



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA  
CURSO DE AGRONOMIA**

**SINERGIA DE DADOS DOS SATÉLITES SENTINEL-2 E LANDSAT-8  
PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS  
NA REGIÃO DO CERRADO**

**EDUARDO DE SOUZA FERNANDES**

**BRASÍLIA, DF  
2017**

**EDUARDO DE SOUZA FERNANDES**

**SINERGIA DE DADOS DOS SATÉLITES SENTINEL-2 E LANDSAT-8  
PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA REGIÃO DO  
CERRADO**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. MARINA ROLIM BILICH NEUMANN

Coorientador: Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ FARIAS DE SOUZA

**BRASÍLIA, DF  
2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

ds de Souza Fernandes, Eduardo  
Sinergia de dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8  
para estimar evapotranspiração de áreas agrícolas na região  
do Cerrado / Eduardo de Souza Fernandes; orientador Marina  
Rolim Bilich Neuman; co-orientador André Luiz Farias de  
Souza. -- Brasília, 2017.  
53 p.

Monografia (Graduação - Engenharia agrícola) --  
Universidade de Brasília, 2017.

1. Evapotranspiração. 2. Sensoriamento remoto. 3.  
Geoprocessamento. 4. Sentinel-2. 5. Landsat-8. I. Rolim  
Bilich Neuman, Marina, orient. II. Farias de Souza, André  
Luiz, co-orient. III. Título.

### Cessão de direitos

Nome do Autor: Eduardo de Souza Fernandes

Título: Sinergia de dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 para estimar evapotranspiração na região do cerrado

Ano: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desse relatório e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação, e nenhuma parte desse relatório pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe Claudia por sempre me apoiar e acreditar no meu potencial, meus irmãos Pedro e Carol por seu amor incondicional, Luiz ABC por seus ensinamentos diários, os meus companheiros de universidade e de colégio que me acompanharam durante toda a minha vida acadêmica e ajudaram a moldar o meu caráter e minhas escolhas profissionais.

Agradeço também aos estudantes que compartilharam da experiência do programa ciência sem fronteiras comigo para Davis-CA, tendo sido um dos melhores momentos da minha vida onde estudei e trabalhei em uma universidade de alto nível mundial rodeado das melhores e mais inteligentes pessoas já conheci e que com certeza me influenciam muito.

Agradeço em especial para Maria José Diaz Vicente, uma mulher fantástica que me apoia e tenta me fazer ser melhor diariamente, e que me ajudou demais na realização deste trabalho, desde seu apoio moral até o toque especial que ela acrescentou. Agradeço também à Carolina Carvalho, Engenheira Agrícola da UNIVASF e uma grande amiga com o coração enorme que teve a gentileza de dedicar seu tempo para me ajudar com o trabalho.

André Souza e Marina Bilich, agradeço demais a vocês pelo total suporte e disposição para a realização deste trabalho, tenho um grande orgulho de ter feito parte deste projeto junto com vocês. Agradeço também à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília pela oportunidade concedida para realização do Curso de Agronomia.

## RESUMO

### **SINERGIA DE DADOS DOS SATÉLITES SENTINEL-2 E LANDSAT-8 PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS NA REGIÃO DO CERRADO**

O estudo visou gerar dados de evapotranspiração diária da área do PAD-DF, Distrito Federal, de forma prática, utilizando dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 e com uma adaptação do algoritmo SEBAL. Combinados com informações de solo da região se obtiveram valores esperados para evapotranspiração de áreas irrigadas e expostas, além de evidenciar a crise hídrica do Distrito Federal. Considerando a quantidade de áreas agrícolas, estimou-se uma variação de valores de evapotranspiração de 0 a 10 mm/dia, sendo que os maiores valores foram relacionados com os meses em que ocorreram eventos de precipitação e os meses de seca apresentaram uma redução da taxa de evapotranspiração. O modelo SEBAL mostrou-se eficiente e prático, encontrando valores dentro da faixa observado na literatura.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Sentinel-2; Landsat-8; Geoprocessamento; Sensoriamento remoto; SIG

## **ABSTRACT**

### **SYNERGY OF SENTINEL-2 AND LANDSAT-8 SATELLITES DATA TO ESTIMATE EVAPOTRANSPIRATION OF AGRICULTURAL AREAS IN THE CERRADO REGION**

This study aimed to generate daily evapotranspiration data of data on the of the PAD-DF, Federal District, in a practical form using data from the Sentinel-2 and Landsat-8 satellites with an adaptation of the SEBAL algorithm. Combined with soil information from the region were expected values for evapotranspiration of irrigated and exposed areas, as well as the evidence of the water crisis of the Federal District. Considering the amount of agricultural areas studied, a variation of evapotranspiration values of 0 to 10 mm/day was estimated, with the highest values being related to the months in which precipitation events occurred and the drought months presented a reduction of the evapotranspiration rate. The SEBAL model was efficient and practical, finding values within the range determined by the literature.

**Keywords:** Evapotranspiration; Sentinel-2; Landsat-8; Geoprocessing; remote sensing;GIS

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. HIPÓTESE.....</b>	<b>3</b>
<b>3. OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Objetivo geral .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>4.1 Agropecuária no Cerrado e a gestão hídrica .....</b>	<b>4</b>
<b>4.2 Evapotranspiração e estimativa por Sensoriamento remoto .....</b>	<b>7</b>
<b>4.3 Satélite Sentinel .....</b>	<b>12</b>
<b>4.4 Satélite Landsat 8 (OLI-TIRS).....</b>	<b>16</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1 Descrição da área de estudo .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2 Adaptação do modelo SEBAL .....</b>	<b>19</b>
<b>5.3 Perfis temporais de Índice de vegetação de áreas irrigadas na região de interesse.....</b>	<b>28</b>
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
<b>6.1 Adaptação do modelo SEBAL e geração dos mapas de evapotranspiração .....</b>	<b>29</b>
<b>6.2 Perfis temporais de Índice de vegetação de áreas irrigadas na região de interesse.....</b>	<b>35</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por alimentos no Brasil, assim como em todo o mundo vem acompanhada do crescimento pela busca de exploração de novas áreas de cultivo e uma maior utilização de recursos hídricos, sendo, portanto, a ação antrópica um grande agente do desequilíbrio e o uso descontrolado destes recursos. Dentro deste panorama é de extrema importância que seja realizada uma eficiente gestão destes recursos para evitar sua escassez. Para que esta gestão seja realizada de forma otimizada é necessário que haja informações e estudos de demanda e disponibilidade de água cada vez mais precisa e atualizada frequentemente.

Sabendo-se que este consumo humano de água gera grandes impactos na disponibilidade deste recurso nas bacias hidrográficas, exemplos de questões como a demanda de água e a poluição podem ser compreendidas e analisadas para que haja um aumento na racionalidade do uso deste recurso tão escasso, e para que os estudos nesta área resultem em resultados positivos é necessário levar em conta a produção e a cadeia de suprimentos como um todo, considerando não apenas o seu uso direto por um consumidor ou produtor, mas também seu uso indireto (Brasil, 2014).

A capital do Brasil vem atravessando a pior crise hídrica da sua história. O baixo nível dos reservatórios de abastecimento durante o período de chuvas levou ao primeiro racionamento que atingiu a maior parte da população. Alguns fatores contribuem para a intensificação da crise hídrica no Distrito Federal, entre eles estão: o aumento da produção agrícola (Codeplan, 2013); o crescimento populacional do DF nos últimos 30 anos (Codeplan, 2015), a sazonalidade do clima e variações climáticas anuais.

A região do PAD-DF, localizada no Distrito Federal é conhecida por sua alta produção agrícola, principalmente de grãos, e conseqüentemente uma grande quantidade de áreas agrícolas, onde se destacam principalmente a produção de soja, milho, sorgo, trigo e feijão (Ghesti, 2009).

Esta região faz parte do Cerrado brasileiro, 2º maior bioma do país e habitat de uma extensa biodiversidade de espécies animais e vegetais além que, segundo ANA (2013), sob este bioma estão importantes bacias hidrográficas responsáveis pelo abastecimento de todo o país, demonstrando assim a importância da região e o quanto que a preservação das espécies nativas, uma gestão hídrica criteriosa e uma efetiva utilização de terras é importante para o fornecimento de água para o Brasil inteiro.

Apesar de condições adversas, o cerrado possui um grande potencial agrícola, pois possui uma excelente capacidade de trabalho, além de textura mediana e boas propriedades físicas, tendo sua acidez facilmente corrigida pela adubação e calagem. À vista deste potencial, lançaram-se diversos incentivos governamentais com o objetivo de impulsionar a agricultura na região com a construção de rodovias e o estímulo ao empreendedor agrícola de outras regiões do país (Manzatto et al., 2002). Um destes programas foi o Programa de Assentamento dirigido do Distrito Federal (PAD-DF), que incentivou a exploração agrícola desta região.

Devido à intensa exploração deste local ao longo dos anos, a disponibilidade de água vem cada vez mais diminuindo, evidenciando uma crise hídrica que pode afetar tantos setores urbanos como rurais, demonstrando assim a importância de estudos que auxiliem a gestão hídrica para a região e o sensoriamento remoto é uma excelente ferramenta para auxiliar neste processo.

A ocorrência de conflitos pelo uso da água é consequência direta desse cenário de ocupação agrícola, o que torna indispensável à gestão e o monitoramento dos recursos hídricos tanto pelo governo, quanto pelos produtores rurais e demais usuários. O sensoriamento remoto orbital aplicado ao manejo dos recursos hídricos é capaz de fornecer informações tanto meteorológicas como climáticas dos locais de interesse (Taghvaeian e Neale, 2011), as quais são utilizadas em modelos com o objetivo de estimar os diferentes componentes do balanço hídrico, e a produção de água em bacias hidrográficas.

Um dos principais componentes para a gestão hídrica é a estimativa de evapotranspiração, um termo descrito por Thornwhaite na década de 40 como a transpiração de água pelas plantas combinado com a evaporação de água do solo, tendo, portanto, grande impacto na quantidade deste recurso que é utilizado pelas plantas durante seu ciclo biológico. (Gonsaga et al., 2011)

Com o avanço tecnológico o sensoriamento remoto tornou-se uma ciência que pode auxiliar bastante no monitoramento hidrológico e na gestão dos recursos hídricos no Distrito Federal, combinado com a maior disponibilidade de imagens cada vez mais contendo informações de qualidade são capazes de estimar os componentes do balanço hídricos, incluindo a evapotranspiração real de uma cultura (ET<sub>rc</sub>) que é bastante complexa de se mensurar pois apresenta grande variabilidade espacial e temporal, tendo sua dificuldade de estimativa reduzida com a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto (Karimi; Bastiaanssen, 2015).

## **2 HIPÓTESE**

Os sensores dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 se prestam a fornecer imagens com informações de refletância da superfície valores de evapotranspiração das áreas agrícolas por meio do algoritmo SEBAL.

## **3 OBJETIVO**

### **3.1 Objetivo geral**

O estudo visa estimar a evapotranspiração de uma região agrícola no Bioma do Cerrado, utilizando a combinação de informações dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 e o algoritmo SEBAL.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a qualidade dos dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8, para estimar a evapotranspiração das culturas.
- Avaliar a aplicação do modelo SEBAL para estimar evapotranspiração em áreas agrícolas no Cerrado.
- Gerar informação que possam auxiliar no manejo de bacias hidrográficas e informações sobre o comportamento fisiológico das culturas anuais;
- Possibilitar a identificação das áreas irrigadas em regiões agrícolas no Bioma Cerrado.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Agropecuária no Cerrado e a gestão hídrica

O aumento da demanda interna de alimentos força os governantes a elaborarem políticas públicas de desenvolvimento do setor agrícola, uma dessas políticas foi a expansão da fronteira agrícola do país na região do cerrado, onde até os anos 60 era considerada uma região marginal para a agricultura brasileira.

Essa expansão iniciou-se nos anos 70 com a criação do Programa de Desenvolvimento do Centro-Oeste (Polocentro), os agricultores foram atraídos pela grande disponibilidade de terras a preços mais baixos que as do Sul do País e pelos incentivos fiscais para a abertura de novas áreas. (Macedo, 2015). Durante este período foram feitos grandes investimentos na área de agropecuária e pesquisa, incluindo a criação de órgãos públicos responsáveis por estes setores, como exemplo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), que teve papel importante no desenvolvimento de novas tecnologias para a área do cerrado.

O cerrado Brasileiro ocupa uma área de aproximadamente 200 milhões de hectares concentrados principalmente na região do planalto central do país e é em sua maior parte constituída de grandes extensões de Latossolos de texturas variando de média a muito argilosa, em relevos altamente favoráveis à mecanização, de excelentes propriedades físicas e de fertilidade facilmente corrigida pela adubação e calagem (Manzatto et al., 2002).

Segundo o Delineamento agroecológico do Brasil feito pela Embrapa em 1992, o Centro-Oeste apresentava 31% de suas terras indicadas para preservação permanente, 3% para extrativismo e 66% para lavouras de ciclo curto e longo, considerando nulo o potencial para a pecuária, onde na realidade consideráveis áreas são ocupadas com pastagens plantadas e naturais, revelando uma distorção de uso da terra, principalmente pelo avanço de pastagens sobre áreas indicadas para preservação (Manzatto et al., 2002).

O Ministério do Meio Ambiente, porém, no ano de 2013 realizou o Projeto TERRACLASS Cerrado (BRASIL, 2015) que tinha como objetivo determinar o uso do solo do cerrado através de imagens do satélite Landsat-8, e obteve os resultados que mais se aproximam da realidade da região, apresentando valores em torno de 12 % de ocupação total do cerrado para cultivos agrícolas.

