



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE PRODUTO GLOBAL DE  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL ESTIMADO COM  
DADOS DO MODIS EM ÁREAS IRRIGADAS NO  
BIOMA CERRADO**

**Guilherme Braga Neves**

Orientador: Leandro de Almeida Salles

MONOGRAFIA

BRASÍLIA  
2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**Guilherme Braga Neves**

**AVALIAÇÃO DE PRODUTO GLOBAL DE  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL ESTIMADO COM  
DADOS DO MODIS EM ÁREAS IRRIGADAS NO  
BIOMA CERRADO**

**Monografia de especialização em  
Geoprocessamento Ambiental  
apresentada a banca examinadora do  
Instituto de Geociências como exigência  
para a obtenção do título de Especialista  
em Geoprocessamento**

**Aprovado em**    /    /

**BANCA EXAMINADORA**

MSc. Leandro de Almeida Salles (orientador) \_\_\_\_\_

Prof. Marina Bilich Neumann \_\_\_\_\_

Prof. Luciana Figueiredo Prado \_\_\_\_\_

## **Resumo**

Dado o aumento da população mundial ao longo do tempo, a demanda no uso dos recursos hídricos seguirá o aumento demográfico, fazendo-se necessário o uso de técnicas e ferramentas que visem sua utilização menos predatória. A busca por novas metodologias também demonstram ser ponto fundamental na gestão racional da água. O sensoriamento remoto tem demonstrado potencial para estimativas do balanço de energia, da evapotranspiração e em estudos com modelos hidrológicos e climáticos. A variável evapotranspiração é um dos principais parâmetros no cálculo do balanço hídrico. O presente estudo buscou avaliar o produto global de evapotranspiração real – ETr MODIS calculado através do modelo SSEBop para as culturas do feijão, trigo e soja, todas irrigadas por pivôs centrais na região do PAD/DF e Cristalina, GO. Os valores estimados de ETr pelo SSEBop foram feitas por imagens do sensor MODIS e comparadas aos valores de evapotranspiração real das culturas avaliadas (ETrc), cujas estimativas foram obtidas pelo método da razão de Bowen, advinda de estações meteorológicas instaladas no interior dos pivôs centrais. Foram analisadas imagens nas escalas temporais decendiais e mensais. Todos os valores obtidos por meio do sensoriamento remoto resultaram em valores de % Bias < 0, o que indica a subestimação dos valores de ETr quando comparados aos valores calculados por meio da razão de Bowen. As estimativas de ETr pelo SSEBop na escala mensal para a soja e o feijão apresentaram boa correlação positiva ( CC = 0,76) quando avaliadas pelo valor máximo do pixel associado ao pivô central estudado. No período chuvoso, as estimativas de ETr indicaram correlação positiva (CC = 0,77) também quando analisada sob o valor máximo dos pixel associados ao pivô central. Apesar subestimados, os valores oriundos do produto global de ETr avaliado no presente estudo demonstrou ser uma importante ferramenta auxiliar na gestão de áreas agrícolas sob manejo de irrigação, comprovando ser um instrumento adequado de apoio ao gerenciamento dos recursos hídricos na região.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, recursos hídricos, culturas agrícolas, irrigação.

## **Abstract**

Since the global population is still rising and the demand on water use will follow the demographic growth, the usage of techniques and tools that brings rational exploitation is necessary. The pursue for new methodologies is a critical point. Remote sensing has demonstrated the potential for energy balance estimation, evapotranspiration and in studies with hydrological and climatic models. The evapotranspiration variable is one of the main parameters in the calculation of the water balance. The study aimed to evaluate the global Actual Evapotranspiration (Eta) product, which offers estimated ETa values calculated using the SSEBop model for beans, wheat and soybean crops, all irrigated by central pivots in the PAD/DF region and in Cristalina, GO. The estimated values of Eta were generated using MODIS sensor images, corresponding to the culture periods of the crops, and compared to the ETa values calculated by the Bowen ratio method, which were generated from meteorological stations installed within the central pivots. All images were analyzed at the decadal and monthly time scales. All values obtained by remote sensing resulted in % Bias values  $< 0$ , which indicates the underestimation of ETa when compared to the values calculated using the Bowen ratio methodology. Estimates of ETa by the SSEBop model, in the monthly scale, for soybean and beans indicated a good positive correlation ( $CC = 0.76$ ) when evaluated by the maximum value of the pixels associated to the central pivot which was assessed. In the rainy season, estimated ETa values indicated a positive correlation ( $CC = 0.77$ ) also when analyzed under the maximum pixel value reference. Although systematically underestimating the ETa values from the global SSEBop product evaluated in the present study, proved to be an important alternative tool for the management of water resources in the region.

**Key words:** remote sensing, water resources, agricultural crops, irrigation.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e família por todo o apoio oferecido para que pudesse desenvolver meus projetos pessoais e profissionais.

À Universidade de Brasília que mais uma vez me deu a oportunidade de concluir uma nova etapa na vida acadêmica.

À Agência Nacional de Águas, por meio da Juliana Lopes e Morris por terem cedido os dados usados na pesquisa.

Aos professores Marina Neumann e Henrique Roig pela confiança e oportunidade de trabalhar em sua equipe.

Aos colegas de projeto, Bianca, Gabriela e Raphael.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal FAP-DF, pela disponibilidade da bolsa de estudos.

Aos colegas do laboratório Édio e Diogo por todo o auxílio prestado quando requisitados.

Ao Leandro Almeida Salles, orientador e amigo, por todas as longas reuniões e disposição em me ajudar ao longo deste trabalho.

Ao companheirismo de todos os colegas de Especialização que ora ajudava, ora era ajudado dentro e fora de sala.

## Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>                | <b>1</b>  |
| <b>2. Objetivos .....</b>                 | <b>3</b>  |
| <b>3. Revisão Bibliográfica .....</b>     | <b>3</b>  |
| <b>4. Material e Métodos .....</b>        | <b>14</b> |
| <b>4.5. Resultados .....</b>              | <b>19</b> |
| <b>5. Discussões.....</b>                 | <b>25</b> |
| <b>6. Conclusões .....</b>                | <b>27</b> |
| <b>7. Referências Bibliográficas.....</b> | <b>28</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Dados gerais das culturas analisadas. ....   | 15 |
| Tabela 2. Estatísticas referentes às culturas da Soja e Feijão e Trigo na análise decendial..... | 20 |
| Tabela 3. Estatísticas referentes às culturas da Soja e Feijão e Trigo na análise mensal.....    | 22 |
| Tabela 4. Estatísticas referentes aos períodos Chuvoso e Seco na análise decendial. ....         | 23 |
| Tabela 5. Estatísticas referentes aos períodos Chuvoso e Seco na análise mensal. ....            | 25 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Localização e caracterização da área de estudo.....  | 16 |
| Figura 2. Gráficos de dispersão da ETr decendial da soja e do feijão: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D).....          | 20 |
| Figura 3. Gráficos de dispersão da ETr mensal da soja e do feijão: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D).....             | 21 |
| Figura 4. Gráficos de dispersão da ETr decendial dos períodos chuvoso e seco: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D). .... | 23 |
| Figura 5. Gráficos de dispersão da ETr mensal dos períodos chuvoso e seco: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D). ....    | 24 |

## 1. Introdução

De acordo com o Relatório *How to Feed the World in 2050* (FAO, 2009), em cerca de 30 anos a população mundial alcançará a marca de nove bilhões de pessoas e a produção de cereais e carne terá que aumentar 70% e 42%, respectivamente, para acompanhar o crescimento demográfico. Esses aumentos se darão principalmente em países em desenvolvimento e espera-se que 80% deste incremento na produção venham através da intensificação da agricultura, ou seja, melhorias nos índices de produtividade (produção por unidade de área) e apenas 20% relativos à abertura de novas áreas de agricultura e pecuária. O problema, apontado pelo relatório, é que os índices de produtividade dos principais plantios de cereais ao redor do mundo vêm caindo ao longo das décadas: 3,2%/ano em 1960 para 1,5% em 2000.

Independentemente da estratégia a ser adotada, a água é um recurso fundamental para a produção de alimentos, sendo a irrigação de culturas a principal atividade que demanda recursos hídricos no Brasil e no mundo (ANA, 2017; FAO, 2009). No Brasil, 46% do consumo total de água se dão pela irrigação, seguido pelo consumo urbano, 27%, e, por fim, no uso industrial, correspondendo a 18% (ANA, 2017).

Em um país onde o consumo de água é crescente, aliado às bacias hidrográficas que estão ano a ano mais degradadas e urbanizadas, resultando na diminuição da disponibilidade hídrica, se faz necessário um robusto arcabouço técnico provido de estudos científicos que sirva para orientar as tomadas de decisões dos gestores responsáveis.

Desta forma, a necessidade de conhecimento dos parâmetros hidrológicos e suas variações espaciais e temporais de determinada região são de fundamental importância para o gerenciamento adequado desses recursos de forma a minimizar as restrições e conflitos pelo uso da água (Lima *et al.*, 2014).

Uma variável que pode ser analisada de forma mais detalhada em relação à hidrologia de determinado local é a evapotranspiração. Este termo pode ser brevemente definido como o processo pelo qual a água é transportada da superfície terrestre para a atmosfera, seja por meio da evaporação da água nas camadas mais superficiais do solo, mas também pela transpiração das espécies vegetais (Allen *et al.*, 1998).

Em bacias hidrográficas onde há acentuada existência de agricultura irrigada, o entendimento da variação temporal e espacial da evapotranspiração se faz essencial para a gestão dos recursos hídricos (Bastiaanssen *et al.*, 2005)

Os modelos de estimativa de evapotranspiração são diversos e podem ser usados variando de acordo com seus princípios básicos adotados e sua complexidade na execução, sendo o princípio do balanço de energia

constantemente usado para esse fim (Lopes *et al.*, 2019). Estes modelos, porém, possuem alta complexidade e alto custo para serem testados por conta do elevado nível de dificuldade na coleta e disponibilidade de dados nos variados sistemas agropecuários (Majumdar *et al.*, 2007).

O sensoriamento remoto, por sua vez, é uma ferramenta que vem sendo utilizada para diversas aplicações, entre elas: estimativa do balanço de energia, da evapotranspiração, monitoramento de estiagens, bem como em estudos envolvendo modelos hidrológicos, meteorológicos e climáticos (Kalma *et al.*, 2008). Seu uso na hidrologia foi impulsionado nos últimos anos devido ao lançamento de novos sensores orbitais que possuem potencial de utilização no monitoramento hidrológico (Warren *et al.*, 2014).

Os mapas de uso e ocupação do solo permitem aos gestores endereçar os conflitos relativos ao consumo de água. Essa percepção serve de base para avaliação de como a água é consumida e o entendimento do custo de oportunidade relativo ao uso da água pela agricultura ou outros setores (Bastiaanssen *et al.*, 2005).

