



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE
CULTURA DO TOMATEIRO INDUSTRIAL
ESTIMADO POR SENSORIAMENTO
UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER**

DÉBORAH LÍDYA ALVES SALES

Orientador:

Prof. Dr. José Alves Júnior

DÉBORAH LÍDYA ALVES SALES

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DO TOMATEIRO
INDUSTRIAL ESTIMADO POR SENSORIAMENTO UTILIZANDO O
ALGORITMO SAFER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. José Alves Júnior

Co-Orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

Goiânia, GO - Brasil

2016

**Ficha catalográfica a ser elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo autor, sob orientação do Sibi/UFG**

Sales, Déborah Lídyá Alves

**Evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial
estimado por sensoriamento utilizando o algoritmo SAFER /**

Déborah Lídyá Alves Sales. – Goiânia, 2016.

xii, 65 f.: il

**Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de
Goiás. Escola de Agronomia, 2016.**

Bibliografia.

**Anexos. 1. Tomate industrial. 2. Necessidade hídrica. 3. Imagem
de satélite. 4. Balanço de energia. 5. Balanço hídrico. 6. Manejo de
irrigação I. Universidade Federal de Goiás. Escola de Agronomia.
Título.**

DÉBORAH LÍDYA ALVES SALES

**TÍTULO: “EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DO
TOMATEIRO INDUSTRIAL ESTIMADO POR SENSORIAMENTO
UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER”**

Dissertação DEFENDIDA e APROVADA em 01 de março de 2016, pela
Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira
IESA/UFG

Prof. Dr. Adão Wagner Pego Evangelista
EA / UFG

Prof. Dr. José Alves Júnior
Orientador – EA / UFG

Goiânia, Goiás
Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo carinho e atenção, e motivação em todas as etapas de minha vida.

Ao meu orientador Professor Doutor José Alves Júnior pela amizade, pelos conselhos, incentivo, ajuda e contribuições científicas essenciais para conclusão deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), pela oportunidade de realização do mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Sr. Edmilson Faria, pelo auxílio na realização do trabalho em sua fazenda.

Ao Sr. Edson Tavares diretor do Porto Seco Centro Oeste pela disponibilização dos dados da estação meteorológica da sua empresa.

Aos meus colegas João Maurício, Rherison Tyrone e Rafael Batista por sua amizade, companheirismo e auxílio durante esses anos.

A todos professores do programa do PPGA e do NUCLIRH pelos ensinamentos transmitidos e experiências trocadas durante todo o período de estudos.

Ao co-orientador Prof. Dr. Derblai Casaroli.

A todos os colegas do curso de Pós Graduação em Solo e Água, pelo companheirismo e pela ajuda durante o período de realização do curso.

Enfim, a todos que, diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

A minha mãe Nicelma Alves da Silva Sales,

A minha irmã, Sarah Priscilla Alves Sales Aquino

Ao meu sobrinho, Marcos Paulo Sales Aquino

E em especial para o meu pai José Joaquim de Sales que não mediu esforços para me ajudar e esteve comigo durante toda caminhada.

DEDICO

À toda minha família;

OFEREÇO

Sumário

LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE SIGLAS	12
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CULTURA DO TOMATE INDUSTRIAL E SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA	17
2.2 CARACTERÍSTICAS DE CULTIVARES DE TOMATE PARA O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL	18
2.3 NECESSIDADE HÍDRICA DA CULTURA DO TOMATEIRO E A IRRIGAÇÃO	19
2.4 SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	22
2.5 O ALGORITMO SAFER E SEU PROCESSAMENTO	23
2.5.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância	24
2.5.2 Cálculo de reflectância	25
2.5.3 Albedo no topo da atmosfera	26
2.5.4 Albedo de superfície	26
2.5.5 Temperatura de superfície	26
2.5.6 Índice de vegetação de diferença normalizada NDVI	27
2.5.7 Evapotranspiração em escala regional utilizando o algoritmo SAFER	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 LOCAL, CLIMA, SOLO E SISTEMA DE CULTIVO	30
3.2 HÍBRIDOS DE TOMATE	31

3.3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL E OS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE CULTURA UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE..	31
3.4 CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO.....	33
3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO SOLO	34
3.6 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	34
3.7 MONITORAMENTO DO POTENCIAL DE ÁGUA NA FOLHA	37
3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5 CONCLUSÕES	53
6 REFERÊNCIAS	54
ANEXOS	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores do coeficiente de cultura (Kc) para o Tomateiro segundo FAO 56, (Allen et al., 1998).....	21
Tabela 2.	Valores do coeficiente de cultura (Kc) para o Tomateiro para processamento para as condições edafoclimáticas dos cerrados do Brasil Central (Marouelli et al., 2008)	22
Tabela 3.	Caracterização química e física do solo Silvânia- GO, 2015.....	34
Tabela 4.	Caracterização e duração dos estádios fenológicos do tomateiro (N901; H1308) cultivado em pivô central, no período de 23 de maio a 21 de setembro de 2015 no município de Silvânia - GO.....	39
Tabela 5.	Parâmetros de ajuste da curva característica de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980), a partir do potencial matricial em kPa e do conteúdo de água em m^3m^{-3}	44
Tabela 6.	Evapotranspiração da cultura do tomateiro industrial (N901) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Silvânia – GO, 2015.....	45
Tabela 7.	Evapotranspiração da cultura do tomateiro industrial (H 1308) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Silvânia - GO, 2015.	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Localização Município de Silvânia (A); Vista aérea da área experimental do pivô Central (Fazenda cabeceira do Piracanjuba Silvânia – GO) (B); Local onde foi instalado o experimento pivô central de 63 ha.....	30
Figura 2.	Vista aérea da distância em linha reta da estação meteorológica na área de estudo, Silvânia-GO, 2015.....	32
Figura 3.	Fluxograma esquemático para o calculo da evapotranspiração atual por meio do algoritmo SAFER.....	33
Figura 4.	Câmara de pressão de Richards	35
Figura 5.	Coleta de amostragem de solo com o coletor amostrador de solo (A); Processo de saturação das amostras indeformadas (B).....	35
Figura 6.	Avaliação do potencial de água na folha: Câmara de Scholander (A), folha seccionada colocada na câmara (B), pecíolo voltado para fora da câmara, através de uma borracha usada para vedar a câmara de pressão (C), leitura do surgimento da seiva (D).....	37
Figura 7.	Fases fenológicas. Fase inicial do pegamento das mudas 7 DAT; 49 DAT Florescimento; 56 DAT inicio da frutificação; 91 DAT inicio da maturação; 122 DAT colheita.....	40
Figura 8.	Evapotranspiração da cultura (ETc) pelos métodos SAFER, FAO 56 e EMBRAPA.....	41
Figura 9.	Balanço hídrico da cultura, com destaque para as lâminas líquidas de irrigação, variação da umidade do solo em relação a CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CRIT: ponto crítico e SAT: ponto de saturação.....	41
Figura 10.	Temperatura média do ar e radiação solar global diferentes ao longo do ciclo da cultura, Silvânia-GO,2015.....	42
Figura 11.	Potencial da água na folha (ψ_f Mpa) médio para os híbridos N901 e H1308 ao longo do ciclo da cultura do tomateiro industrial, Silvânia - GO, maio a setembro de 2015.....	43

Figura 12.	Curva característica de retenção de água do solo média, para o perfil de 0,10-0,4 m de profundidade, área de tomateiro irrigada por pivô central em solo argiloso, Silvânia-GO, 2015.	44
Figura 13.	Mapas de Evapotranspiração atual pelo modelo SAFER referente ao período de junho a setembro de 2015, cultura do tomate industrial irrigada por pivô central (híbridos N901 e H1308), Silvânia - GO.....	46
Figura 14.	Comparativo da ETc estimada pelo método padrão FAO-56 (Allen et al., 1998), com evapotranspiração estimada atual (ETa) utilizando o SAFER A e B, Comparativo da ETc estimada pelo método EMBRAPA (Marouelli et al., 2008), com evapotranspiração estimada atual (ETa) utilizando o SAFER C e D, ao longo do ciclo para os dois híbridos (H1308 e N901), Silvânia-GO, 2015.....	48
Figura 15.	Coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER associados com os valores estabelecidos pela FAO 56 (Allen et al., 1998), em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.....	49
Figura 16.	Comparativo entre o Kc para a cultura do tomate industrial adaptados de FAO 56 Allen et al. (1998) e o Kc utilizando o SAFER, ao longo do ciclo da cultura.....	50
Figura 17.	Comparativo entre o Kc para a cultura do tomate industrial de Marouelli et al. (2008) e o Kc utilizando o SAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo da cultura.....	51

Figura 18. Coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER associados com os valores estabelecidos Marouelli et al. (2008), ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.....	51
---	----

LISTA DE SIGLAS

CAD – Capacidade de água disponível

DAT – Dias ápos o transplântio

DN – Números digitais

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ET – Evapotranspiração

ETa – Evapotranspiração atual

ETo – Evapotranspiração de referência

ETc – Evapotranspiração da cultura

ETr – Evapotranspiração real

FAO – Food and Agriculture Organization

Kc – Coeficiente de cultura

NDVI – Índice de vegetação de diferença normalizada

SAFER – Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving

RESUMO

SALES, D. L. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial estimado por sensoriamento utilizando o algoritmo Safer.** 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016¹.

A produção de tomate industrial vem se destacando no cenário agroindustrial brasileiro. Na região do Cerrado, a produção ocorre no período seco do ano (maio a outubro), em grandes áreas irrigadas, principalmente por pivô central (sistema de irrigação responsável por cerca de 90% da área de produção de tomate industrial). Apesar da produção ser considerada tecnificada, o setor ainda é muito carente de informações técnico-científicas que auxiliem a cultura atingir o potencial de produtividade e qualidade na região. A prova disso é a baixa produtividade média atual (80 t/ha) em comparação a importantes regiões produtoras no mundo (Espanha e Estados Unidos, principalmente), que apresentam o dobro desta produtividade. Uma das informações fundamentais é a necessidade hídrica dos híbridos de tomateiro nas condições locais de cultivo. O refinamento desta informação pode auxiliar no melhor dimensionamento de projetos de irrigação, assim como no melhor manejo da água ao longo do ciclo, e pela melhor gestão dos recursos hídricos. Entretanto, os métodos tradicionais de pesquisa nesta área requerem o uso de evapotranspirômetros que são onerosos e pontuais e necessitam de sistemas de aquisição de dados, o que dificulta sua utilização. Mas, técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo aplicadas com eficiência, já testadas em outras regiões e tem se mostrado bem promissoras. Assim, este estudo teve o objetivo de estimar a evapotranspiração atual da cultura (ETa) de dois híbridos de tomateiro para o processamento industrial, N901 e H1308, e os seus respectivos coeficientes de cultura (Kc) pelo modelo de balanço de energia SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) utilizando imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, na órbita 221/72 e 222/71, e comparação com tradicional método micrometeorológico utilizando evapotranspiração de referência (ETo Penman-Monteith), com os Kcs recomendados pela FAO 56 e EMBRAPA. O estudo foi realizado na Fazenda cabeceira do Piracanjuba, no município de Silvânia-GO, no período de maio a agosto de 2015, em solo argiloso com preparo convencional. Além disso, foi monitorado o potencial de água na folha (semanalmente) e o conteúdo de água no solo pelo balanço hídrico dinâmico local. O potencial de água na folha e a umidade do solo revelaram que não ocorreu déficit hídrico ao longo do ciclo de 122 dias. Os resultados mostraram, ainda, que a cultura acumulou uma evapotranspiração total de 351,97, 340,97 e 356,26 mm pelos métodos FAO 56, EMBRAPA e SAFER, respectivamente. Os Kcs estimado pelo método do SAFER apresentou significativa correlação com os métodos FAO 56 e Embrapa (FAO 56, $R^2 = 0,98$; Embrapa, $R^2 = 0,95$). A ETa estimada pelo método do SAFER apresentou significativa correlação com os métodos micrometeorológicos (FAO 56, $R^2 = 0,97$; Embrapa, $R^2 = 0,97$), podendo este ser utilizado para estimativa da ETa do tomateiro na região.

Palavras-chave: Tomate, necessidade hídrica, imagem de satélite, balanço de energia, manejo de irrigação.

¹ Orientador: Prof. Dr. José Alves Júnior. EA-UFG.
Co-Orientador: Prof. Dr. Derblai Casaroli. EA-UFG.

ABSTRACT

SALES, D. L. A. **Evapotranspiration and crop coefficient of tomato by sensor using algorithm SAFER**. 2016. 65 f. Dissertation (Master in Agronomy: Soil and water) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016¹.

The production of industrial tomato has stood out in the Brazilian agribusiness scenario. In the Cerrado region, production occurs in the dry season (May to October), in large irrigated areas, mainly by central pivot (irrigation system accounts for about 90% of the industrial tomato production area). Although the production is considered hi-tech, the sector is still very lacking in technical and scientific information to assist the crop reaches potential productivity and quality in the region. Proof of this is the low average yield obtained (80 t/ha) compared to major producing regions in the world (Spain, United States, mainly), which feature double that productivity. One of the required information is the water requirement of tomato hybrids on local growing conditions. The refinement of this information can contribute to a better design of irrigation projects, as well as better water management throughout the cycle, and the better management of water resources. However, traditional methods of research, in this area, require the use of evapotranspirometers, which are expensive and require occasional and data acquisition systems, which complicates their use. More, remote sensing techniques have been applied effectively, already tested in other regions and have been quite promising. This study aimed to estimate the current crop evapotranspiration (ET) two tomato hybrid for industrial processing, N901 and H1308, and their respective crop coefficients (Kc) by the energy balance model SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) is using images from Landsat 8 OLI / TIRS in orbit 221/72 and 222/71, and compared to traditional micrometeorological method using reference evapotranspiration (ET_o Penman-Monteith), with Kcs recommended by FAO 56 and Embrapa. The study was conducted at Fazenda head of Piracanjuba in the municipality of Silvânia-GO, in the period from May to August 2015, in clay soil with conventional tillage. In addition, the leaf water potential (weekly) and the water content in the soil water balance by the dynamic site was monitored. The water potential in leaf and soil moisture show that no water deficit throughout the 122-day cycle. The results showed also that the culture accumulated total evapotranspiration of 351.97, 340.97 and 356.24 mm, by FAO 56, EMBRAPA and SAFER methods, respectively. The Kcs estimated by SAFER method showed a significant correlation with the methods FAO 56 and Embrapa (FAO 56, $R^2 = 0.98$; Embrapa, $R^2 = 0.95$). A ET_a estimated by SAFER method showed a significant correlation with micrometeorological methods (FAO 56, $R^2 = 0.97$ and EMBRAPA, $R^2 = 0.97$). Therefore, Safer can be used to estimate the tomato ET_a in the Cerrado region.

