

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CULTURA DO MILHO NA
REGIÃO NOROESTE PAULISTA**

Vitor Felipe Trinca

Orientador: Profº. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez

**ILHA SOLTEIRA - SP
MARÇO – 2019**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CULTURA DO MILHO NA
REGIÃO NOROESTE PAULISTA**

Vitor Felipe Trinca

Orientador: Profº. Drº. Fernando Braz Tangerino Hernandez

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha
Solteira - UNESP, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheiro Agrônomo.

ILHA SOLTEIRA - SP
MARÇO – 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Nelson Donizeti Trinca e Vera Trinca como simples forma de agradecer todos os esforços realizados por eles para mais essa conquista em minha vida, sempre acreditando mais em mim que eu mesmo, sempre me apoiando em todas as minhas decisões, sempre sendo meu porto seguro e, acima de tudo pelo amor incondicional.

Aos meus avós, Nelson Trinca e Ruth Trinca (*in memorian*) que sempre estiveram ao meu lado, me educando, me defendendo e torcendo pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar saúde, motivação e sabedoria para superar todas as barreiras impostas sobre meu objetivo final, a formação profissional em Engenharia Agronômica.

Aos meus pais, Nelson e Vera, pelo exemplo de dedicação, força e amor; que sempre me apoiaram em minhas escolhas e lutaram para que eu pudesse ter sucesso em tudo que eu faço. Por todos os sacrifícios que fizeram por mim e pela pessoa que me tornaram, muito obrigado.

Agradeço aos meus avôs paternos, Nelson e Ruth (*in memorian*), que sempre tiverem um papel muito grande em minha formação, sempre presentes em minha vida, me apoiando e querendo o meu melhor. Em singular, a Dona Ruth, que nos deixou fisicamente em meio de minha graduação, mas sempre esteve presente em alma e valores me dando forças e onde estiver, sei que está muito feliz com essa nossa conquista, minha maior apoiadora.

A minha irmã Estela e meu cunhado Leandro por todo o apoio prestado e por nos presentear com a nossa querida Alice, minha sobrinha e afilhada que nos trouxe mais alegria e, reforçou ainda mais toda a definição de afeto e cumplicidade existente em nossa casa.

Agradeço a todos os meus familiares, em especial aos meus tios Vilmar e Neusely e minha prima Bianca, que sempre estiveram presentes em minha jornada, sendo agentes diretos em minhas conquistas.

Não poderia de deixar de agradecer meus amigos de infância, apesar de nossos caminhos serem diferentes, nunca nos afastamos um do outro e eu sou muito feliz por nossa amizade e companheirismo. Mauro Antonio, Henrique, Igor, Daiane, Mariana, Ariane e Maria Rosa muito obrigado por fazerem parte da minha construção e estarem presentes nos melhores momentos de minha vida.

Agradeço minha segunda família, adquirida em Ilha Solteira, a República Barcana. Victor (Diva-gá), Lucas (Fartura), Hugo (7x1), Guilherme (Garrote), Fayner (soudado), Bruno (Nim), Daniel (ninguém) e claro, nossa segunda mãe, Ritinha. Obrigado por tudo que compartilhamos juntos, desde as contas no final do mês até as festas.

Agradeço a toda Turma XLVI por todo o companheirismo, todas as alegria e os momentos difíceis em que passamos juntos. Em especial, agradeço, ao Igor,

Guilherme, Fernando, Felipe, Diogo, Lucas, Vanessa, Mariane, Fernanda, Matheus e Natália por serem mais próximos e terem contribuído muito comigo durante essa minha jornada.

Agradeço todos os docentes que me proporcionaram grandes aprendizados e principalmente ao Professor Doutor Fernando Braz Tangerino Hernandez que acabou se tornando um segundo pai e com toda a sua dedicação contribuiu muito para meu desenvolvimento como aluno, orientado e ser humano.

Agradeço a Área de Hidráulica e irrigação da UNESP Ilha Solteira, por ser a minha melhor escolha, ou melhor, por ter me escolhido durante a minha Graduação. Foram mais de 4 anos de muitos aprendizados e conquistas, um conhecimento que a sala de aula não seria capaz de me proporcionar e, além de toda a informação que obtive ali, conheci pessoas fantásticas que além de colegas de laboratório se tornaram grandes amigos. Emanoelle, Julia, Paulo, Marielle, Regiane, Diego, Renato, Larissa, Iuri e Pedro; meu muito obrigado a todos vocês e tudo que partilhamos juntos.

Agradeço a Ramo da Terra, empresa Júnior de Engenharia Agronômica por ter me dado a certeza de que escolhi o curso certo. Por me proporcionar tantos desafios e me dar tantas alegrias. Sou apaixonado por essa organização e não existe palavras que eu possa descrever o quanto eu sou grato a tudo que vivenciei em quase 3 anos de Movimento Empresa Júnior. Também quero agradecer as pessoas em que conheci na Ramo da Terra e quero levar para a vida. Obrigado por cada suporte e todas as nossas experiências e evoluções juntos a Família Ramo da Terra.

Agradeço ao Centro Acadêmico “João Roberto Barros” do curso de Engenharia Agronômica por todos os desafios e a sensação de dever cumprido a fim de fortalecer ainda mais o nosso curso. Em especial a Daniela Araujo e todos os outros que fizeram parte de nossa gestão contribuído para um excelente trabalho.

Agradeço ao Governo Federal e ao Projeto Rondon por terem me proporcionado umas das experiências mais marcantes de minha vida na Operação Tocantins e em específico quero agradecer a UNESP Araraquara por me acolher tão bem e me dar a honra de participar de conhecer tantas pessoas incríveis como o Professor Robertinho, Maria Victoria, Larissinha, Juliana, Vinicius (cautela), Vinicius e Eduardo. “Isso é Rondon pessoal!!!”

Agradeço a toda equipe MAST da Universidade de Minnesota por terem aberto as portas para mim e deixarem eu concretizar mais um sonho que foi estar nos Estados Unidos durante 8 meses. Presenciei momentos imagináveis e só consigo ser eternamente realizado com essa fase. Não daria para por aqui o nome de todos que foram partes essenciais nessa minha etapa, mas agradeço, em geral a todos por cada ensinamento.

Agradeço a Louis Dreyfus Company - Plataforma Sucos - a empresa que me abriu as portas e esta me proporcionando uma vivência incrível, mostrando de fato como é a dinâmica e diretrizes do mercado de trabalho. Estou muito feliz de iniciar minha carreira nessa Companhia ao lado de grandes Profissionais.

Enfim, agradeço a todos que direta e indiretamente contribuíram com a minha jornada em Ilha Solteira e com a minha formação acadêmica, saibam que levarei um pedaço de cada um, por toda a minha vida.

“O correr da vida embrulha tudo.
A vida é assim: esquenta e esfria,
aperta e daí afrouxa, sossega e
depois desinquieta.

O que ela quer da gente é
coragem.”

Guimarães Rosa

RESUMO

O Brasil é o segundo maior exportador e o terceiro maior produtor de milho. A produção do grão tem grande importância econômica e é a principal opção de plantio irrigado no inverno e primavera na região Noroeste Paulista, que conta com mais de 14 mil hectares irrigados sob sistema de pivô central. Para máximas produtividades e eficiência do uso da água cabe ao produtor de alimentos compreender a necessidade hídrica, quantificando o volume de água necessário durante o seu ciclo de desenvolvimento e para tanto, o conhecimento da evapotranspiração de referência e dos coeficientes de cultura ao longo do ciclo são fundamentais como estratégia de manejo quando a opção de controle é baseada via atmosfera. Assim, o objetivo desse trabalho foi determinar a necessidade hídrica total da cultura do milho no Noroeste Paulista, realizar o balanço hídrico e manejo da irrigação baseado no sistema de irrigação por aspersão e estimar a relação ET_a/ET₀ usando o modelo SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration). Foi possível analisar que a cultura cultivada no primeiro semestre requer um total de 310 mm com uma média de 2,43 mm/dia, calculado pelo método tradicional, e esse valor pode ser 14% maior se os coeficientes da cultura forem indicados pela equação GDac. Já no segundo semestre a média da ET_c é de no mínimo 3,65 mm/dia, e consequentemente a necessidade hídrica aumenta, ultrapassando os 480 milímetros totais em todos os cenários estudados. A necessidade hídrica através da água da chuva é comprovada nos dois ciclos produtivos. No que se refere a modelagem da relação ET_a/ET₀, o perfil da curva formada pelos valores determinados mostrou coerência com as curvas encontradas na literatura.

Palavras chave: Water need. Irrigation Management. SAFER. Irrigated Agriculture.

ABSTRACT

Brazil is the second largest exporter and the third largest producer of corn. The production of the grain has great economic importance and is the main option of irrigated planting in winter and spring in the state of São Paulo, which has more than 14 thousand hectares irrigated under a central pivot system. For maximum productivity and water use efficiency, it is the responsibility of the food producer to understand the water requirement, quantifying the high demand of water volume required during its development cycle and, therefore, knowledge of the reference evapotranspiration and crop coefficients throughout the cycle are fundamental as a management strategy when the control option is based via atmosphere. The objective of this work was to determine the total water requirement of the maize crop in the state of São Paulo, to perform the water balance and irrigation management based on the sprinkler irrigation system and to estimate the ET_a / ET₀ ratio using the SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration). It was possible to analyze that the crop cultivated in the first semester requires a total of 310 mm with a mean of 2.43 mm/day, calculated by the traditional method, and this value can be 14% higher if the culture coefficients are indicated by the equation GDac . In the second half of the year, the ET_c average is at least 3.65 mm/day, and consequently the water requirement increases, exceeding the total 480 mm in all the scenarios studied. The water requirement through rainwater is proven in both productive cycles. With respect to the modeling of the ET_a / ET₀ relation, the profile of the curve formed by the determined values showed coherence with the curves found in the literature.