A compreensão destes conceitos se faz importante do ponto de vista estratégico, uma vez que instituições públicas federais, a exemplo da Agência Nacional de Águas – ANA devem monitorar e regular aos estados o uso sustentável dos recursos hídricos, caso contrário políticas emergenciais de racionamento serão cada vez mais frequentes, como ocorrido em São Paulo e no Distrito Federal nos anos de 2014 e 2017, respectivamente.

As principais vantagens no uso da tecnologia baseiam-se no fato da possibilidade de obtenção da evapotranspiração real – ETr sem a realização de coleta de dados de solo ou da cultura, além de propiciar maiores coberturas espaciais e temporais a um custo relativamente baixo (Bastiaanssen *et al.*, 2005).

O entendimento dessa variável para as propriedades rurais pode acarretar na diminuição do consumo de água na irrigação, tendo como consequências a redução nos custos totais da empresa e, concomitantemente, na eficiência da mesma, bem como na melhora da qualidade ambiental, uma vez que a demanda por recurso hídrico poderá ser reduzida. Essa lógica se aplicada a uma região mais ampla e em efeito cascata, por si só, pode resultar em uma economia bastante significativa na quantidade de água usada, tornando-a mais disponível aos usuários a jusante do corpo hídrico.

Assim, novas técnicas e abordagens relativas à irrigação possuem relevância em relação ao uso eficiente dos recursos hídricos, pois ao passo que o preço deste recurso aumenta a busca por novos sistemas mais eficientes, em detrimento aos convencionais, também se elevam (Paz *et al.*, 2000).

## 2. Objetivos

### 2.1. *Objetivo Geral*

Avaliar a usabilidade do produto global de ETr estimado pelo modelo SSEBop, por meio do sensor MODIS em áreas agrícolas irrigadas para o monitoramento e gestão da água em bacias hidrográficas inseridas no bioma Cerrado.

### 2.2. *Objetivos Específicos*

- a. Obter série temporal de ETr estimado pelo SSEBop para cada pivô central monitorado;
- b. Validar o produto global do SSEBop com medidas de ETr *in situ* obtidas a partir de diferentes culturas agrícolas;
- c. Avaliar as estimativas do SSEBop em diferentes escalas temporais com diferentes culturas agrícolas.

## 3. Revisão Bibliográfica

### 3.1. *Sensoriamento Remoto*

O termo sensoriamento remoto surgiu no início da década de 1960 e por definição é dada como uma técnica de obtenção de imagens de alvo da superfície terrestre sem que haja contato físico entre o sensor utilizado e o alvo estudado. Consiste em uma das metodologias mais eficazes na coleta de dados automatizada para monitoramento dos recursos naturais em escala global (Meneses e Almeida, 2012).

De maneira mais pragmática, o sensoriamento remoto é o uso da tecnologia de sensores para obtenção de imagens aéreas de determinado local ou região. Antigamente, estes registros aéreos eram realizados por meio de aviões, em que um sensor era acoplado ao mesmo e fotos eram feitas quando acionado. Hoje, por haver sensores embarcados em satélites (orbitais) e pela popularização dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), a obtenção de imagens aéreas se tornou mais acessível dos pontos de vista prático e financeiro.

Os sensores são uma espécie de máquina fotográfica que capta a energia eletromagnética da superfície terrestre e transforma a energia existente pela onda em um valor numérico proporcional à intensidade desta energia, os quais são decompostos em diferentes faixas de luz, também chamadas de bandas espectrais (Figueiredo, 2005).

As bandas espectrais são intervalos de comprimento de onda dentro de todo o espectro eletromagnético existente, incluindo a faixa de cores da região do visível. Cada banda, portanto, é capaz de absorver um intervalo deste espectro, e cada imagem de satélite possui mais de uma banda. Desta forma, as imagens adquiridas via sensoriamento remoto não são definidas em um único comprimento de onda, e sim em diferentes intervalos, denominados de bandas espectrais (Meneses e Almeida, 2012).

A busca pelo desenvolvimento de ferramentas e metodologias que visam calcular ou estimar a evapotranspiração por meio de dados meteorológicos é historicamente recente, com o estudo de Bowen em 1926, em que foi criada uma técnica, baseada nas trocas de calor e massa entre a superfície e atmosfera, que permite desmembrar a energia disponível entre calor sensível e calor latente.

A coleta destes dados climáticos, porém, nunca foi tarefa simples, o que dificultava o desenvolvimento da ciência ligada a evapotranspiração. Consistiam basicamente em mensurações diretas ou indiretas, através de lisímetros ou via balanço de energia, respectivamente. A coleta dos variados parâmetros necessários para cálculo da evapotranspiração, cuja mensuração para áreas extensas requeria um grande esforço, limitavam a aplicação destas mensurações (Idso *et al.*, 1975).

Em 1972, quando lançado o *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), alcunhado de Landsat-1 em 1975, foi possível obter os primeiros dados de origem remota e testá-los a fim de provar sua aplicabilidade em estudos ligados à evaporação da água no solo em determinado espaço de tempo. À época, estudos demonstraram que a evaporação real poderia ser calculada através das temperaturas medidas remotamente por meio de radiômetros existentes nos sensores orbitais (Idso, 1975). No entanto, em 1978, com os lançamentos dos satélites *Heat Capacity Mapping Mission* (HCMM) e *Tiros-N*, foi possível utilizar dados do sensoriamento remoto para realizar estudos de fluxo de energia e umidade no solo, pois os satélites em questão coletavam dados na faixa do termal (10,5 – 12,5 $\mu$ m) em diferentes horários do dia (Price, 1980).

Em sequência, muitos estudos foram realizados no intuito de fazer uso destas informações coletadas de forma remota com o objetivo de estimar a evapotranspiração real. Pesquisas relativas ao desenvolvimento e validação de índices de vegetação (Tucker, 1979); estabelecimento de relações entre banda termal e teor de umidade do solo (Price, 1980) são alguns exemplos do progresso realizado ao estudo da evapotranspiração e que se fazem úteis até os dias atuais.

Para estimar os valores de evapotranspiração devem-se utilizar modelos matemáticos, os quais podem ser divididos em dois grupos: os métodos empíricos, que se baseiam em dados obtidos através do sensoriamento remoto com dados medidos na superfície terrestre por meio de modelo estatístico; e métodos analíticos, que variam em

complexidade e buscam estabelecer os processos físicos, necessitando de dados medidos direta e indiretamente por sensoriamento remoto e instrumentos na superfície (Li *et al.*, 2009).

No tratamento analítico, os modelos podem ser categorizados como de uma camada (*Single Source Models*) ou de duas camadas (*Dual Source Models*), na qual a maior diferença entre as duas reside no fato da separação do fluxo de energia da superfície ser desmembrada em um ou dois componentes: na evaporação da superfície do solo e na transpiração das plantas (Allen *et al.*, 1998)

Ainda que os modelos de duas camadas sejam entendidos como mais evoluídos quando comparado aos de uma camada (Kustas e Norman, 1996; Norman *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2012), os modelos de camada singular são amplamente usados, havendo diferentes abordagens que foram sendo desenvolvidas com o tempo, por exemplo: o *Surface Energy Balance for Land* – SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998a; Bastiaanssen *et al.*, 1998b); o *Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration* – METRIC (Allen *et al.*, 2007); e o *Surface Energy Balance System* – SEBS (Su, 2002).

O SEBAL, por exemplo, pode ser utilizado em problemas ligados ao desempenho da irrigação de culturas, bem como na gestão dos recursos hídricos por meio do entendimento da relação entre uso do solo e uso da água para manejo de bacias hidrográficas, desenvolvimento de modelos hidrológicos e monitoramento da degradação da vegetação nativa (Bastiaanssen *et al.*, 2005).

O *Simplified Surface Energy Balance operational* - SSEBop, por sua vez, é uma metodologia mais recente que buscou simplificar a aplicação do modelo (Senay *et al.*, 2007, 2013), favorecendo seu uso. Diferentemente do METRIC e do SEBAL, o SSEBop calcula o fluxo de calor sensível por meio da variação da temperatura pré definida em situações extremas, o que não reduz a performance do modelo em questão (Singh e Senay, 2016).

Assim como os outros, o SSEBop também foi validado em campo por meio de lisímetros (Senay *et al.*, 2013), por estações agroclimatológicas (Singh, 2012) e por meio do balanço hídrico (Senay *et al.*, 2016), corroborando com seu potencial de aplicação.

No Brasil, o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS, por ter excelente resolução temporal (1 dia), é amplamente empregado para diversas aplicações, como: obter estimativas de evapotranspiração real de culturas, como feijão, soja e cana de açúcar (de Paula, 2018), (Ruhoff *et al.*, 2008) assim como para bacias e sub-bacias hidrográficas (Comini *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2014), e para entender a dinâmica da cobertura vegetal (Rosembach *et al.*, 2010).

Internacionalmente, o uso do sensor MODIS também abrange diversos usos. Nos EUA, temos: estimativa da evapotranspiração ripária (Nagler *et al.*, 2013) e de culturas agrícolas (Nagler *et al.*, 2013; Patel *et al.*, 2006);

monitoramento de estiagem no sul dos EUA (Wan e Wang, 2010); estudos de evapotranspiração pós incêndios florestais (Poon *et al.*, 2018), além de estimativa de produção primária (Yuan *et al.*, 2010).

Na China devem-se destacar os estudos relacionados ao uso remoto de dados climáticos e suas consequências para a gestão dos recursos hídricos; estimativa da evapotranspiração em área agrícola (Thevs *et al.*, 2015; Yang, He e Lei, 2010); e de lagos em áreas úmidas (Sun *et al.*, 2011); e previsões de estiagens na agricultura (Gao *et al.*, 2008; Zhang e Yamaguchi, 2014).

Desta forma, é possível inferir que a busca por essas práticas robustas e com viabilidade prática para mapeamento do fluxo de energia pode ser muito relevante para agricultura de precisão, monitoramento de estiagens, modelagem de águas subterrâneas e, ainda, para detecção de mudanças em sistemas naturais e manejados resultantes de ações antrópicas ou climáticas (Anderson *et al.*, 2004), além da mensuração indireta da evapotranspiração configurar uma significativa mudança na gestão dos recursos hídricos (Bastiaanssen, 2000; Courault *et al.*, 2003).

Pode-se afirmar que muito se avançou em relação à tecnologia na área de sensoriamento remoto. Existem diversos modelos que possibilitam estimar e monitorar a evapotranspiração com o uso de imagens de satélite e dados climatológicos (Allen *et al.*, 2007b; Bastiaanssen *et al.*, 2005; Senay *et al.*, 2013).