Key words: *Solanum lycopersicum*, water requirement, satellite image, energy balance, irrigation management.

¹ Adviser: Prof. Dr. José Alves Júnior. EA-UFG.
Co-Adviser: Prof. Dr. Derblai Casaroli. EA-UFG.

1 INTRODUÇÃO

A produção de tomate se destaca no cenário agroindustrial brasileiro. O Brasil ocupa o sétimo lugar na produção mundial de tomate, e para impulsionar a expansão da produção, alguns estados tem aumentado a qualidade, produção e produtividade do tomateiro. Atualmente, o estado de Goiás se destaca com 65% desta produção, seguido pelos estados de São Paulo, com 12,7%, e Minas Gerais, com 1,3% da produção nacional (FAEG, 2014). Esse destaque deve-se basicamente às condições edafoclimáticas mais favoráveis á cultura do tomate rasteiro em relação a outras zonas tradicionais de cultivo no país (Hott et al., 2014).

A cultura do tomate industrial é quase totalmente irrigada, e o método de irrigação por aspersão é o mais utilizado nesta cultura. Na região do Cerrado, o sistema de pivô central é utilizado em mais de 90 % (Koetz, 2008).

A disponibilidade hídrica para a cultura do tomate deve ser mantida durante todo o ciclo, para se obter bons resultados. Entretanto, se o manejo da irrigação for incorreto, este pode levar a aplicações excessivas de água, que acarretarão no desperdício do recurso hídrico, podendo inferir em aumento da incidência de doenças e pragas agrícolas (Ferreira, 2013). Portanto, a quantificação da evapotranspiração é indispensável para o manejo hídrico em cultivo irrigado, pois esta representa a demanda hídrica da cultura, e seu conhecimento evita desperdício de água e energia, ou quebras de produtividade.

Para a obtenção da evapotranspiração das culturas, existem diversos métodos, diretos e indiretos. Como método direto, tem-se a lisimetria tanto de pesagem, drenagem e lençol freático constante. E como métodos indiretos têm-se os métodos de balanço hídrico, razão de Bowen, correlações turbulentas e mais recentemente o sensoriamento remoto.

A combinação de sensoriamento remoto com estações agrometeorológicas possibilita avaliar variáveis para possível melhoramento no manejo da irrigação e um possível diagnóstico da quantidade necessária de água a ser aplicada. As práticas de sensoriamento remoto vindo sendo aplicadas com eficiência na estimativa de balanço de

radiação na superfície, dos fluxos de calor e da evapotranspiração através de imagens de satélite.

Os dados obtidos através do sensoriamento remoto para o cálculo dos fluxos de energia que ocorrem na interface solo-vegetação-atmosfera utilizam-se de algoritmos para obtenção desses elementos (Bezerra, 2008). Um desses é o SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) que foi desenvolvido por Teixeira et al. (2012 a).

O SAFER é um algoritmo simplificado que tem apresentado bons resultados na estimativa da evapotranspiração em larga escala. Esse algoritmo tem a vantagem de não ser obrigatório o uso da banda termal, e de poder ser aplicado com os dados meteorológicos provenientes de diferentes tipos de estações (agrometeorológicas analógicas convencionais e automáticas). Sendo essa uma característica importante por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia, da evapotranspiração e da produtividade da água em larga escala ao longo dos anos (Teixeira et al., 2013).

A base teórica deste algoritmo utiliza imagens obtidas pelos satélites como LANDSAT 8 (OLI/TIRS) nas bandas do visível e do infravermelho próximo, podendo ser utilizado com imagens de outros satélites, desde que utilizem os parâmetros de forma apropriada. Neste contexto, os métodos que estimam a evapotranspiração (ET) e os respectivos coeficientes de cultura (K_c) a partir de imagens de satélites se mostram muito úteis, pois são capazes de propiciar a obtenção da ET em áreas com diferentes características quanto ao tipo da cobertura (plântio direto ou convencional, e em diferentes densidades de plântio, por exemplo). Ao contrário dos métodos micrometeorológicos, que, apesar de precisos, apresentam resultados válidos para áreas com culturas com as mesmas condições fenológicas, com K_{cs} específicos para cada condição de cultivo.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi investigar a viabilidade do algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) como uma alternativa para estimar a evapotranspiração atual da cultura (ETa) de dois híbridos de tomateiro para o processamento industrial, N901 e H1308, e os seus respectivos coeficientes de cultura (K_c) pelo modelo de balanço de energia, utilizando imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, e comparando-o com o método micrometeorológico utilizando ETo Penman Monteith e os K_{cs} padrão FAO 56 (Allen et al., 1998) e Embrapa (Marouelli et al., 2008).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CULTURA DO TOMATE INDUSTRIAL E SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

Pertencente a família Solanaceae, o tomate industrial é uma espécie olerícola cultivada em todo o mundo. Seu centro de origem é a parte ocidental da América do Sul, mas especificamente o território limitado ao norte pelo Equador, ao sul pelo Chile, oeste pelo Oceano Pacífico e a leste pela Cordilheira do Andes. Após a sua descoberta, no século XVI, o tomate foi levado da América para a Europa, sendo inicialmente cultivado como planta ornamental em jardins da Espanha, Itália e Inglaterra, de onde então se difundiu por todo o mundo. No Brasil, o tomateiro foi introduzido por imigrantes europeus no final do século XIX (Alvarenga, 2013).

O tomate industrial é considerado uma das culturas mais expressivas no cenário agrícola mundial devido sua importância para o comércio “*in natura*” e indústria de extratos. É considerado uma das culturas de grande importância para as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Duarte et al., 2007).

O tomateiro é uma planta autógama, herbácea, de caule flexível com flores hermafroditas ou perfeitas, que possuem frutos que vão desde o tamanho de uma cereja até 0,5 Kg (Sonnenberg & Silva, 2004). Seu sistema radicular é do tipo pivotante, podendo chegar até 1,5 m de profundidade. O caule da planta jovem de tomateiro é ereto, herbáceo, suculento e coberto por pêlos glandulares (Pinto & Casali, 1980). As folhas são alternadas, compostas por número ímpar de folíolos, sendo peciolados e apresentam bordas serrilhadas (Sasaki & Seno, 1994).

É uma cultura perene, de porte arbustivo e ereto. Pode ser conduzida na forma rasteira, semi-rasteira e ereta (Alvarenga, 2013). Cultivares com hábito indeterminado, na maioria das vezes é destinadas a produção de frutos *in natura*, enquanto que plantas de tomateiro com hábito determinado são destinadas preferencialmente para o cultivo industrial, cujos frutos possuem aptidão para a exploração agroindustrial (Silva & Giordano, 2000; Silva & Vale, 2007).

O tomateiro tem a capacidade de se desenvolver bem em regiões de climas temperados tropical de altitude e subtropical. O plantio de tomate para indústria vem sendo feito por meio de transplante de mudas utilizando-se o preparo convencional do solo ou o plantio direto na palha. A temperatura média no período de cultivo deve ser de 21°C, porém, a planta do tomateiro tolera uma faixa de 10 a 34 °C (Embrapa, 2003).

A época de plantio do tomateiro deve ser em épocas ou locais com baixo índice pluviométrico e com baixa umidade relativa do ar. Nas cidades de São Paulo, região Centro Oeste e Minas Gerais, o plantio é recomendado no mês de fevereiro a meados de junho; Região Nordeste, Alto, Médio e Submédio do São Francisco, o plantio é recomendado do mês de março a meados de junho. O tomateiro industrial necessita entre 300 mm a 600 mm de água durante todo seu ciclo. Sendo assim, o excesso de chuva ou de irrigação e a alta umidade relativa do ar favorecem a ocorrência de doenças contribui para redução da qualidade do fruto, diminuindo o teor de sólidos solúveis e favorecendo o crescimento de fungos na polpa, o que não é bom para o produtor (Embrapa, 2003).

O mercado do tomate industrial no Brasil teve uma expansão, impulsionada por fatores como o aumento da renda per capita, mudança de hábitos alimentares, crescimento das redes de *fast foods* e entrada de novas empresas no mercado de processamento de tomate (Gameiro et al., 2007; Geraldini et al., 2011).

De acordo com dados da Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Goiás (FAEG), a safra de tomate industrial estimada para Goiás em 2014 é de pouco mais de 1,1 milhão de toneladas numa área plantada de 14.500 ha. Com este número, o Estado tem uma participação de aproximadamente 65% de todo o tomate industrial plantado no Brasil.

O setor de tomate industrial apresenta grande importância econômica ao agronegócio brasileiro, por movimentar mais de R\$ 2,6 bilhões por ano (Carvalho, 2013), apresentando um elevado aspecto econômico e social, por meio da geração de emprego e renda no campo (Geraldini et al., 2011).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE CULTIVARES DE TOMATE PARA O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL

No mercado são encontrados vários híbridos e cultivares de tomate para processamento industrial. Na escolha de um híbrido ou cultivar deve-se levar em conta

algumas características que podem ajudar a garantir o sucesso na produção, como resistência ou tolerância às principais doenças de ocorrência na região, ou algumas características como duração do ciclo. A maior parte das cultivares, listadas nos catálogos de empresas de sementes, possui ciclo de 105 a 145 dias, e o teor de sólidos solúveis (°Brix) nos frutos é outra das principais características da matéria prima. Grande parte dos sólidos solúveis em tomate é composta por açúcares, formados a partir da hidrólise do amido que são importantes componentes do sabor dos frutos por meio do equilíbrio com os ácidos orgânicos, quanto maior o teor de sólidos solúveis, maior será o rendimento industrial (Gómes & Camelo, 2002).

A viscosidade aparente ou consistência é também um fator importante de qualidade dos produtos industrializados (sucos, ketchups, molhos, sopas e pastas). A coloração, também deve ser considerada visto que tomates com boa coloração possuem teores licopeno na faixa de 5 mg em 100 gramas de polpa. A acidez da polpa é outra característica importante que, além de influenciar no sabor, interfere no período de aquecimento necessário para a esterilização dos produtos. A firmeza, concentração de maturação, formato e tamanho dos frutos são outras características a serem consideradas. Porém, é muito difícil encontrar cultivares com todas essas características em níveis ideais, devendo-se escolher aquelas que, além dos aspectos agrônômicos, atendam as necessidades das distintas linhas de produtos. As principais doenças de ocorrência por (Bactérias: Cancro bacteriano, Mancha bacteriana, Pinta bacteriana, Murcha bacteriana, Talo oco; Fungos: Mancha-de-estenfílio, Mela-de-rizoctonia, Murcha-de-fusário, Murcha-de-verticílio, Pinta-preta, Podridão-de-esclerócio, Podridão-de-esclerotinia, Requeima, Septoriose; Vírus: Virose do complexo do vira-cabeça do tomateiro, mosaico-do-tomateiro, Risca do tomateiro e mosaico, Topo-amarelo e Amarelo-baixeiro, Geminivirose) na área, muitas vezes, determinam a escolha da cultivar (Aguiar, 2011).

2.3 NECESSIDADE HÍDRICA DA CULTURA DO TOMATEIRO E A IRRIGAÇÃO

Necessidade hídrica da cultura é a quantidade de água requerida pela cultura, em determinado período de tempo do seu ciclo fenológico, de modo a não limitar seu crescimento, o seu desenvolvimento e sua produção, nas condições climáticas locais, ou seja, é a quantidade de água necessária para atender a evapotranspiração da cultura (Oliveira, 2005a).

O tomateiro é uma das hortaliças exigentes em água, com consumo acima da média. No fruto maduro do tomateiro, a água participa com 93% a 95% de sua constituição (Santana et al., 2011). Alvarenga (2004) relata que o ciclo do tomateiro pode ser dividido em três fases distintas. A primeira fase, que tem duração de quatro a cinco semanas aproximadamente, indo do transplante das mudas até o início do florescimento. A segunda fase tem duração de cinco a seis semanas, iniciando-se por ocasião do florescimento e terminando no início da maturação dos frutos. A terceira fase vai da maturação ao final da colheita. É importante conhecer o início e término das fases, possibilitando uma melhor programação das adubações, a indicação de cada nutriente, bem como a quantidade de água a aplicar.

A necessidade hídrica total, após o transplante, para a cultura do tomate é de 300 a 600 mm, dependendo do clima (Embrapa, 2003). A quantidade de água aplicada por irrigação deve ser suficiente para elevar o conteúdo de água no solo à capacidade de campo, na camada correspondente a profundidade efetiva do sistema radicular que, de modo geral, é de 0,40 m (Santana et al., 2011), quanto atinge o pleno desenvolvimento.

Existem diversos métodos para estimativa do consumo de água pelas culturas. Bernardo et al. (2005) afirmam que a quantidade de água evapotranspirada depende principalmente da planta, do solo e do clima, sendo este último fator predominante sobre os demais, de modo que a quantidade de água requerida por uma cultura varia com a extensão da área coberta pelo vegetal e com as estações do ano.

Evapotranspiração é a perda de água para atmosfera, em forma de vapor, pelos processos de evaporação das superfícies e transpiração das plantas. A transpiração aumenta com o desenvolvimento da cultura, atingindo valores máximos no estágio de floração, quando as plantas cobrem totalmente o solo; a evapotranspiração apresenta comportamento semelhante, pois a transpiração é seu componente mais importante, uma vez que a evaporação do solo diminui com o desenvolvimento da cultura (Santana et al., 2011). Na agricultura irrigada, o conhecimento da evapotranspiração máxima nos diferentes estágios de desenvolvimento das plantas cultivadas é fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (Bernardo et al., 2005).

Segundo Pavani (1985), a determinação da evapotranspiração é de grande importância para o planejamento e dimensionamento de projetos e do manejo de água em áreas irrigadas. As técnicas de irrigação são utilizadas para suprir as demandas ou necessidade hídrica das culturas, mesmo na ausência de precipitação, onde os riscos de

quebra de safra podem ser minimizados, com maior garantia de produção. Neste sentido, a irrigação constitui na tecnologia que proporciona grande eficiência da agricultura.

O manejo de irrigação envolve uma tomada de decisão sobre quando irrigar e quanto de água aplicar (Alves Júnior et al., 2007). A quantidade a ser aplicada pode ser calculada como sendo a água consumida pela cultura, dividida pela eficiência do sistema, enquanto a quantidade de água consumida pode ser estimada pela evapotranspiração real (ET_r) (Bernardo et al., 2005). A evapotranspiração de referência refere-se à evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira, na qual as medições meteorológicas são realizadas para a obtenção de um conjunto consistente de dados (Santana et al., 2011).