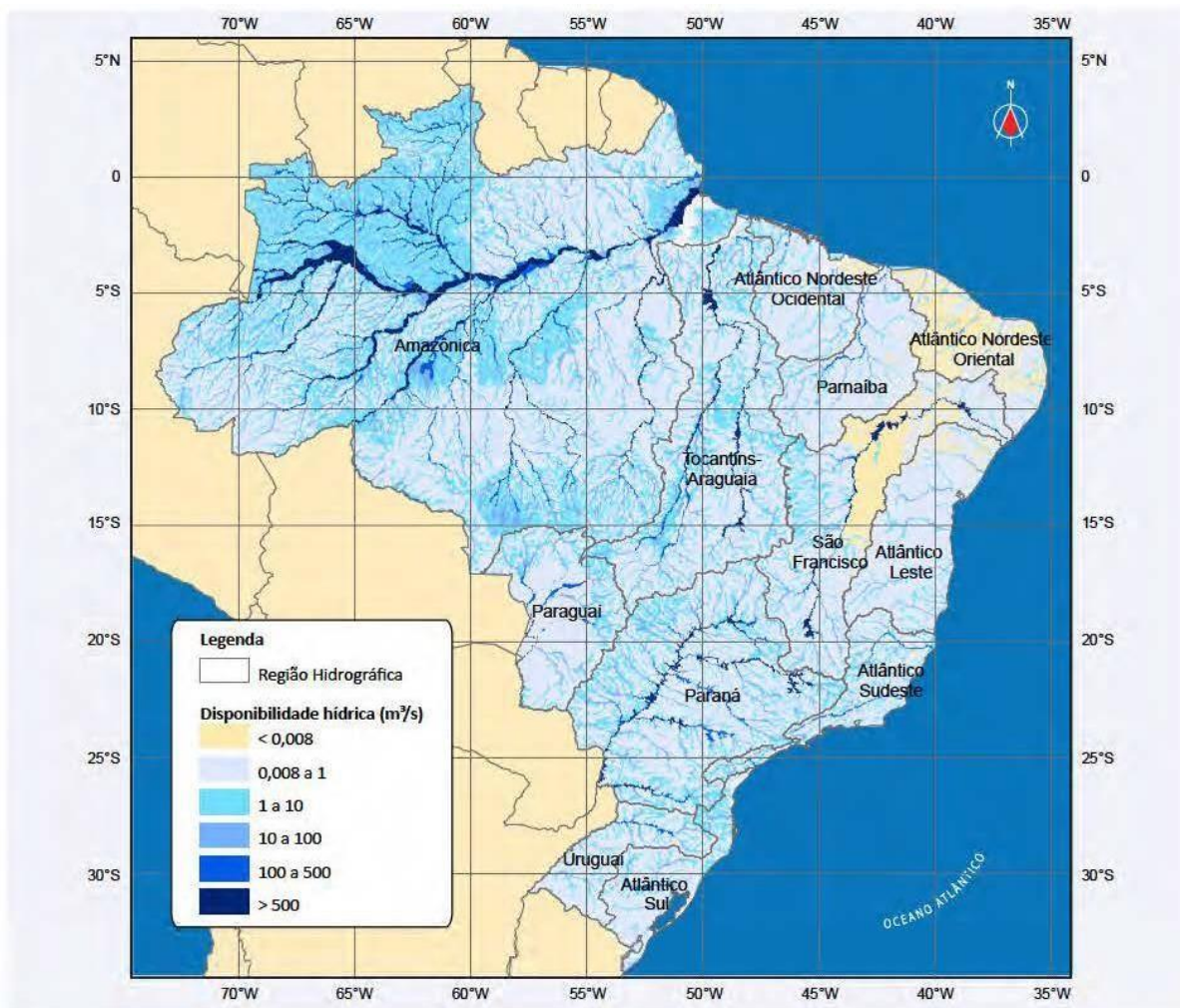
Especialmente no Centro-Oeste, a área atualmente ocupada por lavouras é pequena se comparada com a área potencial que a região possui para essa atividade, observa-se, porém, um incremento ao longo da década passada, de 45,6 milhões de hectares para 53,2 milhões em 1998, foi decorrente em grande parte da incorporação de áreas de pastagens, especialmente nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Tocantins (IBGE, 1995).

A produção brasileira, porém, ainda se concentra principalmente em soja e milho, representando 70 % da produção da área plantada do país (Manzatto et al., 2002) e especialmente na área analisada do Programa de assentamento dirigido do Distrito Federal (PAD-DF), localizada no sudeste do Distrito, culturas como trigo, sorgo e feijão também são bastante comuns e representam grande parte da produção da região.

A importância da água já é extremamente conhecida para o desenvolvimento fisiológico das plantas, este recurso, porém é cada vez mais escasso e a busca desenfreada pelo aumento da qualidade, gera uma pressão muito grande sobre a agricultura, principal setor utilizador de água. O Brasil, no entanto, é possuidor de 12% das reservas de água do planeta, distribuída em 12 regiões hidrográficas (Figura 1). (ANA, 2013)

Apesar de possuir esta enorme quantidade de água, esta distribuição é bastante desigual, possuindo aproximadamente 75% deste volume na área amazônica, região onde a atividade agrícola é restringida e possui somente 5% da população brasileira, enquanto que o restante do país conta com os 25% restantes de água, porém para uma atividade agrícola bem mais intensiva e para atender 95% da população, o que muitas vezes gera conflitos entre o meio rural e urbano, podendo causar prejuízos para ambos os lados (Marzullo, 2014).

A distribuição de água e as 12 áreas divididas de acordo com as bacias hidrográficas, ilustradas na figura 1, ressalta a importância da região de estudo, já que está localizado em um ponto de abastecimento direto das bacias do Tocantins-Araguaia, São Francisco e Paraná, sendo de extrema importância um eficiente manejo dos recursos desta região.



**Figura 1.** Disponibilidade hídrica superficial estimada para o Brasil (ANA, 2013)

A gestão hídrica, portanto, surge como um conjunto de métodos estratégicos que buscam solucionar conflitos de uso descontrolado da água e distribuição desigual, principalmente nos últimos 30 anos em que o crescimento populacional impulsionou o consumo de água e conseqüentemente a pressão sobre este recurso.

A fim de formalizar a gestão hídrica no país, em 1997 foi aprovada a Lei nº 9.433 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), fortalecendo o país no debate de conflitos gerados pela disputa e disponibilidade de recursos hídricos, equacionando fatores como o crescimento urbano, rural e industrial aliado à degradação ambiental, de modo a assegurar às futuras gerações um padrão de vida de qualidade (Marzullo, 2014).

A gestão de recursos hídricos deve ser realizada de forma integrada com outras partes de gestão ambiental, integrando diversos componentes dos processos

produtivos que aliado ao correto manejo do solo e eficientes projetos utilização de recursos são capazes de intensificar a produção além de promover uma correta preservação ambiental.

#### **4.2 Evapotranspiração e estimativa por Sensoriamento remoto**

O termo evapotranspiração foi introduzido ao meio científico no início da década de 40 com o cientista Charles Warren Thornthwaite que explicava que este termo expressava a simultaneidade da transpiração da planta e da evaporação da água presente no solo, sendo controlada por fatores como suprimento de água no solo, características foliares e pela quantidade de energia solar disponível e que mais tarde em 1948 com Howard Penman em sua obra "*Natural evaporation from open water, bare soils and grass*", geraram em seus trabalhos o conceito de Evapotranspiração potencial (ETp) caracterizada como a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, ou seja, área com extensa superfície natural, totalmente coberta por vegetação baixa, de altura uniforme e com elevado índice de área foliar (IAF), de crescimento ativo na fase adulta. (Gonsaga et al., 2011).

Anos após a determinação de evapotranspiração por estes autores, na década de 60, surgiu Monteith que ajustou o modelo criado por Penman e criou um novo método de estimar diretamente a evapotranspiração da cultura havendo também nesta época a introdução do termo evapotranspiração de referência (ETo), criado por Doorenbos e Pruitt (1977) e descrito como a evapotranspiração em um sistema padronizado que combinados com os dados meteorológicos e coeficientes da vegetação analisada, é possível estimar valores de evapotranspiração para determinada situação.

Somente na década de 90, com a intensificação das pesquisas na área de evapotranspiração que foi implementada uma padronização na conceituação e estimativa da ETo. Coube à organização *Food and Agriculture Organization* (FAO), portanto realizar esta proposição reunindo no período de 28 a 31 de maio de 1990 diversos especialistas da área com o objetivo principal de analisar os conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET, com enfoque no estabelecimento de uma nova definição para a cultura de referência e o método que pudesse estimar

a ET (Pereira et al., 1997).

O modelo proposto pela FAO determinava algumas regras de padronização como a substituição da utilização da Evapotranspiração potencial pela evapotranspiração de referência, definindo assim o termo em três categorias (Allen et al., 1994).

- Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>): quantidade de água evaporada em um sistema com cobertura de grama com os seguintes parâmetros: altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s/m. Logo, a ET<sub>o</sub> é um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período
- Evapotranspiração máxima de uma cultura (ET<sub>c</sub>): é a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) multiplicado por um coeficiente  $k_c$  que depende da espécie/variedade e do estágio de desenvolvimento da mesma.
- Evapotranspiração real de uma cultura (ET<sub>rc</sub>): refere-se à evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) multiplicado pelo coeficiente  $k_s$  que representa a disponibilidade de água no solo. No caso do presente trabalho este é o parâmetro que desejamos descobrir por meio do sensoriamento remoto.

O cálculo para determinação de ET<sub>o</sub> pode ser feito de diversas maneiras, e buscando a padronização destes métodos, a reunião organizada pela FAO também foi responsável por estabelecer o melhor método para estimativa da ET<sub>o</sub>, sendo escolhido o método de Penman-Monteith que, após parametrização, passou a denominar-se Penman-Monteith-FAO (PM-FAO).

Apesar de o método de Penman-Monteith-FAO ser o mais aceito no meio acadêmico e ter sua efetividade comprovada (Xu; Chen, 2005; Yoder et al., 2005; López-Urrea et al., 2006), em alguns casos, dependendo da disponibilidade de dados e das regiões analisadas, outros métodos podem ser utilizados. Estes métodos podem utilizar o sensoriamento remoto, empiricamente, com embasamentos físicos ou diretos através do uso de lisímetros, que são equipamentos medidores de quantidade e consumo de água presente em uma área limitada. Os principais métodos utilizados para determinação de evapotranspiração são descritos na tabela 1.



**Tabela 1.** Métodos mais utilizados para cálculo de evapotranspiração (Gonsaga et al., 2011).

<b>Método</b>	<b>Citado em</b>	<b>Elementos Meteorológicos de entrada</b>	<b>Variáveis Auxiliares de entrada</b>
Penman(PEN)	Penman (1948), Yoder et al. (2005)	Tx, Tn, T, UR, v, n, P, Rs, Rn	DJ, Lat
Thornthwaite (TW)	Thornthwaite (1948)	Tmn, Tm, T	Lat
Turc (TC)	Yoder et al. (2005), Tabari (2010)	T, UR, Rs	DJ, Lat
Penman-Monteith-FAO (PM-FAO)	Allen et al. (1998)	Tx, Tn, T, UR, v, n, P, Rs, Rn	DJ, Lat
Tanque Classe A (TCA)	Doorenbos & Pruitt (1977), Allen et al. (1998)	ECA, v, UR	Extensão da bordadura do tanque
Makkink (MK)	Pereira et al. (1997), Yoder et al. (2005)	Rs, P, T	DJ, Lat
Radiação Solar (RS)	Doorenbos & Pruitt (1977), Pereira et al (1997)	T, v, UR, Rs, P	-
Linacre (LN)	Pereira et al. (1997)	Tm, Tpo, Tx, Tn	Lat, Alt
Camargo (CAM)	Pereira et al. (1997)	Tm	DJ, Lat
Jensen-Haise (JH)	Pereira et al. (1997), Trajkovic & Kolakovic (2009)	Rs, T	DJ, Lat
Hargreaves (HG)	Allen et al. (1998), Sousa et al. (2010)	T, Tx, Tn	DJ, Lat
Priestley-Taylor (PT)	Pereira et al. (1997), Sentelhas et al. (2010),	T, P, Rn, G	DJ, Lat

Tx, Tn e T: temperaturas diárias máxima, mínima e média, respectivamente; UR: umidade relativa média diária; v: velocidade do vento; n: insolação ou horas de brilho solar; P: pressão atmosférica média diária; Rs: radiação solar; Rn: saldo de radiação no sistema solo-planta-atmosfera; Tmn: temperatura normal (média de 30 anos) do mês ou a média mensal de vários anos com representatividade climática; Tm: temperatura média mensal observada no mês em estudo; ECA: evaporação do tanque Classe A; URmín: umidade relativa mínima; Tpo: temperatura do ponto de orvalho; G: fluxo de calor no solo; D: Dia Juliano; Lat: Latitude; Alt: Altitude.

Com o avanço tecnológico e a maior qualidade de dados disponibilizados por satélites, o sensoriamento remoto tornou-se grande ferramenta para estimativa da evapotranspiração, sendo possível através da análise de imagens e aplicação de algoritmos alcançarem uma maior precisão na determinação dos parâmetros relacionados à evapotranspiração, se afastando de valores padronizados gerais e aproximando-se da realidade de cada situação.

Embora seja o modelo fisicamente baseado mais utilizado, as equações de Penman-Monteith-FAO exigem uma grande quantidade de informações bastante detalhadas, tornando-se um método impraticável quando se tratando de áreas bastante extensas (Jiang; Islam, 2003).

Modelos baseados em sensoriamento remoto tem se tornado um dos assuntos mais discutidos em sistemas de precisão e de manejo hídrico devido ao aumento de disputa pelo acesso à água, principalmente durante épocas de seca. Enquanto técnicas empíricas de estimativa de evapotranspiração são limitadas aos tamanhos dos campos de experimentações por precisar de uma variedade de acessórios de medições de parâmetros como temperatura do ar, velocidade do vento, pressão de vapor, entre outros, estimativas baseadas em sensoriamento remoto tem a capacidade de gerar informações precisas e consistentes de componentes do balanço de energia, podendo cobrir espacialmente uma grande área da superfície terrestre em minutos.

Combinando parâmetros obtidos através de sensoriamento remoto com dados meteorológicos e características da vegetação é possível calcular a evapotranspiração tanto para escalas locais, regionais ou globais. Este cálculo é realizado através da evolução temporal e distribuição espacial de índices de vegetação, além do albedo e da emissividade da superfície, sendo estes praticamente indispensáveis para a maioria dos modelos de estimativas que se baseiam no balanço de energia.

Os índices de vegetação são parâmetros com o uso disseminado em técnicas de sensoriamento remoto, sendo fundamentado pela relação entre o aumento da energia solar absorvida e o desenvolvimento das plantas da região analisada, tendo uma associação direta com a quantidade de biomassa a cobertura do solo, as características foliares das plantas e sua produtividade (Fontana et al., 1998). A maioria dos índices de vegetação utilizam a reflectância ou radiância do dossel das plantas das bandas dentro do campo visível até o infravermelho. (Huete, 1998). Os índices de vegetação citados neste trabalho, são citados na tabela 2 abaixo, tendo suas aplicações descritas por Matsushita (2007) e Qi, et al. (1994).

**Tabela 2.**Aplicações dos índices de vegetação

<b>Índice de Vegetação</b>	<b>Aplicação</b>
Índice de Área Foliar (IAF)	Determina as características estruturais do dossel das plantas
Índice de Vegetação de Solo Ajustado (SAVI)	Desenvolvido para minimizar os efeitos do solo sobre o dossel das plantas
Índice de Vegetação Diferenciada Normalizada (NDVI)	Monitoramento fisiológico, classificação vegetal e determinação de parâmetros estruturais das plantas
Índice de Vegetação melhorada (EVI)	É um NDVI modificado com melhorias na sensibilidade a regiões de alta biomassa e na capacidade de monitoramento do dossel das plantas

Segundo Matsushita, 2007, O EVI busca reduzir os efeitos do solo e da atmosfera sobre o monitoramento da vegetação, sendo mais sensível a variação de estruturas do dossel das plantas, incluindo o IAF, possuindo uma melhor representação da fisiologia da planta e da arquitetura do dossel, quando comparado com o NDVI, devido a este fato, o EVI foi escolhido para substituir o NDVI nas equações de estimativa de evapotranspiração.

Há vários algoritmos baseados no balanço de energia disponíveis para o cálculo de evapotranspiração tendo sua eficácia provada por diversos pesquisadores, apresentando resultados satisfatórios como em Elhaddad et al. (2011) que utilizou o método ReSET, baseado em outros métodos também bastante disseminado, METRIC (Allen et al., 2007) e SEBAL (Bastiaansen et al., 1998), demonstrando que o método estudado de fato era uma ferramenta importante para o manejo hídrico. Outro modelo é o S-SEBI, que utiliza dados do satélite MODIS e também possui comprovação científica de determinação de variação espacial de evapotranspiração em Santos e Silva (2010) realizado em regiões semiáridas do estado do Ceará.