### 3.1.1 *Sensor MODIS e sua importância*

O sensor MODIS apresenta excelente resolução temporal (um dia), espectral alta e baixa resolução espacial, que varia de 250 a 1.000 metros, Dentre os produtos oferecidos pelo sensor, devem-se destacar as imagens com a estimativa de reflectância espectral na superfície, que é uma aproximação de como se tivesse realizado a medição *in loco* (MODIS, 2011).

Esse sensor, por ter 36 bandas espectrais, permite estudos mais específicos para cada um dos 36 intervalos do espectro eletromagnético que o sensor atinge, tornando-o um dos mais importantes para estudos das variáveis climáticas em termos globais.

Suas principais aplicações estão relacionadas ao clima com obtenção de medidas de fluxo de energia radiante, aquisição de dados de umidade atmosférica, temperatura da superfície terrestre e marítima, velocidade dos ventos, propriedades físicas das nuvens, monitoramento das mudanças climáticas em escala global e também o uso e cobertura do solo (Teixeira *et al.*, 2013).

Apesar da baixa resolução espacial, a agricultura, que geralmente é favorecida por sensores com altas resoluções espaciais, também pode se beneficiar, uma vez que os dados passíveis de serem obtidos através do

MODIS permitem o estudo mais aprofundado da variável evapotranspiração, parâmetro fundamental em empresas rurais de alto rendimento.

### 3.2. Evapotranspiração

A irrigação de culturas agrícolas depende do solo e da quantidade de água que pode ser armazenada neste. Para melhor compreender este sistema, é necessário entender dois conceitos que estão intrinsicamente ligados ao manejo da água em culturas: a capacidade de campo e o ponto de murchamento.

O primeiro refere-se à água drenada para baixo da zona radicular ou, ainda, para dentro de um dreno, não ficando mais disponível para a planta. Considerando-se que o solo saturado esteja em um local onde o lençol freático é profundo, a água disponível neste terá um movimento vertical para baixo, sendo mais uma vez não disponível para a cultura hipotética. O ponto de murchamento, por sua vez, é quando a planta não consegue retirar umidade do solo na mesma quantidade com que ela respira, havendo, portanto, um déficit hídrico (Bernardo *et al.*, 2008).

Como já citado, a evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície vegetal, durante determinado período de tempo. Inclui-se a evaporação da água do solo, a evaporação da água depositada pela irrigação, chuva ou orvalho na superfície vegetal, bem como a transpiração vegetal. Este processo necessita da energia solar para que seja realizado e depende da planta, do solo e, principalmente, do clima (Bernardo *et al.*, 2008).

A evaporação da água do solo baseia-se no fato de que em solos saturados ou com lençol freático próximo à superfície sua evaporação é próxima de 100%, pois quanto mais próxima à superfície, maior será a intensidade de evaporação e, conseqüentemente, quanto mais profundo for o lençol freático, menor a taxa de evaporação da água do solo.

A transpiração é descrita pelo processo pelo qual a água sai da planta para a atmosfera por meio de seus estômatos, sob a forma de vapor. Esse sistema é um contínuo movimento de água do solo para as raízes, das raízes até as folhas, e destas para a atmosfera. Quando a transpiração de uma planta for maior que sua capacidade de absorver água do solo, haverá o murchamento da mesma.

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica é um diagnóstico detalhado de como e quanto a região tem recebido e perdido água. Para o cálculo é considerado o volume de precipitação, o escoamento superficial do solo, sua infiltração e, por fim, a evaporação do solo e transpiração das espécies vegetais, as quais, estas duas últimas, correspondem à evapotranspiração.

Os métodos para cálculo do balanço hídrico baseiam-se no princípio da conservação de massa aplicada ao ciclo hidrológico e apesar de simples do ponto de vista teórico, sua aplicação muitas vezes esbarra em dificuldades práticas de campo, sendo uma das causas destes modelos não serem usados de forma mais ampla quando comparados aos modelos de transferência de energia e massa. No entanto, por ser conceitualmente mais simples, é uma forma prática de comparar e validar métodos e técnicas que ligados ao estudo dos parâmetros ligados à hidrologia.

Desta forma, uma maneira de calcular a taxa de evapotranspiração pode ser por meio do Balanço Terrestre de Água, na qual se infere que em uma superfície de tamanho  $A$ , a média da evapotranspiração pode ser expressa por:

$$E = P - Q - \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

Em que o  $E$  é a taxa média de evapotranspiração da superfície,  $Q$  é a soma dos escoamentos superficiais e de base por unidade de área,  $S$  é o volume de água armazenado por unidade de área.

Em casos de estudos em grandes áreas naturais, tais como bacias hidrográficas, os fatores  $Q_g$  (água subterrânea) e  $Q_{ri}$  (entrada de água superficial) poderão ser desprezados, ao passo que em bacias artificiais, estes valores são, em tese, conhecidos com precisão. Portanto, se  $R = (Q_{ro} - Q_{ri})$  é o escoamento superficial médio por unidade de área, a equação (Balanço Hídrico) pode ser simplificada por (Brutsaert, 2005):

$$E = P - R - \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

Para que a Eq. (Bal. Hídr. Simplificado) seja corretamente empregada, serão necessários dados relativos à precipitação e de escoamento superficial. Para reduzir a importância da variável  $S$ , que é mais complicada de ser obtida, é preciso que o período de análise seja de ao menos um ano, caso contrário fica indispensável uma nova equação que estime a variável  $S$ . Vale ressaltar que o volume de água armazenado ( $S$ ) retorna ao mesmo valor após um ano, o que explica a insignificância de  $S$  ao longo do tempo (Brutsaert, 2005).

O termo evapotranspiração pode ser analisado por diferentes óticas, que possuem os mesmos princípios, porém cada qual com suas especificidades. A Evapotranspiração Potencial de Referência ( $ET_o$ ) é representada pela demanda de evapotranspiração ocorrida em uma superfície coberta por uma cultura hipotética, em que não haja escassez hídrica e nutricional. A Evapotranspiração Potencial de Cultura ( $ET_{pc}$ ) ocorre quando a cultura se encontra em ótimas condições de umidade e nutrientes no solo, de modo a permitir a produção potencial desta mesma cultura em campo. Já a Evapotranspiração Real da Cultura ( $ET_{rc}$ ) é a quantidade de água evapotranspirada por uma determinada cultura sob as condições normais de cultivo, ou seja, sem necessariamente do teor de umidade

permanecer sempre próximo à capacidade de campo, o que significa que a  $ET_{rc}$  é menor, ou no máximo, igual a  $ET_{pc}$  (Bernardo *et al.*, 2008).

A  $ET_o$  é predominantemente controlada pelo tempo por fatores como a radiação solar, vento e a diferença na pressão de vapor da água, enquanto a  $ET_c$  depende de um número maior de fatores, como a espécie cultivada e sua profundidade radicular, sua altura e os albedos referentes a essa mesma cultura e do solo.

Para determinação da  $ET_o$  existem os métodos diretos e indiretos. As metodologias diretas calculam a  $ET_o$  a partir de alguns parâmetros, como a fonte de água a ser usada, se é via irrigação, precipitação ou água subterrânea. As mais comuns são: lisímetros, parcelas experimentais, controle da umidade no solo e método da Entrada-Saída. Os métodos indiretos, por sua vez, são aqueles em que há necessidade multiplicar o valor encontrado por um fator K, a ser determinado para cada região e método escolhido. Os métodos mais utilizados são: evaporímetros e equações.

De acordo com a *Food and Agricultural Organization* – FAO, o método padrão para cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), a qual considerou como superfície de referência uma cultura hipotética com altura de 0,12 metro, albedo de 0,23 e resistência superficial igual a  $70 \text{ s m}^{-1}$ , semelhantemente a uma superfície extensa de grama verde em crescimento ativo, de altura uniforme com irrigação adequada (Allen *et al.*, 1998).

Também chamada de equação de Penman-Monteith (FAO), este cálculo incrementou os conceitos de balanço de energia com dados oriundos da resistência aerodinâmica e da superfície, tornando o cálculo da evapotranspiração de culturas plausível. Hoje, é largamente usada no Brasil, sendo recomendada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa - como a metodologia padrão para cálculo de  $ET_o$ .

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (E_s - E_a)}{\Delta + \gamma (1+0,34 u_2)} \quad (3)$$

Em que:

$ET_o$ : Evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$R_n$ : Saldo de radiação à superfície da cultura ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$G$ : Densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$T$ : Temperatura do ar a 2m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );

$u_2$ : Velocidade do vento a 2m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );

$E_s$ : Pressão de vapor de saturação (kPa);

Ea: Pressão parcial de vapor (kPa);

$\Delta$ : Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>)

$\Gamma$ : Coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>).

A evapotranspiração possui papel central na transferência de massa e energia entre o sistema solo-água-vegetação e a atmosfera e, por isso, é um importante processo para o ciclo hidrológico (Senay *et al.*, 2013).

Desta forma, neste processo de transferência, existe a necessidade de transformação do estado físico da água de líquido para gasoso, o qual só poderá ocorrer quando há um acréscimo de energia no sistema.

O aumento de energia pode ser dado por meio de dois fatores: radiação solar direta e, em menor grau de importância, a temperatura do ar (Lopes *et al.*, 2019). A força para retirar a água da superfície evaporante é função do gradiente de pressão de vapor na atmosfera a sua volta, de forma que à medida que o ar se satura de umidade, o processo se tornará cada vez mais lento até que este seja encerrado. A substituição do ar saturado, por sua vez, subordina-se a velocidade do vento.

Desta forma, podem ser elencados como parâmetros climatológicos a serem considerados na mensuração da evapotranspiração a: radiação solar; temperatura do ar; e a velocidade do vento.

O conhecimento acerca das taxas de evapotranspiração para determinado local é componente essencial para o desenvolvimento e monitoramento de sistemas hidrológicos, da agricultura e ambiental. Um exemplo é o fato de a evapotranspiração ser uma variável chave na irrigação e modelagem de culturas (Senay *et al.*, 2013).

Para a variável em questão ser medida são necessários equipamentos de alto custo e profissionais especializados, o que muitas vezes torna o processo moroso, além de torná-lo inviável do ponto de vista financeiro. De forma a fazer-se viável, a evapotranspiração é estimada por meio de dados meteorológicos, de vegetação e de solo. Por meio do estudo do balanço de energia na superfície, por exemplo, é possível quantificar a energia disponível para que processos como o aquecimento do ar, do solo e a evaporação da água ocorram (Payero *et al.*, 2003).

Desta forma, a evapotranspiração pode ser descrita como o resíduo da equação do balanço de energia, descrito por:

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

Em que:

Rn: saldo de radiação,  $W m^{-2}$ ;

LE: fluxo de calor latente,  $W m^{-2}$ ;

H: fluxo de calor sensível,  $W m^{-2}$ ;

G: fluxo de calor no solo,  $W m^{-2}$ .