Keywords: Corn crop. Evapotranspiration. Water need.Irrigation Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais produtores mundiais de milho do mundo.....	15
Figura 2. Localização da área de estudo.....	23
Figura 3. Fluxograma das etapas do método SAFER (2012) utilizando a superfície albedo, a superfície temperatura e do NDVI.....	27
Figura 4. Coeficientes da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no primeiro semestre do ano de 2016.....	32
Figura 5. Coeficiente da cultura obtidos por imagens de satélite durante o primeiro ciclo produtivo do milho.....	33
Figura 6. Comportamento da evapotranspiração de referência no primeiro ciclo da cultura.....	34
Figura 7. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no primeiro semestre do ano de 2016.....	35
Figura 8. Armazenamento de água no solo na cultura do milho semeado em 25 de março de 2016 utilizando os coeficientes de cultura (Kc) propostos pelo Boletim FAO 56 e os obtidos através da equação dos Graus-dias acumulados (GDac).....	36
Figura 9. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016.....	37
Figura 10. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016.....	38
Figura 11. Armazenamento de água no solo na cultura do milho semeado em 07 de agosto de 2016 utilizando os coeficientes de cultura (Kc) propostos pelo Boletim FAO 56.....	39
Figura 12. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016, área irrigada por carretel.....	40
Figura 13. Comportamento da evapotranspiração de referência no segundo ciclo da cultura.....	41

Figura 14. Coeficiente da cultura do milho irrigado obtidos pelos metodos FAO 56, GDac e algoritimo SAFER no segundo semestre do ano de 2016, carretel.....	41
Figura 15. Armazenamento de água no solo na cultura do milho semeado em 2 de setembro de 2016 utilizando os coeficientes de cultura (Kc) propostos pelo Boletim FAO 56.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização dos polígonos em estudo.....	23
Tabela 2. Fases fenológicas dos híbridos em estudo.	25

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Destaque Econômico	16
2.2	Fitologia e fatores agroclimáticos que atuam no cultivo do milho.....	17
2.3	Irrigação, evapotranspiração e uso da água.	18
2.4	Evapotranspiração atual (ET _a) definida pelo sensoriamento remoto .	20
3.	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	Identificação e caracterização da área em estudo	22
3.2	Estimativa da necessidade hídrica da cultura do milho.....	24
3.2.1	Equação Penman-Monteith.....	24
3.2.2.1	Coeficiente de cultivo (K _c) pelo método tradicional da FAO	25
3.2.2.2	Coeficiente de cultivo (K _c) pelo cálculo dos graus dias acumulados	26
3.3	Determinação da evapotranspiração atual ou real da cultura usando o modelo SAFER	26
3.3.1	Pré processamento	27
3.3.2	Radiância	27
3.3.3	Cálculo de reflectância	28
3.3.4	Albedo no topo da atmosfera	28
3.3.5	Albedo de superfície.....	29
3.3.6	Temperatura de superfície	29
3.3.7	Índice de vegetação de diferença normalizada - NDVI	29
3.3.8	Evapotranspiração em escala regional utilizando o algoritmo SAFER	30
3.3.9	Avaliação dos Resultados Obtidos.....	30
3.4	Balanço Hídrico	30

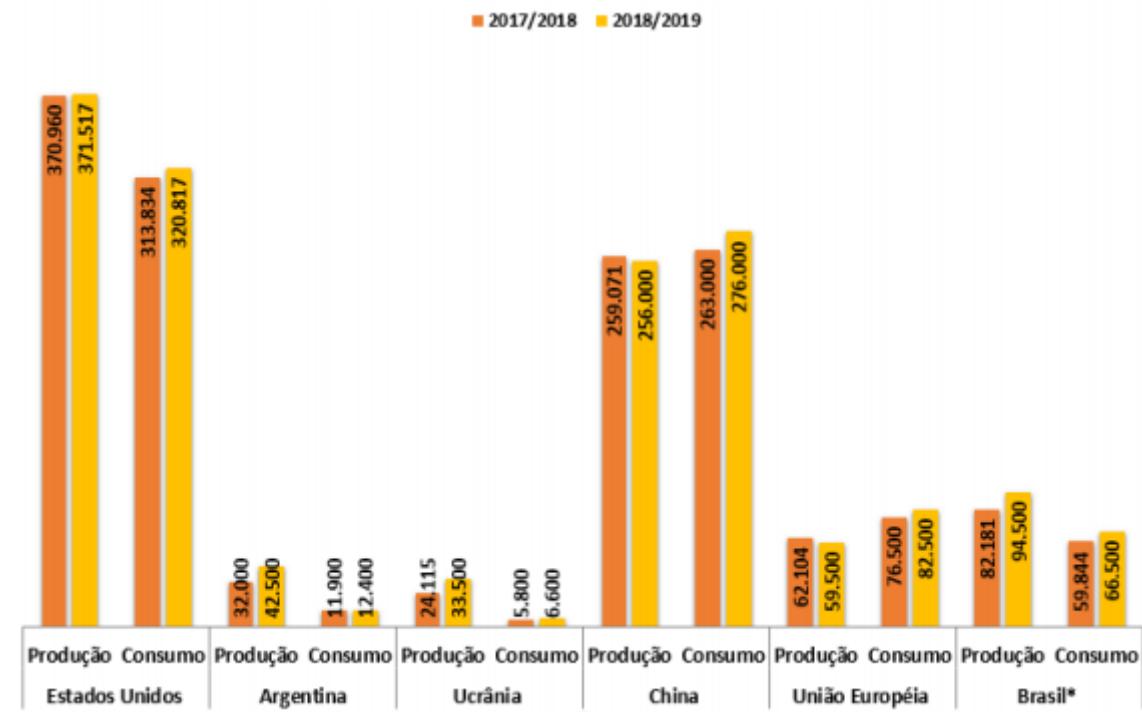
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5. CONCLUSÕES.....	42
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

Acredita-se que o milho é a planta comercial mais importante oriunda nas américas. Há indícios que a sua origem tenha sido na América Central ou no México, entre 8 e 10 mil anos atrás (PEIXOTO, 2014).

A produção de milho (*Zea mays L.*) é a de maior volume dentre os cereais no mundo, sendo 1,07 Bilhão de toneladas na safra 2017/2018. Os países responsáveis por essa produção são: Estados Unidos, China, Brasil e Argentina (CONAB, 2017) conforme apresenta o gráfico abaixo.

Figura 1. Principais produtores mundiais de milho do mundo em milhões de toneladas.



Fonte: CONAB (2019).

Visto a importância do grão e devido ao fato da cultura do milho expressar alta suscetibilidade a estiagens, a ocorrência de períodos com redução do aporte hídrico às plantas em períodos críticos do desenvolvimento da cultura torna a irrigação essencial na produção do milho.

A situação atual das culturas comerciais revela que a água vem sendo usada produtivamente, porém a falta de controle da água aplicada e erosão excessiva

proveniente de manejo de solo equivocados podem afetar de forma adversa a disponibilidade e qualidade da água, podendo em algumas micro bacias inviabilizar a expansão da agricultura irrigada (HERNANDEZ et al., 2011).

Perante a este contexto, Hernandez et al. (2011) afirmam que dados agrometeorológicos, sensoriamento remoto e sistema geográfico de informação podem melhorar o manejo da água para irrigação, bem como dos recursos hídricos de uma maneira geral, contribuindo para a agricultura irrigada cada vez mais sustentável, potencializando, ou ampliando, a produtividade da cultura, além de possibilitar melhorias na qualidade do produto, produção na entressafra, o uso mais intensivo da terra e a redução do risco do investimento feito na atividade agrícola.

O propósito desse trabalho foi determinar a necessidade hídrica total da cultura do milho no Noroeste Paulista nos dois ciclos produtivos, realizar o balanço hídrico e manejo da irrigação baseado no método de irrigação por aspersão e estimar a relação ET_a/ET₀ usando o modelo SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration) a fim de gerar indicadores que sejam base para se praticar cada vez mais a sustentabilidade na produção de alimentos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Destaque Econômico

A cultura do milho é produzida em grande volume no mundo. Esse fator ocorre devido as diversas utilizações do cereal, sendo assim, a maior parte do milho gerado é destinado para nutrição animal, alimentação humana e é matéria prima para vários processos da indústria alimentícia e de bebidas, além de ser uma importante matriz energética na produção de biocombustíveis como o etanol (CONAB, 2017).

A Conab (2018) afirmou que, o milho, é o grão mais produzido no mundo, resultando em 42% de todos os grãos gerados, sendo o arroz e o trigo representado por um percentual de 30 e 18 % respectivamente. E, ainda segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2019), espera-se que na safra 2018/2019, o Brasil seja responsável por 90,4 milhões de toneladas ocupando uma área de mais de 16 milhões de hectares para o cultivo da cultura tendo grande importância no cenário mundial pois é o terceiro maior produtor e o segundo maior exportador de milho.

