluviômetros. No caso de condições irrigadas, adiciona-se a irrigação (I) à precipitação (P) como uma entrada adicional de água ao sistema cultivado. Estes indicadores são úteis tanto para o manejo de irrigação como para a determinação dos diferentes graus de aptidão climática em zoneamentos agroclimáticos (TEIXEIRA et al., 2012b; 2014 a,b).

A fração evapotranspirativa ( $ET_f = ET/ET_0$ ) em culturas agrícolas sem estresse hídrico nem ambiental, é considerada como o coeficiente de cultura -  $K_c$  (ALLEN et al., 1998), podendo ser obtido tanto com experimentos de campo e extrapolados em larga escala (TEIXEIRA et al., 2016a; 2018c), como por sensoriamento remoto (KAMBLE et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2014c, 2015; 2021b). Em vegetação natural, essa fração pode caracterizar as condições de umidade na zona das raízes das plantas, detectando-se condições de estresse hídrico (LU et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2017; 2018a; 2020a).

Aplicando a  $ET_f$  com a utilização do SAFER no produto MODIS MOD13Q1 ao longo das fases da cultura da cana de açúcar, cultivada na dependência de chuvas no nordeste do Estado de São Paulo, TEIXEIRA et al., (2016b) perceberam benefícios da irrigação suplementar durante a fase de crescimento ativo da cultura.

Teixeira et al., (2016c), de posse de imagens MODIS determinaram os componentes do balanço hídrico na bacia hidrográfica do Rio Paracatu, Noroeste de Minas Gerais. Os valores médios de  $ET_f$  sob condições ótimas de umidade do solo permitiram a elaboração do modelo relacionando o  $K_c$  com os graus dias acumulados ( $GD_{ac}$ ) para a cultura do milho podendo ser usado posteriormente no manejo de água pelos produtores.

Ñunez et al., (2016) determinaram a dinâmica dos componentes do balanço hídrico com a aplicação do SAFER na bacia hidrográfica de Cabeceira Comprida, Noroeste de São Paulo. Os autores reportaram variações espaciais e temporais desses componentes, sendo as espécies vegetais nas vizinhanças do córrego beneficiadas pelos fluxos hídricos laterais para as zonas das suas raízes.

Bispo et al., (2017) estimaram o balanço hídrico para a cultura da cana-de-açúcar no Noroeste de São Paulo. Os valores do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), definido como a relação da evapotranspiração atual para a de referência ( $ET/ET_p$ ), indicaram que as fases de perfilhamento e crescimento de colmos são os períodos mais críticos com relação ao requerimento hídrico (RH), necessitando de irrigação suplementar nessas fases para evitar decréscimo da produtividade.

Silva Junior et al., (2018) obtiveram o balanço hídrico climático no noroeste de São Paulo, para determinação dos meses com maior deficiência hídrica para a agricultura de sequeiro nessa região. Os resultados indicaram os meses de agosto, setembro e outubro como os mais críticos, quando as precipitações pluviométricas caem ao mesmo tempo em que a demanda atmosférica se eleva.

Com o objetivo de recomendar o melhor período para a semeadura do feijoeiro no noroeste de São Paulo, Avilez et al., (2018) usando grades de dados climáticos, analisaram o balanço de água no solo. Os autores constataram que semeaduras a partir do mês de maio até agosto são desfavoráveis considerando-se o elevado requerimento hídrico (RH) coincidindo com o período de redução das chuvas.

Araújo et al., (2019) avaliaram o desempenho do SAFER no perímetro de irrigação Pontal Sul em Petrolina-PE, para modelagens dos componentes do balanço hídrico através da união de imagens MODIS e dados climáticos em uma série histórica de dados. As maiores taxas da ET ocorreram nas condições de elevados níveis de umidade na zona radicular das culturas irrigadas, proporcionadas pelas chuvas e/ou irrigações, com máximos no período chuvoso.

Avilez et al., (2020) determinaram os valores de coeficiente de cultura ( $K_c$ ) através da razão  $ET_p/ET_0$  nas diferentes fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar, com a aplicação do algoritmo SAFER em imagens do satélite Landsat 8. A curva de  $K_c$  apresentou coerência com aquelas reportadas na literatura, entretanto com valores inferiores aos localmente recomendados para o manejo de irrigação da cultura.

Andrade et al., (2020) aplicaram o SAFER com imagens MODIS para estimativa de parâmetros hídricos na bacia do rio Paracatu. Em algumas áreas irrigadas, foram observadas taxas da ET representando mais que o dobro do valor médio de toda a bacia. Os autores concluíram que, em geral, o algoritmo apresentou resultados satisfatórios na escala de bacia hidrográfica com potencial para ser aplicada no planejamento e monitoramento da demanda hídrica.

Teixeira et al., (2020b) modelaram os componentes do balanço hídrico visando o monitoramento de áreas agrícolas na área do circuito de frutas em São Paulo. Os resultados

mostraram a aplicabilidade do algoritmo para quantificar a dinâmica desses componentes em uma escala de tempo de 16 dias e resolução espacial de 250 m nas áreas que experimentam mudanças climáticas e de uso da terra, combinando-se dados climáticos e imagens MODIS.

Rampazo et al., (2020) aplicaram o SAFER em imagens MODIS para a modelagem dos componentes do balanço hídrico na cultura da cana-de-açúcar na mesorregião de Bauru, São Paulo. Os autores reportaram maiores taxas da ET na estação chuvosa, coincidindo com o estágio de crescimento ativo da cultura, enquanto as menores ocorreram na estação seca, envolvendo as fases fenológicas de emergência e maturação.

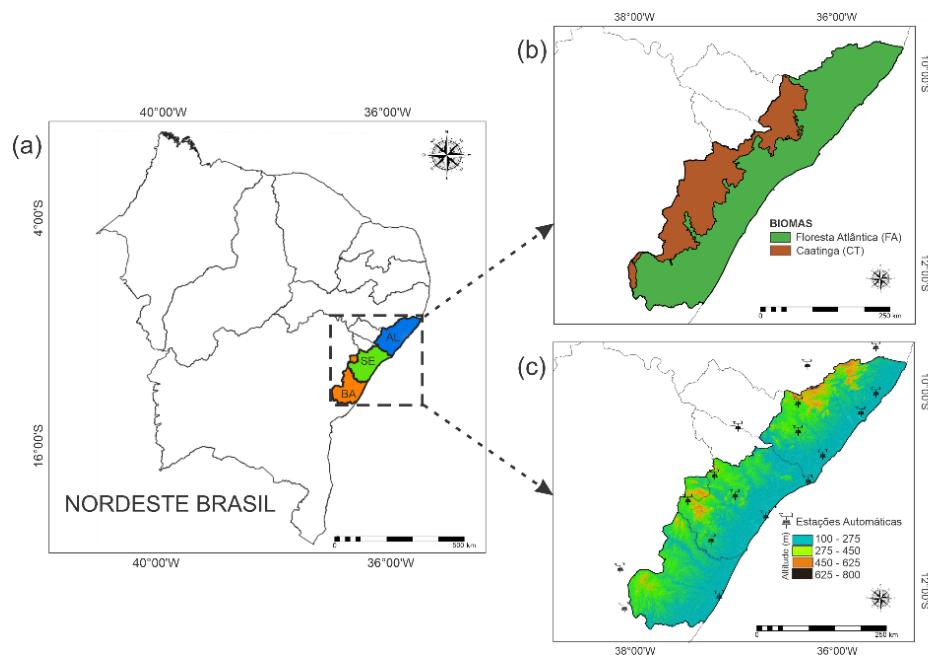
De acordo com os vários estudos já realizados em diferentes agros-ecossistemas brasileiros, evidencia-se que a combinação de imagens de satélites e dados climáticos com aplicação do algoritmo SAFER é tecnicamente viável para a obtenção dos componentes do balanço hídrico em diferentes escalas espaciais e temporais. A aplicação do algoritmo usando-se imagens de altas resoluções fica limitada, quando se visa o monitoramento da dinâmica destes componentes ao longo dos anos, devido às frequentes contaminações das imagens por nuvens. Para esta finalidade destacou-se nas pesquisas, o método de obtenção da temperatura da superfície sem a banda termal com o produto MODIS MOD13Q1, que tem resolução espacial de 250 m, fornecendo 23 imagens a cada 16 dias por ano.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo e estações climáticas

A região de estudo engloba áreas de crescimento agrícola na região litorânea do Nordeste do Brasil, envolvendo os estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA), denominada SEALBA, um acrônimo formado pelas siglas desses três estados. A Figura 1 apresenta a localização do SEALBA nos respectivos estados no Nordeste do Brasil (Figura 1a), biomas de acordo com os Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE - [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)) (Figura 1b) e altitudes com as 17 estações climáticas usadas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inmet>) (Figura 1c).

**Figura 1** – Localização da região SEALBA no Nordeste do Brasil envolvendo os estados de Sergipe - SE, Alagoas - AL e Bahia – BA (1a), com detalhes para os biomas (1b) e altitudes com as estações climáticas (1c) usadas na modelagem dos componentes do balanço hídrico.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 1 descreve os detalhes de cada estação do INMET utilizada localizadas nos estados de Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, cujos dados foram interpolados.

**Tabela 1.** Rede de estações automáticas do INMET utilizada série histórica de 2007 a 2021.



| Município            | Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) |
|----------------------|---------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Pernambuco</b>    |         |              |               |              |
| Garanhuns            | A322    | -8.91        | -36.49        | 828          |
| Palmares             | A357    | -8.67        | -35.57        | 164          |
| <b>Alagoas</b>       |         |              |               |              |
| Arapiraca            | A353    | -9.8         | -36.62        | 237          |
| Coruripe             | A355    | -10.13       | -36.29        | 82           |
| Maceió               | A303    | -9.55        | -35.77        | 84           |
| Palmeira dos Índios  | A327    | -9.42        | -36.62        | 278          |
| Pão de Açúcar        | A323    | -9.75        | -37.43        | 21           |
| São Luís do Quitunde | A356    | -9.29        | -35.57        | 14           |
| <b>Sergipe</b>       |         |              |               |              |
| Aracaju              | A409    | -10.95       | -37.05        | 4            |
| Brejo Grande         | A421    | -10.47       | -36.48        | 6            |
| Carira               | A420    | -10.4        | -37.75        | 290          |
| Itabaiana            | A451    | -10.67       | -37.47        | 0            |
| Itabaianinha         | A417    | -11.27       | -37.8         | 205          |
| Poço Verde           | A419    | -10.74       | -38.11        | 367          |
| <b>Bahia</b>         |         |              |               |              |
| Conde                | A431    | -12.04       | -37.68        | 32           |
| Feira de Santana     | A413    | -12.2        | -38.97        | 230          |
| Serrinha             | A441    | -11.66       | -39.02        | 338          |

**Fonte:** Instituto Nacional de Meteorologia, 2023. Organização: Autor, 2023.

Contabilizado-se os pixels de 250 x 250 m das imagens MODIS, 33% do SEALBA está em Sergipe (2,0 Mha), 37% em Alagoas (2,3 Mha) e 30% na Bahia (1,9 Mha), totalizando 6,2 Mha. A região envolve os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT).

A Floresta Atlântica (FA), com 3,9 Mha contabilizados, ocupa 63% da região do SEALBA, em uma porção mais próxima do litoral. Esse bioma é caracterizado pela presença de vegetação florestal, sendo prevaletentes a floresta ombrófila densa e aberta, a floresta estacional semidecidual e ecossistemas associados na baixada litorânea (restinga, mangue e apicum). O clima é tropical úmido, ocasionado pelas massas de ar úmidas vindas do Oceano Atlântico, com temperaturas médias e umidade do ar elevadas durante todo o ano e com chuvas regulares e bem distribuídas (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2023).

O bioma Caatinga, com 2,3 Mha contabilizados, representa 37% do SEALBA, apresentando uma flora composta por árvores e arbustos com características que permitem a adaptação às condições climáticas adversas. A região apresenta médias de temperaturas anuais elevadas, com escassez e menores quantidades de chuvas que no bioma FA, com períodos de seca ao longo do ano (BEUCHLE et al., 2015).

Tanto o bioma Floresta Atlântica (FA) quanto o bioma Caatinga (CT) vem sofrendo alteração do uso da terra devido a inserção de diversos cultivos como: frutíferas, sucroenergéticas, grãos, silvicultura e pastagem (PROCÓPIO et al., 2019).