Alguns dos modelos digitais mais utilizados para estimar a variável evapotranspiração por dados obtidos por sensoriamento remoto são: o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL (Bastiaanssen. *et al.*, 1998a; Bastiaanssen *et al.*, 1998b); o modelo *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* – METRIC (Allen *et al.*, 2007b); e o *Simplified Surface Energy Balance for Operational Application* – SSEBop (Senay *et al.*, 2013).

A principal diferença entre eles reside, principalmente, na forma de calcular o fluxo de calor sensível (Lopes *et al.*, 2019). O SEBAL calcula a diferença de temperatura a partir dos valores de calor sensível para as condições de pixel quente, que corresponde ao máximo fluxo de calor sensível e mínimo fluxo de calor latente; e pixel frio, que possui fluxo de calor sensível mínimo e fluxo de calor latente máximo (Bastiaanssen *et al.*, 1998). No METRIC, por conseguinte, a diferença de temperatura dá-se em função da evapotranspiração de referência para a cultura alfafa obtida pela metodologia de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2007b). Em ambos os modelos se faz necessário a completa resolução do balanço de energia.

O SEBAL necessita, de maneira geral, medições de velocidade do vento associada a uma intensa calibração, o que requer um operador experiente, enquanto o METRIC, que utiliza a evapotranspiração de referência para se autocalibrar, requer dados precisos de radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento, preferencialmente em base horária (Lopes *et al.*, 2019; Allen *et al.*, 2007a).

Desta forma, apesar de apresentarem bons resultados, especialmente para estudos locais, estes dois modelos demandam grandes volumes de dados quando utilizados para regiões mais amplas ou com limitação de dados, impossibilitando o emprego das respectivas metodologias.

A repartição da energia disponível entre calor sensível, que é a energia utilizada para alteração da temperatura do ar atmosférico, enquanto o calor latente é a energia usada para o processo de mudança de fase da água, pode ser realizada por meio da Razão de Bowen (Bowen, 1926).

a) Razão de Bowen

Bowen (1926) implementou uma metodologia para desmembrar a energia disponível ( $R_n - G$ ) entre calor sensível e calor latente, baseando-se nas trocas de calor e massa entre a superfície e atmosfera. No entanto, somente nas últimas décadas é que sua aplicação prática foi possível, propiciando a adoção do método para se calcular a evapotranspiração (Payero *et al.*, 2003).

A razão de Bowen ( $\beta$ ) representa a relação entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente, ambos medidos em  $W\ m^{-2}$ , conforme a equação:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (5)$$

É possível estabelecer, através das equações [3] e [4], respectivamente, uma relação empírica entre o fluxo de calor sensível e o gradiente vertical de temperatura  $\frac{\partial T}{\partial z}$  e o fluxo de calor latente e o gradiente vertical de pressão de vapor  $\frac{\partial e}{\partial z}$ .

$$H = -\rho_a c_p k_h \frac{\partial T}{\partial z} \quad (6)$$

$$LE = -\frac{(\rho_a c_p)}{\gamma} K_v \frac{\partial e}{\partial z} \quad (7)$$

Em que:

$\rho_a$  = a densidade do ar atmosférico,  $kg\ m^{-3}$ ;

$c_p$  = calor específico do ar a pressão constante,  $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;

$k_h$  = coeficiente de transporte turbulento para o calor,  $m^2\ s^{-1}$ ; e

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico,  $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ;

$k_v$  = coeficiente de transporte turbulento para o vapor de água,  $m^2\ s^{-1}$ .

Ademais, considerando que os coeficientes de transporte turbulento para o vapor de água e calor sejam iguais (Perez *et al.*, 1999), a razão de Bowen pode ser calculada a partir das diferenças verticais de temperatura e pressão de vapor entre dois níveis, conforme a equação a seguir:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (8)$$

Correlacionando-se a razão de Bowen com a equação do balanço de energia (Equação 1), é possível calcular o fluxo de calor latente pela equação:

$$LE = \frac{(Rn-G)}{1+\beta} \quad (9)$$

A razão de Bowen tem se apresentado como uma boa metodologia em relação a métodos de medição direta (Silva *et al.*, 2005; Todd *et al.*, 2000); além de suas vantagens incluem a possibilidade de realização de medidas simples e contínuas em curtos intervalos de tempo e o fato de informações acerca da aerodinâmica da superfície de interesse não serem necessárias (Lopes *et al.*, 2019).

### 3.3. Modelo SSEBop

O SSEBop origina-se do *Simplified Surface Energy Balance* - SSEB (Senay *et al.*, 2007) como uma alternativa simplificada, também baseada no balanço de energia da superfície, porém sem haver necessidade de sua completa solução. Essa característica facilita a obtenção de estimativas de evapotranspiração de forma mais ágil em regiões mais extensas, contrastando com os procedimentos mais complexos e acurados que não são viáveis (Allen *et al.*, 2007a).

O que torna o SSEB mais prático do ponto de sua aplicabilidade é o fato da temperatura ser multiplicada diretamente pela estimativa de máxima evapotranspiração, enquanto os modelos SEBAL e METRIC, por exemplo, a temperatura é usada para uma estimativa aerodinâmica do fluxo de calor sensível, que é subtraído da energia disponível para obtenção do fluxo de calor latente (Senay *et al.*, 2011).

O *Simplified Surface Energy Balance for operational application* - SSEBop (Senay *et al.*, 2013) foi desenvolvido em sequência com uma nova característica: inclusão de condições de contorno previamente determinada para cada pixel referente às condições de fluxo de calor latente mínimo (pixel quente), o qual é obtido através da adição de uma diferença de temperatura predefinida, única para cada localização e sazonalmente dinâmica; e máximo (pixel frio), cujo valor de referência é estimado como uma fração da temperatura do ar.

Esta diferença de temperatura predefinida nos valores de referência para os pixels quentes e frios amplifica a aplicabilidade do método quando comparada aos modelos mais complexos, SEBAL e METRIC, que necessitam de regiões com climas e hidrologia mais homogêneas e uniformes. Essa nova parametrização do modelo foi desenhada para reduzir a probabilidade de erros relativos ao operador, fator existente no modelo SSEB e similares. No SSEBop, a possível fonte de erro mais significativa advém do viés no uso da função dT que é única para cada pixel. Essa nova abordagem do dT predefine a diferença de temperatura (dT) entre os valores de referência “quente” e “frio” para

cada pixel, diferentemente de outros modelos como o SSEB ou SEBAL, que utilizam um conjunto de referência em pares aplicáveis a uma região com clima minimamente estável. (Senay *et al.*, 2013).

Os resultados encontrados por Senay *et al.*, (2013) se mostraram satisfatórios em que o modelo foi testado para todo o território dos Estados Unidos da América fazendo uso de imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS. Não obstante, o autor indica que a aplicação do modelo para regiões menos extensas implicaria em melhores performances e resultados.

O SSEBop, portanto, possibilita realizar a estimativa da evapotranspiração real como sendo uma fração da evapotranspiração de referência, que advém do balanço de energia na superfície (Senay *et al.*, 2013), o que facilita a aplicação do modelo, pois não é necessária a resolução completa do balanço de energia (Senay *et al.*, 2016)

Em um estudo comparativo entre SSEBop, METRIC e SEBAL, ficou provado que a complexidade do modelo não significa uma performance melhor, visto que os resultados gerados pelo SSEBop foram melhores que o SEBAL e semelhantes aos encontrados com o METRIC, que é o modelo mais complexo (Singh e Senay, 2016).

## **4. Material e Métodos**

### *4.1. Área de Estudo*

Os alvos de estudo consistem em pivôs centrais das culturas: trigo (*Triticum aestivum*), soja (*Glycine max*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*), as quais estão localizadas nas regiões do Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal – PAD/DF e em Cristalina, Goiás. De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante da região é do tipo AW, tropical de savana, característico do bioma Cerrado, e precipitação média anual média de 1.400 mm. Seu relevo é plano a levemente ondulado.

As culturas foram monitoradas ao longo de todo seu ciclo de vida: plantio, desenvolvimento e colheita. As informações gerais para cada pivô podem ser visualizadas na Tabela 1.

**Tabela 1. Dados gerais das culturas analisadas.**

| <b>Cultura</b> | <b>Localização</b> | <b>Período</b>          | <b>Nº Estação</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Referência</b>            |
|----------------|--------------------|-------------------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| <b>Feijão</b>  | PAD/DF             | 01/04/2015 a 30/09/2015 | 1                 | 90,56            | (de Paula, 2018)             |
| <b>Soja 1</b>  | Cristalina, GO     | 01/11/2014 a 30/04/2015 | 2 e 3             | 44,85            | (de Paula, 2018)             |
| <b>Soja 2</b>  | PAD/DF             | 01/10/2015 a 31/03/2016 | 4 e 5             | 90,56            | (de Paula, 2018)             |
| <b>Soja 3</b>  | Cristalina, GO     | 01/10/2017 a 31/01/2018 | 6                 | 122,24           |                              |
| <b>Trigo 1</b> | Cristalina, GO     | 01/06/2017 a 31/10/2017 | 7                 | 123,49           | (Lopes <i>et al.</i> , 2019) |
| <b>Trigo 2</b> | Cristalina, GO     | 01/05/2018 a 31/08/2018 | 8                 | 122,01           |                              |

Parte dos dados utilizados no presente trabalho foram coletados por de Paula (2018) e por Lopes *et al.* (2019). A análise dos dados seguiu o mesmo padrão desses estudos, no qual a soja e o feijão foram agrupados em um único conjunto de dados (de Paula, 2018); enquanto a cultura do trigo formou outro grupo de dados (Lopes *et al.*, 2019). Também foram acrescidos ao escopo do estudo medições relativas a um ciclo de trigo e outro de soja realizados após o término dos experimentos realizados por de Paula (2018) e por Lopes *et al.* (2019).

A avaliação em relação à sazonalidade dos plantios também foi feita, sendo os dados divididos em dois grupos: Chuvoso e Seco, nos quais as culturas cultivadas entre outubro a fevereiro foram alocadas no grupamento Chuvoso, enquanto os plantios entre maio a setembro foram agrupados como Seco.

Todas as áreas de estudo analisadas encontraram-se situadas no interior de quatro *pixels* do sensor MODIS, de modo que cada *pixel* foi avaliado de forma individual, bem como de forma agrupada para cada cultura. Cada *pixel* da imagem foi dividido em quatro quadrantes, numerados de 1 a 4, de forma sistemática, para padronização dos dados extraídos (Fig. 1).