Segundo Teixeira et al. (2013) na região Sudeste do Brasil, o milho é uma das principais culturas que tem sido cultivada em dois períodos durante o ano, com plantios de primeira safra entre os meses de outubro e novembro, no início das chuvas, enquanto que os de segunda safra ocorrem em fevereiro ou março, podendo a produção ser destinada tanto para o consumo humano ou para alimentação de animais.

É fato, que a cultura de milho é classificada como uma das culturas prioritárias na região sudeste do País, assim faz se necessário o conhecimento a fundo dos sistemas de cultivo e as tecnologias aplicadas em fazendas comerciais do milho grão e silagem para o manejo eficiente com resultados satisfatórios.

2.2 Fitologia e fatores agroclimáticos que atuam no cultivo do milho

O milho (*Zea mays L.*) é uma gramínea originária da América Central, e pode atingir até 2 metros até dois metros de altura originando uma planta com média entre 600 a 1000 sementes (EMBRAPA, 2015).

A cultura é fisiologicamente classificada com rotas metabólicas tipo C4, sendo altamente dependente de sua estrutura e extensão foliar, e pode ser cultivada desde o nível do mar até 3.600 metros de altitude e a temperatura média noturna acima de 12º C e média diurna superior a 19º C com capacidade de elevar ao máximo a interceptação da radiação fotossinteticamente (MAGALHÃES, 2015).

A cultura exibe alta sensibilidade a estiagens, e assim, a ocorrência de períodos com redução do aporte hídrico às plantas em períodos críticos do desenvolvimento da cultura, que compreende do florescimento à maturação fisiológica, pode ocasionar redução direta na produção final (BERGAMASCHI, et al., 2006).

Hernandez et al. (2003) descreve que o déficit hídrico na cultura do milho propicia diversos aspectos que implica na redução da produtividade, ou seja, com a falta de água ocorre uma redução do seu conteúdo de água e do seu potencial hídrico, resultando em perda de turgescência, fechamento dos estômatos, redução do crescimento e assim os cultivos de entressafra ou até mesmo safrinha sem o uso de irrigação pode provocar riscos ao produto final.

De tal modo, de acordo com a Ageitec (2018) o milho é cultivado em terras cuja precipitação varia de 250 a 5.000 mm anuais, sendo que a quantidade de água

consumida por uma planta de milho durante o seu ciclo está em torno de 600 mm e dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, quatro a oito dias diminuem em mais de 50%.

2.3 Irrigação, evapotranspiração e uso da água.

A irrigação é realizada desde as antigas civilizações, principalmente aquelas que se desenvolveram em regiões mais secas, como Egito e Mesopotâmia. Atualmente são aproximadamente 310 milhões de hectares irrigados, com um potencial de mais de 200 milhões de hectares em todo o mundo. A China e a Índia possuem 70 milhões de hectares irrigados aproximadamente cada, os Estados Unidos com 27 milhões de hectares e seguidos vem o Paquistão com 20, milhões de hectares e Irã, aproximadamente 8,7 milhões de hectares (ANA, 2017).

No Brasil a agricultura irrigada iniciou-se por volta de 1900 no Rio Grande do Sul, em que era cultivado o arroz, se intensificando em todo o país por volta de 1970 e 1980. A ANA (2017) aponta que o Brasil está entre os 10 países com maior área irrigada, com aproximadamente 6,95 milhões de hectares, com uma estimativa de aumento de área para 10,09 milhões de hectares em 2030. Ainda de acordo com a ANA (2017) o sudeste do Brasil é a região que possui maior área irrigada, ocupando 2,7 milhões de hectares, sendo 1,3 milhões de hectares localizados no estado de São Paulo.

O uso de sistemas de irrigação é a base para melhorar o manejo da produção, além de auxiliar na potência da oferta dos insumos aos cultivos, cumprindo um crescente e fundamental papel na produção agrícola e pecuária (ANA, 2017).

A prática é utilizada para complementar a disponibilidade da água provida naturalmente pela precipitação, proporcionando ao solo teor de umidade suficiente para suprir as necessidades hídricas das plantas contribuindo ainda para reduzir a expansão de plantios em áreas com cobertura vegetal natural, diminuir os riscos contra a seca, além de proporcionar a colheita fora de época e a flexibilização da produção.

Bernardo et al. (2011) descrevem que o método de irrigação é a forma pela qual a água pode chegar até a cultura, sendo quatro métodos: superfície, localizado, aspersão e subterrânea. Para cada método de irrigação, tem-se sistemas de irrigação específicos, que é o conjunto de equipamentos que irá permitir o ato de

irrigar, sendo composto em geral por uma estação de bombeamento, um sistema de transporte, um sistema de distribuição, um sistema de aplicação de campo e um sistema de drenagem (FAO, 2016).

A decisão de irrigar deve ser tomada a partir de alguns fatores, tendo como os principais: a quantidade e distribuição da chuva, a qualidade e disponibilidade de água da fonte, o efeito da irrigação na produção e a necessidade de água.

Tomando por base as premissas para irrigar ou não Hernandez et al. (2003) apresenta elevadas probabilidades da falta de água das chuvas na região Noroeste Paulista do Estado de São Paulo para o cultivo de culturas e devido a isso, a irrigação torna-se uma prática eficaz para o acréscimo agronômico e, além disso, Squizato et al. (2018) defende que a região tem um forte potencial para a expansão da agricultura irrigada devido as condições de relevo favoráveis e a oferta de água.

Em relação a ao efeito da execução da agricultura irrigada na cultura do milho, ALBUQUERQUE (2010) apresenta que a adoção de sistemas de irrigação pode proporcionar um aumento da produtividade de 57% dependendo das condições de temperatura, sendo a maior necessidade por água entre o momento do florescimento e enchimento de grãos.

As áreas de milho irrigadas tende a ser de grandes extensões, resultando em um manejo da irrigação, geralmente, via atmosfera e este processo envolve conceitos relacionados a evapotranspiração (ET). E de acordo com Allen et al. (1998), a evapotranspiração é definida como a conjunção dos processos de transferência de água para a atmosfera, sendo da superfície do solo por evaporação, e da vegetação por transpiração.

É possível a quantificação da evapotranspiração de referência (ETo), possibilitando conhecer os potenciais hídricos diários, mensais e anuais de uma região, necessária para satisfazer as necessidades reais hídricas das culturas a serem implantadas.

A recomendação da ETo é uma dificuldade partilhada por várias ciências que a estudam e consiste em uma diversidade de métodos que ocorre devido à complexidade da transferência da água do sistema solo-planta para a atmosfera e é dependente principalmente da quantidade de energia solar que chega a superfície do solo, com isso os diferentes climas presentes no mundo se da à dificuldade de obtenção dos elementos meteorológicos necessários para a alimentação destes métodos.

No entanto, existem diversas metodologias para o cálculo da ETo e tais métodos vão desde os mais simples, com base empírica, até aqueles que apresentam embasamento físico consistente sobre o fenômeno.

Depois de rigorosas verificações do método, Allen et al. (1998), constataram que o método de estimativa Penman-Montheith modificado pela FAO representa de maneira solida o fenômeno biofísico da evapotranspiração e pode ser estimado pelos elementos metereológicos encontrados em uma estação metereológica. A ETo é a evapotranspiração de uma extensa superfície vegetada com vegetação rasteira, em crescimento ativo, sem restrição hídrica, com isso, a ETo depende apenas das variáveis meteorológicas.

Já a evapotranspiração de cultura (ETc), é a evapotranspiração de uma cultura em dada fase de seu desenvolvimento - sem restrição hídrica -, em condições ótimas de crescimento. Assim a ETc depende das condições meteorológicas, expressas por meio da ETo, do tipo de cultura e da área foliar.

O Coeficiente de cultura (Kc) nada mais é que um índice que relaciona a evapotranspiração de uma cultura (ETc) com a evapotranspiração da cultura de referência (ETo).

Portanto, o Kc é variável de acordo com o ciclo da cultura, ou seja, ao ponto que a planta se desenvolve a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação vai aumentando até atingir o ponto de maturação, sofrendo alterações em seus coeficientes. Os valores de Kc podem variar de um local para outro e de um clima para outro pois depende diretamente da textura e o teor de umidade do solo, com a profundidade e densidade radicular e com as características fenológicas da planta.

Assim, quantificação da água evapotranspirada num sistema solo-planta-atmosfera, torna-se uma informação primordial nos projetos de irrigação, determinando o sucesso do empreendimento, tanto economicamente quanto em termos ambientais (OLIVEIRA; CARVALHO, 1998), pois a captação e elevação de agua exigem alto investimento em equipamentos e grande consumo de energia.

2.4 Evapotranspiração atual (ETa) definida pelo sensoriamento remoto

Hoje em dia o uso de modelos agrometeorológicos, baseados em dados de sensoriamento remoto, tanto em escala regional quanto local, tem-se mostrado

bastante promissores para a agricultura, sendo possível a manipulação de um elevado numero de dados associados com resultados precisos.

Algoritmos têm sido desenvolvidos com o uso de dados de sensoriamento remoto adquiridos por sensores a bordo de plataformas orbitais e sub-orbitais, de modo a estimar espacialmente a ET_a, K_c e outros indicadores de desempenho do uso da agua.