Os dados climáticos que entraram na modelagem dos componentes do balanço hídrico em larga escala foram a radiação solar global ( $R_G$ ), a temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa do ar ( $U_R$ ), a velocidade do vento ( $u$ ). Esses dados foram usados nos cálculos da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e atual ( $ET$ ), as quais juntamente com dados de precipitação pluviométrica ( $P$ ) permitiram a contabilidade do balanço hídrico (TEIXEIRA et al., 2021a, b). Com a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) os dados climáticos entraram na modelagem juntamente com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, contribuindo para uma maior caracterização espacial dos componentes desse balanço.

### 3.2. Características das imagens utilizadas

Para o cálculo dos parâmetros envolvidos na obtenção dos componentes do balanço hídrico em larga escala no SEALBA, foram usadas as bandas 1 e 2 do sensor MODIS (produto reflectância MOD13Q1) baixado do site do EARTHDATA App EEARS (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>), em conjunto com as estações climáticas do INMET. A Tabela 1 apresenta as características das bandas 1 e 2 do produto MODIS MOD13Q1 com respectivos comprimentos de onda, faixa de varredura, faixas espectrais, e resoluções espacial e temporal.

**Tabela 2.** Características das bandas 1 (B1) e 2 (B2) do produto MODIS MOD13Q1.

| Sensor | Bandas | Faixa de Varredura (km) | Faixas Espectrais ( $\mu\text{m}$ ) | Resolução Espacial (m) | Resolução temporal (dias) |
|--------|--------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| MODIS  | B1     | 2.330                   | 0,62-0,67                           | 250                    | 16                        |
|        | B2     |                         | 0,84-0,87                           |                        |                           |

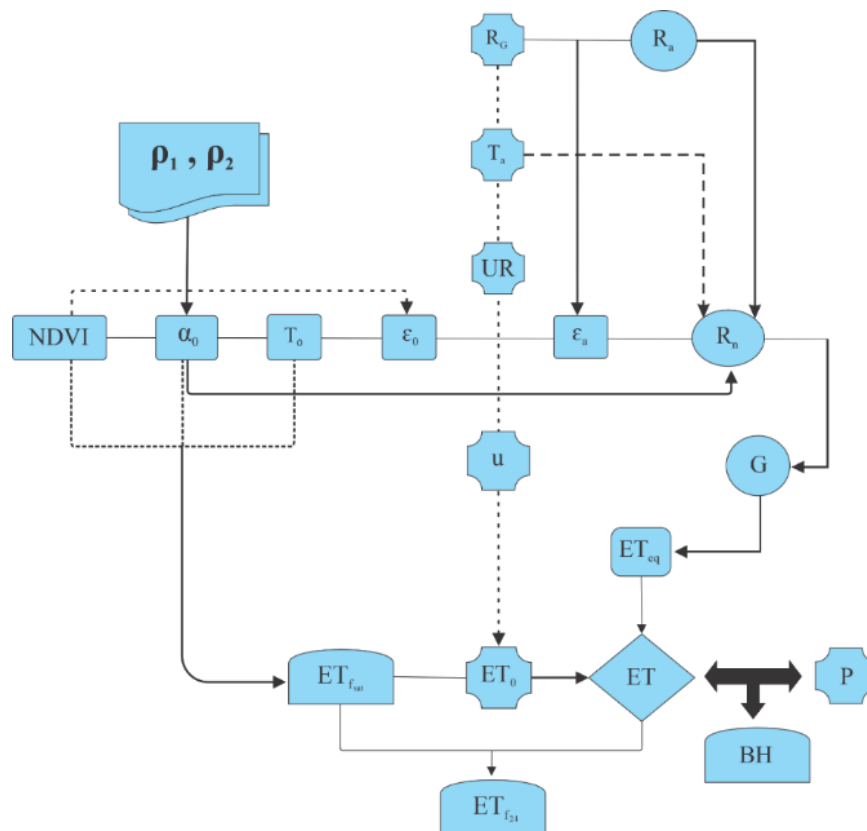
Fonte: Autoria própria (2023).

MODIS é um instrumento a bordo das plataformas Terra e Aqua com 36 bandas espectrais entre 0,405 e 14,385  $\mu\text{m}$ , que coleta dados em três resoluções espaciais (250 m, 500 m e 1000 m). O produto MOD13Q1 com a resolução espaço temporal de 250 m e 16 dias, respectivamente, fornece 23 imagens de reflectâncias livres de nuvens ao longo de cada ano. A modelagem foi realizada com a versão atual do SAFER usando-se apenas as bandas 1 e 2 em conjunto com dados climáticos, quantificando-se a dinâmica dos componentes do balanço hídrico, considerando-se o período de 2007 a 2021, sob diferentes condições termo hidrológicas ao longo dos anos.

### 3.3. Modelagem do balanço hídrico na região do SEALBA

A Figura 2 apresenta uma visão esquemática do algoritmo SAFER, aplicado com o produto MODIS MOD13Q1 e dados climáticos, na obtenção dos componentes do balanço hídrico na região do SEALBA para o período de 2007 a 2021.

**Figura 2.** Fluxograma da aplicação do algoritmo SAFER com o produto MODIS MOD13Q1 e dados climáticos, na obtenção dos componentes do balanço hídrico no SEALBA para o período de 2007 a 2021.



Fonte: Autoria própria (2023).

**Nota:**  $\rho_{1,2}$  – reflectâncias das bandas 1 and 2, respectively; NDVI – Índice de vegetação por diferença normalizada;  $\alpha_0$  – Albedo da superfície;  $T_0$  – Temperatura da superfície;  $R_G$  – Radiação solar global incidente;  $R_a$  – Radiação solar no topo da atmosfera;  $T_a$  – Temperatura do ar; UR – Umidade relativa do ar;  $u_2$  – Velocidade do vento a 2m de altura;  $ET_{f_{sat}}$  – Fração evapotranspirativa no momento da passagem do satélite;  $ET_0$  – Evapotranspiração de referência;  $\varepsilon_0$  – Emissividade da superfície;  $\varepsilon_a$  – Emissividade da atmosfera;  $R_n$  – Saldo de radiação;  $G$  – Fluxo de calor no interior da superfície;  $ET_{eq}$  – Evapotranspiração de equilíbrio;  $ET$  – Evapotranspiração atual;  $P$  – Precipitação; BH – Balanço hídrico;  $ET_{f_{24}}$  – Fração evapotranspirativa diária.

### 3.3.1. Cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada / Albedo da Superfície

Após serem baixadas as imagens de reflectância ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) do produto MOD13Q1 e realizados os cortes para a região do SEALBA, os valores dos pixels do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), usado para consideração da cobertura de superfície e das condições de umidade na zona das raízes das plantas foram calculados como:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

onde  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são respectivamente as reflectâncias MODIS das bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo)

Seguindo a Figura 2, o albedo da superfície ( $\alpha_0$ ) foi quantificado como:

$$\alpha_0 = a + b\rho_1 + c\rho_2 \quad (2)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes de regressão. Em agros-ecossistemas mistos do Nordeste do Brasil, os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  foram 0,08, 0,41 e 0,14, envolvendo cultivos irrigados e vegetação natural sob condições hidrológicas contrastantes (TEIXEIRA et al., 2008, 2013), que podem ser calibrados para condições ambientais específicas caso seja desejável maior precisão para  $\alpha_0$ .

### 3.3.2. Estimativa da Temperatura da Superfície

Para a estimativa da temperatura da superfície ( $T_0$ ) sem as bandas termais, foi feita uma combinação com dados obtidos nas estações climáticas e por sensoriamento remoto para o balanço de radiação. O saldo de radiação ( $R_n$ ) foi então estimado através da equação de Slob (De BRUIN 1987):

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_G - a_L \tau_{sw} \quad (3)$$

onde  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica de ondas curtas ( $R_G/R_a$ ) e  $a_L$  é um coeficiente de regressão, aqui extrapolado com os valores dos pixels da temperatura do ar ( $T_a$ ).

$$a_L = a_T T_a + b_T \quad (4)$$

e os coeficientes de regressão  $a_T$  e  $b_T$  para a região Nordeste do Brasil foram 6,8 e -40, respectivamente, mas podem ser ajustados para condições ambientais específicas (TEIXEIRA, 2010).

A emissividade atmosférica ( $\epsilon_A$ ) foi calculada como:

$$\epsilon_A = a_A (\ln \tau_{sw})^{b_A} \quad (5)$$

onde  $a_A$  e  $b_A$  são coeficientes de regressão, que são relatados como 0,94 e 0,11, respectivamente, para o Nordeste do Brasil, que podem ser calibrados com medições de balanço de radiação de campo para condições ambientais específicas (TEIXEIRA et al., 2008, 2013).

A emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ ) foi estimada como:

$$\epsilon_0 = a_0 \ln NDVI + b_0 \quad (6)$$

onde  $a_0$  e  $b_0$  são coeficientes de regressão, que foram relatados como 0,06 e 1,00 para agrossistemas da região Nordeste do Brasil, mas podem ser adquiridos para condições ambientais específicas através de medições simultâneas dos componentes do balanço de radiação em campo e do NDVI por sensoriamento remoto (TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2008).

Pelo método residual, seguindo o princípio físico da mínima de Stefan-Boltzmann, a temperatura da superfície ( $T_0$ ) foi estimada como:

$$T_0 = \frac{\sqrt[4]{R_G (1 - \alpha_0) + \sigma \epsilon_a T_a^4 - R_n}}{\sigma \epsilon_0} \quad (7)$$

onde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

### 3.3.3. Estimativa da Evapotranspiração Atual

Para estimativa da ET, sua razão para  $ET_0$ , ou seja, fração evapotranspirativa para o momento da passagem do satélite ( $ET_{f_{sat}}$ ), foi modelada:

$$ET_{f_{sat}} = \exp \left[ a_{sf} + b_{sf} \left( \frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (8)$$

onde os coeficientes de regressão  $a_{sf}$  e  $b_{sf}$  encontrados para o como 1,90 e -0,008 para o Nordeste do Brasil (TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2008), podendo ser calibrados através de medições de campo da ET e  $ET_0$  e dos parâmetros obtidos por sensoriamento remoto  $\alpha_0$ , NDVI e  $T_0$ , considerando superfícies com contrastes hidrológicos (VENÂNCIO et al., 2021; SAFRE et al., 2022).

A Eq. 8 não funciona para corpos d'água ou em misturas de solo com água ( $NDVI < 0$ ), portanto, o conceito de evapotranspiração de equilíbrio -  $ET_{eq}$  (RAUPASCH, 2001) é inserido no algoritmo SAFER para essas circunstâncias:

$$ET_{eq} = 0.035 \left( \frac{\Delta (R_n - G)}{\Delta + \gamma} \right) \quad (9)$$

onde  $\Delta$  é a inclinação da curva que relaciona a pressão de vapor de saturação ( $e_s$ ) e  $T_a$ ,  $\gamma$  é a constante psicrométrica, e  $G$  é o fluxo de calor do solo estimado de acordo com a equação abaixo:

$$\frac{G}{R_n} = a_G \exp(b_G \alpha_0) \quad (10)$$

sendo 3,98 e -25,47 os coeficientes de regressão  $a_G$  e  $b_G$ , respectivamente, para a região Nordeste do Brasil, podendo ser calibrados com medições simultâneas de balanço de energia de campo para outras condições ambientais (TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2008).

Considerando que os valores instantâneos da fração evaporativa não diferem muito daqueles para 24 horas (ALLEN et al., 2007), através das funções condicionais aplicadas aos valores NDVI (TEIXEIRA et al., 2013), os valores diários de pixel ET foram estimados como:

$$ET = ET_{f_{sat}} \cdot ET_0 \text{ ou } ET_{eq} \quad (11)$$

onde  $ET_0$  foi calculada usando dados climáticos diários em grade de radiação solar global incidente ( $R_G$ ), temperatura média do ar ( $T_a$ ), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento à 2 metros de altura ( $u_2$ ) (ALLEN et al., 1998).