A escolha do algoritmo que será utilizado para a estimativa de evapotranspiração depende de cada situação, já que cada modelo utiliza parâmetros diferentes, específicos para determinadas condições, sendo demonstrado na tabela 3 as principais qualidades e deméritos de diferentes algoritmos utilizados para estimativa de evapotranspiração (LIOU, 2014)

**Tabela 3.** Diferenças entre métodos de evapotranspiração por sensoriamento remoto

Algoritmos	Parâmetros inseridos	Citado em	Prós	Contras
SEBI	$T_{pbl}, h_{pbl},$ $v, T_s, R_n, G$	Pelgrum, 2001	Relaciona os efeitos de $T_s$ diretamente com o calor latente.	Alta complexidade e grande quantidade de parâmetros requeridos.
SEBS	$T_{air}, h_a, v,$ $T_s, R_n, G$	Elhag et al., 2011	Incertezas sobre a $T_s$ , e parâmetros meteorológicos podem ser parcialmente resolvidas; Cálculo explícito de rugosidade para transferência de calor.	Alta complexidade e grande quantidade de parâmetros requeridos.
S-SEBI	$T_s, R_n,$ $G, a_s$	Mattar et al., 2014	Não é necessária a utilização de medições de solo.	Uso restringido a locais de extrema temperatura.
SEBAL	$v, h_a, T_s,$ $VI, R_n, G$	Sun et al., 2011	Requer poucos dados de medições de solo e não necessita da aplicação de correções atmosféricas exatas.	Uso limitado em áreas de alta declividade.
METRIC	$v, h_a, T_s,$ $VI, R_n, G$	Allen et al., 2007	Similar ao SEBAL, porém também é capaz de considerar a declividade e aspecto da superfície.	Dificuldade na determinação dos pixels "âncora".
TSM	$T_{air}, v, h_a, T_s,$ $LAI, R_n, G, F_r, T_c$	Shah et al., 2007	Inclui a visão geométrica e exclui a necessidade de correções empíricas para o "excesso de resistência"	Grande necessidade de dados de medições de solo.

$T_{pbl}$  é a temperatura do limite da camada terrestre,  $h_{pbl}$  a altura do limite da camada terrestre,  $v$  a velocidade do vento,  $T_c$  a temperatura do dossel da vegetação,  $T_s$  a temperatura da superfície,  $R_n$  o saldo de radiação da superfície,  $G$  o fluxo instantâneo de calor no solo,  $h_a$  a altura de medição da velocidade do vento e da temperatura do ar,  $VI$  é o Índice de vegetação,  $IAF$  o Índice de área foliar,  $F_r$  cobertura de vegetação fracionada,  $a_s$  o albedo da superfície e  $T_{air}$  a temperatura do ar.

### 4.3 Satélite Sentinel

O Sentinel-2 é uma missão da *European Space Agency* (ESA), baseada na constelação de dois satélites de observação terrestre (Sentinel-2A e Sentinel-2B), cada um carregando um único instrumento multiespectral com 13 canais espectrais dentro das faixas espectrais visível, infravermelho próximo e infravermelho de onda curta pesando aproximadamente 1140 kg os satélites foram desenvolvidos para uma vida útil de sete anos (ESA, 2017) Orbitando o planeta Terra em lados opostos ( $180^\circ$  entre os dois) com uma altitude de 786 km, os dois satélites são possíveis de revisar um ponto sobre o equador a cada cinco dias, tendo esse tempo diminuído quando comparada às latitudes mais elevadas.

A missão Sentinel-2 faz parte de um programa maior chamado programa Sentinel, composto de 6 missões (Sentinel-1,2,3,4,5,5P) que é visto como parte do projeto de lançamento da nova geração de satélites de observação terrestre e tem, portanto, como objetivo a substituição de antigas missões que chegaram ao fim de sua vida útil ou simplesmente alcançaram seus objetivos, garantindo assim a continuidade dos estudos, garantindo dados de qualidade e sem lacunas em estudos em progresso. (ESA, 2017)

O satélite foi desenvolvido e construído por um consórcio de diversas empresas, sendo elas lideradas pela *Airbus Defence and Space* e é considerado um grande exemplo no avanço tecnológico europeu na área de geoprocessamento, sendo auxiliado pela agência espacial francesa e alemã que contribuem com expertise na área de processamento de imagem e calibração além de suporte para comunicação ótica. Em adição aos satélites, também foram desenvolvidas diversas estações em terra, para que haja uma rapidez maior no processamento de dados e liberação destes para os usuários.

O Programa Sentinel foi desenvolvido para apoiar uma extensa gama de serviços relacionados à superfície terrestre, providenciando informações de extrema importância para setores como o da agropecuária, florestal, conservação, entre tantos que podem se beneficiar do uso destas imagens. Alguns dos serviços que podem ser obtidos através do Sentinel são os citados abaixo (ESA, 2017)

- Monitoramento florestal, detecção de cobertura de solo e gestão de desastres naturais;
- Monitoramento de rios, lagos e oceanos;
- Aplicação agrícola;
- Determinação de vários índices de plantas tais como NDVI, IAF e EVI;
- Monitoramento de crescimento de plantas;
- Informações de poluição em águas de lagos e costas;
- Erupções vulcânicas;
- Monitoramento Glacial, incluindo mapa de extensão e cobertura de neve;
- Gestão de segurança alimentar
- Análise de riscos ambientais.

Os produtos oferecidos pelo Sentinel – 2 para o uso geral são uma compilação de partições indivisíveis do produto que contém todas as possíveis bandas espectrais, denominadas de grânulos, sendo de tamanhos determinados e dentro de uma única órbita. Ambos os produtos oferecidos para o público (Level-1C e Level 2A) são ortofotos em projeção UTM/WGS84 tendo imagens de aproximadamente 500 MB de tamanho, podendo ter a sua totalidade ocupada ou não por imagem de cobertura terrestre. Os produtos disponíveis para público são listados na tabela 4 abaixo (ESA,2017):

**Tabela 4.** Produtos do satélite Sentinel -2.

Nome	Descrição	Produção e Distribuição	Tamanho médio das imagens
Level 1-C	Refletâncias de topo da atmosfera em geometria cartográfica	Geração sistemática e distribuição online	500 MB por imagem (100x100 km <sup>2</sup> )
Level 2-A	Refletância inferior da superfície em geometria cartográfica	Geração a partir da utilização da caixa de ferramentas do próprio Sentinel-2 pelo próprio usuário	600 MB por imagem (100x100 km <sup>2</sup> )

Com dito anteriormente, a missão Sentinel-2 é constituído de 13 bandas espectrais, as quais são demonstradas na tabela 5 e tendo suas características descritas abaixo na tabela 6.

**Tabela 5.** Bandas do satélite Sentinel- 2. (ESA, 2017)

Resolução	Nº da banda	Nome	Comprimento de onda central (nanômetros)	Combinações de banda
10 m	2	Azul	490	Cor verdadeira (RGB 4/3/2); Falsa cor (1/2); RGB 8/4/3 e RGB 4/8/3
	3	Verde	560	
	4	Vermelho	665	
	8	Infravermelho próximo	842	
20 m	5	Vermelho próximo 1	705	SWIR 1 RGB; 12/11/8A
	6	Vermelho próximo 2	740	
	7	Vermelho próximo 3	783	
	8A	Vermelho próximo 4	865	
	11	Infravermelho de onda curta/ SWIR 1	1610	
	12	Infravermelho de onda curta/ SWIR 2	2190	
60 m	1	Aerossol	443	-
	9	Vapor de água	940	
	10	Cirrus	1375	

**Tabela 6.** Características do satélite Sentinel- 2.

<b>Órbita</b>	Circular, heliossíncrona, descendente, 98.5623° de inclinação, período de 98.46 minutos e altitude de 786 km.
<b>Horário de imageamento</b>	10 h 30 min AM.
<b>Bandas do sensor</b>	4 bandas no visível e no infravermelho; 6 bandas no “red edge” e no infravermelho de ondas curtas e 3 bandas para correções atmosféricas
<b>Resolução Espacial</b>	13 bandas, sendo, 4 delas com 10 m de resolução, 6 delas com 20 m de resolução e 3 delas com 60 m de resolução
<b>Resolução Radiométrica</b>	12 bits por pixel
<b>Tamanho de cena básica</b>	Produtos Sentinel-2 no nível 1C e 2A entregue em formato de 100 por 100 km, conforme uma grade própria, em UTM/WGS84, ortoretificados.
<b>Largura da faixa imageada</b>	290 km
<b>Precisão de localização</b>	20 m de erro circular medido em 90% dos casos, sem uso de pontos de controle.
<b>Frequência de revista</b>	Cinco dias com a constelação de dois satélites Sentinel 2A e 2B, no equador.
<b>Programação de imageamento</b>	É feito um planejamento semanal cobrindo um prazo de imageamento de 10 dias

#### 4.4 Satélite Landsat 8 (OLI-TIRS)

O satélite Landsat-8 foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013 pela NASA na base aérea de Vandenberg no estado da Califórnia (EUA), operando a uma altitude de 705 km, numa órbita heliosíncrona com inclinação de 98,2° (ligeiramente retrógrada), semelhante às órbitas das séries Landsat 5 e 7. A sua passagem na linha do equador ocorre às 10:00 horas, com diferença de 15 minutos para mais ou para menos (EUA, 2013).

O satélite cobre praticamente a totalidade do globo terrestre com exceção para latitudes polares, possuindo uma resolução temporal de 16 dias e cenas de aproximadamente 170 x 183 km. O sistema de mapeamento do Landsat-8 dispõe de dois instrumentos de observação terrestre. O primeiro, conhecido como *Operational Land Imager* (OLI) possui nove bandas espectrais, demonstradas na tabela 7.

**Tabela 7.** Bandas OLI do satélite Landsat- 8.(EUA, 2013)

Resolução	Nº da banda	Nome	Comprimento de onda central (micrômetros)
15m	8	Pancromática (PAN)	0.5-0.68
	1	Visível Ultra Azul	0.43-0.45
30 m	2	Visível azul	0.45-0.51
	3	Visível verde	0.53-0.59
	4	Visível vermelho	0.64-0.67
	5	Infravermelho próximo	0.85-0.88
	6	Infravermelho médio/ SWIR 1	1.57-1.65
	7	Infravermelho médio/ SWIR 2	2.11-2.29
	9	Cirrus	1.36-1.38



O outro sistema responsável pela geração de imagens é o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), o qual possui duas bandas de pixel de 100 metros, processadas e disponibilizadas em versões de 30 metros, coincidindo assim com o restante das bandas do satélite Landsat-8. Nestas bandas termais pixels “escuras” representam temperaturas mais amenas enquanto pixels mais claros representam temperaturas mais elevadas, disponibilizando assim informações importantes para manejo de irrigação e também para estimativa de massa de calor em áreas urbanas. As duas bandas do TIRS são representadas na tabela 8:

**Tabela 8.** Bandas TIRS do satélite Landsat- 8. (EUA, 2013)

Resolução	Nº da banda	Nome	Comprimento de onda (micrómetros)	Observação
100 m	10	Infravermelho termal/ TIRS 1	10.6-11.19	Processados e disponibilizados com resolução de 30 m
	11	Infravermelho termal/ TIRS 2	11.5-12.51	

O Landsat-8 disponibiliza suas imagens em um intervalo de 15 dias para a mesma região, enquanto que o Sentinel-2 disponibiliza suas imagens em um período menor, de aproximadamente 5 dias, em vista deste fator, foram selecionadas imagens do Landsat-8 de datas que mais se aproximassem das datas das imagens obtidas pelo Sentinel-2, sendo o período máximo de diferença entre as imagens de 8 dias.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Descrição da área de estudo

A área onde foi conduzido o estudo trata-se da região do PAD-DF, sigla para

Programa de Assentamento dirigido, localizada no sudeste do Distrito Federal, Brasil, com uma área total de 43.777 ha. É uma das principais regiões agrícolas do Distrito e se destaca pela produção intensiva e pela grande quantidade de fazendas sob sistema de irrigação de pivô central, facilmente identificadas por imagens aéreas, devido à sua área circular. O mapa de localização da área é representado na figura 2.

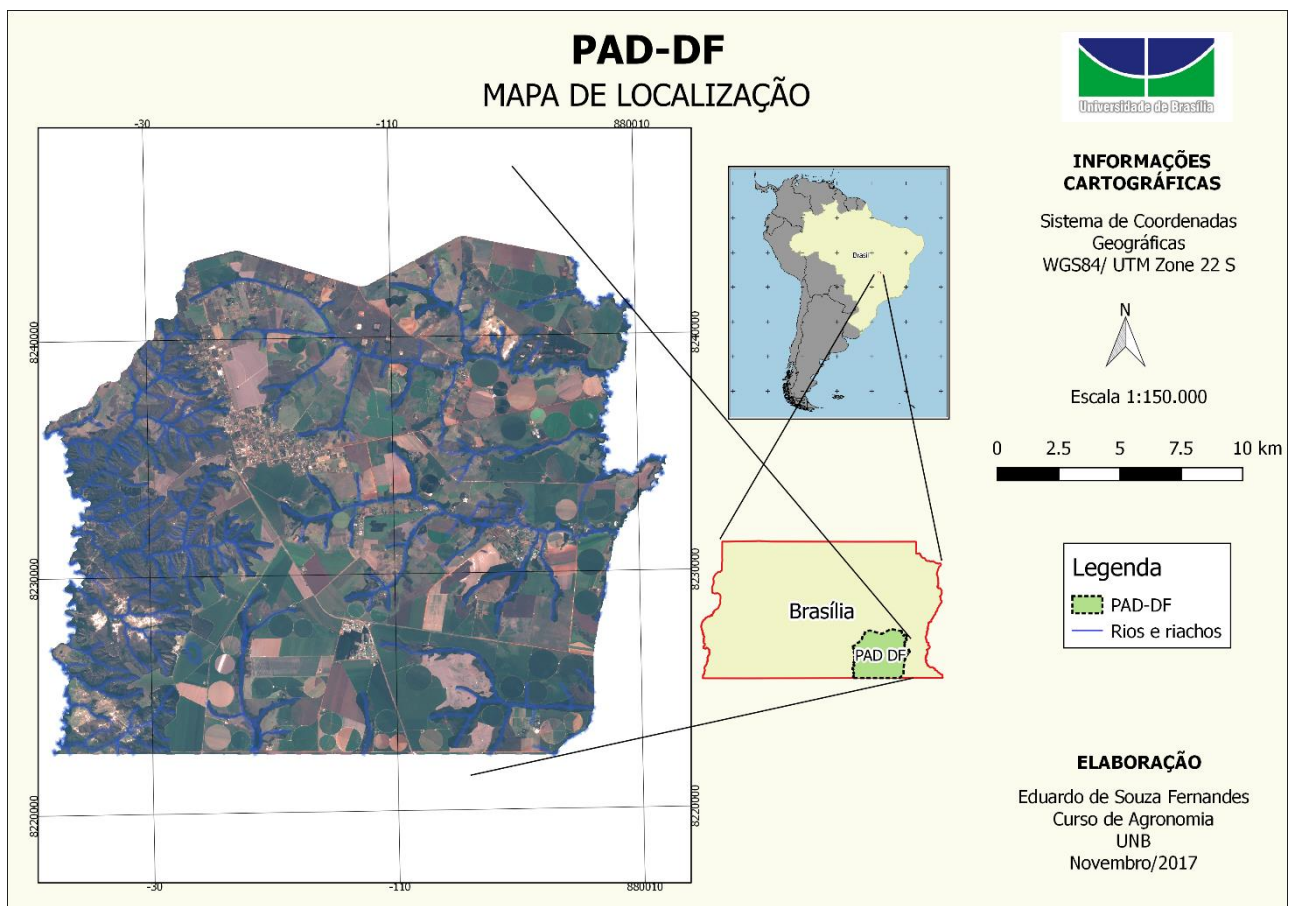


Figura 2. Mapa de Localização do PAD DF.

## 5.2 Adaptação do modelo SEBAL

A fim de calcular a evapotranspiração da região, foi utilizada uma sinergia entre os dois satélites antes mencionados: o Sentinel-2 e o Landsat-8, esperando-se assim maior acurácia nos dados fornecidos. O satélite Sentinel-2, apesar de apresentar imagens de qualidade para estimativa de evapotranspiração, ainda não possui um efetivo sistema de sensores para uma efetiva estimativa de temperatura da superfície terrestre, que deverá ser calculado para melhor aproximação dos resultados encontrados no trabalho com a realidade, portanto foi aproveitada a sinergia que as combinações dos dados destes dois satélites podem prover, gerando assim dados mais confiáveis.