As estações meteorológicas utilizadas para obtenção dos dados *in loco* foram posicionadas no interior dos pivôs centrais e suas coordenadas geográficas foram armazenadas para posterior identificação ao quadrante onde a mesma estava inserida ao longo de todo o desenvolvimento da cultura.

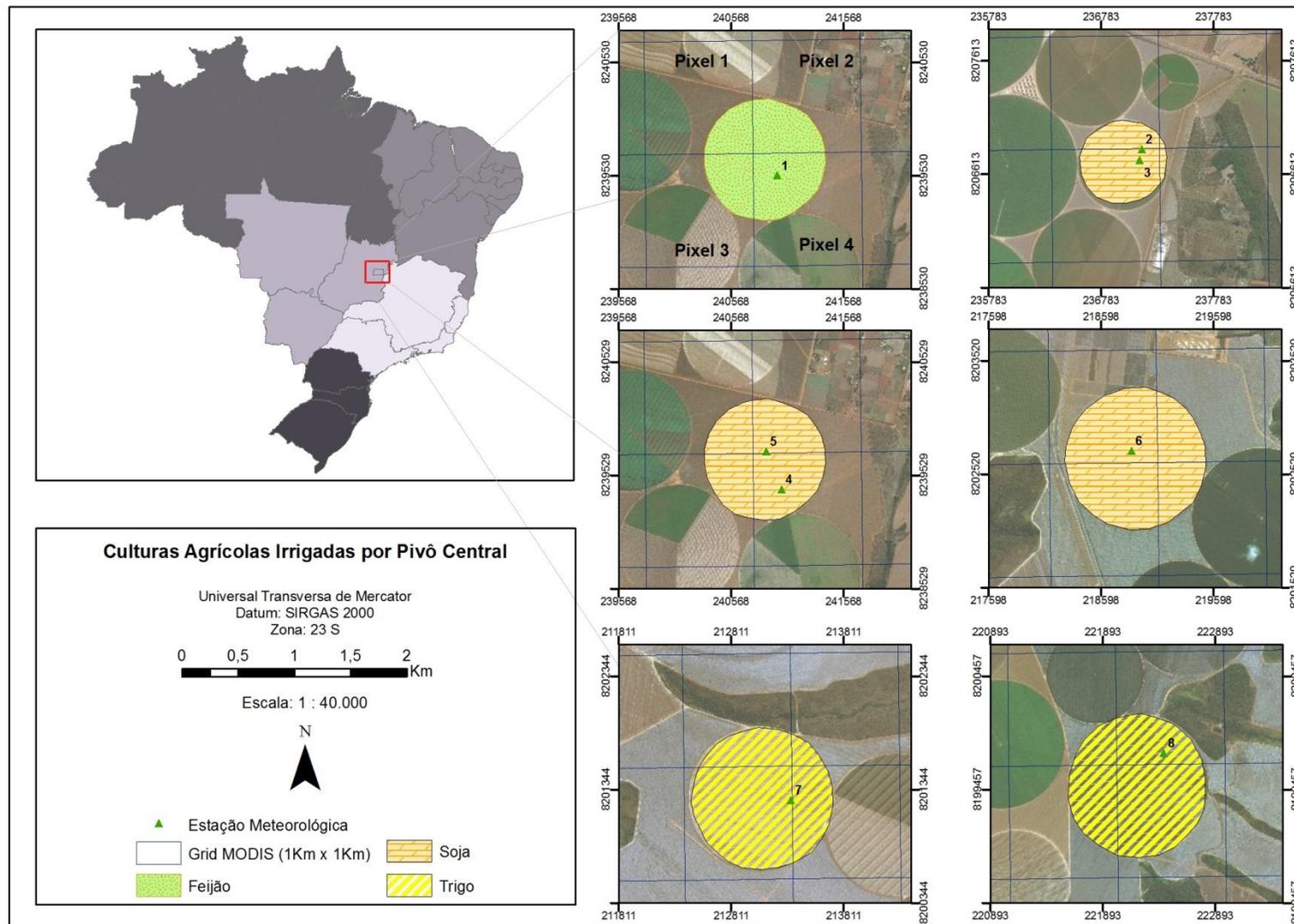


Figura 1. Localização e caracterização da área de estudo.

Das imagens MODIS foram extraídos dois conjuntos de dados:

1. Valor gerado pela aplicação do modelo SSEBop relativo ao *pixel* onde a estação meteorológica estava inserida, alcunhada de ‘pixel da estação’;
2. Valor máximo referente aos quatro *pixels* onde os pivôs estavam contidos, denominado ‘valor máximo do pixel’.

#### 4.2. SSEBop e suas equações

Como já mencionado anteriormente, o SSEBop calcula a ETr a partir de uma fração da ETo por meio da Equação 10.

$$ETr = ETf \times k \times ETo \quad (10)$$

Em que:

ETr: Evapotranspiração real

ETf: Fração evapotranspirativa;

k: constante

ETo: Evapotranspiração de referência.

Apesar de Senay *et al.*,(2013) sugerirem o uso de  $k = 1.2$ , eles também recomendam realizar a calibração deste parâmetro para reduzir valores enviesados por meio de lisímetros ou balanço de energia através da Equação 11.

$$ETf = \frac{Th - Ts}{Th - Tc} \quad (11)$$

Em que:

Ts: Temperatura da superfície do alvo via imagem de satélite, onde a evapotranspiração está sendo medida em um determinado período do tempo;

Th: É a Ts estimada para o pixel quente;

Tc: É a Ts estimada para o pixel frio.

$$Tc = c \times Ta \quad (12)$$

Em que:

Ta: Temperatura da superfície terrestre;

c: fator de correção relativo a Ta até Ts em uma vegetação úmida e com transpiração máxima

$$c = \frac{T_{scold}}{Ta} \quad (13)$$

Em que:

Ts\_cold: Temperatura dos alvos localizados em regiões definidas como frias nas imagens (NDVI > 0,8)

Ta: Temperatura da superfície terrestre

Para mais detalhes acerca das equações utilizadas na parametrização do SSEBop recomenda-se que seja consultado o estudo de Senay *et al.*, (2013), que fez a formulação inicial do modelo, bem como Senay *et al* (2016; 2017) que trouxeram modificações ao método.

#### 4.3. Evapotranspiração via *Climate Engine*

O *Climate Engine* é uma plataforma que fornece dados de sensoriamento remoto pela internet (<https://app.climateengine.org/>) que foi elaborado por uma equipe multidisciplinar de cientistas cujos principais parceiros são a *National Aeronautics and Space Administration* - NASA, *Google Earth Engine* e o *United States Geological Survey* – USGS. O serviço disponibiliza uma série de produtos oriundos de processamentos digitais como, dentre os quais, a ETr obtido por meio do modelo SSEBop. Na prática, o *Climate Engine* torna públicas imagens com a evapotranspiração estimada desde 2003 até a presente data, a cada 10 dias.

Os seis pivôs tiveram sua evapotranspiração real estimada através de imagens processadas obtidas junto ao *Climate Engine*. Esta etapa seguiu alguns processos, os quais serão descritos a seguir:

**Obtenção das imagens dentro do período de cultivo da cultura:** cada cultura teve suas imagens adquiridas de modo a representar todo o ciclo de vida da cultivar em questão. As imagens adquiridas possuem periodicidade de 10 dias (decendial), com resolução espacial de 1km, cujos valores relativos à evapotranspiração foram calculados por meio do modelo SSEBop por meio de dados do sensor MODIS (Senay *et al.*, 2013).

**Processamento das imagens no software ENVI 5.3:** cada cultura teve seu *dataset* de imagens processadas. Iniciando-se com a ferramenta *Layer Stacking*, que empilhou todas as imagens da cultura, da mais antiga para a mais nova. Em seguida, o vetor *shapefile* foi inserido para localização da área de estudo. A etapa seguinte consistiu no uso da ferramenta *Region of Interest (ROI)*, cujo objetivo foi de extrair o valor de ETr para todos os pivôs. Vale ressaltar que não foi encontrado nenhum pixel puro, ou seja, foram usados quatro pixels para cada pivô avaliado.

**Transferência dos dados extraídos da imagem para planilhas digitais:** Na sequência, os dados foram extraídos dos quatro pixels em que abrange o pivô e armazenados em planilhas eletrônicas para posterior análise.

#### 4.4. *Evapotranspiração real das culturas avaliadas*

As estações meteorológicas, as quais forneceram os valores reais de evapotranspiração das culturas, foram alocadas na parte interna dos pivôs centrais estudados, conforme Figura 1. A metodologia de cálculo para obtenção da ETrc foi baseada na Razão de Bowen, cujas equações já foram supracitadas anteriormente.

### 4.5. Resultados

#### 4.6. *Análise da ETr decendial para as culturas avaliadas*

A Figura 2 apresenta os gráficos de dispersão da ETr decendial da soja e do feijão em relação ao valor do pixel em que a estação agrometeorológica está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B), e do trigo com base no pixel (C) e no valor máximo (D). A Tabela 2 apresenta os resultados da análise estatística dos cenários avaliados para as culturas da soja e feijão e para a cultura do trigo na escala temporal decendial.

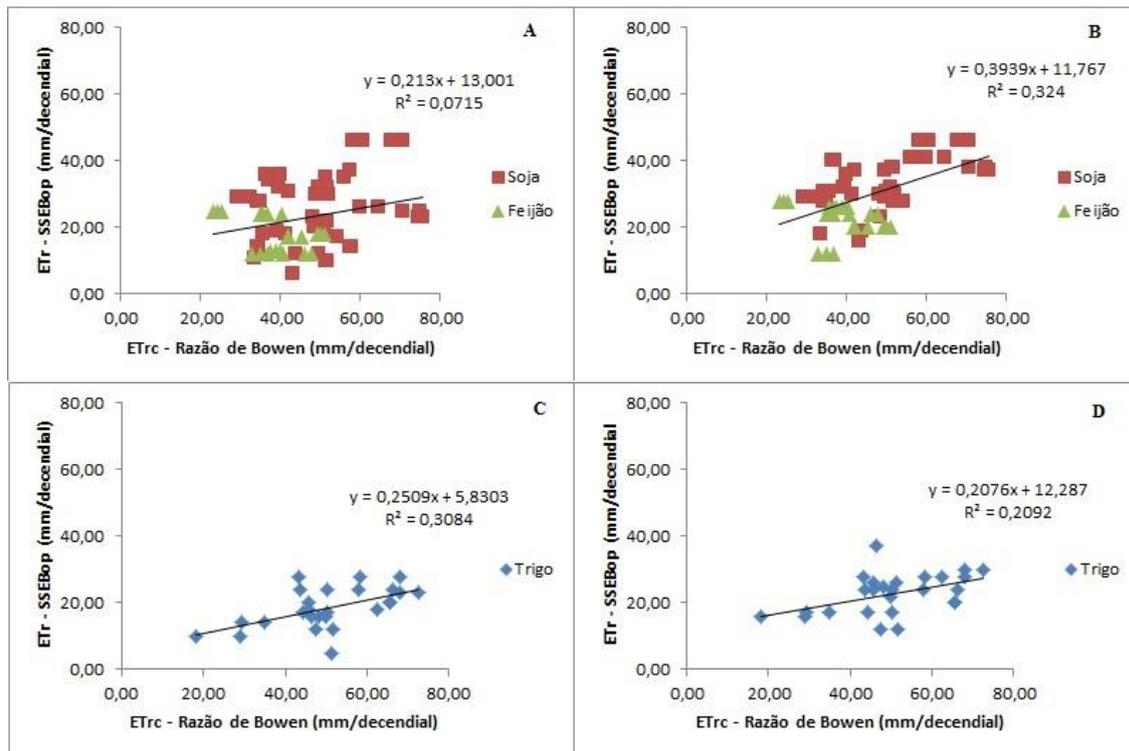


Figura 2. Gráficos de dispersão da ETr decenal da soja e do feijão: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D).