### 3.3.4. Balanço hídrico

Após a obtenção da ET em larga escala, incluindo corpos de água e misturas de água e solo, a fração evapotranspirativa para 24 horas ( $ET_{f_{24}}$ ), foi considerada como indicador da umidade na zona das raízes na escala diária:

$$ET_{f_{24}} = \frac{ET}{ET_0} \quad (12)$$

O balanço hídrico (WB) foi considerado como:

$$WB = P - ET \quad (13)$$

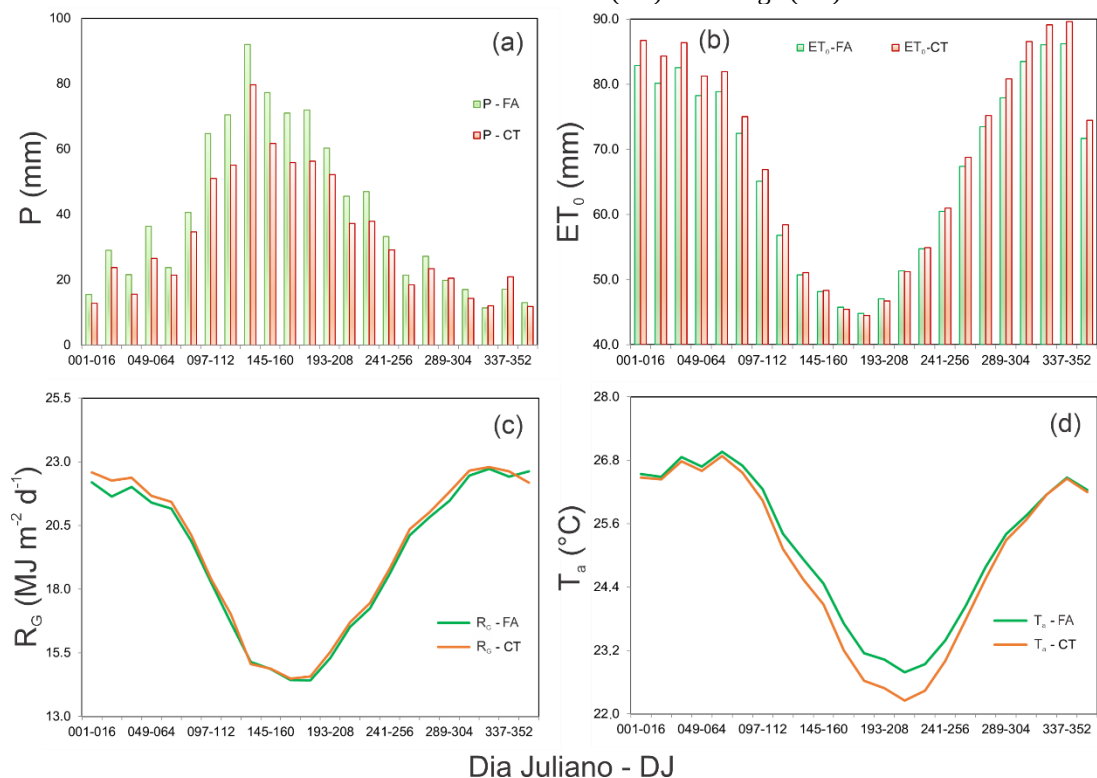
onde P são dados de precipitação em grade da rede de estações climáticas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Condições climáticas

A Figura 3 apresenta os valores médios para intervalos das imagens MODIS de 16 dias dos parâmetros climáticos nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT). no período de 2007 a 2021, em termos de dias julianos (DJ).

**Figura 3.** Valores médios dos parâmetros climáticos para intervalos das imagens MODIS de 16 dias nos biomas do SEALBA entre 2007-2021, em termos de dias julianos (DJ). P – Totais para a precipitação,  $ET_0$  – Totais para evapotranspiração de referência,  $R_G$  – Média da radiação solar global diária,  $T_a$  – Média da temperatura diária do ar. Biomas: Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT).



Fonte: Autoria própria (2023).

Para ambos os biomas, em geral, houve irregularidade na distribuição das chuvas, concentradas no meio do ano (Figura 3a). O período de maior precipitação (P) foi em maio (DJ: 129-144) quando os valores para 16 dias são acima de 90 mm na Floresta Atlântica (FA) e maiores que 70 mm na Caatinga (CT). As menores taxas de P, com totais médios abaixo de 12 mm em ambos os biomas são em dezembro (DJ: 321-336). Considerando a escala anual, o total médio de P em CT, com 771 mm ano<sup>-1</sup>, foram 83% daquele para FA (927 mm ano<sup>-1</sup>).

Com relação à demanda atmosférica (Figura 3b), o período com os maiores valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) coincidem com menores precipitações (Figura 3a) em



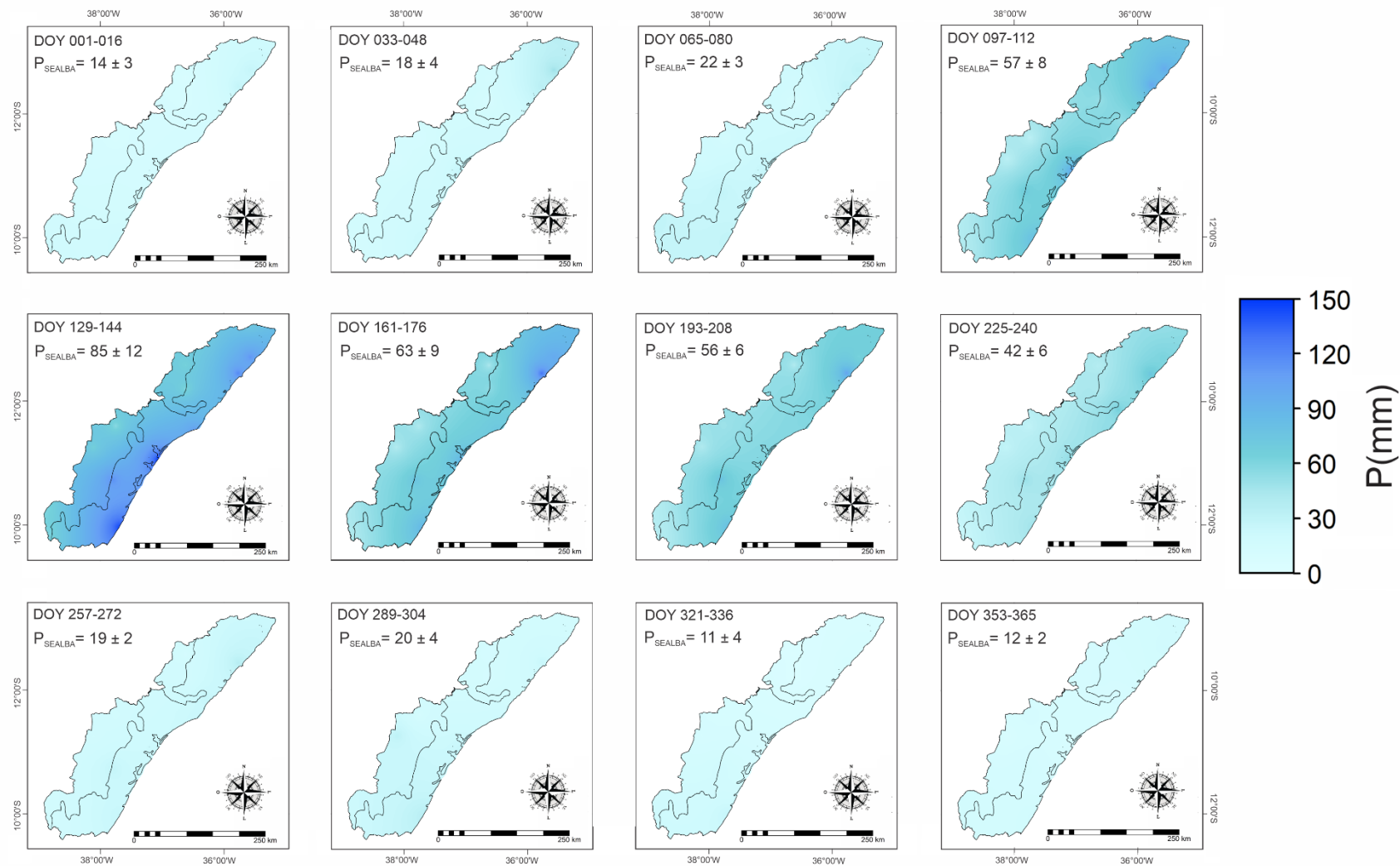
dezembro (DJ: 321-336), com totais para 16 dias acima de 85 mm em ambos os biomas, enquanto os menores valores de  $ET_0$  ocorreram de junho a julho (DJ: 177-192), quando estes ficaram abaixo de 45 mm, portanto com menor amplitude ao longo do ano que para P. Na escala anual, P atendeu 60 % e 49% da  $ET_0$  para FA e CT, respectivamente, evidenciando deficiência hídrica em ambos os biomas. Pelas Figuras 3a e 3b, percebe-se que para ambos os biomas, o período de menor demanda atmosférica ( $< ET_0$ ) corresponde àquele de maior quantidade de chuvas ( $> P$ ), enquanto que nos períodos mais secos ( $< P$ ) ocorrem as maiores demandas atmosféricas ( $> ET_0$ ).

As tendências da radiação solar global incidente ( $R_G$ ) e temperatura média do ar ( $T_a$ ) ao longo do ano são similares àquela para  $ET_0$  com, entretanto com diferenças na ocorrência dos valores máximos e mínimos que são de DJ: 065-080 (março) e 209-224 (julho-agosto), respectivamente. Os limites superiores de  $R_G$  e  $T_a$  foram respectivamente em torno de  $23,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $27,0 \text{ }^\circ\text{C}$  para ambos os biomas. Entretanto mesmo que os mínimos de  $R_G$  fiquem em torno de  $14,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em ambos os biomas, com relação a  $T_a$  estes ficam em torno de  $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$  para FA e de  $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$  para CT. Na escala anual, apesar dos níveis de  $R_G$  serem ligeiramente superiores em CT (média de  $19,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) que para FA (em torno de  $19,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), respectivamente) aqueles para  $T_a$  são inferiores para CT (média de  $24,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ) que para FA (em torno de  $25,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Os menores valores diários de  $T_a$  para CT devem ser devidos a uma maior emissão da radiação à noite, resfriando o ar nesse período, comportamento semelhante ao de desertos.

#### **4.2. Dinâmica espacial e temporal da precipitação**

A Figura 4 mostra as distribuições espaciais dos valores médios dos totais de precipitação (P) em termos de dias julianos (DJ), para alguns intervalos de 16 dias das imagens MODIS, com as médias correspondentes dos pixels e desvios padrões (SD) na região do SEALBA no período de 2007-2021.

**Figura 4.** Distribuições espaciais dos totais médios de precipitação (P) em termos de dias julianos (DJ), para intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 na região do SEALBA.

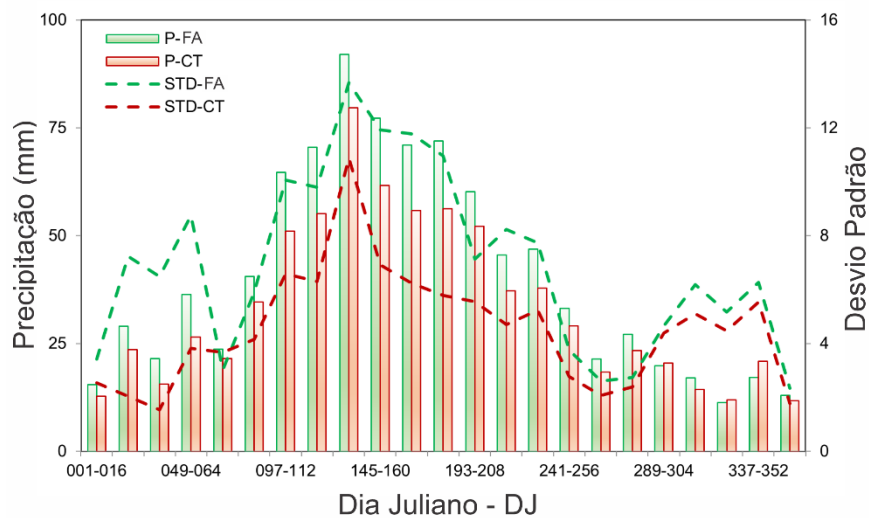


Fonte: Autoria própria (2023).

Para a região SEALBA as maiores precipitações, com totais médios para 16 dias acima de 50 mm ocorrem entre os meses de abril a julho (DJ: 097-208) com concentração das chuvas nas áreas mais próximas do litoral, enquanto os menores valores são de novembro a fevereiro (DJ: 305 a 365 e 001 a 048), quando os totais médios para 16 dias ficam abaixo de 20 mm em toda a região. De acordo com os valores médios e desvios padrões, o período de maior variação espacial coincide com o período mais seco, destacando-se o mês de novembro (DJ: 305-338) com desvio padrão (DP) representando 40% do valor médio. Considerando a escala anual, o total médio de P para toda a região do SEALBA é de 849 mm.

Extraíndo-se os pixels dentro dos biomas Floresta Atlântica - FA e Caatinga – CT (ver Figuras 1b e 4), a Figura 5 mostra os valores médios e desvios padrões (DP) dos totais de precipitação (P) para períodos de 16 dias das imagens MODIS, no período de 2007-2021, para Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA.