Para a pesquisa foi utilizado o algoritmo SEBAL porque como demonstra a tabela 2 ela é indicada para ambientes com baixa declividade, o que é o caso da região, além de considerar medições de solo, diferentemente de outros métodos como o S-SEBI, que apesar de poder ser utilizado para o estudo, o algoritmo SEBAL demonstra-se mais preciso para a realidade de cada situação, já que leva em consideração parâmetros da região analisada, tendo seus resultados comprovados por diversos estudos. (Bastiaanssen et al., 2005; Sun et al., 2011; Papadavid, G et al., 2013)

Algumas adaptações foram realizadas no modelo SEBAL, quanto a utilização do Enhanced vegetation index (EVI) ao invés do Normalized vegetation index (NDVI) como proposto por Allen et al. (2002), além usar fórmulas de emissividade e albedo provenientes de outros estudos (Andrade et al., 2009; Van de Griend; Owe, 1993) e também quanto ao cálculo de calor sensível instantâneo (H), onde a rugosidade da atmosfera foi desprezada, pois o objeto de estudo são culturas anuais de pequeno porte, que causam pouco impacto na alteração de correntes de ar, mostrando-se tão eficientes quanto as fórmulas propostas pelo algoritmo SEBAL. Porém com um nível de dificuldade de realização reduzido, otimizando, portanto, o estudo e mantendo a qualidade das informações.

A utilização do satélite Landsat-8 se restringiu à banda de número 10, sendo suficiente para determinação da temperatura da superfície por meio do algoritmo SEBAL, afim de calcular o fluxo instantâneo de calor de solo (G), parâmetro determinante para a estimativa de evapotranspiração.

Sendo assim, foi considerado a evapotranspiração como um resíduo do balanço de energia podendo ser expressa pela relação entre o saldo de radiação para superfície ( $R_n$ ), o fluxo instantâneo de calor no solo ( $G$ ) e o fluxo de calor sensível instantâneo ( $H$ ), todos medidos em  $W.m^{-2}$  demonstrada na fórmula que tem valores podendo variar entre  $100 - 700 W/m^2$  (Allen et al., 2002)

$$ET = R_n - G - H \quad (1)$$

Para iniciar a resolução desta equação, primeiramente examinamos o saldo de radiação de energia para a superfície ( $R_n$ ), esta variável, porém está relacionada com outras duas variáveis que devem ser calculadas previamente. São elas o albedo instantâneo da superfície, que pode ser descoberto através de informações provenientes do próprio satélite e é expresso pela equação 2, descrita por Andrade et al. (2009):

$$\alpha = 0,160\rho_1 + 0,291\rho_2 + 0,243\rho_3 + 0,116\rho_4 + 0,112\rho_5 + 0,081\rho_7 - 0,0015 \quad (2)$$

Em que  $\rho_1$ - $\rho_7$  representam os dados de refletâncias do satélite, que quando submetido a uma álgebra de mapas através do programa QGIS 2.18 (ESRI), é capaz de produzir um mapa representativo deste parâmetro. Em nosso estudo, já que usamos o satélite Sentinel, estamos interessados nas bandas de menor resolução (10 metros) e somente 4 bandas possuem esta característica, portando para o presente estudo iremos considerar somente as bandas de número dois (B02), três (B03), quatro (B04) e oito (B08), a equação, portanto foi adequada para que melhor representasse o estudo. Podendo ser expressa conforme a equação 3:

$$\alpha = 0,160B02 + 0,291B03 + 0,243B04 + 0,116B08 \quad (3)$$

A outra variável determinante para o cálculo do saldo de radiação de energia para a superfície ( $R_n$ ) é a emissividade, o qual foi escolhido a fórmula proposta em Van de Griend e Owe (1993), que possui uma dificuldade relativamente menor que outras fórmulas e apresenta resultados confiáveis, já que considera o índice de vegetação da região. Esta fórmula é expressa por:

$$\varepsilon = a + b \ln(NDVI) \quad (4)$$

Onde  $a = 1,0094$  e  $b = 0,04$ , valores obtidos através de uma regressão linear empírica. Para melhor aplicação desta equação no estudo, como falado anteriormente, o NDVI foi alterado pelo EVI, já que este índice é mais rigoroso quando comparado ao NDVI, limitando assim para áreas onde há mais água e sendo assim destacam-se as áreas irrigadas, e para descobrir o valor do EVI utilizou-se a fórmula:

$$EVI = 2,5 \times \frac{NIR - R}{1 + NIR + 6R - 7,5B} \quad (5)$$

Onde NIR significa o espectral de infravermelho próximo, e R e B os espectrais vermelho e azul respectivamente (Huete et al., 1997).

Tendo estas informações é possível então calcular o saldo de radiação de energia para a superfície ( $R_n$ ) que é expresso na equação 6 (Allen et al., 2002)

$$R_n = (1 - \alpha)R_s \downarrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow - (1 - \varepsilon)R_l \downarrow \quad (6)$$

Onde  $R_s \downarrow$  representa a direta e difusa radiação solar de onda curta que atinge de fato a superfície terrestre, pode ser expressa pela equação 7 e seu valor varia entre 200-1000 W/m<sup>2</sup>:

$$R_s \downarrow = C_s \times \cos\theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (7)$$

Sendo  $C_s$  a constante solar (1367 W/m<sup>2</sup>), as variáveis  $d_r$  e  $\tau_{sw}$ , representando o inverso da distância entre a Terra e o sol ao quadrado e a transmissividade terrestre respectivamente e o ângulo de incidência solar  $\theta$  podem ser calculadas da seguinte maneira (Allen et al., 2002) :

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \frac{DOY \times 2\pi}{365} \quad (8)$$

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (9)$$

$$\theta = \arccos[-\tan(Lat) \times \tan(\delta)] \quad (10)$$

Onde DOY representa o dia do ano sequencial, Z é a elevação em relação à altura do mar, em metros; Lat representa a latitude local em radianos, no caso do hemisfério sul, considerar negativa, e  $\delta$  representa o ângulo correspondente à declinação solar, que é calculado da segundo a equação 11:

$$\delta = 0,409 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times DOY - 1,39\right) \quad (11)$$

Outra variável presente na equação de saldo de radiação é  $R_l \downarrow$ , que representa o fluxo de radiação termal da atmosfera de onda longa e segundo a fórmula descrita por Stefan-Boltzmann, expressa na equação 12, variando entre 200 – 500 W/m<sup>2</sup> :

$$R_l \downarrow = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (12)$$

Sendo  $\sigma$  a constante d Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 / \text{K}^4$ ),  $T_a$  é a temperatura do ar da superfície próxima (K), descoberta a partir de dados de estações meteorológicas da região, disponíveis gratuitamente pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e  $\varepsilon_a$  representa a emissividade da atmosfera e é representada pela fórmula descrita por

Bastiaanssen (1998):

$$\varepsilon_a = 0,85 \times (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (13)$$

Este valor de emissividade de atmosfera, porém, ainda reflete um valor que não condiz com a realidade pois assume uma constante de 85% e não considera as condições de campo de cada situação, sendo então escolhida os valores de emissividade descobertos através da utilização da fórmula proposta por Van de Griend e Owe (1993), que apesar de não representar exatamente a emissividade da atmosfera, é um valor mais próximo da realidade de campo quando comparado à fórmula descrita acima.

Por fim, a última variável desta equação é a  $RL \uparrow$  que representa o fluxo de radiação de onda longa emitida pela Terra em direção a atmosfera descrita também pela equação de Stefan-Boltzmann podendo ter resultados variando entre 200-700 W/m<sup>2</sup>:

$$RL \uparrow = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (14)$$

Sendo  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície (K) e  $\varepsilon_0$  a emissividade da banda de superfície de banda larga, que segundo o algoritmo SEBAL pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \text{ IAF} \quad (15)$$

Onde que IAF significa índice de área foliar, sendo proposto por Allen et al. (2002) na equação 16:

$$\text{IAF} = \ln \frac{(0,69 - \frac{\text{SAVI}}{0,59})}{0,91} \quad (16)$$

Em que SAVI representa o índice de vegetação ajustado do solo e pode ser expresso na equação 17:

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L)(B08 - B04)}{(L + B08 + B04)} \quad (17)$$

Sendo L um fator de ajuste de fundo de solo (L) igual a 0,5 (Allen et al., 2002) e B08 e B04, os valores das bandas oito e quatro respectivamente do satélite Sentinel.

Por tratar-se de uma estimativa bastante elevada para a emissividade, assim como a equação de emissividade de atmosfera, já que considera uma constante de 95% mais uma pequena fração do valor de índice de área foliar, sendo assim, a fórmula de emissividade de superfície de banda larga, proposta por Allen et al. (2002) praticamente despreza o valor de IAF. À vista disso, para o presente estudo devido às condições da região analisada, o cálculo deste fator foi feito através da fórmula de emissividade

proposta por Van de Griend e Owe (1993), que apesar de não representar especificamente a emissividade de superfície de banda larga, foge de parâmetros empíricos.

Para finalizar a fórmula de fluxo de radiação de onda longa emitida pela Terra em direção a atmosfera é necessário calcular a temperatura da superfície, processo o qual foi necessário a utilização de dados do sensor termal infravermelho (TIRS) do satélite Landsat-8, onde a partir do recorte da imagem infravermelha termal da banda de número 10 e após a conversão de níveis de cinza da imagem para radiância é possível calcular a temperatura da superfície através das seguintes equações (Coelho: Correa, 2013):

$$L_{\lambda} = Ml \times B10 + A_L \quad (18)$$

$$T_s = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (19)$$

Sendo  $L_{\lambda}$  a radiância espectral do sensor de abertura em Watts/(m<sup>2</sup>;sr;µm), B10 representa a própria banda de número 10, a ser incluída na calculadora raster do programa Qgis 2.8 (ESRI), e tanto MI, o fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 (3.3420 x 10<sup>-4</sup>), quanto  $A_L$  que indica o fator aditivo de redimensionamento da banda (0,1) foram descobertos através das informações contidas no arquivo de metadata da banda de número 10. K2 representa a constante de calibração 2 (1.321,08 (K)) e K1 a constante de calibração 1 (774.89 (K)) e  $T_s$  a temperatura da superfície, expressa em kelvin.

Seguindo a fórmula de evapotranspiração, a próxima variável a ser calculada é o fluxo instantâneo de calor no solo (G), que segundo a equação proposta por Banstiaanssen (2000) porém substituindo o NDVI por EVI pode ser expressa pela equação 20:

$$G = \frac{T_s}{\alpha} \times (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) \times (1 - 0,98 \times EVI^4) \times Rn \quad (207)$$

Onde  $T_s$  é igual a temperatura da superfície em graus Celsius,  $\alpha$  representa o albedo instantâneo e  $Rn$  o saldo de radiação para superfície. A razão de utilizar o EVI na equação de emissividade também se aplica a este caso, adequando-se assim melhor ao estudo.

Para finalizar a fórmula de evapotranspiração apresentada, a última variável é o fluxo de calor sensível instantâneo (H) que para determiná-la primeiramente devem-se obter pixels “âncoras”, também chamados de pixels quente e frio, selecionados na área

de estudo. O pixel “frio” é selecionado em áreas de corpos d’água ou inundada, enquanto o pixel “quente” geralmente é obtido numa área de solo exposto.

Para o pixel frio os valores de calor sensível foram considerados zero ( $H = 0$ ), pois uma parte da energia disponível para superfície é utilizada nos processos de evapotranspiração e desta maneira a maior parte do  $R_n$  é constituída do fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ). No pixel quente o valor de calor latente foi considerado nulo ( $\lambda ET = 0$ ), o que permite o desprezo do valor de calor sensível instantâneo para as áreas de maior umidade.

Tendo estes dois pixels âncoras, pode-se aplicar a equação 21:

$$H = \frac{(\rho \times c_p \times dT)}{r_{ah}} \quad (218)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do ar úmido ( $1,15 \text{ kg/m}^3$ ),  $c_p$  o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \frac{J}{Kg} \times K$ ),  $dT$  a diferença de temperatura (K) entre os dois pixels âncora, que serão substituídos pelos dados obtidos através das estações automáticas do Paranoá-DF e Brasília do Instituto Nacional de Meteorologia e  $r_{ah}$  é resistência aerodinâmica para transporte de calor, que pode ser medida da conforme a equação 22:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right)}{u \times k} \quad (22)$$

Onde  $z_1$  e  $z_2$  representam a altura em metros de pontos acima do plano zero da vegetação é a velocidade de fricção (m/s), que indica as flutuações turbulentas de velocidade no are  $k$  é a constante de Von Karman’s (0.41). A velocidade de fricção ( $u$ ) pode ser calculada utilizando equação 23 para condições atmosféricas neutras:

$$u = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right)} \quad (23)$$

Sendo,  $k$  a constante de Von Karman’s (0.41),  $u_x$  a velocidade do vento (m/s) na altitude  $z_x$  e  $z_{om}$  indica o comprimento da rugosidade momentânea (m), sendo uma medida de fricção entre a camada de ar que interage com a superfície,

Para o cálculo de calor sensível ( $H$ ), Allen, et al. (2002) recomendam a escolha de dois pixels, que chama de “frio” e “quente”. Para o primeiro é recomendado que seja escolhido áreas de corpos d’água ou inundada, enquanto o pixel “quente” geralmente é obtido numa área de solo exposto. Para o pixel frio os valores de calor sensível são considerados zero ( $H = 0$ ), pois uma parte da energia disponível para superfície é utilizada nos processos de evapotranspiração e desta maneira a maior parte do  $R_n$  é



constituída do fluxo de calor latente, sendo assim, devido a predominância de vegetação em ambientes com alta umidade, principalmente no período da seca, podemos, portanto, desconsiderar os valores de H para esta vegetação perto de fontes de água, que incluiu vegetações nativas de córregos e rios e os pivôs centrais, que são o objeto de estudo desta pesquisa, localizados em sua maioria próximos à estas fontes.

Enfim, após desconsiderado os valores de calor sensível (H) a equação final para cálculo de estimativa de evapotranspiração pode ser demonstrada na equação abaixo e todas as fórmulas inseridas no programa QGIS 2.14 são descritas na tabela 9.

$$ET = Rn - G \quad (24)$$

**Tabela 9.** Fórmulas utilizadas na calculadora raster do programa Qgis 2.14.

$$LV = ("banda\_10\_landsat@1" * 0.00033420) + 0.1$$

$$TEMPERATURA\ DA\ SUPERFÍCIE\ (TS) = 1321.089 / (\ln ((774.89 / "LV@1") + 1))$$

$$ALBEDO = 0.160 * "banda\_2\_sentinel@1" + 0.291 * "banda\_3\_sentinel@1" + 0.243 * "banda\_4\_sentinel@1" + 0.116 * "banda\_8\_sentinel@1"$$

$$EVI = 2.5 * ((("banda\_8\_sentinel@1" - "banda\_4\_sentinel@1") / (1 + "banda\_8\_sentinel@1" + (6 * "banda\_4\_sentinel@1") - (7.5 * "banda\_2\_sentinel@1"))))$$

$$EMISSIVIDADE = 1.0094 + (0.04 * \ln ("EVI@1"))$$

$$RL\uparrow = "emissividade@1" * 0.0000000567 * ("TS@1" ^ 4)$$

$$RL\downarrow = 0.0000000567 * "emissividade@1" * ((Tar + 273.15) ^ 4)$$

$$RN = ((1 - "ALBEDO@1") * RS\downarrow) + "RL\downarrow@1" - "RL\uparrow@1" - ((1 - "emissividade@1") * "RL\downarrow@1")$$

$$G = (("TS@1" - 273.15) / "ALBEDO@1") * (0.0038 * "Albedo@1" + 0.0074 * ("Albedo@1" ^ 2)) * (1 - 0.98 * ("EVI@1" ^ 4)) * "RN@1"$$

$$EVAPOTRANSPIRAÇÃO\ (W/m^2) = "RN@1" - "G@1"$$

$$EVAPOTRANSPIRAÇÃO\ (mm/dia) = ("RN - G@1" / 2454000) * 60 * 60 * 24$$

Para o estudo, foram obtidos 14 grupos de imagens da combinação de satélites Sentinel-2 e Landsat-8 da região, durante o período de 5 de maio de 2017 até 12 de outubro de 2017, buscando sempre imagens com o menor espaço de tempo entre elas e com menor porcentagem de cobertura por nuvem, afim de aprimorar os dados obtidos, sendo as informações do Sentinel-2 escolhidas para o cálculo dos fatores os quais foram inseridos no modelo de equações para estimativa de evapotranspiração em mm/dia através da adaptação do modelo SEBAL para o caso específico.