Tabela 2. Estatísticas referentes às culturas da Soja e Feijão e Trigo na análise decenal.

| Regressão - Decenal        | Soja e Feijão |           | Trigo       |           |
|----------------------------|---------------|-----------|-------------|-----------|
|                            | Valor Pixel   | Valor Máx | Valor Pixel | Valor Máx |
| Estatísticas               |               |           |             |           |
| Coefficiente de Correlação | 0,27          | 0,57      | 0,56        | 0,46      |
| R-Quadrado                 | 0,07          | 0,32      | 0,31        | 0,21      |
| p-valor                    | < 0,05        | < 0,05    | < 0,05      | < 0,05    |
| % Bias                     | -50,44        | -22,50    | -63,36      | -54,91    |
| Observações                | 70            | 70        | 26          | 26        |

Os resultados indicam a existência de correlação positiva entre os dados de ETrc e ETr - SSEBop. A cultura do trigo apresentou o maior Coeficiente de Correlação quando os valores de ETrc foram comparados com o pixel em que a estação agrometeorológica está localizada (CC = 0,56), enquanto para a soja e para o feijão o CC foi

maior quando comparando com o valor máximo do pixel ( $CC=0,57$ ). Os p-valores de todos os CC avaliados na escala de tempo decendial foram significativos (p-valor <0.05).

Não obstante, ao avaliar a regressão entre os dados nos cenários analisados na escala decendial, observa-se que o coeficiente de determinação foi baixo ( $R^2 < 0,40$ ). O SSEBop subestima as medidas de  $ET_{rc}$  para todas os cenários analisados (%Bias < 0), sendo sistematicamente inferior a  $ET_{rc}$ . Além disso, quando se analisa os gráficos de dispersão observa-se que a magnitude de  $ET_r - SSEBop$  não acompanha o crescimento da  $ET_{rc}$ .

#### 4.7. Análise da $ET_r$ mensal para as culturas avaliadas

A Figura 3 apresenta os gráficos de dispersão da  $ET_r$  mensal da soja e do feijão em relação ao valor do pixel em que a estação agrometeorológica está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B), e do trigo com base no pixel (C) e no valor máximo (D). A Tabela 3 apresenta os resultados da análise estatística dos cenários avaliados para as culturas da soja e feijão e para a cultura do trigo na escala temporal decendial.

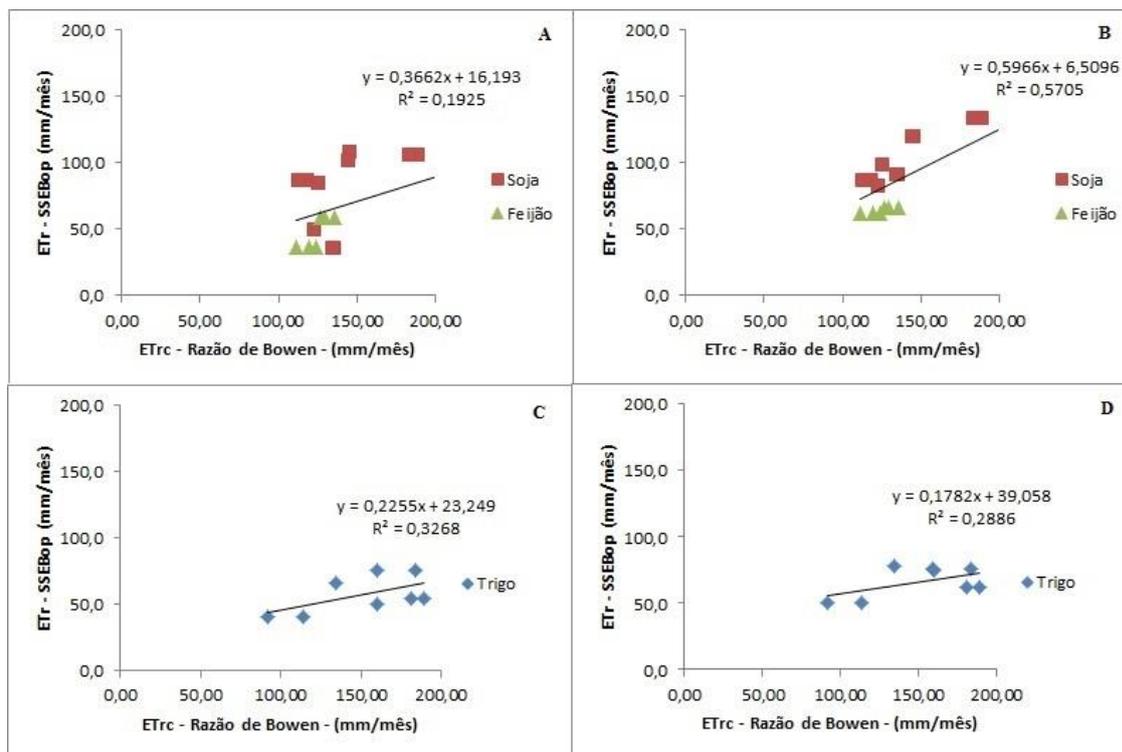


Figura 3. Gráficos de dispersão da  $ET_r$  mensal da soja e do feijão: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D).

**Tabela 3. Estatísticas referentes às culturas da Soja e Feijão e Trigo na análise mensal.**

| Regressão - Mensal         | Soja e Feijão |           | Trigo       |           |
|----------------------------|---------------|-----------|-------------|-----------|
|                            | Valor Pixel   | Valor Máx | Valor Pixel | Valor Máx |
| Estatísticas               |               |           |             |           |
| Coefficiente de Correlação | 0,44          | 0,76      | 0,57        | 0,54      |
| R-Quadrado                 | 0,19          | 0,57      | 0,33        | 0,29      |
| p-valor                    | 0,07          | < 0,05    | 0,14        | 0,17      |
| % Bias                     | -52,08        | -35,80    | -62,15      | -56,47    |
| Observações                | 18            | 18        | 8           | 8         |

Ao analisar os valores em escala mensal percebe-se uma melhora nos resultados. As correlações CC, tomando o valor do *pixel* da estação como referência, melhoraram de forma significativa no caso da soja e feijão (de 0,27 para 0,44), indicando a existência de correlação positiva entre os dados observados e estimados na escala mensal. Porém, deve-se ter cautela, pois o p-valor desta análise, especificamente, não foi significativo. Ainda sobre estas duas culturas, na base mensal, percebe-se um aumento na correlação quando o valor máximo dos *pixels* é a base de comparação, saltando de um  $R^2 = 0,1925$  para  $R^2 = 0,5705$ . O coeficiente de correlação (CC) também foi impactado positivamente, saindo de 0,44 para 0,76, sendo corroborado por um p-valor significativo ( $< 0,05$ ).

Em relação ao trigo, tanto a abordagem decendial, quanto a mensal, analisadas sob a perspectiva do valor do pixel da estação meteorológica, se mantém estáveis,  $R^2 = 0,3084$  (decendial), contra  $R^2 = 0,3268$  (Mensal). Quando a análise parte do valor máximo dos pixels há um incremento de  $R^2 = 0,2092$  (decendial) para  $R^2 = 0,2886$  (Mensal). No entanto, esses valores devem ser analisados de forma mais criteriosa uma vez que o p-valor não foi significativo para os cenários do trigo na escala mensal. O baixo número de observações pode ter prejudicado a análise.

#### 4.8. *Análise da ETr das culturas plantadas nos períodos seco e chuvoso*

Na análise do período seco e chuvoso, separados na escala de tempo decendial (Figura 4. Tabela 4), avaliada pelo pixel da estação e pelos valores máximos, o período seco não indicou correlação entre os dados, visto que os p-valores não foram significativos para ambos os cenários.

Em relação ao período chuvoso, tomando-se como base o valor máximo dos pixels onde a estação estava situada, observa-se a existência de correlação positiva, demonstrado por um bom valor de Coeficiente de Correlação (CC = 0,56), apoiada por um p-valor significativo ( $< 0,05$ ). Seu coeficiente de determinação foi baixo ( $R^2 = 0,31$ ). Para o valor do pixel não foi encontrada correlação entre os valores.

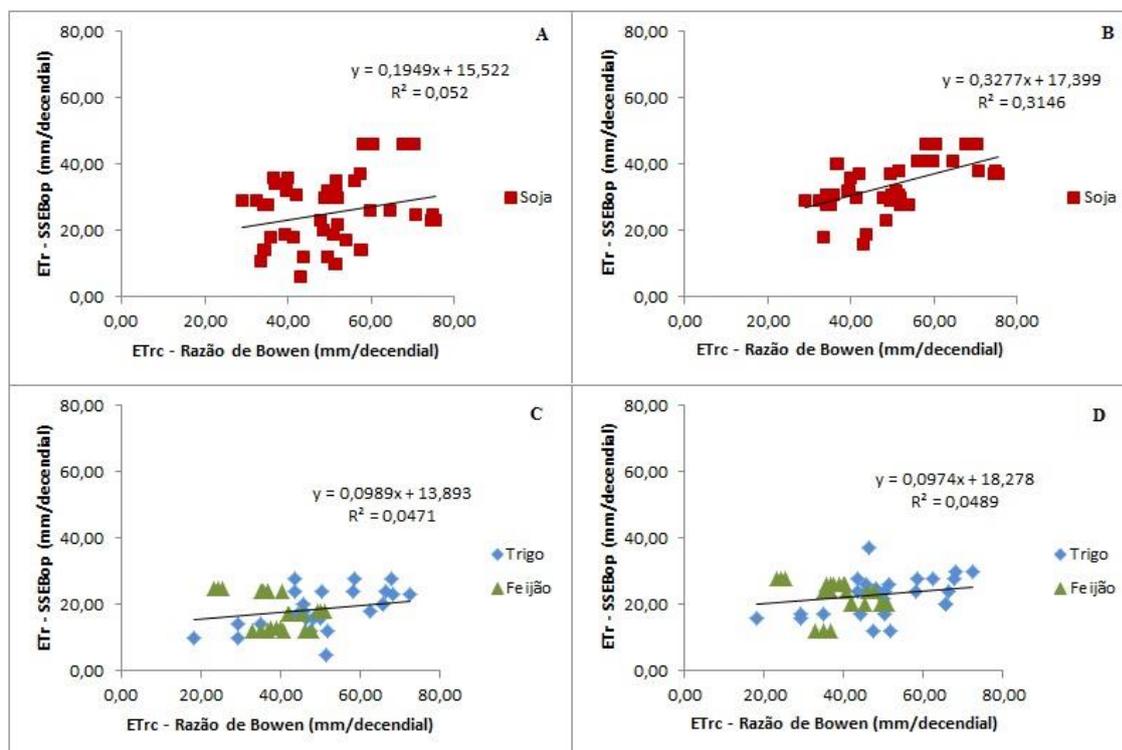


Figura 4. Gráficos de dispersão da ETr decenal dos períodos chuvoso e seco: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D).