Desde o plantio até a colheita, uma cultura vai progressivamente crescendo e ocupando a área disponível. Evidentemente, nessas condições, o conhecimento de ET_c representa a quantidade de água a ser adicionada ao solo, para manter o crescimento e a produção em condições ideais (Oliveira, 2003b).

O consumo de água do tomateiro, em função do período de desenvolvimento dentro dos limites estabelecidos pela FAO 56 (Allen et al., 1998), é apresentado na Tabela 1. Na Tabela 2 é apresentado o consumo de água do tomateiro industrial em função do período de desenvolvimento para as condições edafoclimáticas do cerrado Brasileiro (Marouelli et al., 2008). A eficiência do manejo de água para irrigação é alcançado quando a água utilizada pelas culturas é precisamente quantificada em função da evapotranspiração, que inclui a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas (Lira, 2008).

Tabela 1. Valores do coeficiente de cultura (K_c) para o tomateiro segundo FAO 56, (Allen et al., 1998).

ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO	DIAS DO CICLO	K _c
Inicial	25	0,6
Vegetativo	33	1,15
Frutificação	38	0,70 – 0,90
Maturação	25	0,6

Tabela 2. Valores do coeficiente de cultura (Kc) para tomateiro para processamento industrial, nas condições edafoclimáticas dos cerrados do Brasil Central segundo EMBRAPA (Marouelli et al., 2008).

ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO	DIAS DO CICLO	Kc
Inicial	25	0,45 – 0,55
Vegetativo	33	0,55 – 0,65
Frutificação	38	0,85 – 0,95
Maturação	25	0,60 – 0,65

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Sensoriamento remoto é o termo utilizado para descrever a tecnologia que permite medir as propriedades de um objeto sem entrar diretamente em contato com este os objetos de interesse na superfície são vegetação natural, culturas agrícolas, solos, formações rochosas e corpos de água, entre outros. Tais objetos são, em seu conjunto, genericamente denominados alvos (Lima, 2010).

Essas informações de interesse são obtidas, basicamente, por meio do estudo da interação da radiação eletromagnética emitida por uma fonte natural, no caso o Sol, com esses alvos. Existem várias formas de caracterizar os sistemas de sensoriamento remoto que, podem ser discriminados quanto ao nível de aquisição (terrestre, aéreo e orbital) ou quanto ao processo de detecção, por exemplo, fotográfica ou eletrônica (Lillesand et al., 2004).

A mais usual é em função do domínio espectral, ou seja, a porção do espectro eletromagnético, que é explorada (visível, infravermelho próximo, infravermelho médio, infravermelho distante ou termal e micro – ondas). E alguns dispositivos, por operarem em faixas espectrais, recebem a denominação multiespectral, ou hiperespectral, em função do número de canais adotados.

A principal função de um sensor remoto consiste em captar e medir a quantidade de energia refletida, ou emitida pelos alvos e, dessa forma, obter informações sobre a natureza e suas condições (culturas agrícolas, florestas, rochas, solos, queimadas, corpos d'água, etc.) (Lima, 2010).

O sensoriamento remoto aplicado na agricultura oferece vantagens, como a obtenção de informações que possibilitam a geração de séries temporais da região de

estudo, informações do uso da superfície, estimativa da área irrigada, tipo de cobertura vegetal, estimativa de biomassa vegetal, produtividade agrícola, evapotranspiração, exigência hídrica de culturas e outras variáveis físico-ambientais. Essas informações geralmente revelam aspectos importantes para o planejamento agrícola das áreas irrigadas. Quando apresentada no contexto do manejo pode ser extremamente valiosa para o planejamento agrícola (Lima, 2010).

Nos estudos de quantificação da evapotranspiração, principalmente em agricultura irrigada, ou mesmo em áreas de vegetação nativa, a espécie vegetal deve ser levada em consideração. Isso porque a arquitetura foliar, distribuição espacial da folhagem, resistência interna da planta, transporte de água, tamanho e distribuição dos estômatos, diferem entre as espécies nos diferentes biomas. Esses fatores são determinantes na necessidade hídrica de cada espécie durante a sua fase de crescimento (Giongo, 2011).

A determinação da evapotranspiração é de fundamental importância para o gerenciamento dos recursos hídricos, em espacial para avaliar e quantificar as necessidades hídricas das culturas irrigadas. Na escolha de um método para estimativa da evapotranspiração devem ser consideradas a praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, apresentam limitações, principalmente quanto a instrumentação, o que pode restringir a sua utilização (Lira, 2008).

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para estimativas da evapotranspiração, com larga cobertura espacial, é utilizada desde 1990. Desde então, diferentes métodos para o computo dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração tem sido desenvolvidos, com base em relações físicas e/ ou empíricas (Giongo, 2011).

2.5 O ALGORITMO SAFER E SEU PROCESSAMENTO

O SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) é um algoritmo simplificado de estimativa de evapotranspiração com uso de poucos parâmetros derivados de sensorimamento remoto (Teixeira, 2012a).

O SAFER (Teixeira et al., 2012c) é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração atual em larga escala. Ele possui uma aplicação simples, necessitando apenas dos dados de evapotranspiração de referência (ET_o), radiação global

(Rg) e temperatura média do ar (Ta) obtidos através de estações agrometeorológicas. Juntamente com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e do balanço de energia chega-se a evapotranspiração atual (ETa), que pode ser utilizada como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes culturas, ao se definir a relação ETa/ETo ou coeficiente de cultura atual (Feitosa, 2014).

O SAFER tem sido utilizado para estimativa do balanço hídrico na modelagem hidrológica, no monitoramento do uso da água, na estimativa da evapotranspiração, no planejamento sustentável dos recursos hídricos, na estimativa da água utilizada na agricultura irrigada, na estimativa dos coeficientes de cultivos e na avaliação da quantidade de água utilizada nos grandes projetos de irrigação.

A seguir são apresentadas as etapas de cômputo do algoritmo SAFER. Todas as etapas envolvidas no processo de estimativa do balanço de energia e, conseqüentemente, na determinação da evapotranspiração atual e dos coeficientes de cultura (Kc) para a área de estudo.

As primeiras etapas do processamento estão de acordo com Teixeira (2010), Teixeira et al. (2012b) e Teixeira et al. (2013). Nos próximos itens são apresentadas as equações com detalhamento das etapas.

2.5.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância

Inicialmente, correções atmosféricas são realizadas com posterior conversão dos valores digitais em radiância espectral para cada banda por meio da Equação 1, sendo que o DN de um pixel ou grid representa a intensidade de energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor. Trata-se da intensidade medida, devido á mistura dos alvos na área de um pixel na superfície, a radiância ($L\lambda$) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte, projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($W.m^{-2}.sr^{-1}$).

$$L\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) Q_{cal} + L_{MIN} \quad (1)$$

Em que:

L_{MAX} : radiância máxima ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

L_{MIN} : radiância mínima ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

Q_{cal} : intensidade do pixel (ND), número inteiro de 0 a 255.

2.5.2 Cálculo de reflectância

Na sequência, para cada banda é calculada a reflectância ($p\lambda$) (Equação 2) a partir dos valores de radiância obtidos na etapa anterior, sendo a reflectância razão da quantidade de radiação refletida por um objeto pela quantidade de radiação que incide neste.

$$p\lambda = \frac{\pi * L\lambda}{ESUN\lambda * \cos Z * E_0} \quad (2)$$

Sendo:

$L\lambda$: radiância de cada banda

$ESUN\lambda$: irradiância espectral no topo da atmosfera

$\cos Z$: ângulo zenital

E_0 : ângulo diário

Onde: E_0 é definido pela Equação 3:

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280 \sin(da) + 0,000719 \cos(2*da) + 0,000077 \sin(2*da) \quad (3)$$

Sendo:

da : ângulo diário

Onde: da é definido pela Equação 4:

$$da = (dn - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (4)$$

Sendo:

dn : dia juliano da imagem

2.5.3 Albedo no topo da atmosfera

O albedo é uma medida adimensional e varia segundo as características da superfície, a razão entre a radiação solar direta e a difusa e em função do ângulo zenital solar. A obtenção do albedo no topo da atmosfera foi feita pela Equação 5:

$$A_{\text{top}} = \Sigma(\omega_{\lambda} * \rho_{\lambda}) \quad (5)$$

Onde:

ρ_{λ} : reflectância

ω_{λ} : coeficiente para cada banda

Sendo: ω_{λ} obtido pela Equação (6)

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\Sigma ESUN_{\lambda}} \quad (6)$$

2.5.4 Albedo de superfície

O albedo da superfície é definido como a razão entre as irradiâncias refletida e incidente. As informações sobre o albedo de superfície e temperatura de superfície foram obtidos pelas Equações 2 e 3 utilizando-se os coeficientes de Texeira (2010):

$$\alpha_o = 0,7 * \alpha_{\text{top}} + 0,06 \quad (7)$$

Onde:

α_{top} : Albedo no topo da atmosfera, obtido pela Equação (5)

2.5.5 Temperatura de superfície

Os fundamentos do sensoriamento remoto termal estão embasados na termodinâmica clássica e na física quântica. O problema de se estimar a temperatura de um corpo por meio de sensores remotos é solucionado utilizando as Leis de Kirchhoff e Lei de Planck. A base fundamental do sensoriamento remoto do infravermelho termal é que toda superfície emite radiação, e sua intensidade depende da temperatura da superfície estudada.

Para elaborar a carta de temperatura da superfície, utiliza-se a imagem do canal do infravermelho termal do sensor OLI do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 60 metros.

A temperatura de superfície é calculada pela Equação 8:

$$T_0 = 1,11 * T_{\text{bright}} - 31,89 \quad (8)$$

Onde: T_{bright} é obtido pela Equação 9:

$$T_{\text{bright}} = \frac{1260,56}{\ln \frac{607,16}{L+1}} \quad (9)$$

Sendo:

L: radiância (L_λ) da banda 10 e 11

2.5.6 Índice de vegetação de diferença normalizada NDVI

O índice de vegetação da diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infra-vermelho próximo (IV P) e do vermelho (V) pela soma das mesmas (Allen et al., 2002).

Em seguida são calculados os dados de NDVI pela Equação 10:

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{IVP+V} \quad (10)$$

Sendo:

IVP: valor da reflectância da banda no infravermelho próximo

V: valor de reflectância da banda no vermelho

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a + 1 e para a superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1, já para a água e nuvens o NDVI é, geralmente, menor que zero.

2.5.7 Evapotranspiração em escala regional utilizando o algoritmo SAFER

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 pela Equação 11:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \cdot NDVI} \right) \right] \quad (11)$$

Para o coeficiente “a” foi utilizado o valor de 1,0 (Hernandez et al., 2012; Teixeira et al., 2013) determinado para o Noroeste Paulista, demonstrando ser bem adaptado às condições da região estudada. O coeficiente “b” foi obtido por Teixeira (2010) e corresponde ao valor de -0,008 e ET_0 é a evapotranspiração de referência (Equação 12), dada em milímetros por dia (mm d^{-1}), método Penman-Monteith, conforme boletim FAO N° 56 (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot (R_n - G) + \left[\gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \right]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (12)$$

Em que: R_n é o saldo de radiação à superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G é a densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), T é a média diária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1}), e_s é a pressão de vapor de saturação do ar (kPa), e_a é a pressão de vapor atual do ar (kPa), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor de saturação do ar (kPa), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor do ar na atmosfera ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Em seguida os valores instantâneos da relação (ET/ET_0) foram multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à evapotranspiração atual (ET_a), Equação 13:

$$ET_a = \frac{ET}{ET_0} \cdot ET_0 \quad (13)$$

A estimativa da evapotranspiração potencial da cultura é obtida pelo método da FAO Boletim 56 (Allen et al., 1998) através da Equação 14:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (14)$$

Em que: ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm/dia); ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm/dia); K_c coeficiente de cultura (adimensional) – FAO 56 (Allen et al., 1998).

Em casos que a cultura apresenta total disponibilidade hídrica, através da relação ET_a/ET_0 chega-se ao valor do coeficiente da cultura (K_c) os respectivos coeficientes de cultura (K_c), pelo SAFER, foram calculados pela Equação 15:

$$K_c = \frac{ET_a}{ET_0} \quad (15)$$

em que: ET_a é a evapotranspiração atual (mm d^{-1}); ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL, CLIMA, SOLO E SISTEMA DE CULTIVO

O experimento foi realizado em uma área irrigada por pivô central de 63 ha (Figura 1 B e C), no período de 08 de junho a 21 de setembro de 2015, na fazenda Cabeceira do Piracanjuba, no município de Silvânia – GO (Figura 1 A), localizada em $16^{\circ}24'58,09''S$ e $48^{\circ}52'02,44''O$, 1036m de altitude.

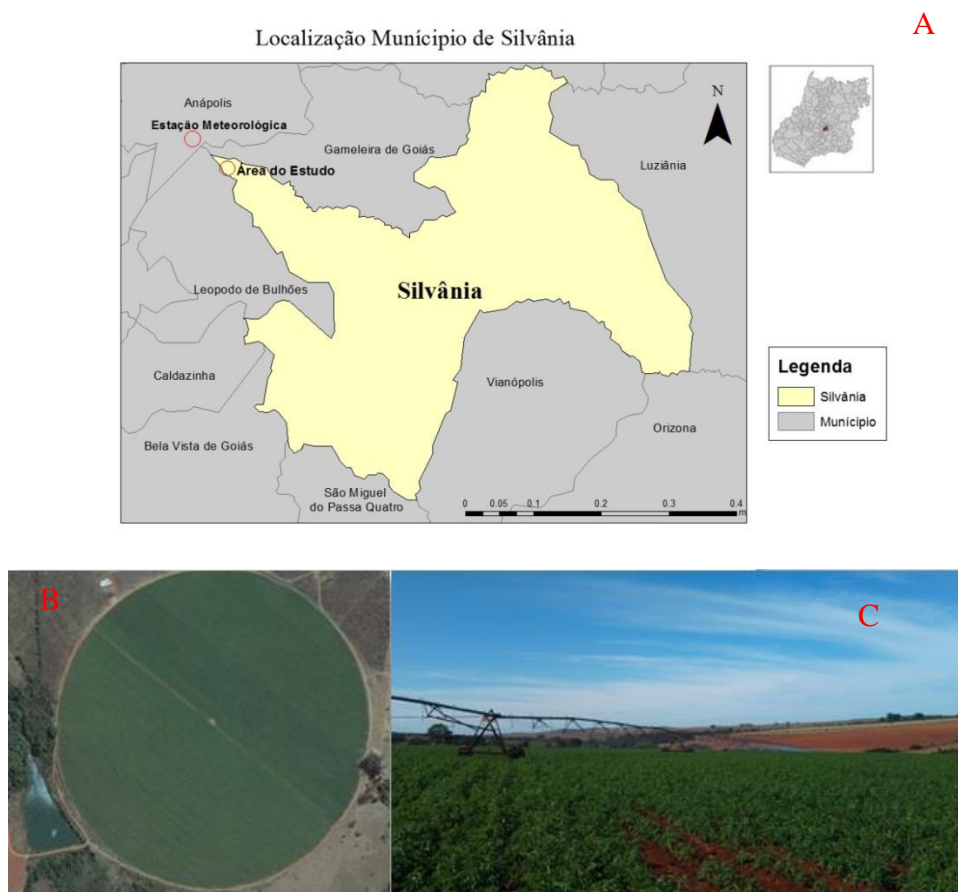


Figura 1. Localização Município de Silvânia (A); Vista aérea da área experimental do pivô Central (Fazenda cabeceira do Piracanjuba Silvânia – GO) (B); Local onde foi instalado o experimento pivô central de 63 ha (C).