Para a obtenção das imagens, foram utilizados o website do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o download das imagens do satélite Landsat-8 e a plataforma *Copernicus da European Space Agency* (ESA) para a obtenção das imagens do Sentinel-2, sendo ambos distribuidores gratuitos e licenciados destes materiais.

Para o equacionamento dos dados extraídos das imagens obtidas, primeiramente foi necessário converter as imagens do Sentinel-2, disponibilizadas em forma de radiância, para refletância o que foi realizado automaticamente pelo complemento Semi-Automatic Classification (SCP), um plug-in do programa QGIS 2.14, que já está programado para o processamento de imagens de ambos os satélites Sentinel-2 e Landsat-8. Após convertido os dados deste satélite, foi inserido no projeto a banda de número 10 do Landsat-8, promovendo a sinergia de informações de ambos os satélites através da calculadora raster do QGIS 2.14.

Foi utilizado então dados distribuídos gratuitamente pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a respeito da temperatura do ar nas estações meteorológicas automáticas de Brasília e Paranoá, escolhidas devido a maior proximidade com a região trabalhada do PAD-DF, sendo feita uma média da temperatura instantânea diária observada nestas estações, inserindo esta informação no equacionamento do modelo para o cálculo do fluxo de radiação termal da atmosfera de onda longa e de todos os outros parâmetros que dependem deste.

A fim de limitar os valores encontrados de evapotranspiração somente às áreas agrícolas do PAD-DF, foi usado o mapa das áreas agrícolas do Distrito Federal estabelecido por Lima (2015), utilizado como uma camada máscara para os mapas de evapotranspiração obtidos para toda a região, eliminando assim os valores de evapotranspiração das áreas de vegetação nativa.

### **5.3 Perfis temporais de Índice de vegetação de áreas irrigadas na região de interesse**

Afim de convalidar os dados de estimativa de evapotranspiração encontrados para as imagens dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 com o algoritmo SEBAL modificado, foram obtidos dados de EVI para áreas sob sistema de irrigação de pivô central, obtidos por meio da divisão de sensoriamento remoto (DSR) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que disponibiliza, atualmente por meio da análise das séries temporais EVI2-MODIS e precipitação acumulada mensal do TRMM para qualquer coordenada geográfica da América do Sul, desde o ano de 2000, apresentando os resultados para as datas disponibilizadas por estes satélites (Freitas et al., 2011), sendo uma importante ferramenta de convalidação, capaz de fornecer informações pontuais de índice de vegetação para fins de comparação com

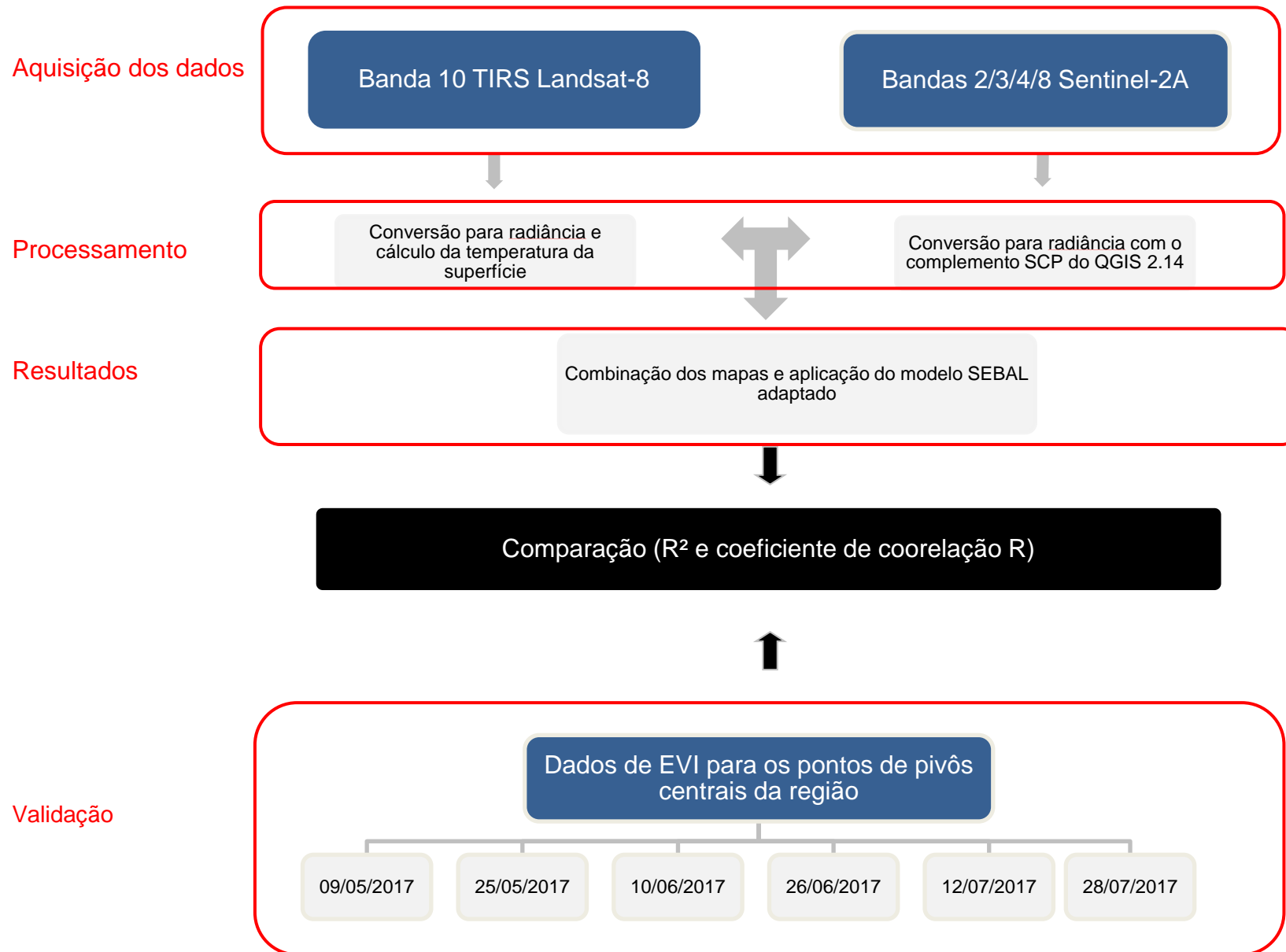
os resultados calculados com o modelo SEBAL adaptado.

Os dados obtidos no portal do DSR foram distribuídos em forma de valores pontuais de EVI para todos os pivôs centrais da região servindo assim para indicar a presença de vegetação e sua intensidade na região do PAD-DF durante o período desde 05 de maio de 2017, coincidindo assim com o início das datas das imagens obtidas do Sentinel-2 e Landsat-8 até meados de agosto de 2017, data limite disponível do portal.

A obtenção destes dados visou identificar as áreas agrícolas irrigadas e em funcionamento, através da intensidade do índice de vegetação, considerando que uma alta taxa de EVI indica a presença de uma vegetação no local e conseqüentemente a utilização dos sistemas de irrigação a fim de corroborar os resultados de estimavas de evapotranspiração, visto que os valores de EVI indicam a intensidade de presença de uma vegetação podendo-se, portanto, assumir um comportamento de taxa de evapotranspiração temporal de acordo com o índice de vegetação.

Em posse dos dados de EVI dos pivôs é possível identificar estes pontos nos mapas de evapotranspiração diária encontrados e localizar seus respectivos valores de evapotranspiração, a fim de se obter um comportamento semelhante entre os dois parâmetros.

Para melhor ilustrar todos os procedimentos realizados nesta pesquisa o fluxograma da figura 3 demonstra as etapas dos processos.



**Figura 3.** Fluxograma dos procedimentos realizados

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Adaptação do modelo SEBAL e geração dos mapas de evapotranspiração

As adaptações do modelo basearam-se na escolha de outras equações para determinação do albedo e emissividade, descrita por Andrade (2009) e Van de Griend e Owe (1993), respectivamente, que apresentam resultados comprovados e possuem uma dificuldade reduzida, facilitando a aplicação do modelo de equações. Além desta alteração, também foi utilizado o EVI ao invés do NDVI, pois como já descrito em algumas pesquisas como Lijun et al. (2008), que analisaram e compararam os comportamentos temporais dos satélites MODIS/EVI e MODIS/NDVI, encontrando para o primeiro uma maior precisão, alcançando valores de 97,17, além de Son et al. (2014), que também com a utilização de dados do satélite MODIS analisaram campos de cultivos de arroz no Vietnam e encontraram divergências nas intensidade de EVI e NDVI, indicando que o EVI sofreu menor interferência fatores externos a planta como a refletância do solo e condições atmosféricas devido a incorporação da banda azul em seu equacionamento.

Outra mudança realizada sobre o algoritmo foi desprezar o valor de calor sensível (H), pois segundo Allen et al. (2002), para o cálculo deste fator é necessário à determinação de dois pixels, chamados de “âncoras”, onde o pixel “frio” estaria em ponto de maior umidade no mapa, e o pixel “quente” estaria em uma região de solo exposto, sendo os valores de calor sensíveis considerados zero para o pixel “frio”. Como na região estudada a vegetação encontra-se predominantemente ao redor de locais de alta umidade, como rios e córregos, ou sob sistema de irrigação, pode-se considerar essas regiões como o pixel “frio” assumindo assim um calor sensível igual à zero nestas áreas de interesse.

Os valores estimados de evapotranspiração diários obtidos por meio das imagens dos satélites Sentinel- 2 e Landsat- 8 para o período entre 05 de maio de 2017 até 12 de novembro de 2017, estão apresentados na tabela 10.

**Tabela 10.** Evapotranspiração estimada na área de estudo no período de 05/05/2017 à 12/10/2017.

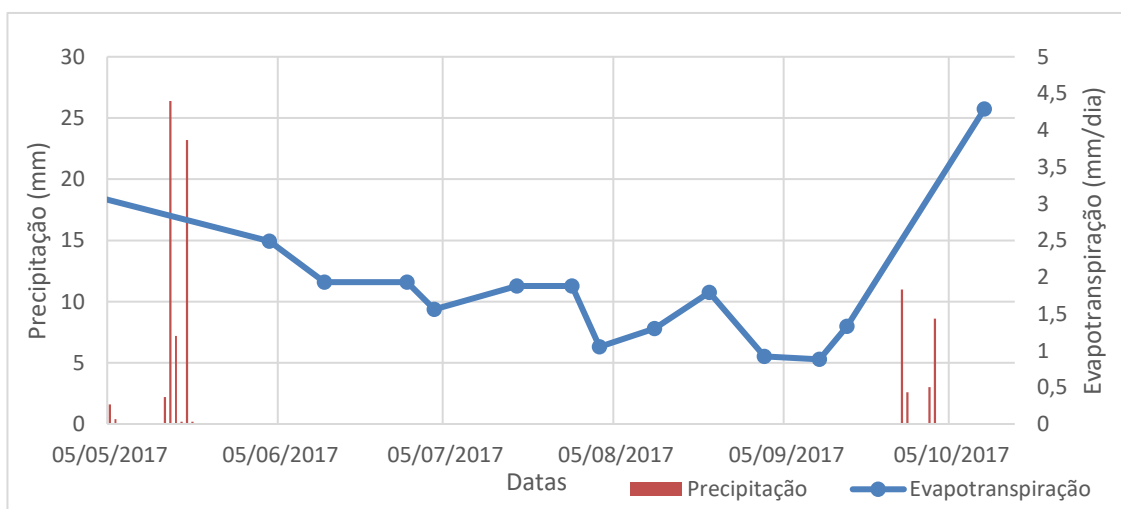
Nº do Grupo	Dia do ano	Dia sequencial (DOY)	Satélite	Mês	dr	Tsw	Tar Médio	RS↓	ETrc min (mm/dia)	ETrc max (mm/dia)	Média (mm/dia)	Desvio Padrão
1	05/05/2017	125	Sentinel 2	MAIO	0,819	0,77	20,60	148,06	1	10	3,064	1,08
	05/05/2017	125	Landsat 8									
2	04/06/2017	155	Sentinel 2	JUNHO	0,706	0,77	21,84	127,69	0	4	2,49	0,98
	06/06/2017	157	Landsat 8									
3	14/06/2017	165	Sentinel 2	JUNHO	0,685	0,77	20,40	123,81	0	4	1,93	0,79
	06/06/2017	157	Landsat 8									
4	29/06/2017	180	Sentinel 2	JUNHO	0,670	0,77	17,99	121,16	0	4	1,93	0,91
	22/06/2017	173	Landsat 8									
5	04/07/2017	185	Sentinel 2	JULHO	0,670	0,77	15,20	121,15	0	4	1,56	0,91
	08/07/2017	189	Landsat 8									
6	19/07/2017	199	Sentinel 2	JULHO	0,683	0,77	17,77	123,46	0	5	1,88	0,99
	24/07/2017	204	Landsat 8									
7	29/07/2017	210	Sentinel 2	JULHO	0,706	0,77	18,29	127,61	0	6	1,88	0,91
	24/07/2017	204	Landsat 8									
8	03/08/2017	215	Sentinel 2	AGOSTO	0,720	0,77	19,50	130,13	0	4	1,05	1,01
	10/08/2017	222	Landsat 8									
9	13/08/2017	225	Sentinel 2	AGOSTO	0,754	0,77	20,80	136,28	0	4	1,3	1,06
	10/08/2017	222	Landsat 8									
10	23/08/2017	235	Sentinel 2	AGOSTO	0,795	0,77	20,04	143,75	0	4	1,79	0,86
	25/08/2017	237	Landsat 8									
11	02/09/2017	245	Sentinel 2	SETEMBRO	0,843	0,77	20,95	152,30	0	4	0,92	0,98
	10/09/2017	253	Landsat 8									
12	12/09/2017	255	Sentinel 2	SETEMBRO	0,895	0,77	22,24	161,70	0	5	0,88	0,97
	10/09/2017	253	Landsat 8									
13	17/09/2017	260	Sentinel 2	SETEMBRO	0,922	0,77	20,22	166,63	0	5	1,33	1,04
	10/09/2017	253	Landsat 8									
14	12/10/2017	285	Sentinel 2	OUTUBRO	1,063	0,77	25,76	192,08	2	6	4,290	0,83
	12/10/2017	285	Landsat 8									

Sendo dr o inverso da distância do Sol à Terra ao quadrado, Tsw a transmissividade terrestre, Tar médio a temperatura média do ar obtida através do website do INPE para a data da imagem do Sentinel-2, RS↓ a radiação solar direta e difusa de onda curta que atinge a superfície terrestre, ETrc min e ETrc max representam os valores máximos e mínimos de evapotranspiração real encontrados na imagem. Os meses destacados em vermelho representam aqueles onde não houveram eventos de precipitação, já os em azul representam os meses em que houveram este tipo de evento

Os dados da tabela 10 demonstram uma maior média de valores de evapotranspiração para os meses os quais houveram eventos de evapotranspiração, o que já era esperado, já que com o aumento da disponibilidade de água, a tendência é que a evapotranspiração tenha uma resposta proporcional ao aumento de água no solo. O valor máximo de ET para o mês de maio demonstra um ponto desproporcional ao restante da imagem, já que é um valor bem acima da média e foi indicado como a minoria entre todos os valores encontrados para a imagem deste dia, além de dados dos pivôs centrais também confirmarem de se tratar de um valor descomunal.