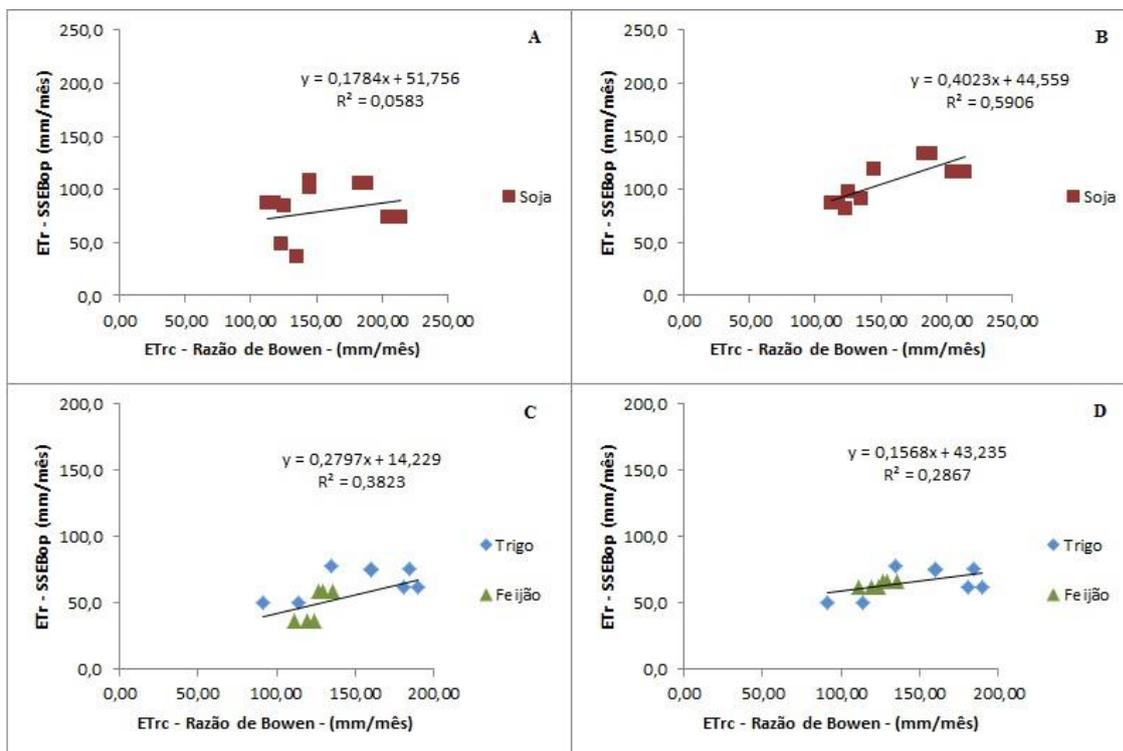
Tabela 4. Estatísticas referentes aos períodos Chuvoso e Seco na análise decenal.

| Regressão – Decenal       | Chuvoso     |           | Seco        |           |
|---------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Estatísticas              | Valor Pixel | Valor Máx | Valor Pixel | Valor Máx |
| Coeficiente de Correlação | 0,23        | 0,56      | 0,22        | 0,22      |
| R-Quadrado                | 0,05        | 0,31      | 0,05        | 0,05      |
| p-valor                   | 0,13        | < 0,05    | 0,13        | 0,12      |
| % Bias                    | -49,39      | -14,75    | -59,09      | -49,45    |
| Observações               | 46          | 46        | 50          | 50        |

Na escala temporal mensal, avaliando-se os períodos chuvosos e seco separados (Figura 5. Tabela 5), na base do valor do pixel, o período chuvoso, apesar de ter indicado um baixo coeficiente de correlação entre os dados (CC = 0,24), não pode ser confirmado, pois seu p-valor não foi significativo (p-valor > 0,05). Ao se tomar como referência os valores máximos dos pixels onde a estação se encontrava a situação se altera. Foi confirmada a

existência de alta correlação positiva entre os dados ( $CC = 0,77$ ), apoiada por um p-valor significativo ( $< 0,05$ ) e um  $R^2 = 0,59$ .

Em relação ao período de estiagem, abordando pela perspectiva do valor do pixel da estação, foi observado um coeficiente de correlação de 0,62 e um p-valor significativo ( $< 0,05$ ), indicando, assim, a existência de correlação positiva entre os dados analisados. Ao se tomarem os valores máximos dos pixels, mantém-se um bom coeficiente de correlação ( $CC = 0,54$ ) e p valor abaixo de 0,05, indicando que também há correlação positiva entre os dados. Seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é igual a 0,29.



**Figura 5.** Gráficos de dispersão da ETr mensal dos períodos chuvoso e seco: em relação ao valor do pixel em que a estação está localizada (A) e ao valor máximo entre os pixels que abrangem cada pivô central (B); e do trigo em relação ao pixel (C) e ao valor máximo (D).

**Tabela 5. Estatísticas referentes aos períodos Chuvoso e Seco na análise mensal.**

| <b>Regressão - Mensal</b> | <b>Chuvoso</b>     |                  | <b>Seco</b>        |                  |
|---------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
|                           | <b>Valor Pixel</b> | <b>Valor Máx</b> | <b>Valor Pixel</b> | <b>Valor Máx</b> |
| Coeficiente de Correlação | 0,24               | 0,77             | 0,62               | 0,54             |
| R-Quadrado                | 0,06               | 0,59             | 0,38               | 0,29             |
| p-valor                   | 0,45               | < 0,05           | < 0,05             | < 0,05           |
| % Bias                    | -48,27             | -30,59           | -61,88             | -53,47           |
| Observações               | 12                 | 12               | 14                 | 14               |

## 5. Discussões

De maneira geral, os resultados demonstraram a existência de correlação positiva entre os dados medidos pelas estações instaladas dentro de áreas com pivô central e aqueles resultantes do sensoriamento remoto, porém não expressivos. Um conjunto de fatores podem explicar o baixo desempenho das estimativas de ETr com o SSEBop pelo *Climate Engine*, como: a resolução espacial da banda do termal do sensor MODIS utilizada no cálculo do SSEBop; a mistura espectral existente nas imagens; as áreas dos pivôs estudados; e a parametrização dos dados de entrada que são utilizados pelo *Climate Engine* no cálculo do SSEBop.

A relação entre as áreas dos pivôs e a baixa resolução espacial da banda termal do MODIS que foi utilizada para o cálculo do ETr pelo SSEBop no *Climate Engine* impactou diretamente nos resultados gerados. Isso se deve ao fato de que o tamanho dos pivôs (entre 45 a 120 hectares) analisados representa uma parte pequena frente à área total do pixel (1Km x 1Km), conforme pode ser visualizado na Figura 1.

Em consequência à baixa resolução espacial, infere-se que a incidência de mistura espectral é fator influente nos valores finais de evapotranspiração.

A mistura espectral pode ser entendida como a tentativa de se classificar corretamente um pixel que contém uma mistura de materiais na superfície terrestre, como solo, vegetação, rochas e água. (Shimabukuro & Ponzoni, 2017). Nas análises feitas, por vezes, em um único pixel havia uma porção maior de outros elementos, como estradas, solo exposto de pivôs vizinhos ou vegetação nativa, do que propriamente o pivô central, os quais provavelmente reduziram os valores de ETr, resultando, assim, em valores abaixo aos medidos em campo. Caso houvesse algum pivô inserido em sua totalidade em um único pixel, ou pivôs que fossem circundados por outros pivôs, talvez fosse possível sua comparação para comprovar a influência da vizinhança em relação aos valores de evapotranspiração. Uma forma de contornar esse problema seria no uso de Modelos Lineares de Mistura Espectral. Esta técnica visa identificar a proporção de cada componente existente em uma imagem multiespectral qualquer, de

modo que cada componente irá gerar uma imagem individual (imagem fração). Tendo conhecimento destas proporções, é possível estimar a resposta espectral de cada componente existente (Shimabukuro & Ponzoni, 2017).

Nos estudos feitos por de Paula, (2018) e Lopes *et al.*, (2019), cujos objetivos foram avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa de evapotranspiração real das culturas da soja e feijão e estimar o valor de evapotranspiração real da cultura do trigo via SSEBop, respectivamente, as análises foram feitas com imagens Landsat 7 e 8, os quais possuem resolução espacial muito superior ao do MODIS. Em ambos os estudos foram encontrados resultados mais consistentes. No caso dos Landsat 7 e Landsat 8, por possuírem melhor resolução espacial da banda termal, há de se imaginar que a estatística seja melhorada muito por conta da redução de ruídos (mistura espectral) causados pelo espaço contido fora dos pivôs, porém dentro dos pixels do MODIS. Ou seja, tudo o que está contido dentro do pixel, mas fora do pivô, influencia de forma direta nos valores extraídos para cada cultura, o que ajuda a explicar a baixa correlação encontrada. O uso de sensores com melhores resoluções espaciais é, portanto, encorajada a fim de minimizar este problema.

Outro fator que pode ter sido decisivo em relação aos resultados encontrados e que deve ser levado em consideração refere-se à parametrização do SSEBop feita pelo *Climate Engine*. Por exemplo, o uso de produtos globais de ETo e de Ta afeta a variabilidade local dos resultados obtidos. Portanto, a diferença da escala global para local afetou a parametrização do modelo, principalmente quando comparado com os estudos desenvolvidos por de Paula (2018) e Lopes *et al* (2019), os quais utilizaram dados de estações meteorológicas do INMET para estimar ETr com o SSEBop e alcançaram bons resultados.