O clima da região é classificado como *Aw*, segundo a classificação de Köppen, sendo as chuvas concentradas no verão e período seco no inverno (Souza, 2011). O solo predominante da área é o argiloso com 48% de argila, 26% de silte e 26% de areia. A produção das mudas do estudo foi realizada em viveiro comercial localizado no município de Goiânia-Go. O transplântio foi realizado manualmente no dia 23/05/2015, com espaçamento de 0,20 m entre plantas e 1,50 m entre linhas, com mudas de 30 dias após a semeadura. A cultura foi plantada em área com preparo convencional do solo (subsolação, aração e gradagem) com densidade de plantio de 30.000 plantas ha⁻¹.

Na adubação de plantio usou-se a formulação 5-20-18, em 1.500 kg ha⁻¹ seguindo a recomendação da cultura utilizando a análise do solo. Sendo realizada também adubação de cobertura aos trinta dias após o transplântio com nitrato de cálcio 300 kg ha⁻¹ e 300 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio. O controle de pragas e doenças foi realizado semanalmente por meio de pulverizações de inseticidas e fungicidas nas doses recomendadas para a cultura (Anexo 1). O sistema de irrigação foi do tipo aspersão por pivô central (Figura 1), onde na primeira semana após o transplântio foram aplicadas lâminas de 5 mm por dia, e nos 30 DAT seguintes foram aplicadas lâminas de 20 mm por semana; no restante do ciclo foram aplicadas lâminas de 30 mm semanalmente, e 15 dias antes da colheita a irrigação foi interrompida (eficiência de aplicação de água de 85%).

A colheita foi realizada mecanicamente quatro meses após o transplântio das mudas, totalizando 122 dias de ciclo.

3.2 HÍBRIDOS DE TOMATE

Os híbridos comerciais utilizados no estudo foram: Heinz 1308 (H-1308) e Nunhems 901 (N-901), sendo 50% da área do pivô central (31,5 ha) para cada um. O híbrido Heinz 1308 foi desenvolvido pela companhia Heinz Seeds. O híbrido N-901 registrado no Ministério da Agricultura é um híbrido de tomate para processamento industrial.

3.3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL E OS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE CULTURA UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE

Para a estimativa da evapotranspiração atual (ETa) e os respectivos coeficientes de cultura, foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS), órbita/ponto 222/71; 221/72, adquiridas gratuitamente no banco de imagens do *United States Geological Survey* – USGS (2015). As imagens selecionadas para o estudo foram adquiridas aos 16 dias após o transplântio (DAT), no dia 08/06/2015, aos 32 DAT em 24/06/2015, 41 DAT em 03/07/2015, 49 DAT em 10/07/2015, 58 DAT em 19/07/2015, 65 DAT em 26/07/2015, 74 DAT em 04/08/2015, 81 DAT em 11/08/2015, 90 DAT em 20/08/2015, 106 em 05/09/2015; e 122 DAT no dia 21/09/2015.

A evapotranspiração de referência (ET₀) foi determinada pelo método de Penman-Monteith, utilizando dados meteorológicos provenientes da estação meteorológica do Porto Seco Centro-Oeste localizado aproximadamente a 8 km da área de estudo (Figura 2).



Figura 2. Vista aérea da distância em linha reta da estação meteorológica na área de estudo, Silvânia-GO, 2015.

Após a obtenção das imagens, estas foram importadas para o algoritmo SAFER incorporado no software Arc Gis®10.2.2, onde foram obtidos os valores médios dos parâmetros biofísicos que compõem a evapotranspiração atual (Figura 3) e o coeficiente de cultura (Kc), para a área total de estudo. Com a ferramenta de programação e cálculo utilizou-se a função *raster calculator* disponível no software gerenciador de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permite o cálculo e aplicação da modelagem através de dados *raster*.

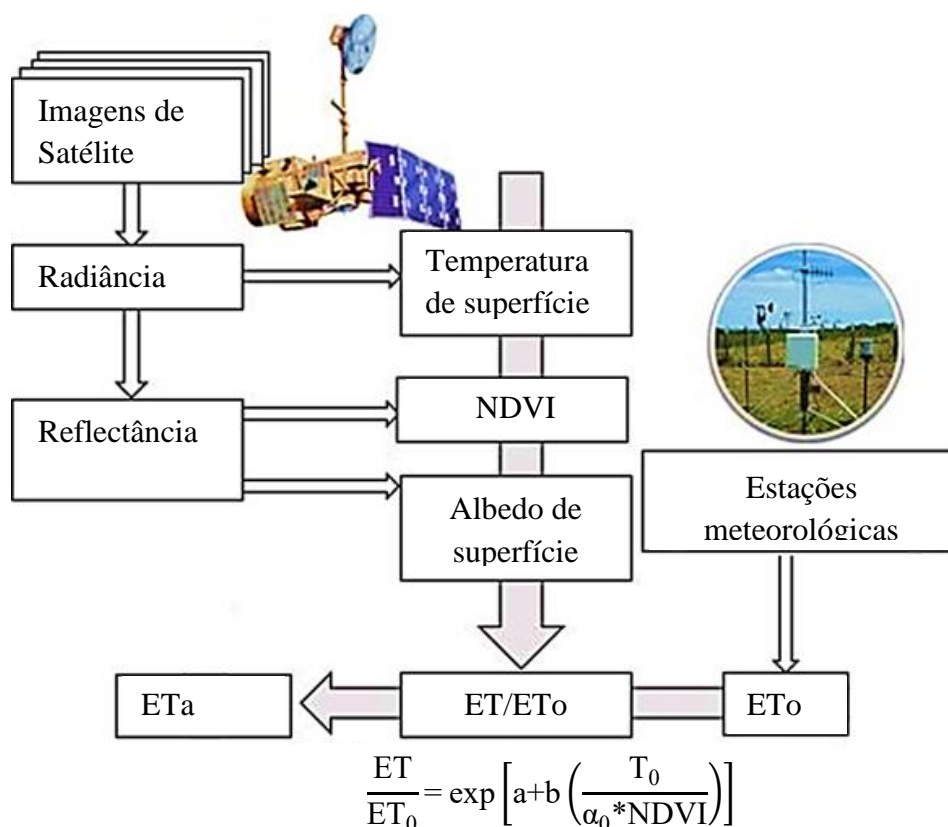


Figura 3. Fluxograma esquemático para o cálculo da evapotranspiração atual por meio do algoritmo SAFER.

O monitoramento do status hídrico da cultura foi através do monitoramento do potencial de água na folha semanalmente (Câmara de Scholander) e pelo conteúdo de água no solo.

3.4 CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

O método mais utilizado para estimar a disponibilidade de água no solo é o balanço hídrico. O Balanço hídrico consiste em avaliar a contabilidade hídrica do solo, até a profundidade explorada pelas raízes, calculando-se, sistematicamente, todos os fluxos positivos (entrada de água no solo) e negativos (saída de água no solo). Tais fluxos decorrem de trocas com a atmosfera (precipitação, condensação e evapotranspiração) do próprio movimento subterrâneo da água (Rossato, 2002).

O cálculo do balanço hídrico diário do solo é feito considerando a evapotranspiração potencial da cultura (ETc), o cálculo do balanço hídrico tem início na data de plantio com a umidade inicial do solo igual à CAD ou igual à umidade determinada

pelo usuário. Com a perda de água para a atmosfera através da evapotranspiração, o solo reduz sua disponibilidade de água para a planta. O volume que falta para atingir a CAD determina a “Deficiência Hídrica do Solo”. Quando a quantidade de chuva e irrigação é maior do que o volume necessário para repor a deficiência hídrica, ocorre o “Excedente Hídrico do Solo”. Esse volume corresponde à perda por escoamento INMET (2015).

3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO SOLO

A caracterização química e física do solo do experimento em estudo foi realizada em maio de 2015. As características químicas e físicas do solo foram determinadas mediante coleta de amostras de solo na área, na profundidade de 0 a 0,20 m. Em seguida, as amostras foram enviadas ao Laboratório (Terra análises para agropecuária). Os resultados analíticos obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização química e física do solo em Silvânia - GO 2015.

Camada (m)	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	K	P	M.O.
		(cmolc dm ⁻³)				(mg dm ⁻³)	(%)	
0,0-0,2	5,2	2,4	0,6	0,0	2,4	84	7	2,7
		Argila		Silte	Areia		ds	
				(%)			(g cm ⁻³)	
0,0-0,2		48	26		26		1,33	

3.6 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Para determinar a curva de retenção de água no solo foi utilizado o método da câmara de pressão de Richards (Embrapa, 2011), utilizando amostras indeformadas de solo. A câmara de pressão de Richards (Figura 4) é um método de obtenção da curva de retenção de água no solo, sob condições de laboratório (Prevedello, 1996). O equipamento é constituído de uma câmara capaz de suportar alta pressão. No interior da câmara fica alojada uma placa porosa a qual está ligada a atmosfera por intermédio de um dreno (Libardi, 2000).



Figura 4. Câmara de pressão de Richards

Foram coletadas 12 amostras indeformadas nas profundidades 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m, em 3 repetições. As amostras foram retiradas no campo com um coletor amostrador de solo com anéis de aço inoxidável, contendo dimensões de 4,8 cm de diâmetro interno e 5,3 cm de altura. Depois, as amostras foram levadas para o laboratório de física de solo (LFS/EA/UFG), vedados os fundos dos anéis com tecido de nylon preso por uma borracha de látex, em seguida foram colocadas para saturar. No processo que envolve a saturação das amostras, as mesmas foram colocadas em uma bandeja de plástico onde foram saturadas por meio da elevação gradual da água. Este procedimento consiste em adicionar uma lâmina de água destilada na bandeja até atingir 2/3 de altura da amostra, permanecendo por um período de 24 horas (Moraes, 1991), garantindo dessa forma a elevação do nível da lâmina de água a fim de que as bolhas de ar pudessem ser liberadas (Klute,1986) (Figura 5).



Figura 5. Coleta de amostragem de solo com o coletor amostrador de solo (A); Processo de saturação das amostras indeformadas (B).

A Curva de retenção de água no solo foi realizada pelo processo de secamento das amostras. Logo após o período de saturação, as amostras foram retiradas da água, em seguida foram pesadas a fim de avaliar o conteúdo volumétrico na condição de saturação (0 kPa). Os anéis contendo o solo foram acondicionados sobre as placas de cerâmica, previamente saturadas e submetidas a sete tensões: -1,0, -6,0, -10,0, -30,0, -60,0, -100,0 e -1500,0 kPa.

O momento de equilíbrio das amostras em determinada tensão foi determinado pela interrupção da drenagem, verificando visualmente pela ausência de gotas de água no tubo de saída. Ao atingir o equilíbrio hídrico em cada tensão, a amostra foi pesada para determinação do seu conteúdo de água. Depois de submetidas à última tensão, foram secas em estufa a 105°C por 24 horas (Gardner, 1986). Após o equilíbrio térmico, foram determinadas as massas de sólidos e a tara (compreendendo anel de alumínio, material sintético e liga elástica), calculando-se, assim, a densidade do solo (relação da massa seca e o volume de solo) e conteúdo de água á base de massa (g g^{-1}) (relação entre massa de água e massa seca de solo).

A curva característica média de retenção de água no solo foi estimada para o perfil de 0,10 a 0,40 m de profundidade, considerada essa última a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (Santana et al., 2011). Com os valores característicos de umidade correspondentes aos seus respectivos valores de tensão, foram obtidos os ajustes de acordo com os parâmetros empíricos da equação proposta por Van Genuchten (1980), (Equação 16) utilizando o programa computacional SWRC (*Soil Water Retention Curve*), elaborado por Dourado Neto et al. (1990).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi_m|)^n]^m} \quad (16)$$

Em que:

θ : conteúdo de água no solo em função do potencial matricial ($\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r : umidade residual ($\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s : umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$);

ψ_m : potencial matricial (kPa);

α : parâmetro de ajuste (cm^{-1});

m e n : parâmetros de ajuste da equação, adimensionais.

3.7 MONITORAMENTO DO POTENCIAL DE ÁGUA NA FOLHA

O monitoramento do potencial de água na folha foi realizado pela câmara de pressão de Scholander (Figura 6). Nessa técnica, a folha é retirada da planta por meio do corte do pecíolo utilizando uma lâmina bem afiada, e em seguida colocada na câmara de pressão com a extremidade do pecíolo seccionada voltada para fora da câmara, através de uma borracha usada para vedar a câmara de pressão (Figura 6). A pressão na câmara é gradualmente aumentada por uma fonte de gás comprimido (Figura 6), até o aparecimento da seiva na superfície. Nesse ponto, a pressão é suficiente para forçar a água das células a se mover para dentro dos vasos do xilema e daí para fora da amostra através da superfície cortada, que pode facilmente ser visualizada com o uso de uma lupa de bolso. A pressão dentro da câmara é registrada. Depois o gás é liberado por um exaustor.



Figura 6. Avaliação do potencial de água na folha: Câmara de Scholander (A), folha seccionada colocada na câmara (B), pecíolo voltado para fora da câmara, através de uma borracha usada para vedar a câmara de pressão (C), leitura do surgimento da seiva (D).