Conforme descreve ALLEN et al. (1998), a evapotranspiração atual corresponde a evapotranspiração de qualquer cultura em qualquer estádio fenológico, podendo estar sofrendo ou não limitação hídrica ou outro fator que impeça a sua taxa potencial e tal limitação se dá devido à ocorrência de pragas e doenças, salinidade do solo, baixa fertilidade do solo, deficiência ou excesso de água no solo, sendo então que a ET_a deve caracterizar a demanda evaporativa determinada pela condição meteorológica, enquanto o K_c seria a medida da restrição imposta pelo sistema solo-planta para atender tal demanda hídrica e com isso os coeficientes de culturas devem ser, portanto, determinados para cada estádio de desenvolvimento da cultura.

Diferentes métodos foram criados, como métodos residuais do balanço de energia, que combinam algumas relações empíricas com modelos físicos e que utilizam dados de geoprocessamento para estimar parâmetros de entrada dos modelos, como o método de SEBAL (BASTIAANSSEN, 1998) e o de Teixeira (2010), posteriormente batizado como SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) em Teixeira et al. (2012 a,b).

A estimativa de evapotranspiração através de imagem de satélite também tem suas limitações, devido a grande área tomada para a obtenção deste parâmetro mas elenca que uma das vantagens da estimativa da evapotranspiração através de imagens de satélite é a obtenção deste valor tomado pixel a pixel, e com isso, os valores de evapotranspiração poderão ser extrapolados para uma área maior ou até uma região, o que não acontece com dados locais.

No algoritmo SAFER, a determinação da evapotranspiração atual foi desenvolvida e validada envolvendo tanto as culturas irrigadas, como as de vegetação natural, aproximando melhor da evapotranspiração real (TEIXEIRA et al, 2013a; TEIXEIRA et al, 2013b).

O SAFER possui uma parametrização mais simples que outros algoritmos, necessitando de dados remotos de albedo, NDVI (*Normalized Difference Vegetation*

Index) e temperatura, e também de dados de evapotranspiração de referência (ETo), radiação global (Rg) e temperatura média do ar (Ta) obtidos através de estações agrometeorológicas para juntamente com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, chegar ao balanço de energia incluindo a evapotranspiração (ET) que pode ser utilizada como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes culturas, ao definir corretamente a relação ET/ETo ou coeficiente de cultura.

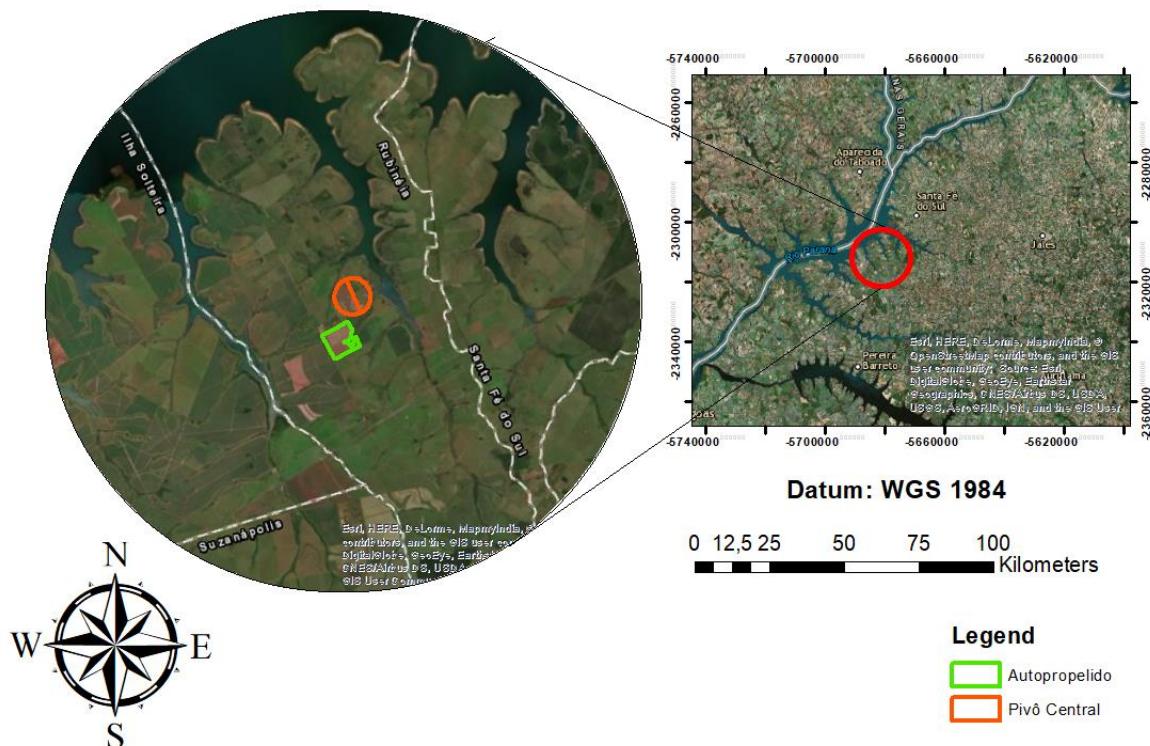
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Identificação e caracterização da área em estudo

Este estudo foi conduzido em áreas irrigadas comerciais na região Noroeste Paulista onde estão presentes sistemas de irrigação do tipo pivô central e carretel enrolador, tendo como centro da área de interesse as coordenadas 20° 41' 40" S e 50° 59' 02" O (Figura 2).

A região de estudo apresenta déficit hídrico prolongado ao longo de oito meses por ano e a maior taxa de evapotranspiração de referência (ETo) do Estado de São Paulo, com suscetibilidade a veranicos. Segundo Köppen, o clima da região é classificado como Aw, apresentando temperatura média anual de 24,5 °C, e umidade relativa do ar média de 64,8% (DAMIÃO et al. 2010; SANTOS et al., 2010; HERNANDEZ et al., 1995; HERNANDEZ et al., 2003), ainda que tenha uma precipitação anual média histórica (1967-1994) de 1232 mm (HERNANDEZ et al., 1995) ou de 1.354 mm (DAMIÃO et al, 2010) no período de 2000 a 2010.

Figura 2. Localização da área de estudo.



Fonte: próprio autor.

Tabela 1. Localização dos polígonos em estudo.

Sistema de Irrigação	Longitude (X)	Latitude (Y)	Área Irrigada (ha)	Município
Pivô central	496609	7753176	90	Rubinéia
Carretel	496609	7753176	70	Rubinéia

Fonte: Google Earth Pro, 2017.

O estudo foi feito com imagens do ano de 2016 obtidas do Landsat 8, as imagens utilizadas do sensor Operacional Terra Imager (OLI) do Landsat 8 foram adquiridas do U.S. Geological Survey (www.usgs.gov).

3.2 Estimativa da necessidade hídrica da cultura do milho

Após a identificação das áreas de milho, construção dos polígonos, visita em campo para confirmação do alvo, obtenção de informações adicionais sobre idade e os sistemas de irrigação, foi aplicado o método tradicional de estimativa da evapotranspiração potencial da cultura pelo método da FAO 56 (Allen et al. ,1998) através da Equação 1. Sua determinação pode ser dada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente de cultura (Kc), que varia de acordo com o tipo de cultura e seu estádio fenológico.

$$ETc = ETo * Kc \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

ET_c = evapotranspiração da cultura (mm/dia);

ETo = evapotranspiração de referência (mm/dia);

K_c = coeficiente de cultura (adimensional) - FAO 56 (ALLEN et al, 1998).

E a evapotranspiração da cultura (ET_c) obtida nestes casos representará a potencial, ou o máximo consumo de água, a partir dos coeficientes de cultura determinado experimentalmente e foi comparado com os obtidos na modelagem baseada em sensoriamento remoto com o algoritmo SAFER.

3.2.1 Equação Penman-Monteith

. A evapotranspiração de referência representa o consumo potencial de uma cultura de referência (grama batatais) sem restrição de água e nutrientes, selecionada para propósitos comparativos sob dadas condições meteorológicas, com adequados tratos e foi obtida na Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista operada pela ÁREA DE HIDRÁULICA E IRRIGAÇÃO DA UNESP ILHA SOLTEIRA.

Para o cálculo da evapotranspiração, utilizou-se da equação de Penman-Monteith (Equação 2). Esta proporciona um valor padrão e pode-se checar a evapotranspiração em diversos períodos do ano ou em outras regiões, assim como também se poderia relacionar com a evapotranspiração de diferentes cultivos (ALLEN et al., 1998).

$$ETo = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

ETo = Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

R_n = Radiação neta na superfície do cultivo (MJ m⁻² dia⁻¹).

G = Fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹).

T = Temperatura média do ar a 2 m de altura (°C).

U2 = Velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹)

es = Pressão do vapor de saturação

a_e = Pressão real do vapor (kPa).

$\text{es} - \text{ea}$ = Déficit da pressão de vapor (kPa).

Δ = Pendente da curva de pressão de vapor ($\text{kPa} \ ^\circ\text{C}^{-1}$).

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa} \ ^\circ\text{C}^{-1}$).

3.2.2.1 Coeficiente de cultivo (Kc) pelo método tradicional da FAO

Para a determinação de Kc das fases fenológicas da cultura foi seguido os recomendados por Allen et al. (1998).