**Figura 5.** Valores médios e desvios padrões (DP) de precipitação (P), na escala temporal de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021.



**Fonte:** Autoria Própria (2023).

Menores quantidades de chuvas são para Caatinga (CT) comparando com aquelas que ocorrem na Floresta Atlântica (FA), principalmente de abril a julho (DJ: 097-192), quando a diferença média para 16 dias entre os dois biomas foi acima de 12 mm. De acordo com os valores de desvio padrão (DP) ao longo do ano percebe-se que no bioma FA ocorreram maiores variações espaciais que no bioma CT, com DP na escala anual nesses biomas representando 17 e 14 % dos valores médios, respectivamente.

Contabilizando-se os pixels de 250 x 250 m das imagens MODIS nos biomas FA e CT dentro dos estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA) na região do SEALBA de acordo com a Figura 1a e 1b, as áreas com FA contabilizam 62, 78 e 46% desses estados respectivamente. Com relação ao bioma CT, os percentuais correspondentes são 38, 22 e 54%. Maior porção com o bioma FA está então relacionada com maiores taxas de precipitação nas áreas do SEALBA situadas em AL, seguidos por SE e BA. |Por outro lado, maior porção com o bioma CT se relaciona com menores taxas de precipitação na porção do SEALBA na BA, seguidos por SE e AL.

A partir de medições dos componentes do balanço hídrico durante o ano de 2008 no bioma Floresta Atlântica (FA), Pereira et al., (2010), relataram um valor anual para P de 1313 mm, um pouco maior do que o total anual médio de 927 mm da pesquisa corrente. Por outro lado, Silva et al., (2017) relataram uma quantidade de chuvas anual no bioma CT de 430 mm no período de 2014 a 2015, estando inferior ao total médio anual na atual pesquisa que anualmente de 772 mm. Entretanto Oliveira et al., (2022) reportaram uma precipitação anual média de 783 mm para o bioma CT, bem próximo do valor encontrado na pesquisa corrente.

Como os valores nessa pesquisa são totais médios em 15 anos, observa-se que as quantidades de chuvas podem variar para cima ou para baixo das condições médias em períodos específicos para ambos biomas. Considerando-se a dinâmica das chuvas ao longo do ano, percebe-se que tanto o bioma FA como o bioma CT no contorno da região do SEALBA apresentam duas estações bem definidas, uma seca e uma chuvosa, com as maiores precipitações concentradas no meio do ano.

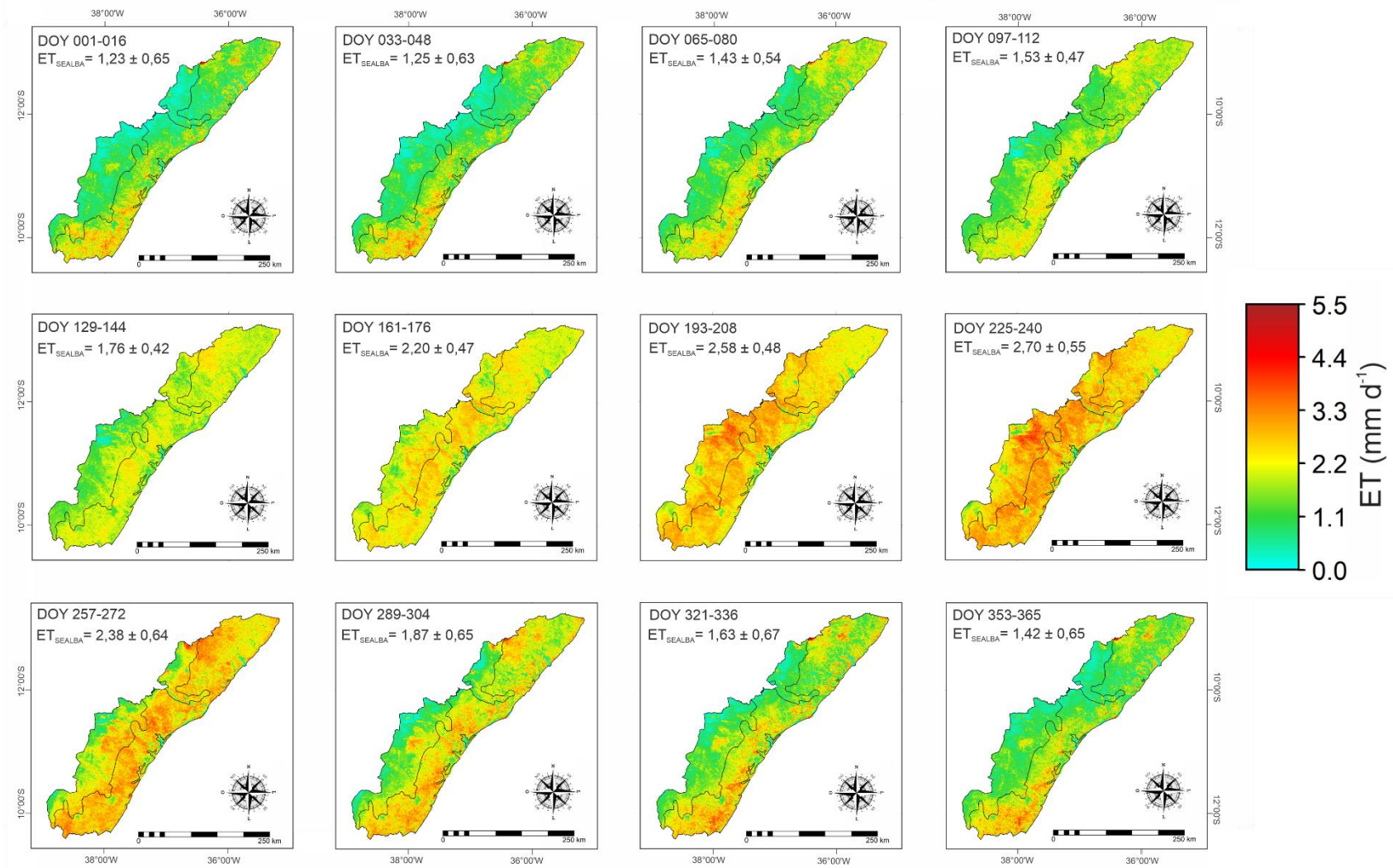
Os mapas e gráficos gerados de caracterização da precipitação na escala temporal de 16 dias estarão disponíveis para acesso de distintos usuários, os quais são importantes para o manejo dos recursos hídricos em geral, e, em particular, da agricultura dependente de chuva ou irrigada, permitindo comparações entre os biomas do SEALBA delimitados pelos estados de Sergipe, Alagoas e Bahia. Com o processamento da série histórica de imagens MODIS e dados de precipitação, pode-se determinar as anomalias das chuvas em anos específicos com relação aos valores médios.

#### **4.3. Dinâmica espacial e temporal da evapotranspiração**

A Figura 6 mostra as distribuições espaciais dos valores médios diários da evapotranspiração atual (ET) para alguns intervalos de 16 dias das imagens MODIS ao longo

do ano, juntamente com a média dos pixels e desvios padrões (DP) para região do SEALBA no período de 2007-2021.

**Figura 6.** Distribuições espaciais das médias diárias de evapotranspiração atual (ET) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA.

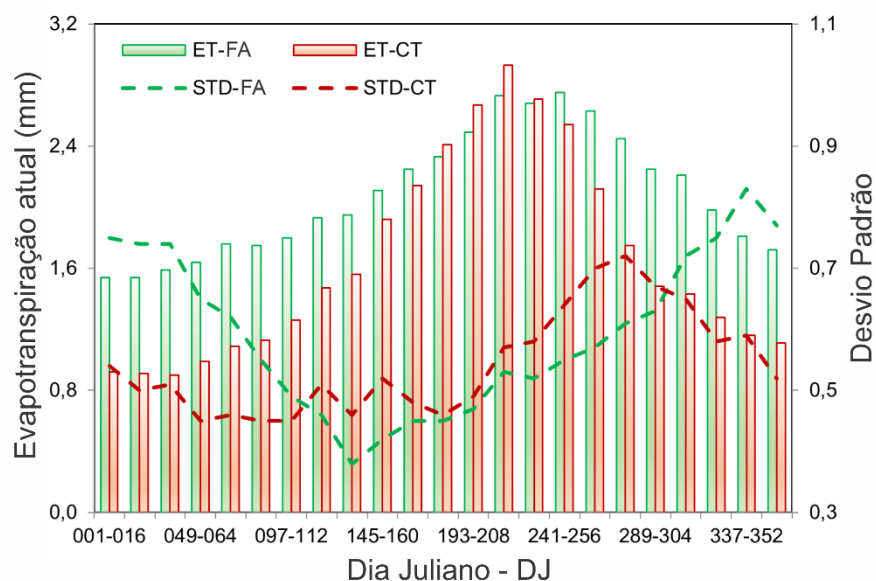


Fonte: Autoria própria (2023).

Como para a precipitação (P), grandes variações espaciais e temporais na evapotranspiração atual (ET) são observadas ao longo do ano na região do SEALBA. Para a região, as maiores taxas da ET, com médias diárias nos intervalos de 16 dias acima de  $2,00 \text{ mm d}^{-1}$ , ocorrem de junho a outubro (DJ: 161-288), enquanto que os valores menores da ET, com médias abaixo de  $1,50 \text{ mm d}^{-1}$  são para o período entre os meses de dezembro a abril (DJ: 353-365 e 001-096). Ao longo de todo o ano, a concentração das taxas maiores é nas áreas mais próximas do litoral. As maiores variações espaciais da ET coincidem com suas menores taxas, fora da estação chuvosa, destacando-se o período entre os meses de janeiro a fevereiro (DJ: 001-044) com desvio padrão (DP) representando 50% do valor médio. Considerando a escala anual, o total médio para toda a região do SEALBA é de  $1.86 \text{ mm d}^{-1}$ .

A Figura 7 mostra os valores médios diários e desvios padrões (DP) para a evapotranspiração atual (ET) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS ao longo do ano, nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA no período de 2007-2021.

**Figura 7.** Valores médios e desvios padrões (DP) de evapotranspiração atual (ET) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021.



**Fonte:** Autoria própria (2023).

No período em que ocorrem os maiores valores da ET, entre julho a outubro, a média diária para intervalos de 16 dias supera  $2,70 \text{ mm d}^{-1}$  no bioma Floresta Atlântica (FA) e  $2,90 \text{ mm d}^{-1}$  no bioma Caatinga (CT). Por outro lado, quando ocorrem as menores taxas, de

dezembro a abril, no bioma FA as médias chegam abaixo de  $1,50 \text{ mm d}^{-1}$  e no bioma CT inferiores a  $1,00 \text{ mm d}^{-1}$ . Na escala anual, os totais médios da ET foram de 760 e 601 mm para os biomas FA e CT, respectivamente com as taxas em CT sendo 79% daquelas para FA.

Através do método do balanço hídrico no solo no bioma Floresta Atlântica (FA), Pereira et al. (2010) reportaram uma taxa anual da ET de  $3,20 \text{ mm d}^{-1}$ , um pouco maior que a do corrente estudo com média anual de  $2,08 \pm 0,59 \text{ mm d}^{-1}$ . Entretanto, com as mesmas técnicas de balanço hídrico entre 2013 e 2018 no bioma FA, Rodrigues et al., (2021) encontraram valores da ET entre  $1,40$  e  $1,80 \text{ mm d}^{-1}$  sob condições de estiagem, similares aos valores médios da pesquisa corrente nas condições mais secas no início e no final do ano. Através de medições do balanço de energia pelo método das correlações turbulentas no bioma Caatinga (CT), Silva et al., (2017) encontraram no período de 2014 a 2015 valores médios de ET variando de  $0,98 \text{ mm d}^{-1}$  durante o período seco a  $1,96 \text{ mm d}^{-1}$  na estação chuvosa do bioma FA. Também com aplicação do método das correlações turbulentas para de 2014 a 2015, Marques et al (2020) reportaram taxas médias de ET de  $0,20$  a  $0,30 \text{ mm d}^{-1}$  durante a estação seca no bioma CT, até a faixa de  $1,70$  a  $2,60 \text{ mm d}^{-1}$  no período chuvoso. Essas taxas envolvem as encontradas na atual pesquisa considerando os valores médios e desvios padrões com média anual de  $1,65 \pm 0,54 \text{ mm d}^{-1}$ .