O potencial de água na folha foi realizado semanalmente, por volta das 10h da manhã, horário de passagem do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS). As amostras foram coletadas aleatoriamente em cinco plantas por parcela. As aferições foram realizadas instantaneamente, no local logo após a retirada da folha da planta, para evitar perdas por evaporação. Então, o potencial foi comparado a um valor de potencial crítico (ψ_{fc}) (-0,40 a

-0,60 Mpa) para a cultura do tomate (Thompson et al., 2007) para verificar o status hídrico das plantas nos dias de passagem do satélite.

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O desempenho do método de estimativa de evapotranspiração pelo algoritmo (SAFER) foi avaliado correlacionando-se os dados estimados pelo sensoriamento remoto com os estimados pelo método padrão da FAO 56 e Embrapa Hortaliças, através de uma análise de regressão linear em que se consideraram os indicadores estatísticos, R-quadrado, coeficiente de correlação simples de Pearson “r” e pelo índice de Willmontt “d”. O índice de concordância de Willmontt está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, variando de zero para nenhuma concordância, a 1,0 para a concordância perfeita, sendo determinado pela Equação 17 (Silva, 2011).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum (|Pi - O| + |Oi - O|)^2} \right] \quad (17)$$

sendo: Pi o valor estimado; Oi o valor observado; O a média dos valores observados.

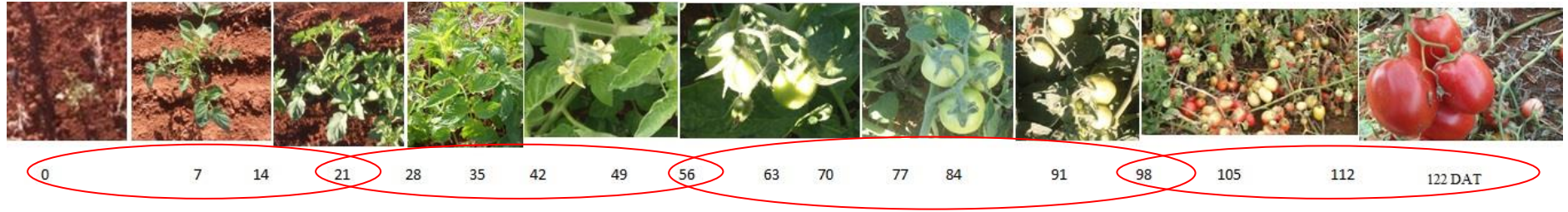
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O transplante das mudas do tomateiro ocorreu no dia 23 de maio de 2015 e na Tabela 4 é possível observar a caracterização e duração dos estádios fenológicos do tomateiro cultivado em pivô central, no período de 23 de maio a 21 de setembro de 2015 o período da fase inicial do transplante ao pegamento das mudas foi de 27 dias; a fase vegetativa 36 dias, fase de florescimento e frutificação 36 dias e da maturação a colheita 23 dias, sendo o ciclo da cultura avaliado, de 122 dias. Fotos do experimento em diferentes épocas são apresentadas na figura 7.

Tabela 4. Caracterização e duração dos estádios fenológicos do tomateiro (N901; H1308) cultivado em pivô central, no período de 23 de maio a 21 de setembro de 2015 no município de Silvânia - GO.

Fase/Período	Inicial	Vegetativo	Frutificação	Maturação	Total
Início	23/05/2015	20/06/2015	26/07/2015	31/08/2015	
Final	19/06/2015	25/07/2015	30/08/2015	22/09/2015	
Período (dias)	27	36	36	23	122

Figura 7. Fases fenológicas. Fase inicial do pegamento das mudas 7 DAT; 49 DAT Florescimento; 56 DAT início da frutificação; 91 DAT início da maturação; 122 DAT colheita.



Transplântio

1ª Flor
Florescimento

1ª Fruto

Frutificação

Colheita
Maturação

CAMPO



A necessidade hídrica total da lavoura foi de 351,97 mm, 340,97 mm e 356,24 mm ao longo do ciclo, pelos métodos FAO 56, EMBRAPA e SAFER, respectivamente (Figura 8), sem diferença entre os híbridos avaliados.

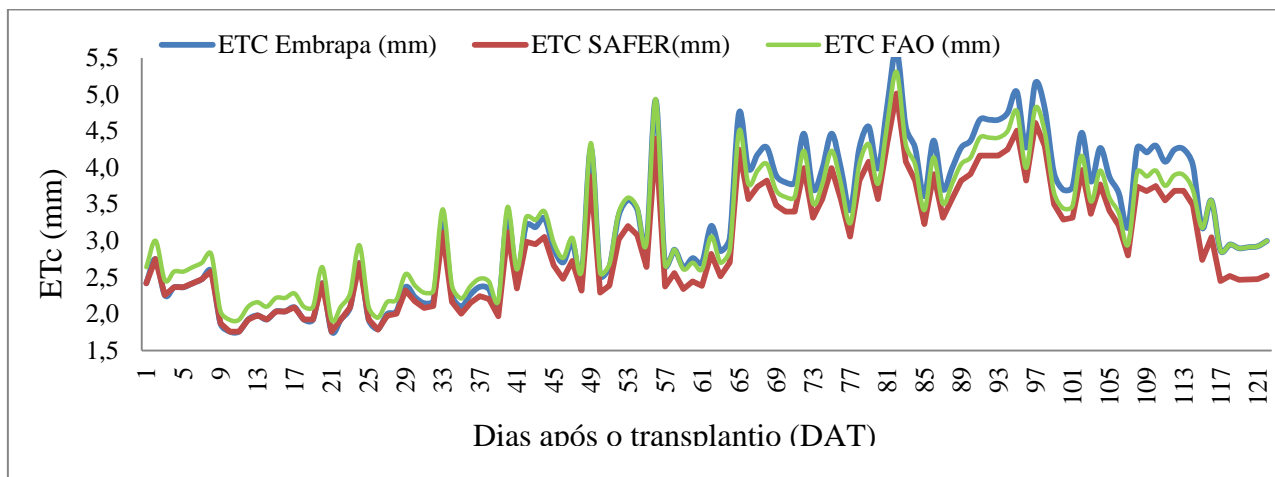


Figura 8. Evapotranspiração da cultura (ETc) pelos métodos SAFER, FAO 56 e EMBRAPA

Ao longo do ciclo, a cultura recebeu 382,50 mm via irrigação (lâmina líquida), suprindo, portanto, a necessidade hídrica da cultura (Figura 9).

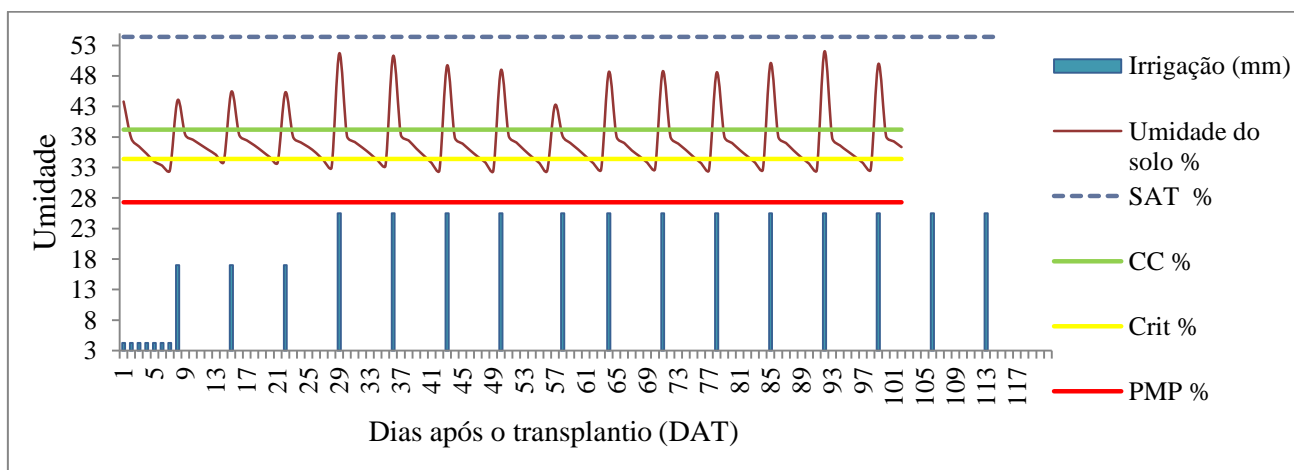


Figura 9. Balanço hídrico da cultura, com destaque para as lâminas líquidas de irrigação, variação da umidade do solo em relação a CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CRIT: ponto crítico e SAT: ponto de saturação.

A temperatura média do ar, ao longo do ciclo da cultura, foi de 22,20 °C (Figura 10), sendo esta favorável para o desenvolvimento da cultura.

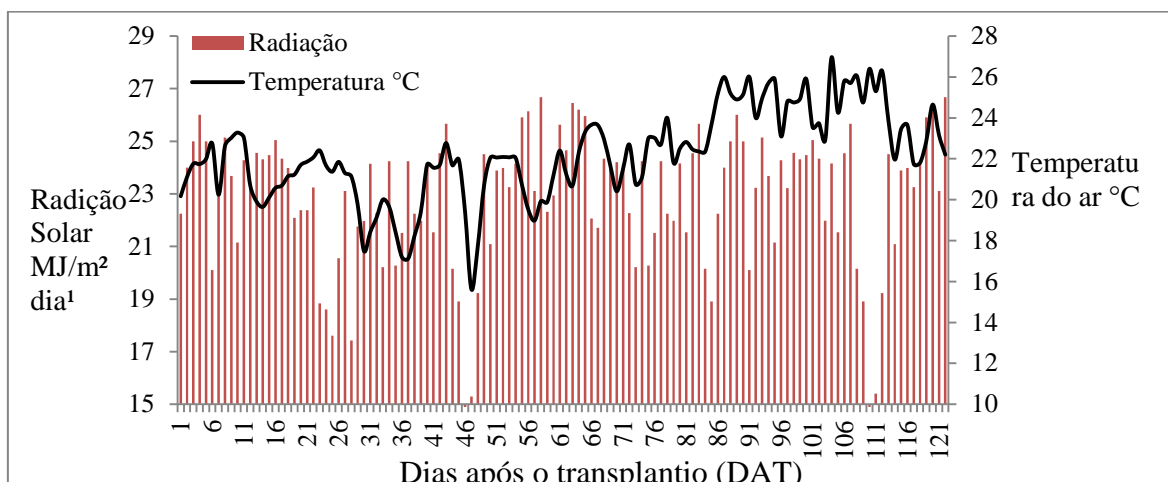


Figura 10. Temperatura média do ar e radiação solar global.

Pois, de acordo com Alvarenga (2013), o tomateiro suporta ampla variação de temperatura, de 10 °C a 34 °C. Para a síntese normal de licopeno (pigmento que confere a coloração vermelha ao fruto), a temperatura ótima normal diária varia de 20 °C a 24 °C. Temperaturas acima desse valor são desfavoráveis para a coloração típica dos frutos, aumentando a porcentagem de frutos com coloração amarela. De maneira geral, as faixas de temperaturas ótimas, são: para a formação das mudas entre 20 °C a 25 °C; florescimento entre 18°C a 24°C; pegamento de frutos entre 19 °C a 24 °C; e na fase de maturação de 20°C a 24°C. Isso demonstra que as condições climáticas ao longo do ciclo foram normais para região, sem nenhum evento atípico.

A produtividade média foi de 101 t ha⁻¹, ficando um pouco acima da média da região, 80 a 85 t ha⁻¹. Mas, de acordo com Silva (2014), alguns produtores, na região, conseguem até 145 t ha⁻¹. O rendimento do tomateiro é bastante afetado pela condição hídrica do solo. Em situações tanto de deficiência quanto de excesso de água, nos diferentes estádios da cultura, a produtividade da cultura é reduzida em diferentes proporções. Os efeitos do déficit hídrico são iniciados quando a taxa de evapotranspiração é maior do que a taxa de absorção de água pelas raízes e sua transmissão para as partes aéreas da planta. Assim, para a obtenção de elevadas produtividades do tomateiro deve-se evitar o déficit ou excesso de água no solo em qualquer fase do ciclo da cultura (Embrapa, 2003). Isso demonstra que este ciclo de tomateiro avaliado, foi bem representativo da região, o que aumenta a confiabilidade dos dados de evapotranspiração obtidos.

Comparado os valores de potencial de água na folha encontrados neste estudo ao longo do ciclo, com o valor de potencial crítico (-0,40 a -0,60 Mpa) relatado na

literatura para a cultura (Thompson et al., 2007), observa-se que as plantas não sofreram déficit hídrico (Figura 11).

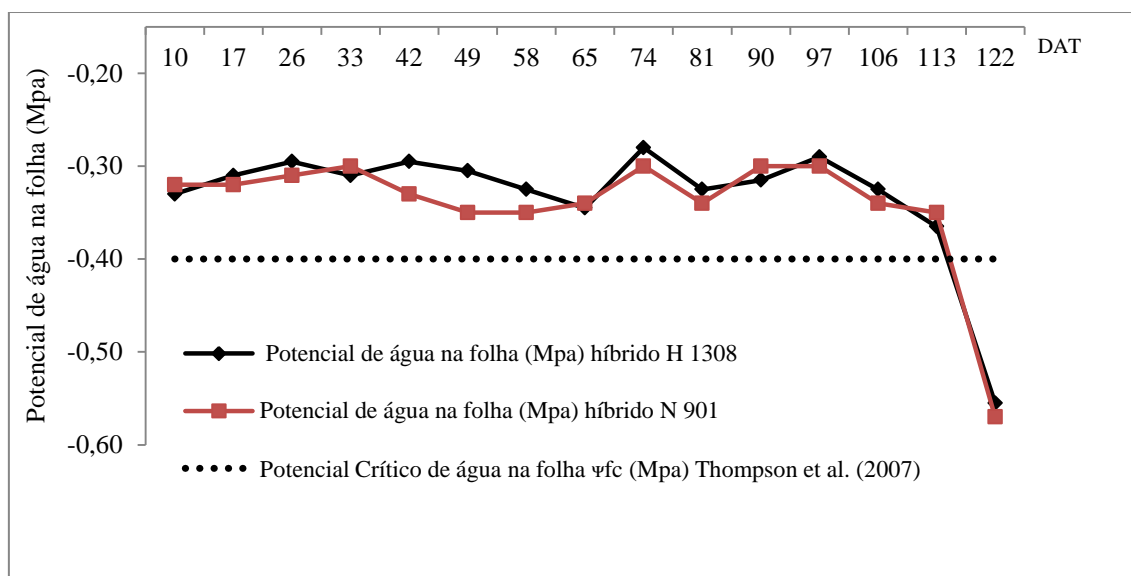


Figura 11. Potencial da água na folha (ψ_f Mpa) médio para os híbridos N901 e H1308 ao longo do ciclo da cultura do tomateiro industrial, Silvânia - GO, maio a setembro de 2015.