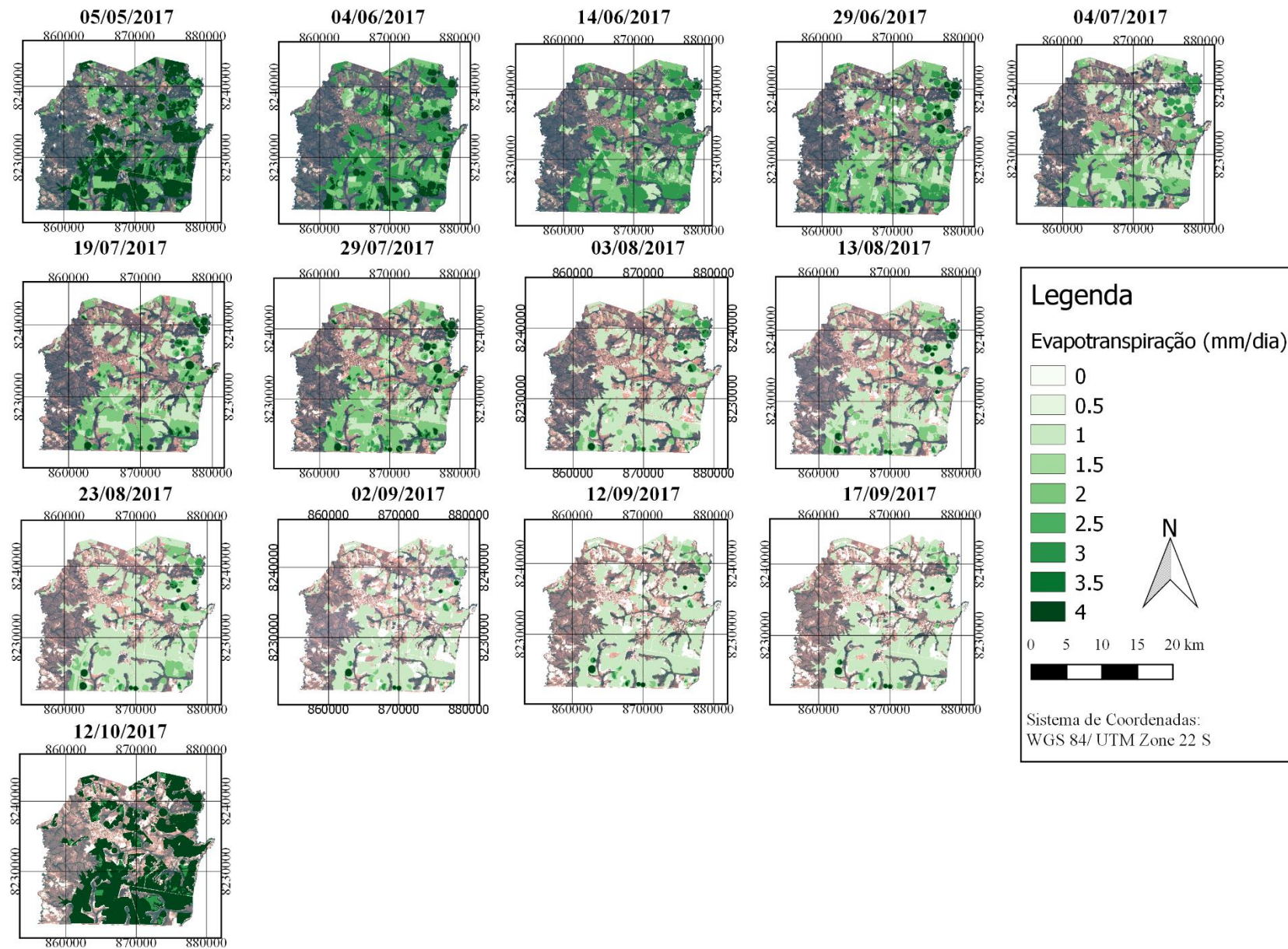
Os resultados encontrados para a estação seca, representado pelos meses de junho, julho, agosto e setembro, evidenciam a pouca utilização dos sistemas de irrigação, demonstrando uma média baixa para a região agrícola do DF, indicando porém que houve o estímulo hídrico em alguns já que mesmo durante os meses os quais não ocorreram eventos de precipitação, houveram valores de evapotranspiração variando entre 4 e 6 mm/dia, podendo-se inferir que estes pontos são aqueles que receberam algum tipo de irrigação.

Os valores médios de evapotranspiração encontrados no período de 05/05/2017 até 05/10/2017 são ilustrados de forma temporal na figura 4, adicionado de dados de precipitação obtidos através do website no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a figura 5 demonstra a região do PAD-DF ao longo do período analisado, ressaltando-se as cores mais intensas, indicando maiores valores de evapotranspiração, identificadas nos meses onde ocorreram eventos de precipitação.



**Figura 4.** Precipitação diária por média de evapotranspiração diária o PAD-DF





**Figura 5.** Mapas de evapotranspiração das áreas agrícolas da região do PAD-DF.

Os resultados encontrados estão condizentes com encontrados por da Silva et al., (2012) que estimaram a evapotranspiração de regiões semi áridas do estado do Ceará, com condições semelhantes à área de estudo, quanto a temperatura elevada e sistemas de irrigação. Encontrando para os meses de agosto e setembro, valores de evapotranspiração médio pelo algoritmo SEBAL de 0,6 e 1 mm, respectivamente, para áreas de sequeiro e valores entre 4mm e 6mm para áreas irrigadas de cultura de coqueiro, dentro da faixa encontrada para os mesmos meses nesta pesquisa, que demonstraram valores variando de 0 a 5 neste período, onde as áreas com maior evapotranspiração são as sob sistema de irrigação.

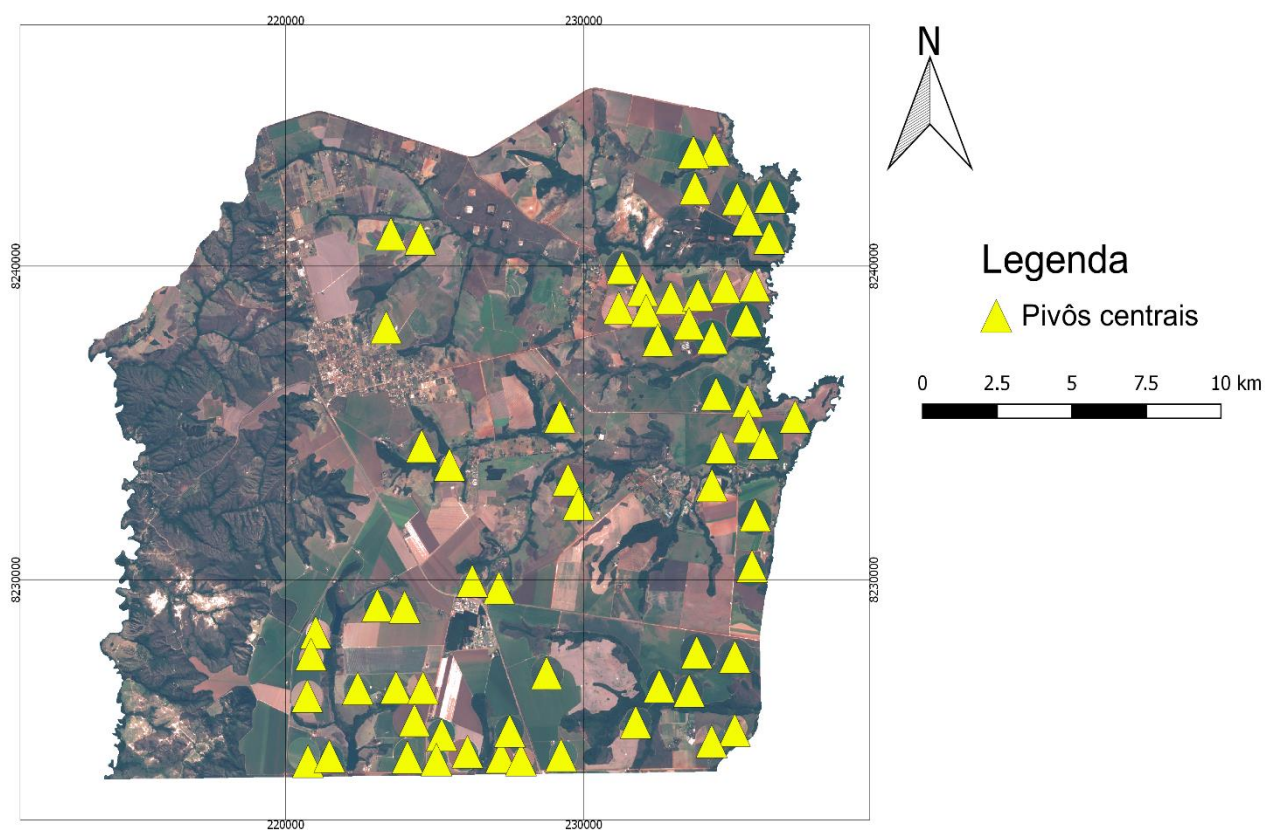
Segundo Ruhoff (2011) valores estimados de evapotranspiração para a vegetação do bioma do cerrado na bacia do rio grande entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, variaram entre 6,6 mm/dia na estação de chuvas, representado nesta pesquisa pelos meses de maio, setembro e outubro, onde foram encontrados os maiores valores de evapotranspiração e 1,2 mm na estação da seca, representado aqui pelos meses de junho, julho e agosto que apresentam valores semelhantes.

Bezerra et al. (2008) também encontraram valores variando entre 0 e 6 mm/dia para os meses de setembro e outubro para uma região semiárida do Ceará, com uma média mais elevada na imagem relativa a outubro, também como observado na tabela 9.

O estudo também está de acordo com Paiva et al. (2011) que utilizaram o modelo SEBAL para estimar a evapotranspiração da região de Piraí do Sul no Estado do Paraná valores de evapotranspiração variando entre 0 e 4 mm/dia entre os dias 4 de julho até o dia 12 de outubro de 2008, e também com Giacomoni (2005) que analisou 44 imagens sem cobertura de nuvens e aplicou os modelos SEBAL e SSEBI, encontrando valores entre 0 e 6 mm/dia para as o modelo SEBAL, no ano de 1998 nos, ambos coerentes com os valores da tabela 10.

## 6.2 Perfis temporais de Índice de vegetação de áreas irrigadas na região de interesse

Para melhor compreensão da dinâmica da evapotranspiração na área de estudo, além dos valores estimados de evapotranspiração, foram obtidos, através de dados provenientes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os valores de EVI entre maio de 2017 até o mês julho, data limite disponível, para as áreas de pivôs centrais indicados na figura 6. Afim de relacionar estes dados de EVI com os obtidos, as informações sobre a taxa de evapotranspiração sobre cada ponto foram extraídas de cada uma das imagens diárias obtidas, tendo seus resultados expressos na tabela 10.



**Figura 6.** Localização dos pivôs centrais da região do PAD-DF.

**Tabela 10.** Dados de evapotranspiração para as áreas de pivô central do PAD-DF em 2017

Localização (UTM)		Nº do pivô	Evapotranspiração (mm/dia)													
X	Y		05/05	04/06	14/06	29/06	04/07	19/07	29/07	03/08	13/08	23/08	02/09	12/09	17/09/	12/10
877.162.849	8.223.572.998	1	3	3	3	3	2	1	1	1	1	2	1	2	2	4
877.232.722	8.225.913.734	2	4	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	5
877.896.513	8.234.071.375	3	4	4	3	3	2	3	2	2	2	2	1	1	1	5
878.779.093	8.239.249.401	4	2	3	3	4	3	3	4	3	4	3	2	2	2	4
878.834.693	8.240.559.993	5	4	4	4	4	3	4	4	3	3	3	1	1	1	5
877.737.057	8.240.519.593	6	2	3	3	4	3	4	4	3	2	2	2	2	3	5
876.328.019	8.240.901.545	7	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	2	5
877.010.116	8.242.122.224	8	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	1	2	2	4
876307,11	8.242.052.509	9	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	5
867.060.272	8.239.558.974	10	4	3	3	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	4
866.077.027	8.239.739.967	11	4	4	3	3	2	2	2	1	1	1	0	0	0	4
873.803.608	8.238.430.691	12	4	3	3	3	2	1	2	1	1	1	1	1	1	5
873.659.205	8.237.158.705	13	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	4
874.465.923	8.237.710.676	14	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	3	3	0
874.572.533	8.237.042.574	15	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	0
875.410.536	8.237.431.885	16	4	2	2	3	3	4	4	3	4	3	1	1	1	4
876.329.053	8.237.495.352	17	4	3	3	4	3	3	4	2	3	2	1	1	1	5
877252,23	8237720,46	18	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	4
878.241.582	8.237.745.947	19	3	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4
878.068.463	8.239.853.996	20	3	3	3	3	3	3	4	2	3	1	1	2	3	5
865.829.757	8.236.763.799	21	3	3	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	4
877.922.204	8236640,68	22	2	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1	1	5
876.774.713	8.236.116.468	23	2	4	4	4	3	2	2	1	1	1	1	1	1	5
875.997.403	8.236.588.191	24	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
874.940.775	8.236.097.332	25	4	4	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	5
871.584.008	8.233.749.551	26	4	4	3	3	2	3	3	3	3	3	3	4	3	0

866.914.798	8.232.940.534	<b>27</b>	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	4
867.831.226	8.232.312.055	<b>28</b>	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	4
871795,15	8.231.721.477	<b>29</b>	3	4	4	4	3	3	2	1	1	1	1	1	1	5
872.123.322	8.230.948.144	<b>30</b>	4		3	3	2	2	2	1	2	1	1	1	1	5
876.848.996	8.234.325.851	<b>31</b>	4	3	3	4	3	4	4	3	4	3	3	3	2	5
876.961.218	8.232.606.033	<b>32</b>	4	2	2	3	3	4	4	2	3	2	1	1	1	4
877.896.327	8.233.244.154	<b>33</b>	4	3	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4
878.384.201	8.232.708.817	<b>34</b>	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	5
876.621.206	8.231.411.533	<b>35</b>	2	3	3	4	3	4	4	4	4	3	3	3	3	5
878.048.496	8.230.417.686	<b>36</b>	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	5
877.893.548	8228786,43	<b>37</b>	5	4	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	5
869.379.299	8.228.349.395	<b>38</b>	4	3	3	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	4
868487,65	8.228.590.826	<b>39</b>	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4
865.277.726	8.227.901.801	<b>40</b>	4	4	3	3	2	2	2		2	2	0	1	1	4
866.191.955	8.227.821.464	<b>41</b>	5	4	3	3	2	2	2	1	1	2	1	1	1	4
863.187.852	8227099,6	<b>42</b>	4	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4
863.005.997	8.226.403.996	<b>43</b>	4	2	2	1	1	2	2	2	2	2	3	3	4	6
862.841.858	8.225.078.905	<b>44</b>	4	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	4
864.545.716	8.225.272.196	<b>45</b>	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4
865830,38	8.225.261.971	<b>46</b>	4	3	3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	4
866.736.935	8.225.226.746	<b>47</b>	4	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3	3	6
870.898.879	8.225.582.568	<b>48</b>	4	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	5
866.419.732	8.224.202.547	<b>49</b>	4	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4
862.808.465	8.222.995.259	<b>50</b>	4	2	2	3	3	4	4	4	4	4	2	1	1	4
863.531.381	8.223.136.048	<b>51</b>	3	4	3	4	3	3	3	1	2	1	1	1	1	5
866.151.962	8.223.024.166	<b>52</b>	4	4	3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	4
867.322.011	8.223.709.143	<b>53</b>	3	4	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	4
867.119.549	8.222.924.238	<b>54</b>	3	4	3	2	1	1	1	1	1	1		1	1	4
868.168.347	8.223.145.456	<b>55</b>	3	4	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	5

869.294.981	8.222.951.056	<b>56</b>	4	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	6
869.956.813	8.222.842.012	<b>57</b>	4	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5
869.606.236	8.223.768.782	<b>58</b>	2	4	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	4
871.307.823	8.222.946.644	<b>59</b>	4	3	3	4	3	4	3	2	2	2	1	2	2	5
873.843.472	8.223.924.639	<b>60</b>	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	5
874.666.948	8.225.051.136	<b>61</b>	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	5
875.668.508	8224878,35	<b>62</b>	4	4	3	3	2	3	3	1	1	2	1	1	1	5
875955,28	8.226.092.316	<b>63</b>	3	4	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	5
876.375.996	8223240,15	<b>64</b>	2	3	3	3	2	3	2	1	1	1	1	1	1	5
879476,91	8.233.513.181	<b>65</b>	3	3	3	3	3	4	4	2	3	2	1	1	1	5

Analisando a imagem da região do PAD-DF pode-se identificar 65 áreas de formato circular, característico de um sistema de irrigação por pivô central. Os dados de evapotranspiração encontrados para cada ponto possuem variações entre 0 a 6 mm/dia, indicando assim que alguns sistemas estavam em funcionamento enquanto outros provavelmente não estavam realizando suas funções de irrigação.