As variações espaciais e temporais das chuvas são as maiores condicionantes climáticas para as variações na evapotranspiração atual (ET), que em conjunto com distintas demandas atmosféricas, explicam as diferenças entre os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA. Entretanto, deve-se destacar que outra importante razão para essas diferenças entre as taxas evapotranspiratórias estão relacionadas aos diferentes níveis de cobertura do solo pela vegetação, afetando a radiação solar absorvida e a partição da ET em transpiração e evaporação do solo (VILLALOBOS et al., 2013). As faixas da ET para os biomas FA e CT encontradas dentro da região do SEALBA são razoavelmente comparáveis com as da literatura para esses biomas, mesmo considerando diferenças nas condições pluviométricas em períodos específicos.

Os mapas e gráficos gerados de caracterização da evapotranspiração atual na escala temporal de 16 dias estarão disponíveis para acesso de distintos usuários, os quais também são importantes para o manejo dos recursos hídricos em geral e para a agricultura dependente de chuva ou irrigada, permitindo comparações entre os fluxos hídricos nos biomas do SEALBA delimitados pelos estados de Sergipe, Alagoas e Bahia. Com o processamento da série histórica de imagens MODIS e dados de evapotranspiração, pode-se determinar as anomalias nos fluxos

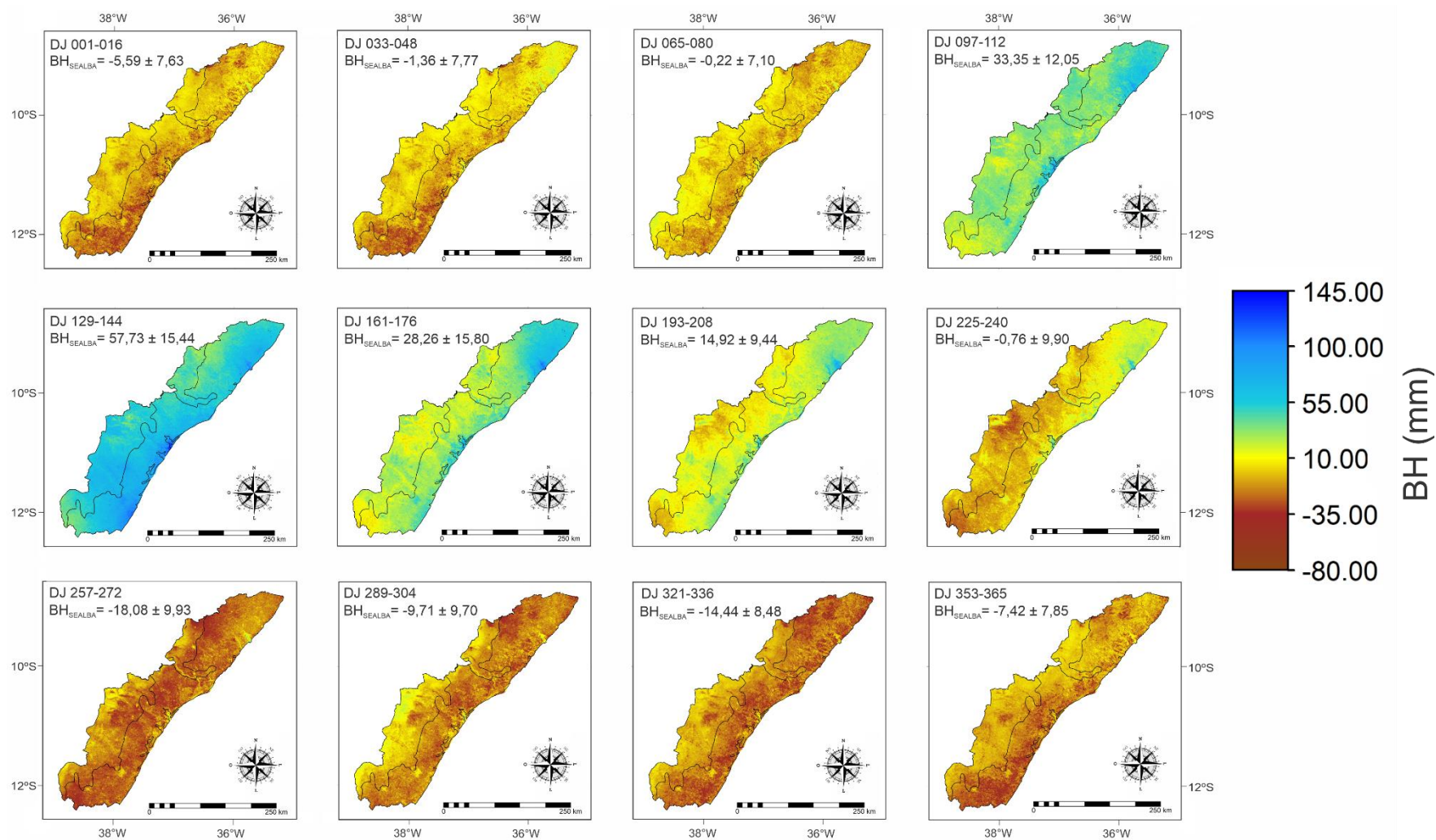


hídricos entre as superfícies e a baixa atmosfera em anos específicos com relação aos valores médios.

#### **4.4. Dinâmica espacial e temporal dos componentes do balanço hídrico**

As distribuições espaciais do balanço hídrico - BH (Eq. 13) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA são apresentados na Figura 8. As taxas médias diárias de evapotranspiração atual (ET) foram extrapoladas para valores totais médios de 16 dias.

**Figura 8.** Distribuições espaciais do balanço hídrico (BH) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA.

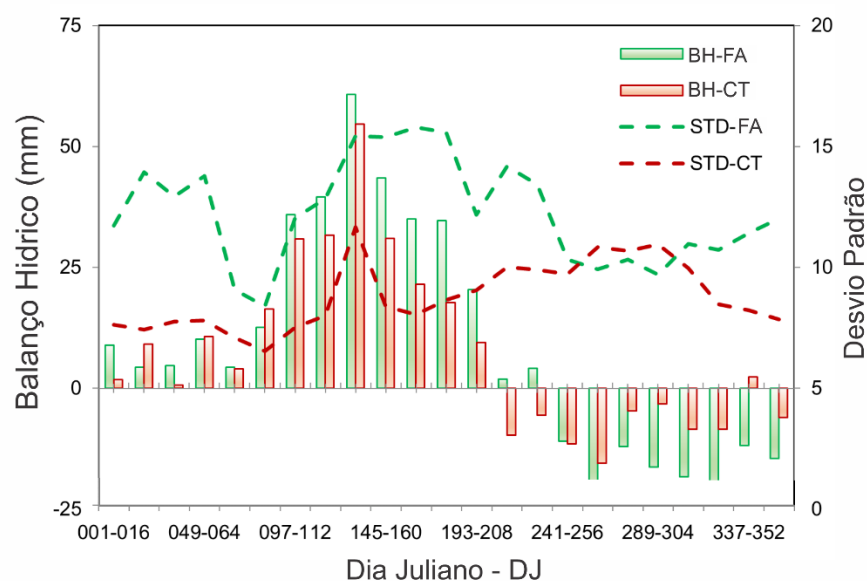


Fonte: Autoria própria (2023).

Os maiores valores positivos de BH no SEALBA, com valores médios para 16 dias acima de 15 mm, ocorrem entre março e julho (DJ: 081-208), causado pelo efeito conjunto de mais elevadas precipitações e menores taxas de evapotranspiração. Os menores valores médios de BH, abaixo de -10 mm são de agosto a janeiro (DJ: 241-365 e 001-016), envolvendo o período de menores quantidade de chuvas e taxas mais elevadas de evapotranspiração. Ao longo do ano, os valores mais positivos são concentrados nas áreas próximas do litoral, enquanto que fora da estação chuvosa os valores negativos são concentrados mais para o interior da região do SEALBA. Considerando a escala anual, a média de BH para toda a região do SEALBA é de 166 mm.

A Figura 9 mostra os valores médios e desvios padrões (DP) do balanço hídrico (BH) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021.

**Figura 9.** Valores médios e desvios padrões (DP) do balanço hídrico (BH) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021.



**Fonte:** Autoria Própria (2023).

Para o bioma Floresta Atlântica (FA) o maior valor positivo de BH para o período de 16 dias, acima de 60 mm, ocorre com a maior precipitação (P) de 92 mm a uma evapotranspiração atual (ET) correspondente de 31 mm durante o mês de maio (DJ: 129-144). O valor mais negativo, abaixo de -20 mm acontece em setembro (DJ: 257-272), com P de 21 mm sob uma elevada ET de 42 mm. Na escala anual BH no bioma FA foi de 164 mm. Os períodos de valores máximo e mínimo de BH no bioma Caatinga (CT) são também em maio (DJ: 129-144) e

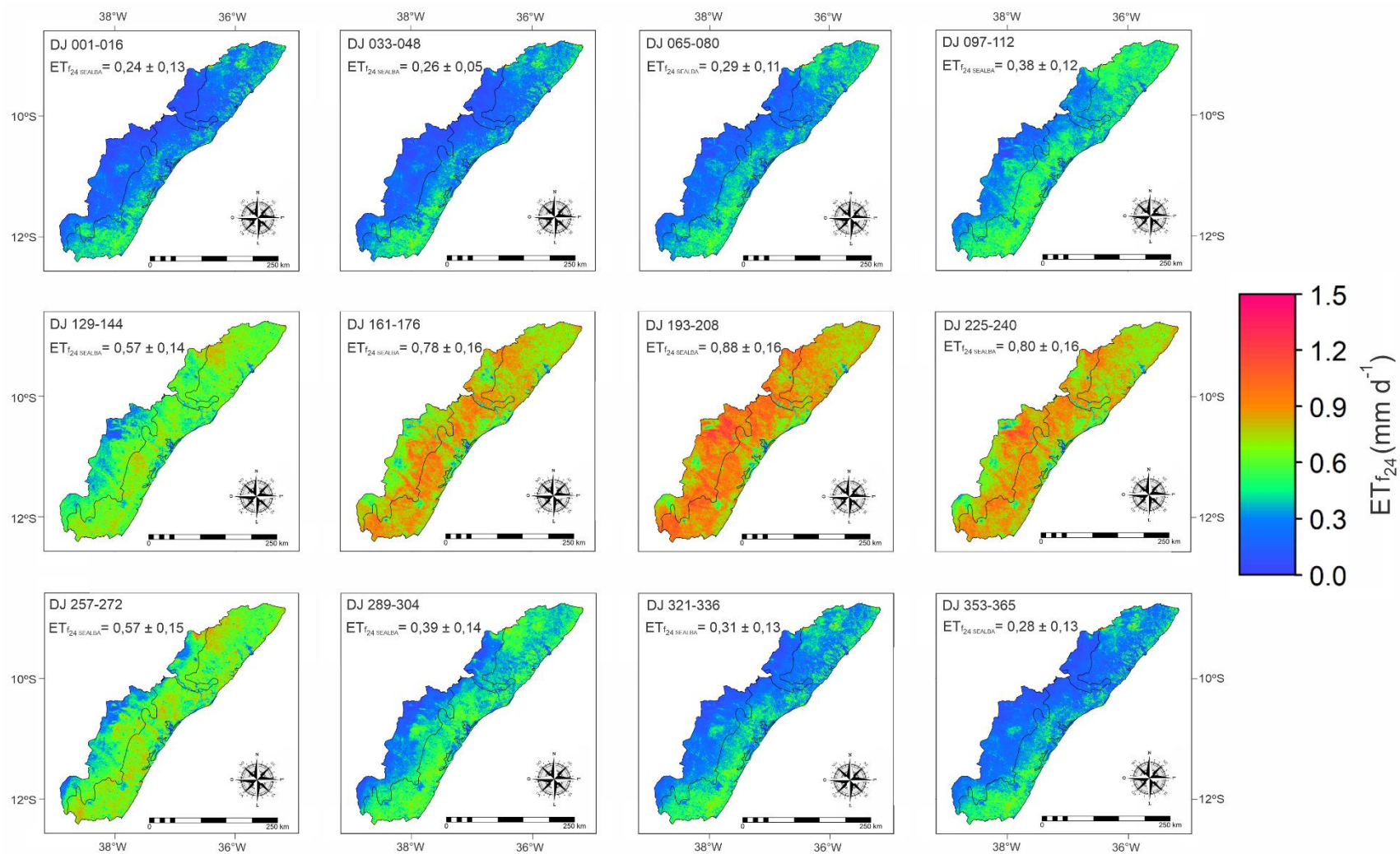
setembro (DJ: 257-272). O valor máximo de 55 mm ocorre sob condições de elevada P de 80 mm e uma baixa ET de 25 mm enquanto o valor mínimo de -16 mm acontece sob condições de baixa P de 18 mm e elevada ET de 34 mm. Na escala anual o bioma CT com BH de 168 mm, tem uma disponibilidade de água ligeiramente superior ao bioma FA, com diferença de 2%, pois mesmo que FA tenha maior quantidade de chuvas, suas maiores taxas de evapotranspiração reduzem BH com relação ao bioma CT.