Isso também pode ser evidenciado com o balanço hídrico da cultura, mostrando que o conteúdo de água no solo, ao longo do ciclo, não ultrapassou de maneira significativa, em nenhum momento, o limite crítico de 40% da água retida entre θ_{CC} e θ_{PMP} (Figura 9). Assim, pôde-se considerar as evapotranspirações atuais (ET_a) estimadas pelo método SAFER, como evapotranspirações potenciais (ET_c). Pois, de acordo com Allen et al. (1998), a ET_c é a evapotranspiração máxima potencial de uma cultura, sem restrição hídrica, em boas condições ambientais, nutricionais e fitossanitárias. Houve apenas uma exceção, na fase final do ciclo, onde foi observado que as plantas sofreram déficit hídrico (Figuras 9 e 11). De acordo com Marouelli et al. (2008), trata-se de um manejo comum na produção de tomates, o corte da água de 20 a 30 dias antes da colheita para favorecer a maturação e a concentração de sólidos solúveis nos frutos.

A curva de retenção de água no solo no perfil de 0,0 a 0,4 m de profundidade, pode ser observada na Tabela 5 e Figura 12. Dela extraiu-se os conteúdos de água no solo nos pontos de capacidade de campo, crítico e murcha permanente, correspondentes aos potenciais matriciais de -6 kPa (θ_{CC} : 39,2% ou $0,392 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e -30 kPa ($\theta_{crítico}$: 34,4% ou $0,344 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e -1500 kPa (θ_{PMP} : 27,3% ou $0,273 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente. Valores

similares foram encontrados para solos argilosos por Pavani et al. (2008) e Casaroli & Jong van Lier (2015).

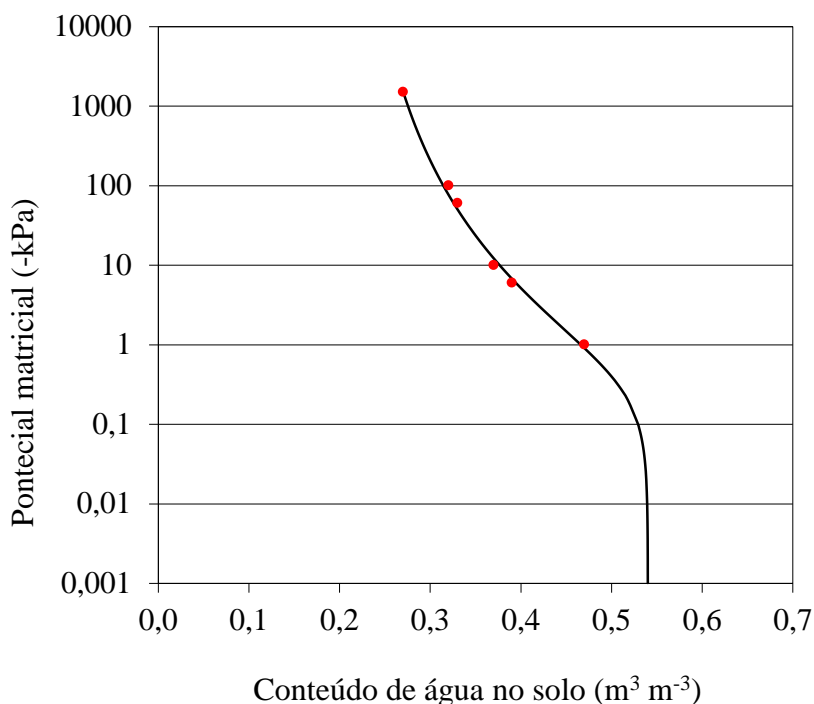


Figura 12. Curva característica de retenção de água do solo média, para o perfil de 0,10-0,4 m de profundidade, área de tomateiro irrigada por pivô central em solo argiloso, Silvânia-GO, 2015.

Tabela 5. Parâmetros de ajuste da curva característica de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980), a partir do potencial matricial em kPa e do conteúdo de água em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Parâmetros	
Θ_s	0,540
Θ_r	0,273
α	2,7810
m	0,1713
n	1,206
R^2	0,998

Θ_s : umidade do solo saturado; Θ_r umidade residual do solo; α parâmetro de ajuste; m e n parâmetros de ajuste da equação, adimensionais; R^2 coeficiente de determinação.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os valores de evapotranspiração de referência (ET_o) determinada pelo método Penman Monteith, e para evapotranspiração atual (ET_a) utilizando o SAFER, além da ET_c estimada pelos métodos FAO 56 e EMBRAPA, em onze datas (referentes aos dias de passagem do Landsat 8 sobre a área) ao longo do ciclo da cultura (Anexo 2). Observa-se que o erro relativo percentual dos dados para os híbridos N901 e H1308, foram de 6,03% e 6,62%, respectivamente.

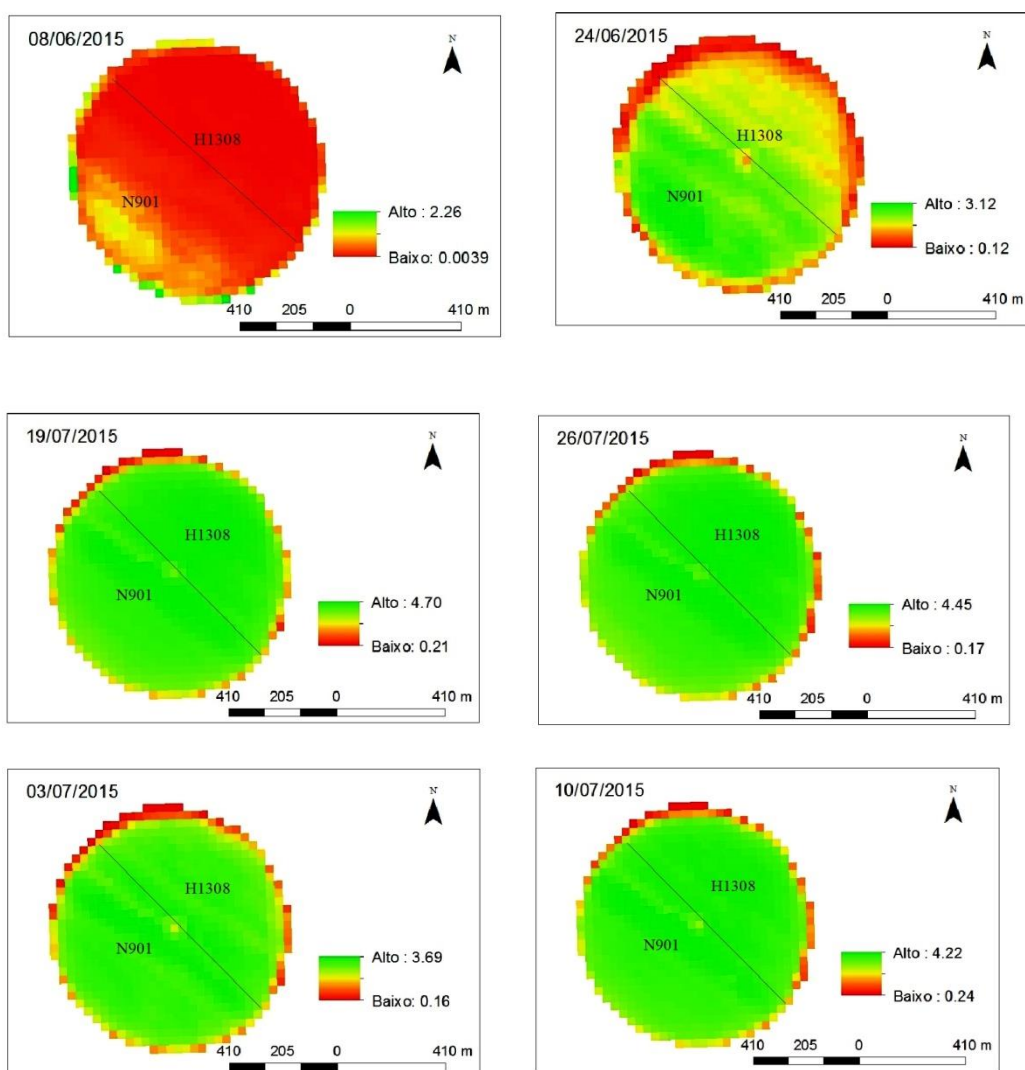
Tabela 6. Evapotranspiração da cultura do tomateiro industrial (N901) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Silvânia – GO, 2015.

Data	DAT	ET _o (mm/dia)	ET _c (mm/dia) (FAO 56)	ET _c (mm/dia) (EMBRAPA)	ET _a (mm/dia) (SAFER)	Erro absoluto (dia)	Erro relativo (%)
08/jun	16	4,7	2,82	2,59	2,54	0,28	10,00
24/jun	32	4,9	3,28	3,09	3,09	0,20	5,97
03/jul	41	5,1	3,83	3,72	3,57	0,26	6,67
10/jul	49	4,7	3,85	3,76	3,62	0,24	6,10
19/jul	58	5,3	4,77	4,77	4,45	0,32	6,67
26/jul	65	5,6	5,04	5,32	4,76	0,28	5,56
04/ago	74	5,0	4,50	4,75	4,20	0,30	6,67
11/ago	81	4,7	4,23	4,47	4,00	0,24	5,56
20/ago	90	5,1	4,59	4,85	4,28	0,31	6,67
05/set	106	5,5	4,24	4,57	4,18	0,06	1,30
21/set	122	5,7	3,31	3,65	3,14	0,17	5,17

Tabela 7. Evapotranspiração da cultura do tomateiro industrial (H 1308) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Silvânia - GO, 2015.

Data	DAT	ET _o (mm/dia)	ET _c (mm/dia) (FAO 56)	ET _c (mm/dia) (EMBRAPA)	ET _a (mm/dia) (SAFER)	Erro absoluto (dia)	Erro relativo (%)
08/jun	16	4,7	2,82	2,59	2,49	0,33	11,67
24/jun	32	4,9	3,28	3,09	3,09	0,20	5,97
03/jul	41	5,1	3,83	3,72	3,52	0,31	8,00
10/jul	49	4,7	3,85	3,76	3,53	0,33	8,54
19/jul	58	5,3	4,77	4,77	4,40	0,37	7,78
26/jul	65	5,6	5,04	5,32	4,70	0,34	6,67
04/ago	74	5,0	4,50	4,75	4,20	0,30	6,67
11/ago	81	4,7	4,23	4,47	4,00	0,24	5,56
20/ago	90	5,1	4,59	4,85	4,34	0,26	5,56
05/set	106	5,5	4,24	4,57	4,18	0,06	1,30
21/set	122	5,7	3,31	3,65	3,14	0,17	5,17

Na Figura 13 visualizam-se os mapas de ETa nos meses de junho a setembro de 2015 para área de estudo. Nota-se que, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura, os valores de ETa variaram. No entanto, os valores maiores foram observados, na fase em que a cultura encontrava-se em pleno desenvolvimento 49 DAT, com início da floração. Os menores valores de ETa foram observados no início e no final do ciclo, fase de pegamento das mudas e fase final de ciclo próximo á colheita, respectivamente.



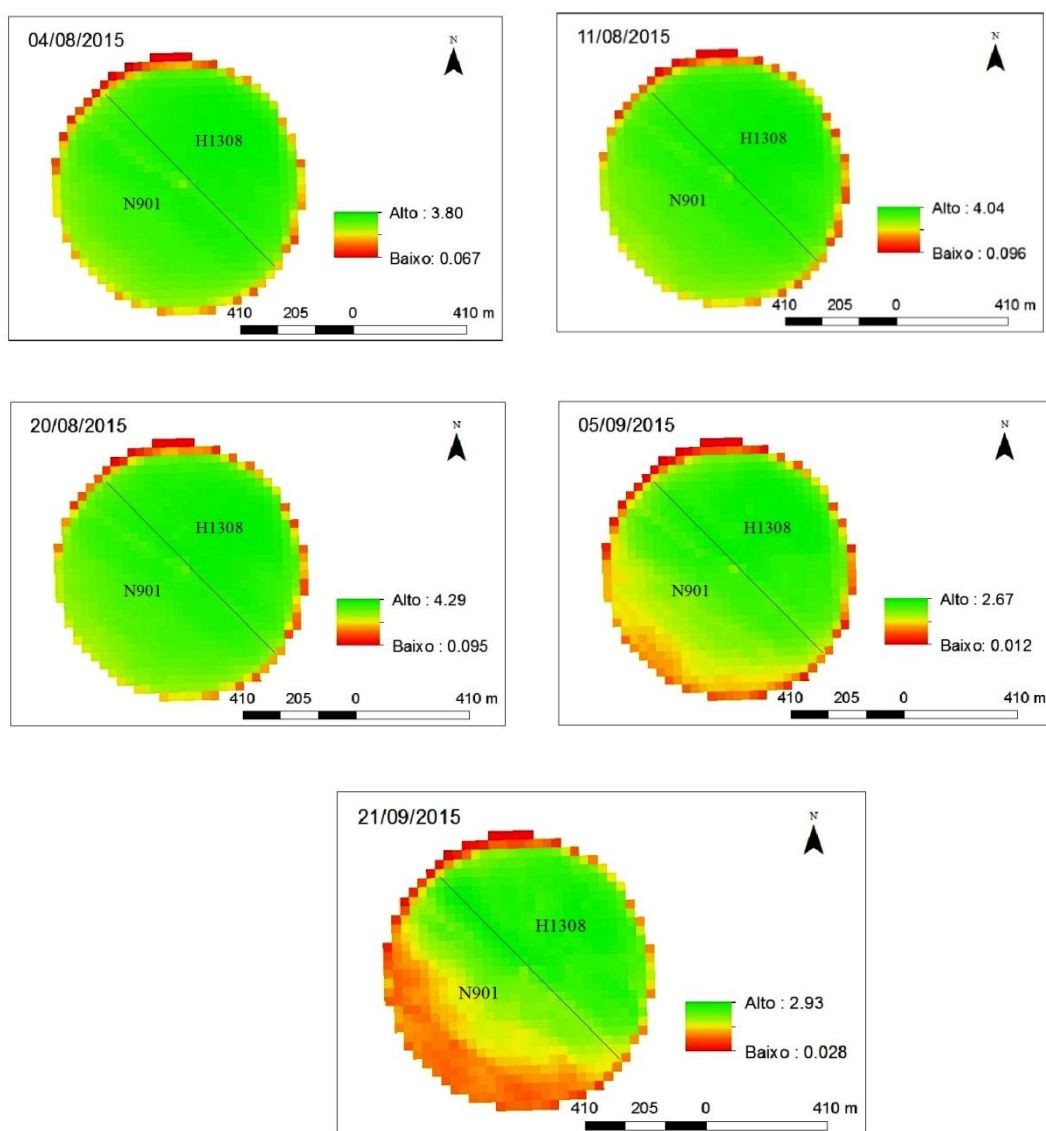


Figura 13. Mapas de Evapotranspiração atual pelo modelo SAFER referente ao período de junho a setembro de 2015, cultura do tomate industrial irrigada por pivô central (híbridos N901 e H1308), Silvânia - GO.