Os coeficientes de cultura basais recomendados por Allen et al. (1998) para a cultura do milho são 0,4; 1,2 e 0,6 para as fases inicial e intermediária e para o final do ciclo, respectivamente. Para efeito do cálculo dos Kc, o ciclo da cultura foi dividido em cinco fases fenológicas, definidas por meio de observações em campo pelo acompanhamento do crescimento das plantas da forma descrita por Allen et al. (2006): I) fase inicial: do plantio até 10% de cobertura do solo - (semeadura-emergência); II) fase de crescimento: desenvolvimento vegetativo; III) fase intermediária: florescimento; IV) início da maturação dos frutos, (produção-enchimento dos grãos); IV) fase final: maturação até a colheita dos frutos (maturação-colheita) conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2. Fases fenológicas dos híbridos em estudo.

Hibrido	Plantio	Colheita	Ciclo	Fases				
				I	II	III	IV	V

PRO2-AS-1555 Agroeste	25/03/2016	30/07/2016	1º Semestre	15	53	93	113	128
30A37	07/08/2016	19/12/2016	2º Semestre	15	62	102	122	135
30A37	02/09/2016	06/01/2017	2º Semestre	15	58	98	118	127

Fonte: FAO 56 (ALLEN et al, 1998), adequado aos híbridos em estudo.

3.2.2.2 Coeficiente de cultivo (Kc) pelo cálculo dos graus dias acumulados

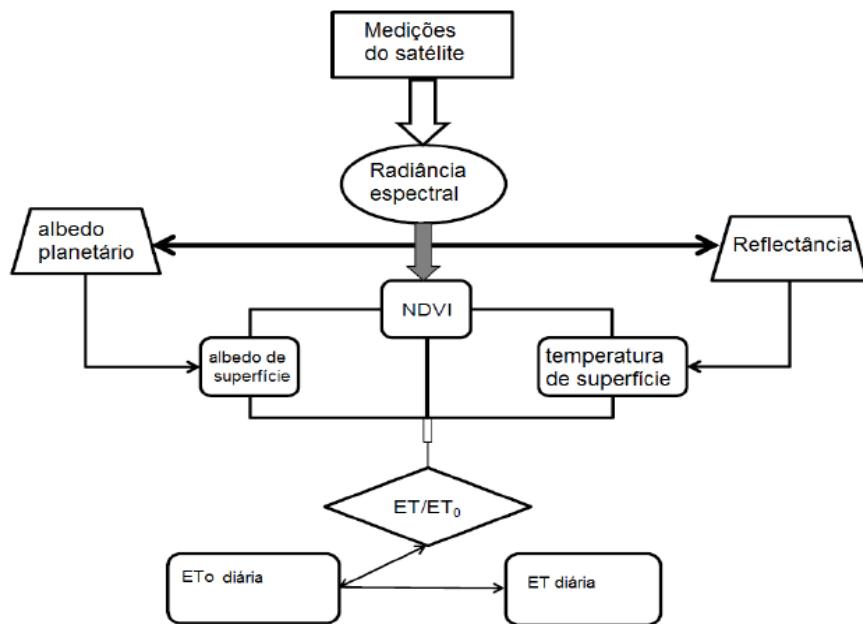
Além do método tradicional para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc), usando os coeficientes de cultura (Kc) do milho descritos por ALLEN et al.(1998), também foi calculada a ETc utilizando os Kc do milho determinados a partir do método dos Graus-dias acumulados (GDac) conforme a Equação 3 descrita por Teixeira et al. (2014), utilizando 10°C como temperatura basal (TEIXEIRA et al., 2013).

$$Kc = -5 \cdot 10^{-7} \text{ GD}_{\text{ac}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ GD}_{\text{ac}} + 0,46 \quad (\text{Equação 3})$$

3.3 Determinação da evapotranspiração atual ou real da cultura usando o modelo SAFER

Utilizou-se o modelo SAFER, este método que se baseia na modelagem da relação ET_a/ET₀ (Coeficiente de cultura atual), que utiliza para o cálculo, os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), não tendo a necessidade de se identificar os extremos representados pelos pixel frio e quente, sendo a implementação baseada em Teixeira (2010), porém o coeficiente de “a” com valor de 1 (Hernandez et al., 2012; Hernandez et al., 2013 e Teixeira et al., 2013) e o coeficiente de “b” sendo com valor de -0,008, obtido por Teixeira (2010) e com fluxograma na Figura 2 e as imagens de satélite fornecem um excelente meio para determinar e mapear a estrutura espacial e temporal da ET_a.

Figura 3. Fluxograma das etapas do método SAFER (2012) utilizando a superfície albedo, a superfície temperatura e do NDVI.



Fonte: Teixeira et al, 2012.

3.3.1 Pré processamento

Antes de iniciar o processamento e aplicação do algoritmo SAFER, as imagens passaram por correções geométricas e calibrações radiométricas, segundo Silva et al., (2012) para produtos do Landsat 8, adaptadas de produtos Landsat 5.

Após tais correções, foi iniciado o processamento das imagens para aplicação do modelo.

3.3.2 Radiância

Para converter os valores quantizados e calibrados (DN) do sistema sensor LANDSAT 8 OLI para radiância e reflectância espectral, utiliza-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens. Inicialmente correções atmosféricas foram realizadas com posterior conversão dos valores digitais em radiância espectral (ARIZA, 2013 e VANHELLEMONT E RUDDICK, 2014) para cada banda por meio da equação:

$$L\lambda = M_L Q_{cal} A_L \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

ML = fator multiplicativo de dimensionamento específico

AL = fator aditivo de dimensionamento específico

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

Sendo a Radiância (L_λ) a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$) conforme apresenta a Equação 4.

3.3.3 Cálculo de reflectância

A reflectância (p_λ) é calculada para cada banda a partir dos valores de radiância obtidos na etapa anterior, sendo a reflectância o processo pelo qual a radiação “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água, ou um solo exposto, conforme Equação 5.

$$p_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda}{ESUN_\lambda * \cos Z * E_0} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

L_λ = radiância de cada banda

$ESUN_\lambda$ = irradiância Espectral no Topo da Atmosfera.

$\cos Z$ = ângulo zenital

E_0 = ângulo diário

Sendo que E_0 é definidor por (Equação 6):

$$\begin{aligned} E_0 = & 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280 \sin(da) \\ & + 0,000719 \cos(2 * da) + 0,000077 \sin(2 * da) \end{aligned} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

da = ângulo diário. E da é definido por (Equação 7):

$$da = (d_n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: d_n = dia Juliano da imagem

3.3.4 Albedo no topo da atmosfera

A obtenção do albedo planetário é, de acordo com a Equação 8:

$$\alpha_{top} = \sum(\omega_\lambda * \rho_\lambda) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

ρ_λ = reflectância

ω_λ = coeficiente para cada banda

Sendo ω_λ obtido pela Equação 9:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (\text{Equação 9})$$

3.3.5 Albedo de superfície

As informações sobre o albedo de superfície e temperatura de superfície foram obtidos pela Equação 10 utilizando os coeficientes de Teixeira (2010):

$$\alpha_o = 0,7 * \alpha_{top} + 0,06 \quad (\text{Equação 10})$$

Assim:

α_{top} = Albedo no topo da atmosfera, obtido na equação 8.

3.3.6 Temperatura de superfície

Para elaborar a carta de temperatura da superfície, utilizou-se a imagem do canal do infravermelho termal das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 μm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51) do sensor TM do satélite Landsat - 8, com resolução espacial de 30 metros.

A temperatura de superfície foi calculada conforme a Equação 11:

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

Onde T_{brilho} é a temperatura média de brilho obtida pela média aritmética de T_{bright} calculada para as bandas 10 e 11 conforme a equação abaixo (Equação 12).

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_6+1}\right)} \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo:

L_6 = a radiância espectral (L_λ); das bandas 10 e 11

3.3.7 Índice de vegetação de diferença normalizada - NDVI

Em seguida foram calculados os dados de NDVI (Equação 13):

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_5)}{(\rho_4 + \rho_5)} \quad (\text{Equação 13})$$

Em que:

ρ_4 = reflectância da banda 4 - banda no vermelho

ρ_5 = reflectância da banda 5 - infravermelho próximo

3.3.8 Evapotranspiração em escala regional utilizando o algoritmo SAFER

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI, foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET_a/ET₀ (Equação 14).

Onde para o coeficiente “a” foi utilizado o valor de 1,0 (HERNANDEZ et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2013) e o coeficiente “b” foi obtido por Teixeira (2010) correspondendo ao valor de -0,008.

$$\frac{ET_a}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (\text{Equação 14})$$

Em seguida os valores instantâneos dessa relação são então multiplicados pelos valores diários da ET₀, chegando assim à ET_a, conforme a Equação 15:

$$ET_a = \frac{ET_a}{ET_0} * ET_0 \quad (\text{Equação 15})$$

3.3.9 Avaliação dos Resultados Obtidos

Após a obtenção das imagens, estas foram exportadas do software Ilwis 3.3 Academic e Arc Gis®10, onde foram obtidos os valores médios dos parâmetros biofísicos que compõem a evapotranspiração atual, ou real, e ao relação ET_a/ET₀, para a área total de estudo.

3.4 Balanço Hídrico

A Capacidade de Água Disponível (CAD), é definida como a diferença entre a umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, multiplicada pela profundidade efetiva do sistema radicular e a densidade dos solos. Neste estudo, a CAD adotada para os cálculos foi de 40 mm considerando o plantio sobre um Argissolo e a profundidade efetiva média do sistema radicular conforme recomenda a Embrapa (2015).