Elevada precipitação (P) em conjunto com baixas taxas da evapotranspiração atual (ET) concentra os valores positivos de BH de março a agosto (DJ: 81-224) em ambos os biomas, FA e CT, possibilitando o uso da água da chuva para a agricultura de sequeiro e armazenamento da água da chuva para uso posterior. Entretanto, do final de julho até dezembro (DJ: 209-265) ocorrem os valores negativos, indicando necessidade de irrigação para períodos críticos de necessidade hídrica das culturas agrícolas. As mais baixas e mais altas taxas da ET em períodos secos e chuvosos, podem ser explicadas pelas condições de baixas e elevadas precipitações, respectivamente, mas quando a umidade na zona das raízes não é limitante, como ocorre no meio do ano, os maiores valores de ET para o bioma CT podem ser devido a uma maior e energia disponível nesse bioma com relação a FA, visto que nenhum deles estão sob condições de restrições de água das chuvas nesse período (SENEVIRATNE et al., 2010).

Como só dados de precipitação ou evapotranspiração não definem a disponibilidade de água da chuva, os mapas e gráficos gerados para caracterização do balanço hídrico na escala temporal de 16 dias e disponibilizados para distintos usuários serão de grande importância para empreendimentos que consomem os recursos hídricos, permitindo comparações da disponibilidade de água entre os biomas do SEALBA delimitados pelos estados de Sergipe, Alagoas e Bahia. Com o processamento da série histórica de imagens MODIS do balanço hídrico, pode-se determinar as diferenças entre déficits e excessos hídricos em anos específicos com relação aos valores históricos.

Para inferir as condições de umidade na zona das raízes das plantas no balanço hídrico ao longo do ano, a Figura 10 mostra as distribuições espaciais dos valores médios diários da fração evapotranspirativa ( $ET_{f_{24}}$ ) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os desvios padrões (DP) para região do SEALBA, no período de 2007-2021.

**Figura 10.** Distribuições espaciais dos valores diários da fração evaporativa ( $ET_{f_{24}}$ ) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios e desvios padrões (DP) no período de 2017-2021 para a região do SEALBA.

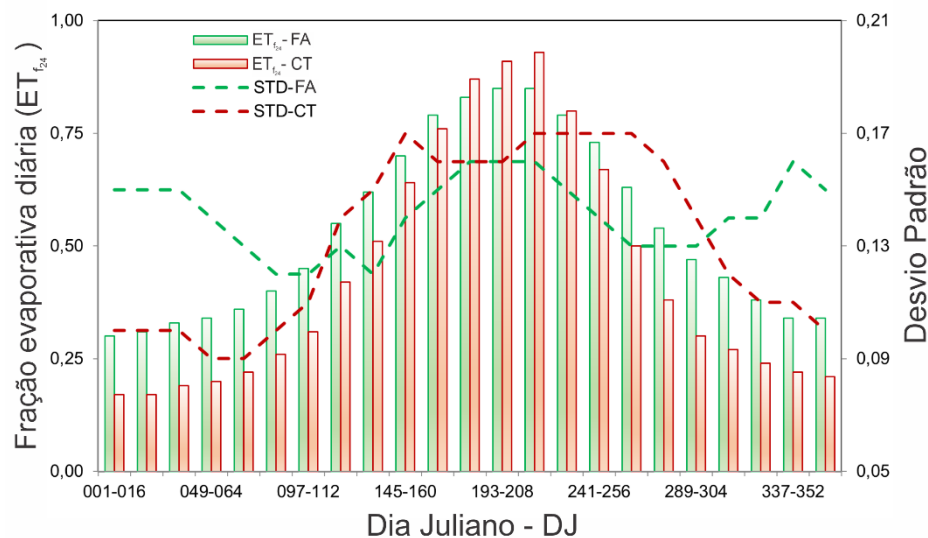


Fonte: Autoria Própria (2023).

Os maiores valores da  $ET_{f_{24}}$  na região do SEALBA, com médias diárias nos intervalos de 16 dias acima de  $0,50 \text{ mm d}^{-1}$ , acontecem de maio a outubro (DJ: 129-288), enquanto os valores menores, com médias abaixo de  $0,30$  são para o período entre os meses de dezembro a março (DJ: 337-365 e 001-079). Ao longo do ano, a concentração das taxas maiores em geral é nas áreas mais próximas do litoral, mas em alguns períodos específicos da estação chuvosa estes ocorrem mais para o interior. As maiores variações espaciais da  $ET_{f_{24}}$  coincide com as condições mais secas, destacando-se o período entre os meses de dezembro a março (DJ: 337-365 e 001-064) quando o desvio padrão (DP) chega a representar mais de 40% do valor médio. Considerando a escala anual, o total médio para toda a região do SEALBA é de  $0,49$ .

A Figura 11 apresenta os valores médios diários da fração evapotranspirativa ( $ET_{f_{24}}$ ) em intervalos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os desvios padrões (DP) para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período 2007 a 2021.

**Figura 11.** Valores médios diários da fração evapotranspirativa ( $ET_{f_{24}}$ ) e desvios padrão (DP), em intervalos 16 dias das imagens MODIS, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, no período 2007 a 2021.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Os maiores valores de  $ET_{f_{24}}$  para o bioma Floresta Atlântica (FA), acima de  $0,50$ , ocorrem de abril a outubro (DJ: 113-288), enquanto para o bioma Caatinga (CT) estes acontecem de maio a setembro (DJ: 129-272). Embora na escala anual o valor de  $ET_{f_{24}}$  médio para FA de  $0,54$  sendo superior em 21% daquele para CT ( $ET_{f_{24}} = 0,44$ ), comparando-se os picos

entre os biomas na estação chuvosa do final de julho a agosto (DJ: 209-224), observa-se que o valor de 0,93 para CT contra 0,85 para FA foi 9% superior.

Os valores inferiores de  $ET_{f_{24}}$  para FA, abaixo de 0,40, ocorrem de novembro a março (DJ: 001-080 e 321-365) enquanto que para CT, esses valores mais baixos, inferiores a 0,30 são de outubro a abril (DJ: 001-096 e 321-365). Os limites inferiores ocorrem no início do ano em janeiro (DJ: 001-016) para ambos os biomas, entretanto o menor valor médio de 0,30 em FA nesse período é cerca de 76% superior ao que ocorre no bioma CT, cerca de 0,17. De acordo com MATEOS et al. (2013) os valores de  $ET_{f_{24}}$  em plantas sob condições não ótimas de umidade na zona das raízes são mais influenciadas pela regulação da abertura dos estômatos, o que é o caso das espécies do bioma CT.

Em culturas agrícolas bem irrigadas, os valores de  $ET_{f_{24}}$ , são chamados de coeficiente de cultura ( $K_c$ ), podendo ser usados na estimativa dos requerimentos hídricos para o manejo de irrigação (TEIXEIRA et al., 2018c). Por outro lado, em vegetação natural, podem caracterizar o grau de estresse hídrico na zona das raízes (LU et al, 2011). Considerando áreas com culturas agrícolas na região do SEALBA, os valores no estudo corrente indicaram melhores condições de umidade no solo de abril a setembro, sendo mais favoráveis para agricultura de sequeiro, com alguns casos as espécies do bioma Caatinga (CT) com melhores condições que as do bioma Floresta Atlântica (FA). Os valores mais baixos de  $ET_{f_{24}}$  no bioma CT no geral estão diretamente relacionados à uma menor disponibilidade de água no solo na zona das raízes das plantas, devido à uma menor quantidade de chuvas aliada a uma maior demanda atmosférica de outubro a abril.

Em pastagens na Flórida (USA), Sumner e Jacobs (2005) reportaram valores de  $ET_{f_{24}}$  variando entre 0,47 e 0,92 sem irrigação, enquanto em estepes sob condições desérticas na Mongólia, China, Zhang et al., 2012 encontraram os valores médios de  $ET_{f_{24}}$  variaram de 0,16 a 0,75. Esses valores são similares em várias situações da Figura 11, tanto para o bioma Floresta Atlântica (FA) como o bioma Caatinga (CT). De acordo com Zhou e Zhou (2009), as variáveis climáticas que mais afetam  $ET_{f_{24}}$  são a temperatura do ar, a umidade do ar e a energia disponível. Entretanto, os valores desse indicador em sistemas naturais também dependem da regulação dos estômatos e da adaptação das espécies às condições de escassez hídrica (MATA-GONZÁLEZ et al., 2005).

Comparando-se os valores de BH (Fig. 9) com  $ET_{f_{24}}$  (Fig. 11) para os períodos de 16 dias e considerando-se ambos os biomas, observa-se que os maiores valores de  $ET_{f_{24}}$  (acima de 0,50) ocorrem de abril à outubro (DJ: 113-288) enquanto aqueles para BH (acima de 14 mm) ocorrem de março a agosto (DJ: 081-240). Portanto ocorre um atraso em torno de até dois meses entre o momento em que a precipitação (P) atende a evapotranspiração (ET) com aquele que as condições de umidade na zona das raízes estão em nível ótimo.

Com os métodos bem sucedidos nos diferentes biomas do SEALBA, utilizando imagens de satélite em conjunto com dados climáticos, pode-se assegurar o acesso preciso dos excessos e das deficiências hídricas que comprometem tanto a produtividade como a qualidade das colheitas agrícolas para cada situação específica, auxiliando o gerenciamento hídrico. Os mapas e gráficos são úteis para geração de critérios de alocação de água e expansão das áreas de cultivos onde ocorrem aptidões agroclimáticas, considerando as condições de instabilidade hídrica que a região vem enfrentando. Uma vez identificados áreas agrícolas com baixos desempenhos, tecnologias disponíveis com base nas estações climáticas disponíveis poderão ser viabilizadas.

A utilização das ferramentas propostas para quantificação dos componentes do balanço hídrico ao longo dos anos é essencial para o manejo racional da agricultura e dos recursos hídricos minimizando conflitos entre os diferentes usuários da terra e da água. As informações geradas são relevantes para a tomada de decisão na escala de estabelecimento rural e no âmbito de elaboração de políticas públicas, subsidiando as decisões sobre o uso dos recursos hídricos e mitigação de eventos de escassez hídrica. Os beneficiários envolvem gestores de políticas públicas, conselhos e comitês de desenvolvimento sustentável, colegiado de gestão de territórios rurais, comitês de bacias hidrográficas, agências estaduais de meio ambiente, secretarias de agricultura e meio ambiente, organizações não governamentais, produtores agrícolas e gerentes rurais.



## 5. CONCLUSÕES

Em suma, foi demonstrada a viabilidade do algoritmo SAFER para uso conjunto com o produto de refletância MODIS MOD13Q1 e dados climáticos interpolados no monitoramento dos componentes do balanço hídrico em áreas de crescimento agrícola com distintos biomas. Tomou-se como exemplo as áreas do SEALBA envolvendo os estados brasileiros de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA) na região costeira do Nordeste do Brasil, destacando-se resultados para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro dessa região.

Para ambos os biomas dentro da região do SEALBA, houve irregularidade na distribuição das precipitações (P) ao longo do ano, entretanto menores quantidades de chuvas são para Caatinga (CT) comparando com aquelas que ocorrem na Floresta Atlântica (FA). De acordo com os valores de desvio padrão (DP) o bioma FA apresenta maiores variações espaciais nos valores de P que o bioma CT. Maiores áreas do bioma FA com relação ao bioma CT contribuem com maiores quantidade de chuvas nas áreas do SEALBA situadas em AL, seguidos por SE e BA. Como para a precipitação (P), grandes variações espaciais e temporais na evapotranspiração atual (ET) são observadas ao longo do ano na região do SEALBA, entretanto com os valores anuais no bioma Caatinga sendo 79% daqueles para o bioma FA.

Contabilizando-se P e ET, o bioma CT tem uma disponibilidade de água ligeiramente superior ao bioma FA na escala anual, com balanço hídrico (BH) maior em 2%, pois mesmo que FA tenha uma maior precipitação (P) com relação a CT, as maiores taxas da ET no bioma FA provocam redução no BH. Inferindo as condições de umidade na zona das raízes através dos valores diários da fração evaporativa ( $ET_{f_{24}}$ ), nota-se que pelos valores maiores de  $ET_{f_{24}}$ , os melhores níveis de umidade são de abril a setembro em toda a região do SEALBA, sendo mais favoráveis para agricultura de sequeiro. Em geral, os melhores níveis são para o bioma FA, mas com alguns casos dentro da estação chuvosa o bioma CT apresenta melhores condições que para o bioma FA. Os valores mais baixos de  $ET_{f_{24}}$  no bioma CT estão diretamente relacionadas à menor disponibilidade hídrica no solo na zona das raízes das plantas, devido à uma menor quantidade de chuvas aliada a uma maior demanda atmosférica de outubro a abril.