Quando se compara os valores de ET_a estimados pelo SAFER, com os valores de ET_c (FAO 56), nota-se uma grande similaridade entre os dados, especialmente nas fases em que a cultura encontra-se em pleno desenvolvimento (03/07, 10/07, 19/07, 26/07, 04/08, 11/08 e 20/08). E nas duas primeiras datas (08/06; 16 DAT e 24/06; 32 DAT), o modelo SAFER subestimou o valor de ET_a em comparação as ET_c estimada pelos métodos da FAO 56 (Allen et al., 1998) e

EMBRAPA (Marouelli et al., 2008) por estar no início do ciclo na fase 1, com superfície descoberta devido a pouca presença de vegetação. A subestimativa da ETa pelo SAFER também foi observada na fase final do ciclo. Esse efeito pode ser explicado devido ao fato da cultura estar entrando na fase de senescência, diminuindo a cobertura do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2015) em estudos com a cultura do feijão irrigado na região do Cerrado (Distrito Federal). Esse efeito pode ser explicado devido ao fato da cultura, tanto no início de ciclo como na fase final do período vegetativo, com solo exposto e folhas amareladas, respectivamente, ter influência direta na determinação do NDVI.

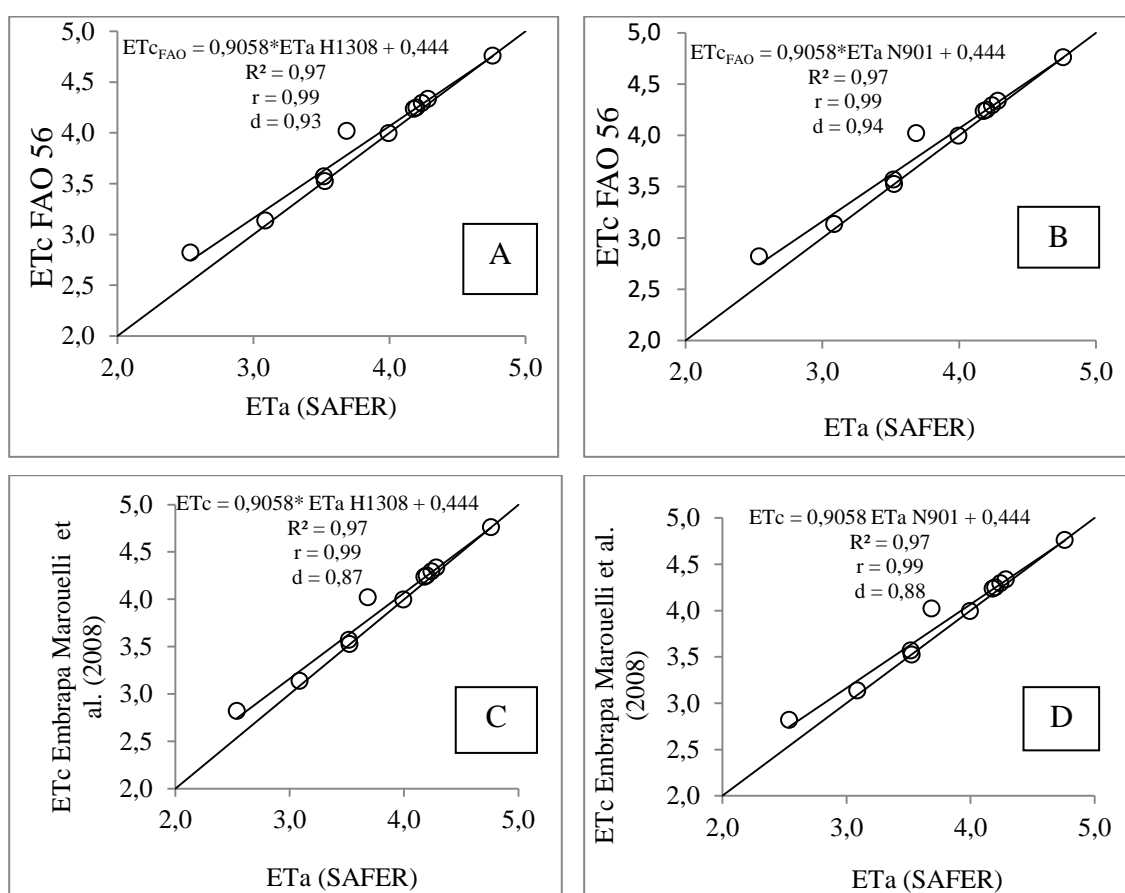


Figura 14. Comparativo da ETc estimada pelo método padrão FAO-56 (Allen et al., 1998), com evapotranspiração estimada atual (ETa) utilizando o SAFER A e B, Comparativo da ETc estimada pelo método EMBRAPA (Marouelli et al., 2008), com evapotranspiração estimada atual (ETa) utilizando o SAFER C e D, ao longo do ciclo para os dois híbridos (H1308 e N901), Silvânia-GO, 2015.

Para o comparativo da ETc estimada pelo método padrão FAO 56 (Allen et al., 1998) e EMBRAPA (Marouelli et al., 2008), a curva de regressão (Figura 14) que melhor

se ajustou aos dados foi a linear, onde a correlação de Pearson “r” apresentou um valor de $r = 0,99$ para ambos os híbridos e para ambos os métodos de estimativa de evapotranspiração de cultura (ETc), sendo assim muito próximo de 1; o índice de Willmontt “d” apresentou um valor equivalente a 0,93 e 0,94 para os híbridos H1308 e N901, respectivamente, para o método de estimativa de ETc (FAO), sendo próximo de 1; já no método de estimativa de ETc EMBRAPA (Marouelli et al., 2008), o índice de Willmontt “d” apresentou um valor equivalente a 0,87 e 0,88 para os híbridos H1308 e N901, e o R^2 apresentou um valor equivalente a 0,97 para ambos híbridos e para ambos os métodos de estimativa de evapotranspiração de cultura (ETc), sendo próximo de 1; mostrando que ajustou bem para os resultados das variáveis analisadas indicando assim uma forte relação entre as duas variáveis analisadas.

Os valores de coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER, associados com os valores adaptados dentro dos limites estabelecidos pela FAO 56 (Allen et al., 1998) para a cultura do tomateiro industrial, estão apresentados na Figura 15.

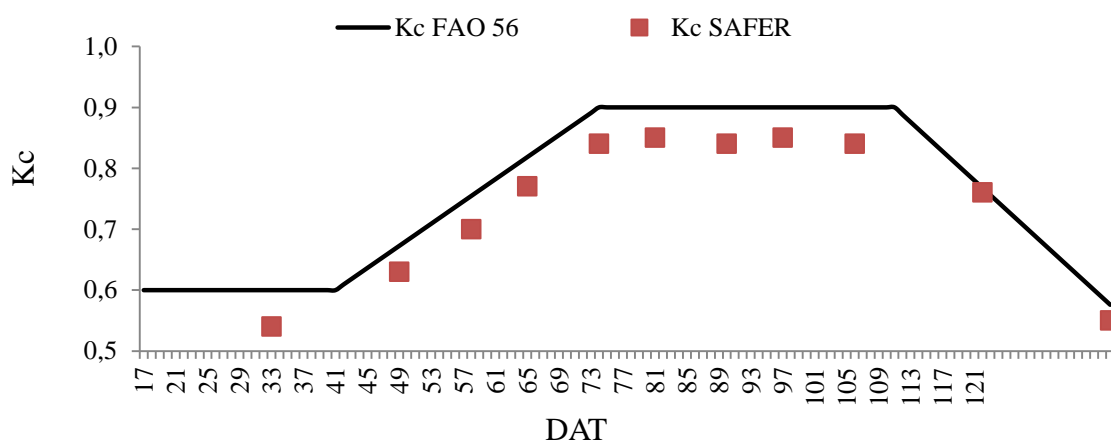


Figura 15. Coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER associados com os valores estabelecidos pela FAO 56 (Allen et al., 1998), em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Os valores obtidos no atual estudo são próximos aos recomendados por Allen et al. (1998) para a cultura do tomateiro rasteiro, cultivado sem restrição hídrica e com a evapotranspiração de referência obtida por Penman-Monteih. Isso mostra a viabilidade do uso do SAFER pra estimativa da ETa desta cultura, desde que seja em áreas com manejo correto da água e a evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-

Monteih (Figura 16). A comparação entre os dois métodos a curva de regressão que melhor se ajustou aos dados foi a linear, apresentou o coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$; a correlação de Pearson “r” apresentou um valor de $r = 0,99$, sendo muito próximo de 1; o índice de Willmontt “d” apresentou um valor equivalente a 0,99; observa-se que houve um bom ajuste para os resultados das variáveis analisada, utilizando os dados de Kc obtidos pelo SAFER relacionados com o de Allen et al. (1998), evidenciando assim uma forte relação entre as duas variáveis analisadas.

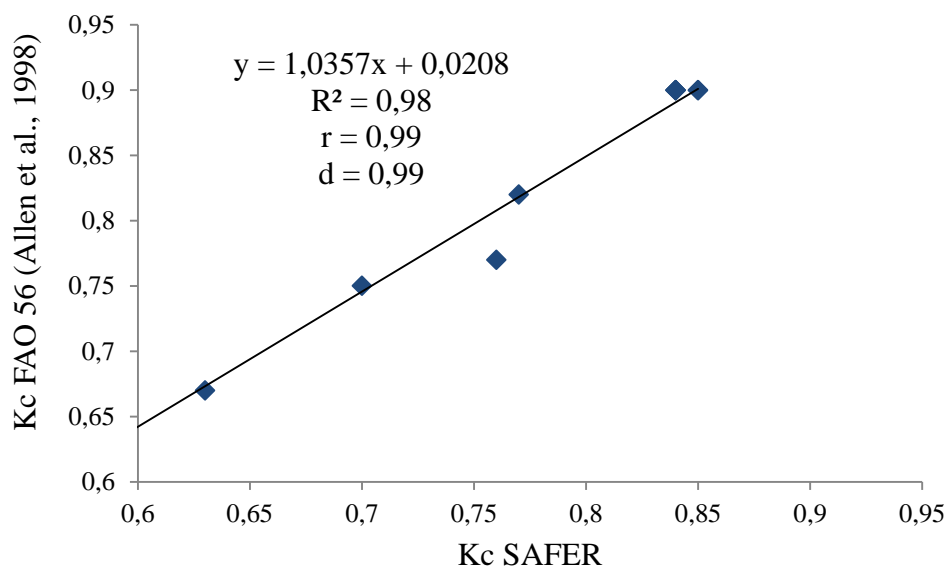


Figura 16. Comparativo entre o Kc para a cultura do tomate industrial adaptados de FAO 56 Allen et al. (1998) e o Kc utilizando o SAFER, ao longo do ciclo da cultura.

Os valores de coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER, associados com os valores de Marouelli et al. 2008 para tomate industrial, estão apresentados na (Figura 17).

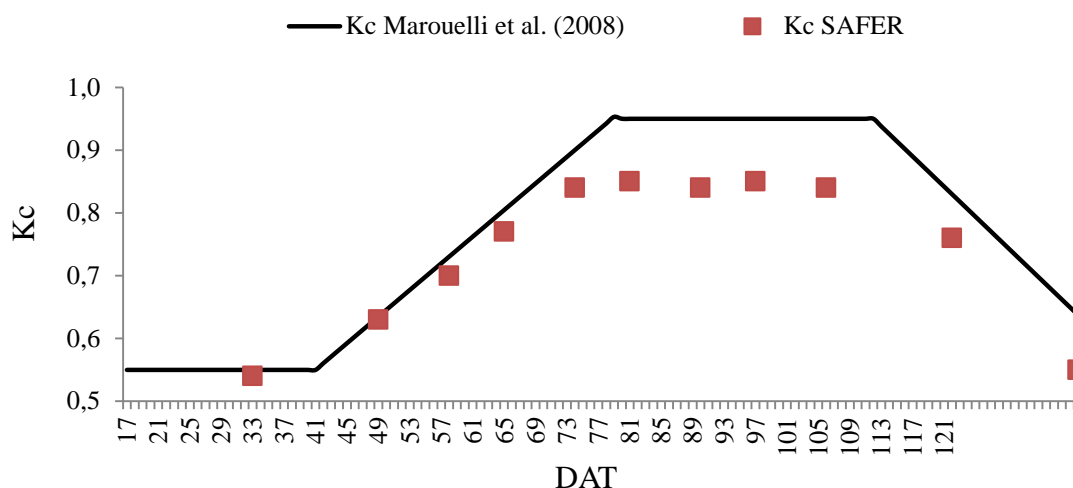


Figura 17. Comparativo entre o Kc para a cultura do tomate industrial de Marouelli et al. (2008) e o Kc utilizando o SAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo da cultura.

Quando comparados os valores encontrados pelo SAFER com os Kc recomendados pela EMBRAPA (Marouelli et al., 2008) para as condições edafoclimáticas do Cerrados (Figura 18), a curva de regressão que melhor se ajustou aos dados foi a linear, observou-se que o coeficiente de determinação encontrado foi de $R^2 = 0,95$, a correlação de Pearson “r” apresentou um valor de $r = 0,97$ sendo muito próximo de 1; o índice de Willmottt “d” apresentou um valor equivalente a 0,98; observa-se que houve um bom ajuste para os resultados das variáveis analisadas, evidenciando assim uma forte relação entre os dois métodos analisados.