Para comparar os dados obtidos de evapotranspiração com os dados de EVI, foi considerado principalmente os dados da época de seca da região, visto que é a época de maior demanda de água e também a época onde os valores de evapotranspiração de sistemas irrigados mais destoam da média geral da região, indicando que provavelmente nas áreas onde ocorreram irrigações os valores de EVI também apresentarão valores elevados.

A fim de ilustrar esta situação foi separado os pivôs centrais os quais, durante a época de seca, representado entre os meses de junho até setembro nos mapas calculados com o algoritmo SEBAL modificado e representado pelos dados dos meses de maio junho e julho da plataforma LAF, obtiveram um aumento constante em seu valor, iniciando em um valor médio de EVI de 0,3 para o mês de maio e tendo um aumento para os meses subsequentes, alcançando valores entre 0,55 e 0,95, indicando um crescimento constante das plantas nestes locais, podendo-se presumir que as áreas de irrigação que obtiveram estes valores, provavelmente estavam em funcionamento e em um período de pós plantio, caracterizado pelo aumento da taxa de EVI explicado pelo desenvolvimento fisiológico da vegetação presente.

Sob estas condições, foram encontrados 18 pivôs, tendo essa classe representado 27,8% dos pivôs totais da região, além deste grupo de pivôs, também foram observados 2 outros comportamentos temporais de taxa de EVI.

Os dados de outros 28 pivôs, representando 43% do total, apresentaram um comportamento semelhante, tendo o dado médio de EVI para o mês de maio apresentando valor médio elevado, de 0,49 sofre uma decadência gradual, porém os dados do final do mês de julho mostram um aumento nos seus valores, retornando a um valor médio de 0,52, podendo indicar que nestes pivôs ocorreram uma colheita e logo após um plantio, caracterizado pela flutuação dos valores de EVI, ou também pode ser explicado simplesmente como uma variação do estágio fenológico da vegetação ali presente, que tem valores possui taxas de EVI bastante distintos durante o seu ciclo produtivo, independentemente da situação, pode-se afirmar que houve um estímulo hídrico nestas áreas durante o mês de julho, pois mesmo sem nenhum evento de precipitação, a vegetação conseguiu se desenvolver.

O terceiro e último grupo, contendo os últimos 19 pivôs, representando 29,2% do total, foi caracterizado como aquelas áreas onde as taxas de EVI decaíram

bruscamente, iniciando-se em um valor médio elevado, de 0,51, indicando que inicialmente havia vegetação nestas áreas, porém os valores de EVI decrescente, atingindo no final do mês de julho um valor médio de 0,17, comprovam a fase final do ciclo da cultura e a baixa ou não utilização do sistema de irrigação até a data limite observada.

Afim de melhor ilustrar a correlação entre os dados de EVI encontrados com os dados de estimativa de evapotranspiração calculados, as tabelas 11, 12 e 13 demonstram os pontos de localização dos pivôs centrais de cada grupo de comportamento, tais como seus respectivos valores de EVI, obtidos através do portal LAF do INPE e sua coorelação com os dados calculados de evapotranspiração retratados em formas de gráficos nas figuras 7, 8 e 9

**Tabela 11.** Pivôs selecionados do 1º grupo de comportamento

Nº do pivô	EVI					
	09/05/2017	25/05/2017	10/06/2017	26/06/2017	12/07/2017	28/07/2017
4	0,204	0,540	0,721	0,739	0,714	0,686
5	0,302	0,626	0,701	0,678	0,577	0,706
6	0,338	0,617	0,784	0,808	0,699	0,574
16	0,411	0,282	0,493	0,700	0,743	0,945
17	0,434	0,551	0,713	0,770	0,694	0,600
19	0,269	0,184	0,309	0,484	0,567	0,822
20	0,292	0,513	0,730	0,793	0,652	0,783
24	0,442	0,411	0,518	0,763	0,678	0,544
31	0,583	0,585	0,733	0,730	0,717	0,706
32	0,415	0,380	0,349	0,470	0,499	0,713
35	0,186	0,432	0,551	0,717	0,550	0,776
44	0,216	0,176	0,287	0,450	0,631	0,814
50	0,219	0,388	0,679	0,814	0,862	0,902
55	0,412	0,548	0,434	0,453	0,435	0,629
56	0,133	0,122	0,146	0,325	0,430	0,699
57	0,131	0,121	0,329	0,443	0,658	0,891
64	0,290	0,361	0,390	0,464	0,315	0,621
65	0,283	0,510	0,672	0,715	0,669	0,838
<b>Média</b>	<b>0,309</b>	<b>0,408</b>	<b>0,530</b>	<b>0,629</b>	<b>0,616</b>	<b>0,736</b>

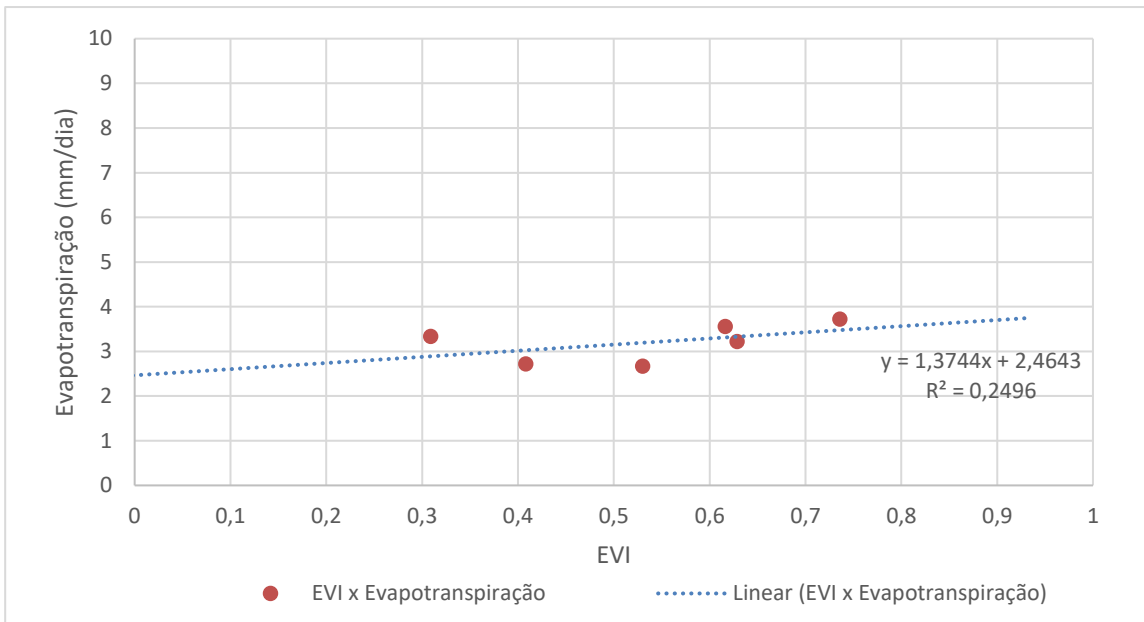


**Tabela 12.** Pivôs selecionados do 2º grupo de comportamento

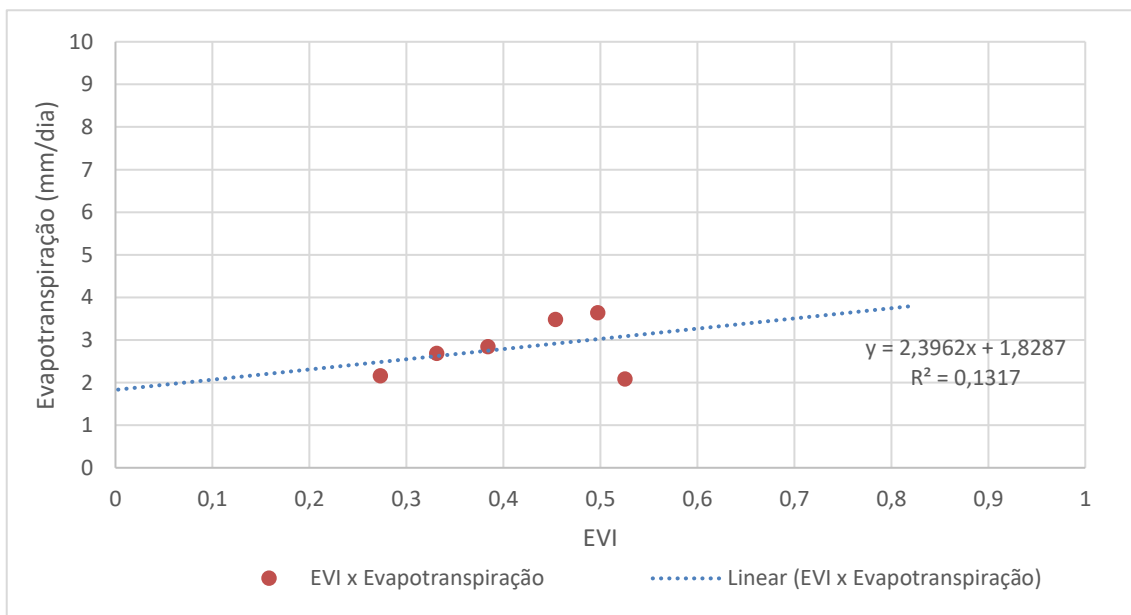
Nº do pivô	EVI					
	09/05/2017	25/05/2017	10/06/2017	26/06/2017	12/07/2017	28/07/2017
1	0,267	0,346	0,276	0,238	0,155	0,600
2	0,603	0,483	0,309	0,197	0,201	0,545
3	0,588	0,561	0,458	0,269	0,187	0,544
7	0,613	0,600	0,537	0,415	0,279	0,412
8	0,603	0,573	0,501	0,472	0,306	0,434
11	0,597	0,553	0,443	0,314	0,225	0,542
13	0,266	0,208	0,188	0,175	0,188	0,400
14	0,463	0,494	0,509	0,479	0,447	0,416
15	0,404	0,423	0,452	0,475	0,427	0,567
25	0,600	0,550	0,489	0,360	0,209	0,416
27	0,494	0,325	0,191	0,177	0,186	0,393
28	0,469	0,344	0,231	0,304	0,480	0,733
29	0,628	0,336	0,252	0,395	0,237	0,392
36	0,546	0,548	0,471	0,402	0,592	0,763
39	0,572	0,493	0,425	0,286	0,208	0,546
43	0,192	0,142	0,145	0,136	0,139	0,512
46	0,486	0,431	0,247	0,170	0,160	0,365
48	0,613	0,496	0,300	0,212	0,192	0,583
49	0,392	0,215	0,184	0,191	0,141	0,533
51	0,563	0,641	0,552	0,573	0,527	0,692
52	0,580	0,470	0,278	0,191	0,181	0,569
53	0,390	0,383	0,379	0,406	0,253	0,582
54	0,279	0,456	0,472	0,457	0,285	0,323
58	0,571	0,560	0,506	0,387	0,231	0,607
59	0,308	0,431	0,663	0,754	0,526	0,775
60	0,636	0,579	0,444	0,267	0,190	0,360
61	0,599	0,568	0,552	0,390	0,286	0,567
62	0,608	0,502	0,302	0,186	0,211	0,541
<b>Média</b>	<b>0,497</b>	<b>0,454</b>	<b>0,384</b>	<b>0,331</b>	<b>0,273</b>	<b>0,525</b>

**Tabela 13.** Pivôs selecionados do 3º grupo de comportamento

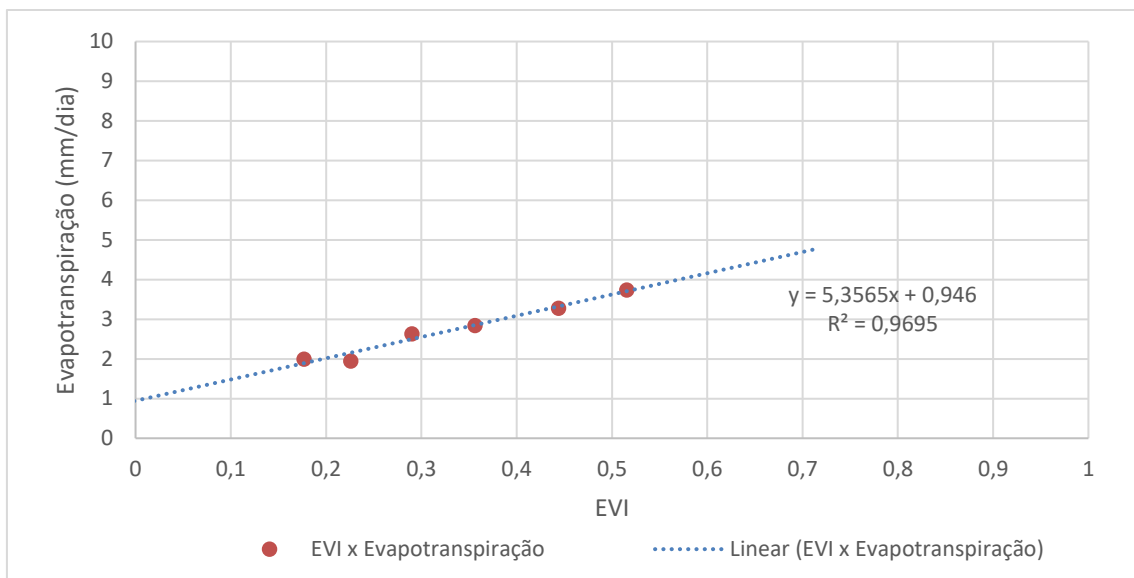
Nº do pivô	EVI					
	09/05/2017	25/05/2017	10/06/2017	26/06/2017	12/07/2017	28/07/2017
<b>9</b>	0,639	0,623	0,571	0,511	0,398	0,278
<b>10</b>	0,433	0,346	0,268	0,209	0,196	0,184
<b>12</b>	0,563	0,417	0,282	0,202	0,231	0,275
<b>18</b>	0,287	0,225	0,203	0,194	0,187	0,179
<b>21</b>	0,341	0,314	0,249	0,268	0,228	0,177
<b>22</b>	0,599	0,764	0,758	0,651	0,261	0,123
<b>23</b>	0,602	0,797	0,756	0,535	0,288	0,040
<b>26</b>	0,501	0,524	0,506	0,479	0,444	0,407
<b>30</b>	0,504	0,412	0,280	0,193	0,185	0,187
<b>33</b>	0,441	0,209	0,200	0,199	0,194	0,188
<b>34</b>	0,565	0,432	0,240	0,193	0,170	0,148
<b>37</b>	0,680	0,626	0,580	0,458	0,248	0,026
<b>38</b>	0,561	0,437	0,223	0,160	0,164	0,174
<b>40</b>	0,648	0,529	0,333	0,247	0,226	0,211
<b>41</b>	0,589	0,396	0,270	0,224	0,194	0,165
<b>42</b>	0,437	0,218	0,199	0,222	0,210	0,193
<b>45</b>	0,487	0,430	0,274	0,184	0,159	0,141
<b>47</b>	0,262	0,136	0,122	0,105	0,119	0,136
<b>63</b>	0,655	0,599	0,454	0,281	0,198	0,127
<b>Média</b>	<b>0,516</b>	<b>0,444</b>	<b>0,356</b>	<b>0,290</b>	<b>0,226</b>	<b>0,177</b>