O balanço hídrico foi feito ao nível de raízes diariamente considerando as duas datas de plantio (25/03/2016 e 07/08/2016) pelo sistema de irrigação do tipo pivô central e também pela área irrigada com o carretel no segundo semestre do ano (inicio 02/09/2016). A simulação teve como estratégia realizar diariamente o balanço hídrico e a reposição através da irrigação teve o turno de rega variável, mas sempre mantendo o armazenamento de água no solo superior à 50%, para uma CAD - Capacidade de Água Disponível de 40 mm, considerando a profundidade efeitiva do sistema radicular de 40 centímetros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A necessidade hídrica de uma cultura é condicionada pelo clima e pelo coeficiente da cultura. O primeiro é representado pela ETo e o segundo pelo Kc ou pela relação ETa/ETo, no modelo SAFER. O Kc é influenciado pelo ciclo da cultura e suas fases fenológicas que pode ser expresso pelo coeficiente de cultura. A época escolhida para plantio faz a diferença no armazenamento de água no solo, pois influenciará na ETo, no regime das chuvas e, consequentemente, na necessidade de irrigação ena extração pela cultura expressa pela ETc.

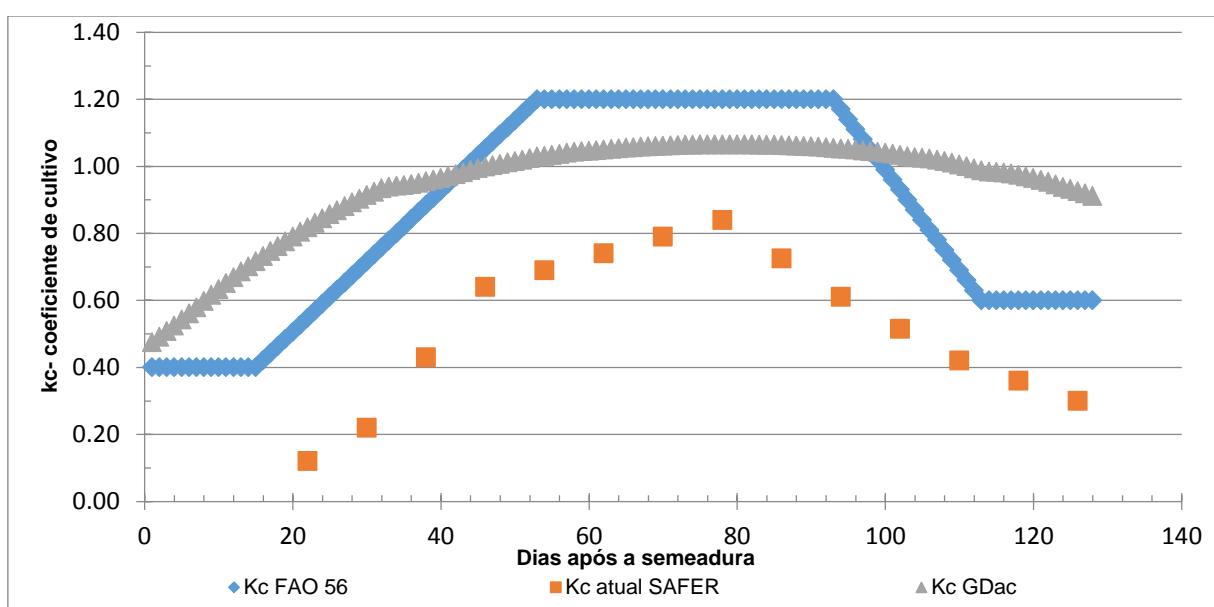
A Figura 4 apresenta o comportamento dos coeficientes da cultura (Kc) calculados no primeiro semestre, entre março e julho do ano de 2016, de acordo com Allen et al. (1998), pela metodologia dos GDac e a relação ETa/ETo obtida pelo modelo SAFER. Analisando a mesma figura, o comportamento da curva do Kc por Allen et al. (1998) se mantem em 0,4 nos primeiros 20 DAS no estádio inicial, variando de 0,4 a 1,2 no desenvolvimento vegetativo e mantendo-se em 1,2 no estádio do florescimento e enchimento de grãos até que de 1,2 diminui até 0,6 quando a cultura passa pelo estadio da maturação. A duração das fases para o híbrido cultivado neste ciclo (PRO2-AS-1555 Agroeste) foram respectivamente 15, 38, 40 e 15 dias de acordo com as fases citadas acima.

Já o método dos Graus-dias acumulados (GDac) conforme a Equação 3 descrita por Teixeira et al. (2014), utilizando 10°C como temperatura basal é possível identificar um Kc maior nos estádios iniciais e finais a partir de valores de 0,47 e 0,91

respectivamente porem, na fase do desenvolvimento vegetativo há uma diminuição no valor do kc de aproximadamente 1,05.

O emprego de variáveis meteorológicas que influenciam o crescimento e o aumento das plantas permite determinar a duração das fases fenológicas. A caracterização de cada uma dessas fases pode se dar com a utilização dos graus-dias, ou seja, o acúmulo diário da energia, sendo necessário apenas a temperatura mínima exigida em prol temperatura base inferior. Com isso é possível obter as fases da cultura, obtendo durante suas diferentes fases fenológicas, e relacioná-la com o momento e lâmina de irrigação.

Figura 4. Coeficientes da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no primeiro semestre do ano de 2016.

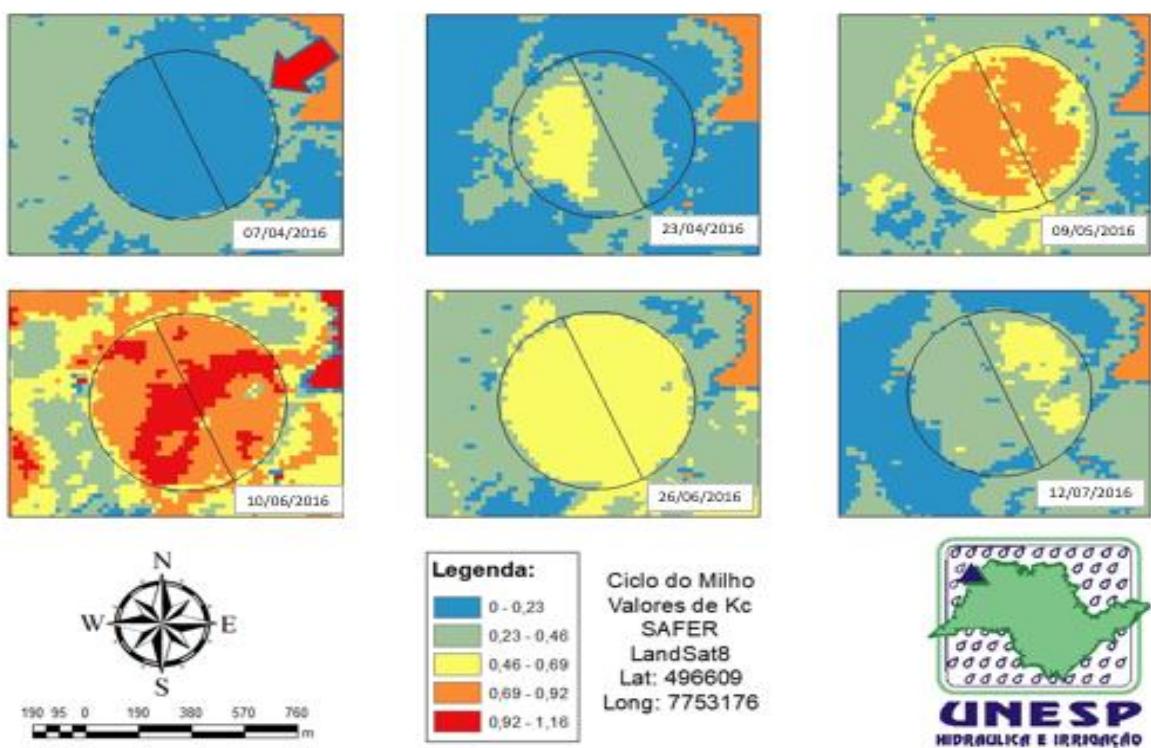


Na Figura 4 e também na Figura 5, são apresentados os valores de Kc, considerados como ET_a/ET₀ média dos pixels na área em estudo. Devido ao plantio do milho acontecer em datas diferentes, foi considerado apenas metade do pivô, ou seja, 45 hectares de 90 hectares, para a obtenção dos números, indicado na Figura 5 pela seta vermelha. Entre os diferentes estádios de cultivo, o valor estava entre 0,12 e 1,2. Tais valores estão de acordo com Teixeira et al., 2014, em que aplicou o algoritmo SAFER ao satélite Landsat durante as estações de crescimento de março a agosto de 2010, em uma região próxima a área de estudo.

A divergência entre os valores indicados na relação ET_a/ET₀ pelo método SAFER quando comparados com outros dois métodos estudados, FAO e GDac, indicam que o plantio não atingiu seu máximo potencial, pois como os valores estimados pelo modelo SAFER são inferiores ao estimado pelo tradicional FAO 56 e GDac, podemos inferir que ocorreram problemas que geraram algum tipo de estresse à cultura, sendo este de natureza hídrica ou fitossanitária, fatores limitantes de solo, nutrição da cultura ou ainda necessidade de ajustes no algoritmo.