A forma de se calcular o fator C (Senay *et al.*, 2013) também pode ter influenciado os valores de ETr estimado com o SSEBop no *Climate Engine*. Na elaboração do produto, o *Climate Engine* divide cada *tile* do modis em 25 unidades e calcula um fator C para cada uma das divisões. No entanto, apesar dessa divisão, cada unidade continua sendo uma área muito extensa, o que torna a área de influência do fator C muito grande. Como consequência as estimativas de ETf e Tc acabam sendo afetadas (Equação 11 e 12, respectivamente), o que afeta diretamente a ETr estimada pelo SSEBop. Ainda em relação à parametrização do fator C, vale mencionar que foi proposta metodologia diferenciada para seu cálculo em Senay *et al.*, (2017) que ainda não foi implementada no algoritmo do *Climate Engine* e que poderia agregar melhores estimativas de ETr.

A fim de buscar resultados melhores é sugerido o uso da técnica de desagregação espacial (*thermal sharpening*), a qual poderia ser usada para aprimoramento da variável da banda do termal do MODIS, o que provavelmente beneficiaria os resultados das análises. A metodologia busca melhorar a resolução espacial da variável em questão.

Modelos testados foram capazes de transformar imagens de resoluções baixas para imagens com resolução espacial média, o que tornou a caracterização espacial da temperatura, agregando importância à técnica para usos em escalas locais, principalmente no monitoramento de evapotranspiração de áreas agrícolas, constatando-se incrementos nos coeficientes de correlação, bem como na redução de erros quando considerados modelos mais locais (Warren, 2013; Warren *et al.*, 2013).

De fato, o sensor MODIS é qualificado como ideal para estimativas em menores escalas englobando grandes áreas, porém, não recomendado para maiores escalas como, por exemplo, propriedades (NASA, 2000; Allen *et al.*, 2007a) e, conseqüentemente, para pivôs centrais. No entanto, optou-se em realizar essa análise para complementar eventuais análises do uso do SSEBop extraído pelo *Climate Engine* na escala de bacias hidrográficas. Um ponto positivo que deve ser elencado é em relação ao uso do sensor MODIS nas estações chuvosas, visto que ele pode suprir com imagens nos períodos em que o Landsat é mais prejudicado, por conta da alta concentração de nuvens nas cenas disponibilizadas, que acabam causando a descontinuação da análise espaço-temporal. A Tabela 5 mostra um bom potencial de uso (CC = 0,77) nesses períodos.

O uso do produto global MODIS, portanto, aparenta ser útil não apenas em escala regional, no estudo de bacias hidrográficas, por exemplo, mas também indica potencial para o apoio na gestão de culturas agrícolas irrigadas.

## 6. Conclusões

O produto global oferecido pelo serviço *Climate Engine*, o qual realiza a estimativa de ETr pelo modelo SSEBop, por meio do sensor MODIS, apresentou ter aplicabilidade em áreas irrigadas por pivô central para auxiliar o monitoramento e gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas inseridas no bioma Cerrado.

O produto global subestimou a evapotranspiração real de todas as culturas analisadas, bem como nos períodos chuvoso e seco, quando comparados com os valores de ETr obtidos através da razão de Bowen. As correlações e os coeficientes de correlação entre as metodologias propostas foram boas.

## 7. Referências Bibliográficas

ALLEN, RICHARD G.; PEREIRA, LUIS S.; DIRK, RAES; MARTIN. FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. **Irrigation and Drainage**, v. 300, n. 56, p. 300, 1998.

ALLEN ET AL. FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. **Irrigation and Drainage**, v. 300, n. 56, p. 300, 1998.

ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: relatório pleno**, n. 1, p. 177, 2017.

BASTIAANSEN. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, n. 1–4, p. 213–229, 1998.

BASTIAANSEN *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, n. 1–4, p. 198–212, 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1–2, p. 87–100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M. *et al.* SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85–93, 2005.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, n. 6, p. 779–787, 1926.

BRUTSAERT, W. **Hydrology: An Introduction**. [s.l: s.n.].

COMINI, B.; ANDRADE, E.; MAILLARD, P. Estimativa Da Evapotranspiração Via Sensoriamento Remoto No Sistema Aquífero Urucuia. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2017.

COURAULT, D. *et al.* Estimation of surface fluxes in a small agricultural area using the three-dimensional atmospheric model Meso-NH and remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 6, p. 741–754, 2003.

DIAS LOPES, J. *et al.* Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2019.

FAO. How to Feed the World in 2050. **The High-Level Expert Forum on How to Feed the World in 2050**, v. 2050, n. 1, p. 35, 2009.

FIGUEIREDO, D. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. 2005.

GAO, M. *et al.* Remote sensing of agro-droughts in Guangdong Province of China using MODIS satellite data. **Sensors**, v. 8, n. 8, p. 4687–4708, 2008.

IDSO, S. B. Estimating Evaporation: A Technique Adaptable to Remote Sensing. **U.S. Water Conservation Laboratory**, v. 189, n. September, 1975.

KALMA, J. D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4–5, p. 421–469, 2008.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Utilisation de la télédétection pour le suivi de l'évapotranspiration sur les terres. **Hydrological Sciences Journal**, v. 41, n. 4, p. 495–516, 1996.

LI, Z. L. *et al.* A review of current methodologies for regional Evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, v. 9, n. 5, p. 3801–3853, 2009.

LIMA, E. P. *et al.* Daily actual evapotranspiration in sub-basins of paracatu using modis sensor products | Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis1. **Revista Ceres**, v. 61, n. 1, p. 17–27, 2014.

MAJUMDAR, T. J.; BHATTACHARYYA, R.; CHATTERJEE, S. On the utilization of ENVISAT AATSR data for geological/hydrological applications. **Acta Astronautica**, v. 60, n. 10–11, p. 899–905, 2007.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. DE. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. v. 1, 2012.

MODIS. MODIS Surface Reflectance User 's Guide. **Orbit An International Journal On Orbital Disorders And Facial Reconstructive Surgery**, p. 1–40, 2011.

NAGLER, P. L. *et al.* Estimating riparian and agricultural actual evapotranspiration by reference evapotranspiration and MODIS enhanced vegetation index. **Remote Sensing**, v. 5, n. 8, p. 3849–3871, 2013.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [Agric. For. Meteorol., 77 (1995) 263–293]. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 80, n. 2–4, p. 297, 2002.

PATEL, N. R.; RAKHESH, D.; MOHAMMED, A. J. Mapping of regional evapotranspiration in wheat using Terra/MODIS satellite data. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 2, p. 325–335, 2006.

PAULA, A. C. P. DE. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CULTURA DA SOJA E DO FEIJOEIRO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN E PELO MODELO SSEBop. p. 88, 2018.

PAYERO, J. O. *et al.* Guidelines for validating bowen ratio data. **Society**, v. 46, n. 4, p. 1051–1060, 2003.

PAZ, V. P. DA S. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. v. 4, n. 3, p. 465–473, 2000.

POON, P. K. *et al.* Evapotranspiração pós incêndios florestais em regiões semiáridas. p. 2017–2018, 2018.

PRICE, J. C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation. **Water Resources Research**, v. 16, n. 4, p. 787–795, 1980.

ROSEMBACK, R. *et al.* Análise Da Dinâmica Da Cobertura Vegetal Na Região Sul Do Brasil a Partir De Dados Modis / Terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 2, p. 401–416, 2010.

RUHOFF, A. L. *et al.* ESTIMATIVA DA SAZONALIDADE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM PLANTAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR ( *saccharum sp .* ) A PARTIR DE DADOS DO SENSOR TERRA / MODIS. **II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**, p. 1–20, 2008.

SENAY, G. B. *et al.* A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, n. 6, p. 979–1000, 2007.

\_\_\_\_. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577–591, 2013.

\_\_\_\_. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171–185, 2016.

\_\_\_\_. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98–112, 2017.

SILVA, B. *et al.* Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens landsat 5 tm. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243–252, 2005.

SINGH, R. K.; SENAY, G. B. Comparison of four different energy balance models for estimating EvapoTranspiration in the Midwestern United States. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 1, p. 1–19, 2016.

SINGH, S. K. Discussions and Closures Closure to “ New Methods for Aquifer Parameters from Slug Test Data ” by Closure to “ Generalized Analytical Solutions for Groundwater Head in Inclined Aquifers in the Presence of Subsurface Drains ” by Sushil K . Singh. v. 133, n. 3, p. 272–275, 2012.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 85–100, 2002.

SUN, Z. *et al.* Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 3–4, p. 1086–1092, 2011.

TEIXEIRA. Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e da água no Semiárido brasileiro. **Embrapa**, p. 32, 2013.

THEVS, N. *et al.* Water allocation and water consumption of irrigated agriculture and natural vegetation in the Aksu-Tarim river basin, Xinjiang, China. **Journal of Arid Environments**, v. 112, n. PA, p. 87–97, 2015.

TODD, RICHARD W., STEVEN R. EVETT, T. A. H. **Bowen ration energy balance method.pdf****Agricultural and Forest Meteorology**, 2000.

TUCKER C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127–150, 1979.

WAN, Z.; WANG, P. International Journal of Remote Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains , USA. n. June 2013, p. 37–41, 2010.

WARREN, MORRIS SCHERER; HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA, ANTÔNIO; NEIVA RODRIGUES, LINEU; BRAZ TANGERINO HERNANDEZ, F. Revista Brasileira De Geografia. **Biblioteca.Ibge.Gov.Br**, v. 07, n. 1, n. ISSN 0034, p. 82, 2014.

WARREN, M. S. DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DE ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL OBTIDAS A PARTIR DO SENSOR MODIS MORRIS SCHERER WARREN Agência Nacional de Águas ( ANA ), Brasília , DF , Brasil Recebido Junho de 2012 - Aceito Setembro de 2012. **Revista Brasileira de MEteorologia**, v. 28, n. 2, p. 153–162, 2013.

\_\_\_\_. MÉTODOS PARA A DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE ( THERMAL SHARPENING ) OBTIDA PELO SENSOR MODIS Methods for Spatial Disaggregating Land Surface Temperature ( Thermal Sharpening ) Obtained by the MODIS Sensor. p. 923–937,

2013.

YANG, D.; HE, C.; LEI, H. Estimation of evapotranspiration using a remote sensing model over agricultural land in the North China Plain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 14, p. 3783–3798, 2010.

YANG, Y.; SHANG, S.; JIANG, L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 164, p. 112–122, 2012.

YUAN, W. *et al.* Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 7, p. 1416–1431, 2010.

ZHANG, X. Q.; YAMAGUCHI, Y. Characterization and evaluation of MODIS-derived Drought Severity Index (DSI) for monitoring the 2009/2010 drought over southwestern China. **Natural Hazards**, v. 74, n. 3, p. 2129–2145, 2014.