**Figura 7.** Média de evapotranspiração diária por EVI do primeiro grupo



**Figura 8.** Média de evapotranspiração diária por EVI do segundo grupo



**Figura 9.** Média de evapotranspiração diária por EVI do terceiro grupo

O gráfico da figura 7 analisa a correlação entre os valores médios de EVI e de evapotranspiração para os pivôs que obtiveram um aumento constante de seus valores, alcançando o valor médio máximo de EVI encontrado de 0,75, e os dados de evapotranspiração calculados por meio do modelo SEBAL adaptado para as áreas, que acompanharam o crescimento e elevaram-se a um valor médio máximo de 3,5 mm/dia, sendo observado um coeficiente de correlação R entre estes parâmetros igual a 0,5.

O segundo grupo, representado na figura 8 demonstra as taxas médias de EVI correlacionada com os dados médios de evapotranspiração calculados, observando-se um coeficiente de correlação R igual a 0,363, podendo ter seu valor reduzido explicado devido ao fato de que este grupo representa aqueles pontos nos quais a taxa de EVI apresenta um comportamento imprevisível, indicando os diferentes estágios de uma cultura ou a colheita e plantio de outra, dificultando a comparação entre os dados já que as imagens nas quais foram observadas as taxas de EVI são de dias distintos às utilizadas para inserir o modelo SEBAL adaptado, causando maior conflito entre a combinação destes dados, o que não afeta os outros grupos de forma significativa pois estes possuem comportamentos previsível de ascensão e decaimento, acompanhados dos valores calculados de evapotranspiração.

O terceiro e último grupo, representado pela figura 9, já apresenta um forte indício de correlação entre os fatores, sendo observado um coeficiente R igual a 0,98, demonstrando uma relação diretamente proporcional entre a queda de taxas de EVI com a queda dos valores de estimativa de evapotranspiração, grupo este de prováveis sistemas de irrigação que não foram utilizados.

Através dos gráficos também é possível observar as faixas de valores nas quais as taxas de EVI e evapotranspiração se relacionam. Em todos os gráficos se pode notar que para a faixa de valores entre 0,3 e 0,5 de EVI, a evapotranspiração relativa aos dados flutua próximos a valores entre 2 e 3 mm/dia, além que segundo a figura 7, valores médios mais elevados de EVI, acima de 0,5 apresentam uma estimativa média de evapotranspiração entre 3 e 4 mm/dia, dados estes que podem servir de base para futuros estudos em estimativa de consumo de água para culturas agrícolas irrigadas

Por fim, os valores de evapotranspiração encontrados para as imagens após o mês de agosto para todos os pontos já apresentam um aumento significativo, o que pode indicar que os valores de EVI se mantiveram altos para estes pontos, impulsionado pelo início da chuva e da época de plantio da safra 2017/18, que só não pode ser comprovado devido a indisponibilidade destes dados.

## 7 CONCLUSÃO

No cenário imposto pela pior crise hídrica da história do Distrito Federal, o manejo e o monitoramento do consumo de água na agricultura se tornaram cada vez mais relevantes para a gestão dos recursos hídricos. Todavia, a variabilidade espacial da demanda hídrica e a extensão territorial da área ocupada por culturas agrícolas e florestais dificultam o manejo da irrigação o que torna tecnologias de sensoriamento remoto atrativas.

Apesar das dificuldades enfrentadas para monitorar a demanda e o consumo de água em áreas agrícolas, a possibilidade de se estimar a evapotranspiração por meio de imagens obtidas remotamente oferece possíveis soluções ao problema que convergem para hipótese norteadora do projeto de pesquisa.

O estudo, comprova que a utilização dos pivôs centrais da região do PAD-DF principalmente durante a época de seca do ano de 2017 esteve aquém de sua real capacidade, com quase 30 % dos seus pivôs desligados ou com baixa utilização, demonstrando um mal-uso de áreas agricultáveis e evidenciando que a crise hídrica do distrito federal de fato afetou os sistemas de cultivo e conseqüentemente a produção da região do PAD-DF

A sinergia dos satélites demonstrou-se bastante eficiente quanto a geração dos parâmetros do modelo SEBAL, tendo como base as imagens do Sentinel-2 complementado pela banda termal do satélite Landsat-8

A modificação realizada no algoritmo SEBAL para otimização e adequação do modelo para a área em questão mostrou que as alterações realizadas tiveram pouco impacto nos valores de evapotranspiração quando comparado com literaturas que utilizaram o algoritmo completo, sendo, portanto, um eficiente e prático método para uma estimativa de evapotranspiração.

Os dados calculados com o modelo SEBAL adaptado, quando combinados com as informações sobre as taxas de EVI dos pivôs centrais da região se prestou em indicar de valores de evapotranspiração para determinadas taxas de EVI, estabelecendo uma conexão entre as informações, buscando assim uma estimativa rápida de evapotranspiração e

consequentemente de consumo de água com as informações de índices de vegetação, gerando uma importante ferramenta para futuros estudos hídricos.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALLEN, R. G., TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC): Model. **Irrig. Drain. Eng.**, v. 133, n. 4, p. 380–406, 2007.

ALLEN, RG, R. TREZZA, AND M. TASUMI. "Surface energy balance algorithms for land: advance training and user's manual. Version 1.0." **Waters Consulting-University of Idaho-WaterWatch** .v.1, 2002, 97p

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43(2): p. 1–34, 1994.

ANA; Agência Nacional das Águas (Brasil); Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013/ Brasília: ANA, 2013. 432 p.: li. ISBN: 978-85-882100-15-8. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA\\_Conjuntura\\_Recursos\\_Hidricos\\_Brasil/ANA\\_Conjuntura\\_Recursos\\_Hidricos\\_Brasil\\_2013\\_Final.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf)

ANDRADE, R. G.; SEDYAMA, G. C.; BASTITELLA, M.; VICTORIA, D. C.; PAZ, A. R.; LIMA, E. P.; NOGUEIRA, S.F. Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto, 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá. **Embrapa Informática Agropecuária/INPE**, p. 695-704, 2009. Disponível em: <http://www.geopantanal2009.cnptia.embrapa.br/cd/pdf/p105.pdf>. Acesso em: 22 Jul. 2017.

BASTIAANSSEN, W. G. M., NOORDMAN, E. J. M., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B. P., & ALLEN, R. G. "SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions." **Journal of irrigation and drainage engineering** v.131 n 1, p 85-93, 2005.

BASTIAANSSEN, W. based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Moreno, J.F.; ROERINK, G.J.; VAN DER, W.T. A Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2 validation. **J. Hydrol**, p. 212–229, 1998.

BEZERRA, B. G, SILVA, B. B., FERREIRA, J.N. "Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5." **Revista brasileira de Meteorologia** v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v23n3/v23n3a05>. Acesso em: 1 dez. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Mapeamento do uso e cobertura do cerrado: **Projeto Terraclass cerrado 2013**. Brasília. MMA/SBF, 2015. 69p. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/Metodologia\\_TCCerrado\\_2013.pdf](http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/Metodologia_TCCerrado_2013.pdf). Acesso em 28 set. 2017.



BRASIL. PROGRAMA ÁGUA BRASIL. **Pegada hídrica das bacias hidrográficas.** 2014. 72 p. Disponível em: <[http://bbaguabrasil.com.br/wp-content/uploads/2015/03/publicacao\\_pegada\\_hidrica\\_bacias\\_agua\\_brasil.pdf](http://bbaguabrasil.com.br/wp-content/uploads/2015/03/publicacao_pegada_hidrica_bacias_agua_brasil.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2017.

Campos, José Eloi Guimarães. "Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos." *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, no. 1, p. 41-48, 2016.

CODEPLAN-COMPANHIA, DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. Pesquisa distrital por amostra de domicílios do Distrito Federal, 2013.

CODEPLAN-COMPANHIA, DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. Pesquisa distrital por amostra de domicílios do Distrito Federal, 2015.

COELHO, A. L.; CORREA, W. Temperatura de superfície celsius do sensor tirs/landsat-8: metodologia e aplicações. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 7, n. 1, p. 31–45, 2013.

DA SILVA, B.B., Braga, A.C., Braga, C.C., de Oliveira, L.M.M., Galvíncio, J.D. and Montenegro, S.M.G.L., 2012. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(9), pp.1218-1226.

DOORENBOS J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. FAO Irrigation and drainage Paper No. 24. **Food and Agriculture Organization of the U.N. Roma**, 1977.

ELHADDAD, A.; GARCIA, L. ReSET-Raster: Surface Energy Balance Model for Calculating Evapotranspiration Using a Raster Approach. *J. Irrig. Drain Eng.*, v. 137, n. 4, p. 203–210, 2011.

ELHAG, M., PSILOVIKOS, A., MANAKOS, I., & PERAKIS, K. Application of the SEBS water balance model in estimating daily evapotranspiration and evaporative fraction from remote sensing data over the Nile Delta. *Water Resources Management*, v.25, n.11, p. 2731-2742, 2011

EUA. USGS – GEOLOGICAL SURVEY. Serviço de Levantamento Geológico Americano (2013). Aquisição de imagens orbitais digitais gratuitas do satélite Landsat-8: data de passagem 10/09/2017. Disponível em <<http://landsat.usgs.gov>>. Acesso em 06 out, 2017.

ESA. European Space Agency. Sentinel – 2. Disponível em: <http://www.esa.int/>. Acesso em: 22 jul. 2017.

FONTANA, C.B. BERLKTO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.33, n.8, p.399-1405, ago. 1998

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences* (2011) 2(1):57-68. doi: 47

10.6062/jcis.2011.02.01.0032. <http://www.epacis.net/jcis>

GIACOMONI, M. H. Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no estado do Rio Grande do Sul. 2005.

GONSAGA, L.; ALVES, G. F.; LISMAR, W.; CASTRO, P. Evapotranspiração de Referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, v. 25, n.3, p.295-309, 1988

HUETE, A.; LIU, H.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Rem. Sens. Environ**, v. 59, p. 440–451, 1997.

IBGE. Censo agropecuário: 1995/96. Rio de Janeiro. **IBGE**, 1995. Disponível em <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=748&view=detalhes>>. Acesso em 28 set. 2017.

JIANG, L.; ISLAM, S. An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data. **Int. J. Remote Sens**, v. 24, p. 2221–223, 2003.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting-Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 507, 2015.

Lijun, Z., Zengxiang, Z., Tingting, D., & Xiao, W. Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, n. 3, 2008.

LIMA, F.M. Mapeamento das culturas graníferas de verão do Distrito Federal. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, **Universidade de Brasília**, 2015, 45p Monografia de Graduação.

LIOU, Y. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review. In: LIOU, Yuei-an; KAR, Sanjib Kumar. **Energies**. Taiwan: Mdpi, 2014. Cap. 7. p. 2821-2849.

LÓPEZ-URREA, R.; DE SANTA OLALLA; F. M.; FABEIRO, C; MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural water management**, v. 85(1), p. 15-26, 2006

MACEDO, J. Os Cerrados Brasileiros: Alternativa Para a Produção de Alimentos no Limiar do Século XXI. **Revista de Política Agrícola**, v. 4, p. 11–18, 2015. Disponível em: <<https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/739/696>>. Acesso em: 06 Jul. 2017.

MANZATTO, C. V.; FREITAS, E.; PERES, J. R. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio

de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2002. 174 p.

MARZULLO, R. Metodologia para o cálculo da pegada hídrica ecotoxicológica de produtos dentro de uma perspectiva de ACV com o uso do GIS. 2014. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; CHEN, J.; ONDA, Y.; QIU, G. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. **Sensors**, v. 7, n. 11, p. 2636-2651, 2007.

MATTAR, C., FRANCH, B., SOBRINO, J. A., CORBARI, C., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., OLIVERA-GUERRA, L.; MANCINI, M. Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural area. **Remote sensing of environment**, v.147, p23-42, 2014

PAIVA, C. M.; TSUKAHARA, R. Y.; FRANÇA, G. B.; NICACIO, R. M. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba: INPE, Anais, p. 101-107, 2011.

PAPADAVID, G., H., TOULIOS, L., MICHAELIDES, S. A modified SEBAL modeling approach for estimating crop evapotranspiration in semi-arid conditions. **Water resources management**, v. 27, n. 9, p. 3493-3506, 2013

PELGRUM, H. Aggregation of a nonlinear land surface model for heterogeneous terrain. **IAHS PUBLICATION**, p.181-186, 2001

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: **Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz**. 1997. 183 p.

RUHOFF, Anderson Luis. Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais. 2011. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/32468>>. Acesso em: 01 dez. 2017.

SANTOS, C. A.; SILVA, B. Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. **Rev. bras. meteorol.**, v. 25, n. 3, p. 365 -374, 2010. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010277862010000300008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010277862010000300008&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 29 set. 2017.

SHAH, N., NACHABE, M., & ROSS, M. Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers. **Groundwater**, v. 45, n.3, p. 329-338, 2007

SILVA, R. R.; BENIN, G.; DA SILVA, G. O.; MARCHIORO, V. S.; DE ALMEIDA, J. L.; MATEI, G. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de trigo em diferentes épocas de semeadura, no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 11, p. 1439-1447, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2011001100004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2011001100004&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 07 out. 2017.

Son, N. T., Chen, C. F., Chen, C. R., Minh, V. Q., & Trung, N. H. A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. **Agricultural and Forest Meteorology** **197**, p. 52-64, 2014.

SUN, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D., & Liu, Z.. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n.3, p.1086-1092, 2011

Taghvaeian, S.; Neale, C.M.U. Water balance of irrigated areas: a remote sensing approach. *Hydrological Processes*, v.25, n.26, p.4132-4141, 2011.

VAN DE GRIEND, A. A; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 1119–1131, 1993.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. H., & SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote sensing of environment**, v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994.

XU, C-Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 18, p. 3717–3734, 2005.

YODER, R. E.; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 21, n. 2, p. 197–202, 2005.