A divergência entre os modelos SAFER e GDac em relação ao FAO 56 pode se dar ainda por divergência entre o material genético utilizado e o clima da região, uma vez que os valores de K_c disponíveis em Allen et al. (1998) foram estimados na em região diferente do estudo em questão.

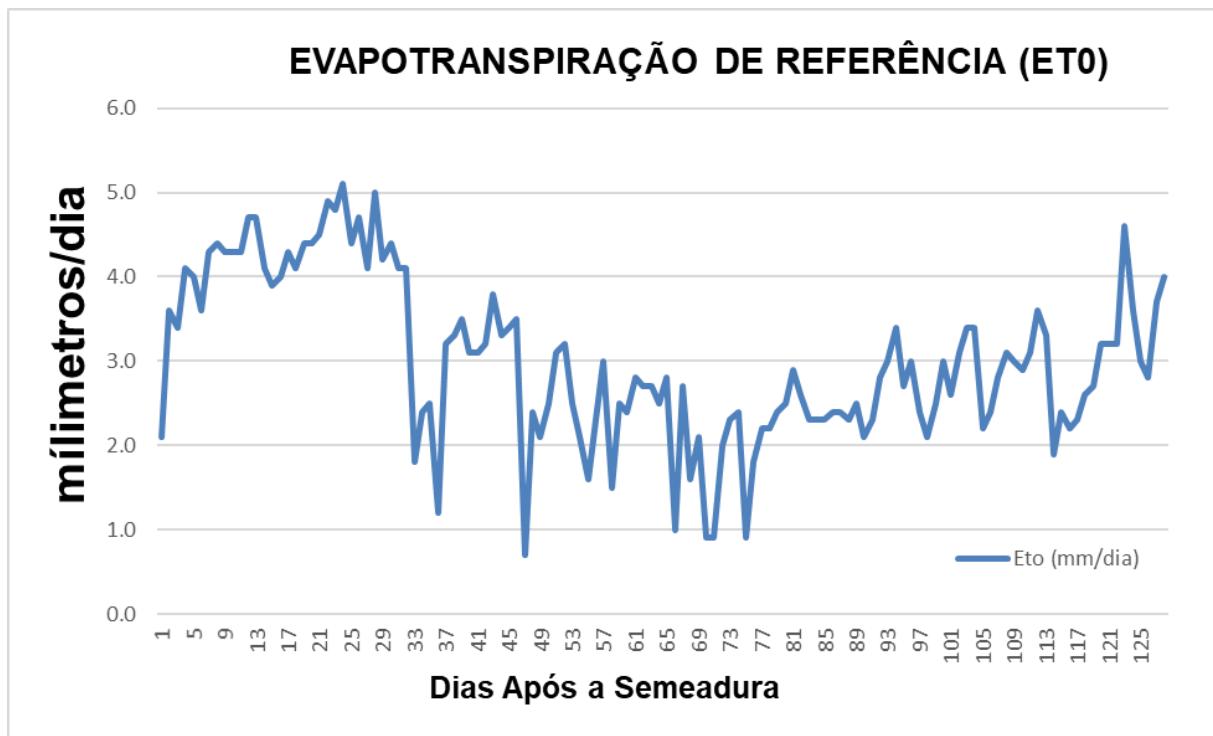
Figura 5. Coeficiente da cultura obtidos por imagens de satélite durante o primeiro ciclo produtivo do milho.



Fonte: próprio autor.

A Figura 6 expressa a variação da ETo em função da época de semeadura, com o plantio realizado em 25 de março de 2016 submetido à uma exigência climática de 386 mm sendo em média 3 mm/dia.

Figura 6. Comportamento da evapotranspiração de referência no primeiro ciclo da cultura.



Fonte: Canal CLIMA. Ilha Solteira: UNESP (2016).

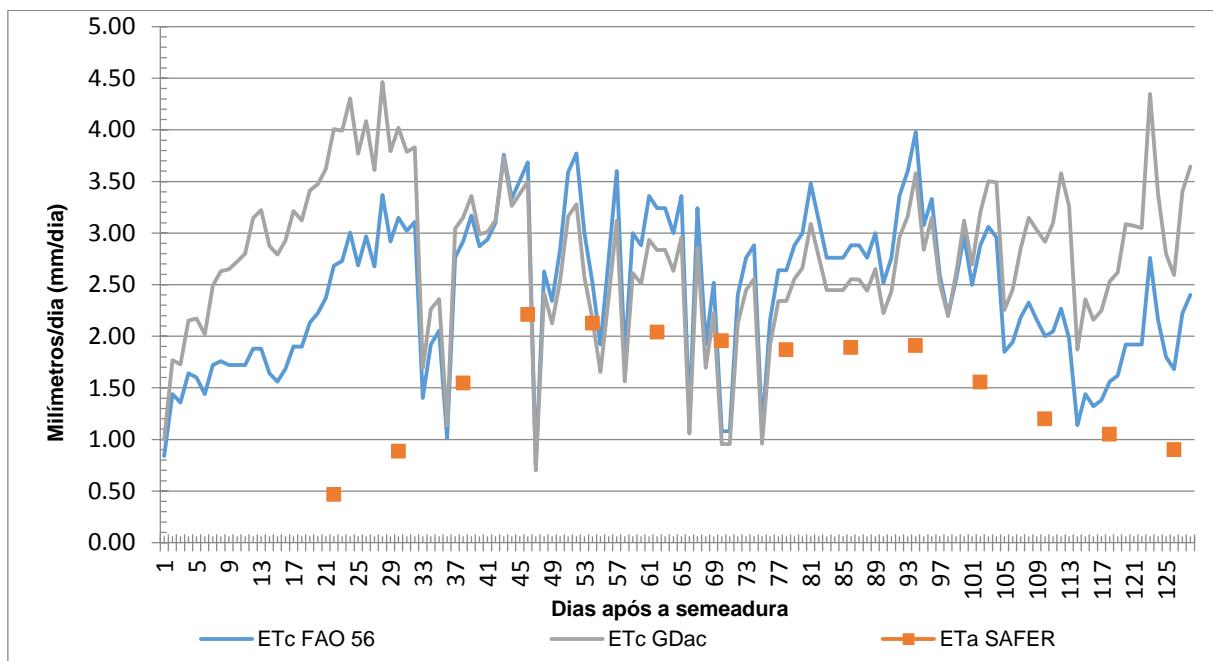
Sendo assim, durante o ciclo da cultura do milho, a ETc apresentou a quantidade de 311 milímetros quando calculado utilizando o Kc indicado pela FAO, enquanto o demanda hídrica utilizando o Kc pelo método Graus-dias acumulados (GDac) se mostrou 14% maior, ou seja, 353 milímetros.

Tal diferença pode ser notada conforme mostra a Figura 6, em que nos primeiros dias após a semeadura é tido uma temperatura média de 28º C totalizando uma média de 3,1 milímetros/dia a ETc GDac, ou seja, devido a incidencia de uma alta temperatura os valores Kc e ETo foram maiores. Por outro lado, pelo método FAO, a média é de 1,9 milímetros/dia, durante o período. A partir do trigésimo quarto dia até o final do ciclo se tem uma média de temperatura média de 21º C e a ETc verificada pelos dois métodos se mantem semelhantes.

Podemos inferir então que quando ocorre um registro de altas temperaturas em determinado periodo de tempo, os valores de Kc tendem a sofrer alterações que

só serão identificadas se o mesmo for quantificado pelo método GDac ou método de modelagem com o auxílio do sensoriamento remoto.

Figura 7. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no primeiro semestre do ano de 2016.