Contudo, mesmo que a modelagem tenha sido processada para uma região específica do Brasil, a aplicabilidade do uso conjunto do produto MOD13Q1 e dados climáticos interpolados apresenta potencial para implementação de um sistema operacional para monitoramento dos componentes do balanço hídrico em qualquer condição ambiental. As quantificações em larga escala da precipitação, da evapotranspiração e das condições de

umidade na zona das raízes, se destacam como de grande auxílio para subsídio de políticas públicas com relação ao manejo e conservação dos recursos hídricos, principalmente nos cenários atuais de mudanças climáticas e de uso da terra, com possibilidade de replicação dos métodos para outras regiões do Brasil e do mundo, após calibrações dos coeficientes de regressão das equações na modelagem.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, W.M.; AVELING, R.; BROCKINGTON, D; DICKSON, B.; ELLIOTT, J.; HUTTON, J.; ROE, D.; VIRA, B. W.; WOLMER, W. Biodiversity conservation and the eradication of poverty. **Science**, v. 306, n. 5699, p. 1146-49, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2018.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome, Italy, 300 pp, 1998.

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.

ALTHOFF, D.; ALVINO, F.C.G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C.C.; CUNHA, F.F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, v. 35, p. 670-678, 2019.

ANDRADE, R.G.; TEIXEIRA, A.H. de C.; SANO, E.E.; LEIVAS, J.F.; VICTORIA, D. de C.; NOGUEIRA, S. F. Pasture evapotranspiration as indicators of degradation in the Brazilian Savanna. A case study for Alto Tocantins watershed. **Proceedings of SPIE**, v. 9239, p. 92391Z-1-92391Z-7, 2014.

ANDRADE, R. G.; LIMA, E. P.; A. H. de C. TEIXEIRA; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. de C.; FACCO, A. G. Mapeamento espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Paracatu utilizando imagens MODIS e o algoritmo SAFER. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.3, p.1729 – 1739, 2020.

ARAÚJO, L.M.; TEIXEIRA, A.H. de C.; BASSOI, L.H. Evapotranspiration and biomass modelling in the Pontal Sul Irrigation Scheme. **International Journal of Remote Sensing**, v. 1, p. 1–13, 2019.

AVILEZ, M.A.A.; HERNANDEZ, F.B.T.; BISPO, R de C.; TEIXEIRA, A.H. de C. Semeadura do feijoeiro em função da disponibilidade hídrica no solo no Noroeste Paulista. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 7, p. 17-27, 2018.

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; GALVAO, I. M.; TEIXEIRA, A. H. de C. Determinação dos coeficientes de cultivo e a evapotranspiração real da cana-de-açúcar com o uso do modelo SAFER. **Agrometeoros**, v.28, p.1 – 8, 2020.

BASTIAANSSSEN, W.G.M.; PELGRUM, H.; WANG, J., MA, Y.; MORENO J.F.; ROERINK, G.J.; WAL VAN DER T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, 213-229, 1998.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S.M.; REIG, F.; LATORRE, B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration

models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 3001-3023, 2014.

BENTO, V.A.; GOUVEIA, C.M.; DACAMARAA, C.C.; TRIGO, I.F. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 259, p. 286-295, 2018.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F... Land Cover Changes In The Brazilian Cerrado And Caatinga Biomes From 1990 To 2010 Based On A Systematic Remote Sensing Sampling Approach. **Applied Geography**, v. 58, P. 116-127, 2015.

BISPO, R.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; TEIXEIRA, A.H. de C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água na cultura de cana-de-açúcar na região noroeste paulista. **Irriga**, v. 1, p. 94-101, 2017.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. Principles of geographical information systems. Oxford, **Oxford University Press**, 1998.

CAI, X.; MCKINNEY, C.; LASDON, S. A framework for sustainable analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. **Water Resources Research**, v. 38, n. 6, p. 21–24, 2002.

CLEUGH, H.A.; LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 285–304, 2007.

CONSOLI, S.; VANELLA, D. Comparisons of satellite-based models for estimating evapotranspiration fluxes. **Journal of Hydrology**, v. 513, p. 475–489, 2014.

CONSOLI, S.; LICCIARDELLO, F.; VANELLA, D.; PASOTTI, L.; VILLANI, G.; TOMEI, F. Testing the water balance model CRITERIA using TDR measurements, micrometeorological data, and satellite-based information. **Agricultural Water Management**, v. 170, p. 68–80, 2016.

DE BRUIN H., From Penman to Makkink. in: HOOGHART, J.C. (ED.), Proceedings and Information: TNO Committee on Hydrological Sciences, vol. 39. **Gravenhage, The Netherlands**, pp. 5–31, 1987.

DYBAS, C.L. Dead zones spreading in World oceans. **BioScience**, v. 55, n. 7, p. 552–557, 2005.

FOLEY, J., DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S., et al. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, p. 570-574, 2005.

FRANCO, R.A.M.; HERNANDEZ, F.B.T.; TEIXEIRA, A.H. de C. Water productivity of different land uses in watersheds assessed from satellite imagery Landsat 5 Thematic Mapper. **Proceedings of SPIE**, v. 9239, p. 92392E-1-92392E-7, 2014.

**FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA.** 2023. Disponível em  
<<https://www.sosma.org.br/conheca/mata-atlantica/>>. Acesso em: 24 de jan de 2023.

GORDON, L.J.; STEFFEN, W.; JÖNSSON, B.F.; FOLKE, C.; FALKENMARK, M.; JOHANNESSEN, Å. Human Modification of Global Water Vapor Flows from the Land Surface. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, n. 21, p. 7612-7617, 2005.

GOUVEIA, C.; TRIGO, R.M.; BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S.M. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: an assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. **Global Planet Change**, v. 151, p. 15-27, 2017.

GUNKEL, G.; KOSMOL, J.; SOBRAL, M.; ROHN, H.; MONTENEGRO, S.; AURELIANO, J. Sugar cane industry as a source of water pollution-case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 180, p. 261-269, 2007.

HE, C.; CHENG, S.-K.; LUO, Y. Desiccation of the Yellow River and the South Water Northward Transfer Project. *Water International*, v. 30, n. 2, p. 261-268, 2005.

HERNANDEZ, F.B.T; TEIXEIRA, A.H. de C.; NEALE, C.M.U.; TAGHVAEIAN, S. Determining Large Scale Actual Evapotranspiration Using Agro-Meteorological and Remote Sensing Data in the Northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, v. 1038, p. 263-270, 2014.

IPCC: CLIMATE CHANGE 2014: **Mitigation of Climate Change**. Contribution of WorkingGroup III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O.; R. PichsMadruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JUNIOR, G. N. ; SILVA, M. V. ; SANTOS, A. ; SILVA, J. L. B. ; PANDORFI, HÉLITON ; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, JOSÉ FRANCISCO ; TEIXEIRA, A. H. C. ; TEODORO, P. E. ; DE LIMA, JOÃO L.M. P. ; SILVA JUNIOR, C. A. ; SOUZA, L. S. B. ; SILVA, E. A. ; SILVA, T. G. F. . Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northesast Brazilian. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1-27, 2022.

KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1588-1602, 2013.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. de C.; TORRESAN, F. E.; VICENTE, L. H.; BOLFE, E. L.; TEIXEIRA, A. H. de C.; BOLFE, E. L.; BARROS, T., R. de. Avaliação do índice de vegetação padronizado no monitoramento indicativo de estiagens em períodos críticos da soja no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, p. 1145-1155, 2014.

LEIVAS, J.F.; Teixeira, A.H. de C.; ANDRADE, R.G.; VICTORIA, D. de C.; SILVA, G.B.; BOLFE, E.L. Application of agrometeorological spectral model in rice area in southern Brazil. **Proceedings of SPIE**, v. 9637, p. 96372B-1-96372B-8, 2015.

LEIVAS, J.F.; Teixeira, A.H. de C.; SILVA, G.B. Evapotranspiração no perímetro irrigado de Jaíba utilizando imagens de satélite. In: IV Seminário da Rede AgroHidro, 2016, Planaltina-DF. Água e Agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra. Planaltina-DF: **Embrapa Cerrados**, p.122 – 128, 2016a.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. de C.; SILVA, G. B.; RONQUIM, C. C.; REIS, J. B. R. S.. Biophysical indicators based on satellite images in an irrigated area at the São Francisco River basin. **Proceedings of SPIE**, v. 9998, p. 99981N-1 - 99981N-9, 2016b.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. de C.; RODRIGUES, C. G.; SILVA, G. B.; GARCON, E. A. M. Monitoramento da evapotranspiração em áreas de haveicultura usado imagens de satélite In: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2017, Petrolina. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Petrolina: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2017a.

LEIVAS, J.F.; TEIXEIRA, A.H. de C.; SILVA, G.B.; GARCON, E.A.M.; RONQUIM, C.C. Water indicators based on SPOT 6 satellite images in irrigated area at the Paracatu River Basin, Brazil. **Proceedings of SPIE**, v. 10421, p.104211I-1 - 104211I-7, 2017b.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. de C.; SILVA, G. B.; GARCON, E. A. M.; RONQUIM, C. C. Water indicators based on SPOT 6 satellite images in irrigated area at the Paracatu River Basin, Brazil. **Proceedings of SPIE**, v.10421, p.104211I-1 - 104211I-7, 2017c.

LIMA, A.L.B.; FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E.C.; ALTHOFF, D.; SANTOS, R.A.; VENANCIO, L.P. Biophysical parameters and actual evapotranspiration of bean culture by means of remote sensing. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 156-166, 2019.

LU, N.; CHEN, S.; WILSKEL, B.; SUN, G.; CHEN, J. Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. **Journal of Plant Ecology**, v.4, p. 49-60, 2011.

LOPES, A. A.; ANDRADE, R G ; TEIXEIRA, A. H. C. Uso do algoritmo SAFER na análise espaço-temporal da evapotranspiração em áreas de produção agropecuária do município de Maracaju, MS. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, p. 3417-3426, 2020.

MARQUES, T. V.; MENDES, K; MUTTI. P.; MEDEIROS, S.; SILVA, L.; PEREZ-MARIN, A. M.; CAMPOS, S.; LÚCIO, P. S.; LIMA, K.; REIS, J. dos; RAMOS, T. M.; SILVA, D. F. da; OLIVEIRA, C. P.; COSTA, G. B.; ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C.; SANTOS E SILVA, C.M., BERGSON BEZERRA, B. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid, **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, p. 107957, 2020.

MATA-GONZÁLEZ, R.; MCLENDON, T.; MARTIN, D.W. The inappropriate use of crop transpiration coefficients ( $K_c$ ) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: **A review**. **Arid Land Research and Management**, v. 19, p. 285-295, 2005.

MATEOS, L.; GONZÁLEZ-DUGO, M.P.; TESTI, L.; VILLALOBOS, F.J. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. **Agricultural Water Management**, v. 125, p. 81-91, 2013.

NAGLER, P.L.; GLENN, E.P.; NGUYEN, U.; SCOTT, R.L.; DOODY, T. Estimating riparian and agricultural actual evapotranspiration by reference evapotranspiration and MODIS enhanced vegetation index. **Remote Sensing**, v. 5, 3849–3871, 2013.

ÑÚNEZ, D.C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. de C.; NEALE, C.M.U.; FRANCO, R.A.M.; LEIVAS, J. F. Annual variability of water productivity components in the watershed of Cabeceira Comprida stream, Santa Fé do Sul, Brazil In: SPIE Remote Sensing 2016, 2016, Edinburgh. **Proceedings of SPIE**. Edinburgh: SPIE Digital Library, v.9998. p. 99981E-1 - 99981E-10, 2016.

OLIVERA-GUERRA, L.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S.; KHABBA, S.; ESCORIHUELA, M.J. Estimating the water budget components of irrigated crops: combining the FAO-56 dual crop coefficient with surface temperature and vegetation index data. **Agricultural Water Management**, v. 208, p. 120–131, 2018.

OLIVEIRA, M. L.; SANTOS, C A.C. dos; OLIVEIRA, G. de; SILVA, M. T.; SILVA, B. B. da; CUNHA, J. E. de B.L.; RUHOFF, A.; SANTOS, C. A.G. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 835, p. 155490, 2022.