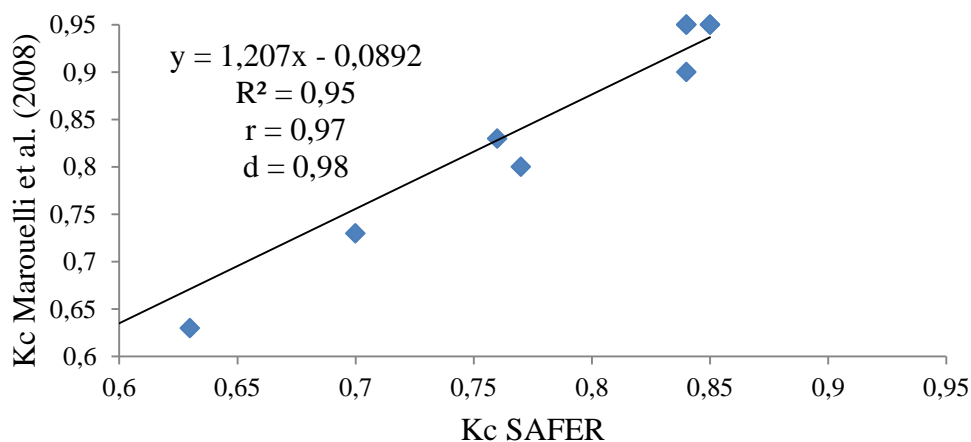


Figura 18. Coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER associados com os valores estabelecidos Marouelli et al. (2008), ao longo do ciclo de desenvolvimento da

cultura.

A partir dos resultados obtidos, o modelo SAFER mostrou-se consistente na avaliação do consumo de água do tomateiro, demonstrando ser um algoritmo recomendado para a estimativa da evapotranspiração atual da cultura.

5 CONCLUSÕES

A combinação de sensoriamento remoto com estações agrometeorológicas possibilita avaliar variáveis para possível melhoramento no manejo da irrigação e um possível diagnóstico da quantidade necessária de água a ser aplicada em cada área, possibilitando assim obtenção de informações úteis que auxiliem o produtor em tomadas de decisões em termos de planejamento e gestão da propriedade. Diante dos resultados apresentados e analisados, conclui-se que a utilização do algoritmo, obteve resultados satisfatórios.

Para os híbridos N901 e H1308 de tomateiro, cultivados em Silvânia - GO em área irrigada por aspersão apresentaram a mesma evapotranspiração, acumulando ao longo do ciclo os totais de 351,97; 340,97 e 356,26 mm, pelos métodos FAO 56, EMBRAPA e SAFER, respectivamente. Os Kcs estimado pelo método do SAFER apresentou significativa correlação com os métodos FAO 56 e Embrapa (FAO 56, $R^2 = 0,98$; Embrapa, $R^2 = 0,95$). A ETa estimada pelo método do SAFER apresentou significativa correlação com os métodos micrometeorológicos (FAO 56, $R^2 = 0,97$; Embrapa, $R^2 = 0,97$), podendo este ser utilizado para estimativa da ETa do tomateiro industrial na região.

6 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **CropEvapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998.** (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), **Advanced training and users manual.** Idaho: Implementation, v.1.0. 2002.
- ALVES JÚNIOR, J.; FOLEGATTI, M. V.; PARSONS, L. R.; BANDARANYAKE, W.; SILVA, C.R.; SILVA, T.J.A.; CAMPECHE, L. F. S.M. Determination of the crop coefficient for grafted Tahiti lime trees and soil evaporation coefficient of Rhodic Kandudalf Clay soil in São Paulo, Brazil. **Irrigation Science**, Berlim, v. 25, n. 4, p. 419-428, 2007.
- ALVARENGA, M. A. R. Origem, botânica e descrição da planta. In: TOMATE. **Produção em campo, casa de vegetação e hidroponia.** 2. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455p.
- ALVARENGA, M. A. R. **Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia.** Lavras: UFLA, 2004. 400 p.
- AGUIAR, R. A. **Manejo do mofo branco em tomateiro industrial.** Tese (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal de Goiás UFG Campus Samambaia, Goiânia – GO, 2011.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação 7ª ed.** Viçosa: Imprensa Universitária, p.596-611, 2005.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais LANDSAT 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Piracicaba ,v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. de. Resposta fotossintética do feijoeiro em função da intensidade de radiação e do teor de água no solo. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, MT, v.13, n.1, p. 69-75, 2015.
- CARVALHO, C. Tomate. **Anuário brasileiro de hortaliças**, Santa Cruz do Sul, p. 80-83, 2013.
- COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C.; OLIVEIRA, S. L. Agricultura irrigada eficiência de irrigação e de uso de água. **Revista Bahia Agrícola**, Salvador, v.7, n.1, p. 57 – 60, 2005.

DUARTE, H. S. S.; ZAMBOLIM, L.; RODRIGUES, F. A. Controle da Requeima em tomateiro industrial com fungicida e silicato de potássio. **Fitopatologia Brasileira**, Lavras, n.3, v. 32, p. 257-260, 2007.

DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J. van.; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção da água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, p. 92-102, jul. 1990.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA . **Tomate industrial-Sistema de Produção**. Versão eletrônica. Jan, 2003.<<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial/mudas.htm> > Acessado em 10 de outubro de 2015.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2011. p.230 (Documentos 132). Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes>>. Acesso em 25 de setembro de 2015.

FAEG. FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DE GOIÁS. Index: Notícias, 2014. Disponível em: <<http://sistemafaeg.com.br/noticias?start=30>>. Acesso em: 30 Nov. 2015

FEITOSA, D. G. **Avaliação temporal e espacial do balanço de radiação, de energia e da evapotranspiração no noroeste paulista, face a mudança no uso do solo**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Agronomia. Faculdade de Engenharia-UNESP-Campus de Ilha Solteira, -SP, 2014.

FERREIRA, J.; ROCHA, H. S., FELIX, L. F.; MEDICI, L. O.; CARVALHO, D. F. **Avaliação da cultura do tomateiro em cultivo protegido, irrigado com acionador automático de baixo custo**. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CONBEA. Campo Grande, 2013.

GAMEIRO, A. H.; CAIXETA FILHO, J. V.; ROCCO, C. D.; RANGEL, R. Estimativa de perdas no suprimento de tomates para processamento industrial no estado de Goiás. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 37, n.07, p. 07-16, 2007.

GERALDINI, F.; JULIÃO, L.; BORGATO, E. Procuram-se agroindústrias. **Hortifruti Brasil**, Piracicaba, n.104,v.10 p.8-23, 2011.

GENUCHTEN, M.Th. Van. **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated soils**. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.41, p.892-8, 1980.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011.123 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícola. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo Piracicaba – SP, 2011.

GÓMES, P. A.; CAMELO, A. F. L. Qualidade postcolheita de tomates armazenados em atmosferas controladas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n.1, p. 38-43, março 2002.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A., **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2ª ed. Madison, American Society of Agronomy, Washington, p. 493-544, 1986.

HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C.; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S. **Determining actual evapotranspiration on the large scale using agrometeorological and remote sensing data in the Northwest of the São Paulo State, Brazil**. In: International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 7º, Geisenheim - Alemanha, Proceedings, p.51, 2012.

HOTT, M. O.; LIMA, V. L. S.; PEREIRA, L. R.; SOUZA, J. M.; REIS, E. F. Produção de biomassa na fase vegetativa do tomateiro em função da tensão de água no solo. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.10, n.18, p. 2389-2398, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201501.pdf/](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201501.pdf/)>. Acessado em: 28 out. 2015

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Agrometeorologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acessado em: 30 nov.2015

KOETZ, M.; MASCA, M. G. C.C.; CARNEIRO, L. C.; RAGAGNI, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G.; RODRIGUES, R. Produção de tomate industrial sob irrigação por gotejamento no Sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. Fortaleza, v.2, n.1, p.09-15, 2008.

KLUTE, A. **Water retention: laboratory methods**. Soil Science Society of America, Madison, p. 635-662, 1986.

LILLESAND, T. M.; KIEFFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 763p.

LIMA, E. P. **Estimativa da evapotranspiração e do balanço hídrico a partir de imagens de satélite de duas sub-bacias do Paracatu**. 2010. 110 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa UFV, Viçosa, 2010.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, p. 509, 2000.

LIRA, V. M. **Obtenção de Parâmetros Biofísicos e Evapotranspiração da Cana de Açúcar mediante imagens orbitais na região do Sub-Médio São Francisco**. 2008. 120 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande. UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

MORAES, S. O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**.1991.141 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP. Piracicaba, 1991.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R.; 2008. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade de água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. 2ª ed. Revista atualizada e ampliada – Brasília – DF. Embrapa Hortaliças e Embrapa Informação Tecnológica, 150 p. 2008.

OLIVEIRA, A. S.; PAZ, V. P.; D'ANGIOLELLA, G.L.B.; PEREIRA, F. A. D. Programação da irrigação pelo método do balanço de água no solo. II aplicação culturas anuais. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 1.p. 73-80, 2005 a.

OLIVEIRA, P. M. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 2003 b. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo: com problemas resolvidos**. Curitiba: C. L. Prevedelo, p. 446, 1996

PAVANI, L. C. **Evapotranspiração e produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) sob três níveis de potencial da água no solo**. 1985. 171 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

PAVANI, L. C; LOPES, A. S; GALBEIRO, R. B. Manejo de Irrigação na cultura do feijoeiro em sistemas de planto direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.1, n.1, p.12-21, 2008.

PINTO, C. M. F.; CASALI, V. W. D. Tomate: tecnologia e produção. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 6, n. 66, p. 8, jun. 1980.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil** . 2002. 145 p. Dissertação (Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE) São José dos Campos.

SANTANA, M. J.; PEREIRA, U. C.; BEIRIGO J. D. C.; SOUZA, S. S.; CAMPOS, T. M. VIEIRA, T. A. Coeficiente de cultura para o Tomateiro Irrigado. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 11-20, janeiro-março, 2011.

SASAKI, J. L. S.; SENO, S. Importância na adubação de algumas olerícolas (alho, cebola, couve-flor, pimentão e tomate). In: SÁ, M. E.; BUZZETI, C. (Coords.). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994. p. 331-343.

SONNENBERG, P. E.; SILVA, N. F. da. **As culturas de: Alface, Cenoura, Batata, Tomate, Cebola e Alho**. 8. ed. Goiânia, 2004. 127 p.

SOUZA, R. F; LEANDRO, W. M.; SILVA, N. B.; CUNHA, P. C. R; XIMENES, P. A.

Diagnose nutricional pelos métodos DRIS e faixas de concentração para algodoeiro cultivado sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, v. 41, n. 2, p. 220-228, abr./jun. 2011.

SOUZA, J. M. F.; ALVES JUNIOR, J. ; SALES, D. L. ; CASAROLI, D. EVANGELISTA, A. W. P. ; PEREIRA, R. M. **Determinação da evapotranspiração atual do feijoeiro irrigado utilizando sensorimamento remoto e a equação de Penman-Monteih**. In: III novagri international meeting, 2015, Fortaleza.

SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R. Estimativa de evapotranspiração de referência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 4, p. 003-022, out./dez. 2011.

SILVA, D. J. H. da.; VALE, F. X. R. do. **TOMATE: Tecnologia e Produção**. Viçosa: UFV, 2007, 355p.

SILVA, J. B. C. da; GIORDANO, L. de B. **Produção mundial e nacional**. In: Tomate para processamento industrial. Brasília: EMBRAPA, 2000. p. 37-59.

SOUZA, J. A. R; MOREIRA, D. A; COELHO, D. F. Crescimento e desenvolvimento de tomateiro fertirrigado com água residuária da suinocultura. **Revista Ambiente e Água**. An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 5, n 2, p. 144-157, 2010.

SILVA, S. I. Densidades populacionais e espaçamentos duplos de dois híbridos de tomate para processamento industrial no cerrado Goiano. 2014. 55p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

TEIXEIRA, A. H. C. **Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation**. Remote Sensing, Petrolina, n. 2 v.4 , p.1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. **Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of fast land use changes in the semi-arid region of Brazil**. In: SPIE Remote Sensing, 2012, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2012 a.

TEIXEIRA, A. H. C. **Modelling Evapotranspiration by Remote Sensing Parameters and Agrometeorological Stations**. In. Remote Sensing and Hydrology; NEALE, C.M.U., COSH, M.H., Eds.; IAHS Publ. 352; IAHS Press: Wallingford, UK; pp. 154–157, 2012 b.

TEIXEIRA, A. H. C.; SHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. **Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil**. Remote Sensing, Edinburgh, United Kingdom, v. 8531, p. 1-10, 2012 c.

TEIXEIRA, A. H. C.; LOPES, H. L.; HERNANDEZ, F. B. T. **Quantificação de parâmetros da produtividade da água com imagens Landsat em condições de mudança de uso da terra no distrito de irrigação Nilo Coelho**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSOREAMENTO REMOTO (SBSR). Anais... São José dos Campos: INPE, 2013.

THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; VALDEZ, L. C.; FERNANDEZ, M. D. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, NL, v. 88, n. 1-3, p. 147-158, 2007.

VARALLO, A. C. T.; LOPES, L. N.; SANTORO, B. L. (Org.). **Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Taubaté: Universidade de Taubaté - UNITAU, 2008, v.1, p. 25-45.

ANEXOS

Axeno 1. Produtos utilizados e seus respectivos ingredientes ativos, formulações, quantidade de ingrediente ativo e dosagem recomendada do produto comercial referentes ao estudo.

Nome comercial	Nome técnico (ingrediente ativo)	Quantidade de Ingrediente ativo (%/L, g/L, kg)
Orthene 750 BR	Acephate	100g / 100L de água
Losban 480 BR	Clorpirifós	1,5 L ha ⁻¹
Provado 200 SC	Imidacloprid	350 ml ha ⁻¹
Danimen 300 EC	Fenpropathrin	150 ml ha ⁻¹
Bravonil 720	Chlorothalonil	200 ml / 100 L de água
Engeo Pleno	Thiamethoxam+Lambdacyhalothrin	75 ml / 100 L de água
Consento	Cloridrato de propamocarbe	1,7 a 2 L ha ⁻¹
Intrepid 240 SC	Methoxyfenozide	6 a 9 ml / 100 L de água
Nomolt	Teflubenzuron	25 ml / 100 L de água
Trigard 750	Cyromazine	15 g / 100 L de água
Revus	Mandipropamid	0,4 a 0,6 L ha ⁻¹
Oberon	Espiromesifeno	600 ml ha ⁻¹

Anexo 2. Diferentes fases fenológicas.



0 DAT (23/05/2015 - Transplante)



7 DAT (Pegamento)



14 DAT (Crescimento vegetativo)



28 DAT (Crescimento vegetativo)



49 DAT (Florescimento)



56 DAT (Início da frutificação)



63 DAT (frutificação)



77 DAT (Frutificação)



91 DAT (Início da Faturação)



105 DAT (Maturação)



122 DAT (Colheita)