PEREIRA, D.R; MELLO, C.R. de; SILVA, A.M. da; YANAGI, S.N.M. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira range region, MG. **Cerne**, v. 16, p. 32–40, 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. 2. ed. São José Dos Campos, **Saraiva**, 2012.

PROCOPIO, S. de O.; CRUZ, M. A. S.; ALMEIDA, M. R. M. de; JESUS JUNIOR, L. A. de; NOGUEIRA JUNIOR, L. R.; CARVALHO, H. W. L. de. Sealba: região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, (**Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Documentos, 221), 2019.

RAHMAN, G.M.; HASSAB, M.Q.; ISLAM, M.S.; SHAMAD, S.Z.K.M. Environmental impact on water quality deterioration caused by the decreased Ganges outflow and saline water intrusion in South Western Bangladesh, **Environment Geology**, v. 40, p. 31-40, 2000.

RAMPAZO, N. A. M.; PICOLI, M. C. A.; TEIXEIRA, A. H. C.; CAVALIERO, C. K. N. Water Consumption Modeling by Coupling MODIS Images and Agrometeorological Data for Sugarcane Crops. **Sugar Tech**, v. 23, p. 524-535, 2020.

RAUPASCH, M.R. Combination theory and equilibrium evaporation. Quarterly **Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, p. 1149–1181, 2001.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 438-447, 2009.

RODRIGUES, A.F.; MELLO, C.R. de; TERRA, M.C.N.S.; BESKOW, S. Water balance of an Atlantic Forest remnant under a prolonged drought period. **Ciência Agrotecnica**, v. 45, e008421, 2021.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

SAFRE, A. L. S.; NASSAR, A.; TORRES-RUA, A.; ABOUTALEBI, M.; SAAD, J. C. C.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. de C.; PRUEGER, J. H.; MCKEE, L.; ALFIERI, J. G.; HIPPS, L. E.; NIETO, H.; WHITE, W. A.; DEL MAR A., MARIA S. L.; KUSTAS W. P.; DOKOOZLIAN, N.; GAO F.; ANDERSON M. C. Performance of Sentinel-2 SAFER ET model for daily and seasonal estimation of grapevine water consumption. **Irrigation Science**, v.1, 2022.

SANTOS, J.E.O.; CUNHA, F.F.; FILGUEIRAS, R.; SILVA, G.H.; TEIXEIRA, A.H. de C.; SILVA, F.C.S.; SEDIYAMA, G.C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 1–8, 2020.

SENEVIRATNE, S.I.; CORTI, T., DAVIN, E.L., HIRSCHI, M., JAEGER, E.B., LEHNER, I., ORLOWSKY, B., TEULING, A.J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth Science Review**, v. 99, p. 125–161, 2010.

SILVA, C.O.F.; MANZIONE, R.L.; TEIXEIRA, A.H. de C. Modelagem espacial da evapotranspiração e produtividade hídrica na porção paulista do afloramento do aquífero Guarani entre 2013 e 2015. **Holos Environment**, v. 18, p. 126-140, 2018a.

SILVA, C.O.F.; MANZIONE, R.L.; Filho, J.L.A. Large-Scale Spatial Modeling of Crop Coefficient and Biomass Production in Agroecosystems in Southeast Brazil. **Horticulturae**, v. 4, P. 1-20, 2018b.

SILVA, C.O.F.; TEIXEIRA, A.H. de C.; MANZIONE, R.L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, v. 120, p. 1-19, 2019.

SILVA, G. B.; TEIXEIRA, A.H. de C.; LEIVAS, J.F. Estimativa de parâmetros biofísicos no bioma Cerrado do Estado de Minas Gerais In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017, Santos. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2017. p.3703 – 3710.

SILVA, P. F. da; LIMA, J. R. de S; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S. de; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water, and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **J. Arid Environments**. v. 147, p. 71–82, 2017.



SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F.; REIS, L. S.; TEIXEIRA, A. H. de C. Estabelecimento dos meses mais críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas (UNICAMP)**, v.12, p.122 -131, 2018.

SMAKTHIN, V.; REVENGA, C.; DOLL, P. Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments, Colombo, Sri Lanka: IWMI, 24p, (**Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Research Report 2**), 2004.

SUMNER, D.M.; JACOBS, J. Utility of penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 308, p. 81-104, 2005.

TEIXEIRA, A.H de C; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; MOURA, M.S.B.; BOS, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C. Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region; **LAP Lambert Academic Publishing: Saarbrücken**, Germany, 226p, 2009.

TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C. Modelling water productivity components in the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. In: Carolina Bilibio; Oliver Hensel; Jeferson Selbach. (Org.). Sustainable water management in the tropics and subtropics and case studies in Brazil. 1ed. **Kassel: University of Kassel**, v. 3, p. 1077-1100, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of land use changes in the semi-arid region of Brazil. **Proceedings of Spie**, v. 8531. p. 85310P-1-85310P-2, 2012a.

TEIXEIRA, A. H. de C.; TONIETTO, J.; PEREIRA, G.E.; ANGELOTTI, F. Delimitação da aptidão agroclimática para videira sob irrigação no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p. 399-407, 2012b.

TEIXEIRA, A.H. de C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G., LEIVAS, J.F. Large-scale water productivity assessments with MODIS Images in a changing Semi-Arid environment: A Brazilian case study. **Remote Sensing**, v. 5, p. 5783–5804, 2013.

TEIXEIRA, A.H. de C.; TONIETTO, J.; PEREIRA, G.E.; HERNANDEZ, F.B.T. Characterization of the wine grape thermohydrological conditions in the tropical Brazilian growing region: Long-term and future assessments. **ISRN Agronomy**, v. 2014, p. 1-14, 2014a.

TEIXEIRA, A.H. de C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L. Up scaling table grape water

requirements in the Low-Middle São Francisco River basin. **Acta Horticulturae**, v.1038, p.655 - 662, 2014b.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; VICTORIA, D.C.; BOLFE, E.L. Irrigation performance assessments for corn crop with Landsat images in the São Paulo state, Brazil. **Water Resources and Irrigation Management**, v.3, p.91 - 100, 2014c.

TEIXEIRA, A.H. de C.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; VICTORIA, D. de C.; BOLFE, E.L. Corn water variables assessments from Earth observation data in the São Paulo State, Southeast Brazil. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.1, p. 1-11, 2015.

TEIXEIRA, A.H. de C.; TONIETTO, J.; LEIVAS, J. F. Large-scale water balance indicators for different pruning dates of tropical wine grape. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n.7, p. 849-957, 2016a.

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, 2016b.

TEIXEIRA, A.H. de C.; LEIVAS, J.F.; SILVA, G.B. Indicadores agrometeorológicos obtidos com imagens MODIS na bacia hidrográfica do Rio Paracatu. In: I Simpósio da Bacia Hidrográfica do São Francisco, 2016a, Petrolina-PE. **Anais do I Simpósio da Bacia Hidrográfica do São Francisco**. Juazeiro-BA: UNIVASF, 2016c.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; SILVA, G. B.; GARCON, E. A. M. Índices hídricos para áreas irrigadas na região de desenvolvimento agrícola Petrolina/Juazeiro. **IRRIGA**, v.1, p.127 - 135, 2017.

TEIXEIRA, A.H. de C.; SIMÃO, F.R.; LEIVAS, J.F.; GOMIDE, R.L.; REIS, J.B.R. da S.; KOBAYASHI, M.K.; OLIVEIRA, F.G. Water Productivity Modeling by Remote Sensing in the Semiarid Region of Minas Gerais State, Brazil. **in: Arid Environments and Sustainability**. 1 ed. Londres: InTech, 2018a, p. 94-108, 2018a.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; SILVA, G. B.; GARCON, E. A. M. Evapotranspiration Estimations in the Brazilian Semi-Arid by Using MODIS Reflectance Products and Agrometeorological Stations. **Modern Environmental Science and Engineering**, v.4, p.562 - 569, 2018b.

TEIXEIRA, A.H. de C.; TONIETTO, J.; LEIVAS, J.F. Water balance indices for tropical wine grapes in: Grapes and Wines - Advances In: Production, **Processing, Analysis and Valorization**. 1 ed. London: InTech, 2018c, p. 77-90.

TEIXEIRA A.H. de C.; TAKEMURA, C.M.; LEIVAS, J.F.; PACHECO, E.P.; BAYMA-SILVA, G.; GARÇON, E.A.M. Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 100296, 2020a.

- TEIXEIRA A.H. de C.; LEIVAS, J.F.; GARÇON, E.A.M.; TAKEMURA, C.M.; QUARTAROLI, C.F.; ALVAREZ, I.A. Modeling large-scale biometeorological indices to monitor agricultural-growing areas: applications in the fruit circuit region, São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, 2020b.
- TEIXEIRA, A. H. de C. LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; GARCON, E. A. M.; TAKEMURA, C. M. Biophysical Characterization and Monitoring Large-Scale Water and Vegetation Anomalies by Remote Sensing in the Agricultural Growing Areas of the Brazilian Semi-Arid Region In: *Advances in Remote Sensing for Natural Resource Monitoring*. 1 ed. **New Jersey: Wiley Online Library**, 2021a, v.1, p. 94-109.
- TEIXEIRA, A. H. de C. LEIVAS, J. F.; STRUIVING, T. B.; REIS, J. B. R. S.; SIMAO, F. R. Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agricultural Water Management**, v. 247, p.1 – 19, 2021b.
- VANELLA, D.; RAMÍREZ-CUESTA, J.M.; INTRIGLIOLO, D.S.; CONSOLI, S. Combining electrical resistivity tomography and satellite images for improving evapotranspiration estimates of Citrus orchards. **Remote Sensing**, v. 11 (4), p. 373, 2019.
- VENÂNCIO, L.P.; MANTOVANI, E.C.; AMARAL C.H. do; NEALE, C.M.U.; FILGUEIRAS, R.; IVO ZUTION GONÇALVES, I.Z.; CUNHA, F.F. DA. Evapotranspiration mapping of commercial corn fields in Brazil using SAFER algorithm. **Scientia Agricola**, v. 78, p. 1–12, 2021.
- VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERIA, S.; LOPEZ-MORENO, J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.
- VILLALOBOS, F.J.; TESTI, L.; ORGAZ, F.; GARCÍA-TEJERA, O.; LOPEZ-BERNAL, A.; GONZÁLEZ-DUGO, M.V.; BALLESTER-LURBE, C.; CASTEL, J.R.; ALARCÓN-CABAÑERO, J.J.; NICOLÁS-NICOLÁS, E. Modelling canopy conductance and transpiration of fruit trees in Mediterranean areas: a simplified approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 171, p. 93–103, 2013.
- VÖRÖSMARTY, C.J.; LÉVÊQUE, C.; REVENGA, C. Fresh Water. In: R. HASSAN, R. SCHOLLES, and N. ASH (EDS.). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group*. **Island Press**, Washington, D.C, 2005.
- WALLING, D.E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. **Global and Planetary Change**, v. 39, n. 1-2, p. 111-126, 2003.
- WANG, S.; HUANG, C.; ZHANG, L.; LIN, Y.; CEN, Y.; WU, T. Monitoring and Assessing the 2012 Drought in the Great Plains: Analyzing Satellite-Retrieved Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence, Drought Indices, and Gross Primary Production. **Remote Sensing**, v. 8, n. 61, 2016.

WARREN, M.S.; TEIXEIRA, A. H. de C.; RODRIGUES, L.L.; HERNANDEZ, F.B.T. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, p. 65-82, 2014.

WRI (World Resources Institute), UNDP (United Nations Development Programme), UNEP (United Nations Environment Programme), and World Bank. World Resources 2005: The wealth of the poor-managing ecosystems to fight poverty. **World Resources Institute**, Washington, D.C., 2005.

YANG, Y.; GUAN, H.; BATELAAN, O.; MCVICAR, T. R.; LONG, D.; PIAO, S.; LIANG, W.; LIU, B.; JIN, Z.; SIMMONS, C.T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. **Scientific Reports**, 6, p. 1-8, 2016.

ZHANG, F.; ZHOU, G.; WANG, Y.; YAN, F., CHRISTER NILSSON, C. Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 379-386, 2012.

ZHANG, L; QIAO, N.; HUANG, C.; WANG, S. Monitoring drought effects on vegetation productivity using satellite solar-induced chlorophyll fluorescence. **Remote Sensing**. v. 11, n. 378, P. 1-18, 2019.

ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. **Science**, v. 329, p. 940-943, 2010.

ZHOU, L.; ZHOU, G. Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. **Journal of Hydrology**, v. 372, p. 41-47, 2009.