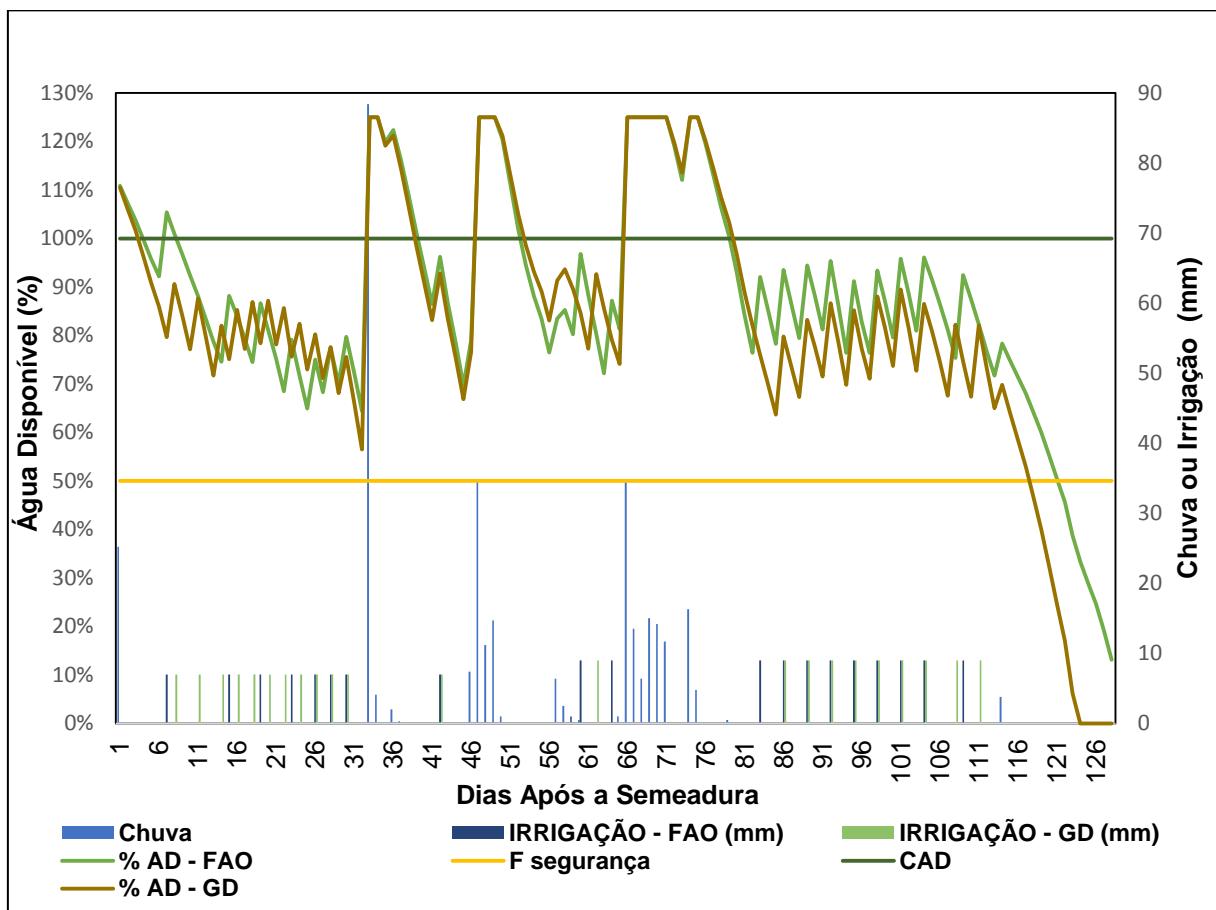
A necessidade hídrica da cultura ficou em média 2,4 mm/dia e pelo método GDac totalizou 2,7 mm/dia. A Evapotranspiração atual, também obtida por imagens de satélite, se mostrou em média 1,54 mm/dia sendo menor em comparação com a evapotranspiração da cultura. Tais resultados podem ser observados na Figura 7.

Parâmetros hídricos do solo, como armazenamento, deficiência e excedente, tem níveis tecnicamente aceitáveis para minimizar erros e consequentemente planejar o uso da água na irrigação, a partir da precipitação e a evapotranspiração da cultura.

A precipitação entre o final de março e o final de julho foi de aproximadamente 320 milímetros, no entanto desse total, apenas 177 milímetros foram utilizados pela cultura, necessitando de 50 % de água por irrigação, devido a distribuição dos mesmos no período e a CAD do solo. Quando se trata do cálculo utilizando os coeficientes de cultura (K_c) da FAO foi necessário irrigar 155 milímetros, conforme indicado na Figura 8, enquanto que quando os coeficientes da cultura (K_c) são acurado pelo método dos Graus-dias acumulados (GDac) chega a

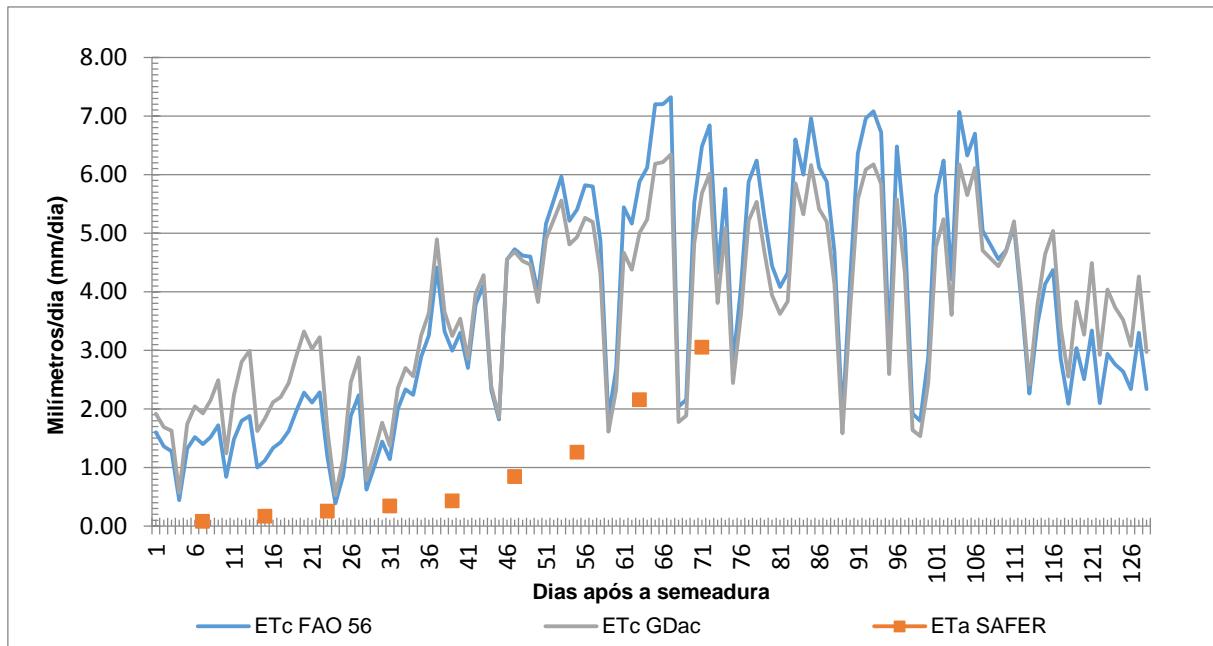
174 milímetros, o que se refere a 12% a mais de milímetros de água requeridos para a cultura (Figura 7).

Figura 8. Armazenamento de água no solo na cultura do milho semeado em 25 de março de 2016 utilizando diferentes coeficientes de cultura (Kc).



Em contrapartida, os coeficientes da cultura propostos pelo método FAO 56, no segundo semestre de cultivo, foi encontrada uma ET_c de 492 milímetros, já pelo método GDac foi visto um valor de apenas 1 milímetros a mais de diferença, totalizando 493 milímetros. Conforme apresenta a Figura 9, é possível identificar uma relação no comportamento da ET_c identificada pelas duas formas citadas, resultando em uma média para todo o ciclo, de 3,65 milímetros/dia. Esta média idêntica pode sinalizar que a divisão, em dias, das fases da cultura na metodologia de Allen et al. (1998) se mostrou adequada para o material no campo estudado.

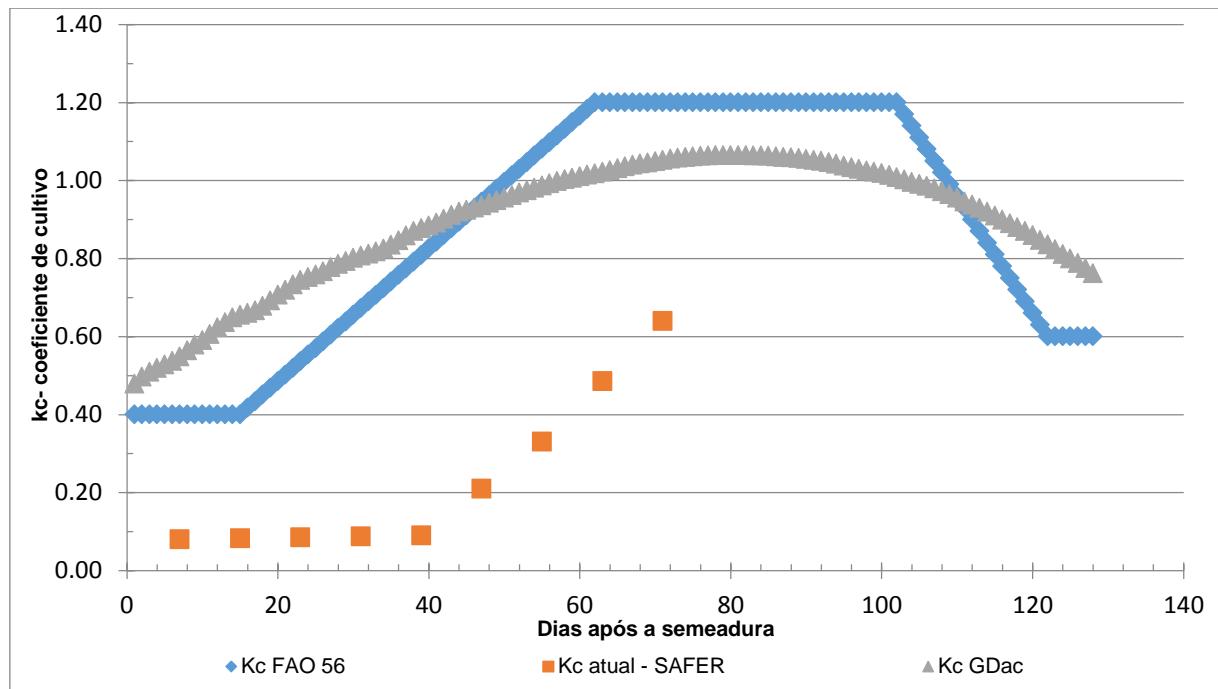
Figura 9. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016 no pivô central.



A evapotranspiração atual, apresentou uma média de apenas 1 mm/dia, isso é explicado pelo fato de não ser possível obter os dados de todas as imagens durante o ciclo por causa da ocorrência de nuvens. Vale salientar, que no segundo semestre do ano, a tendência do número de imagens poluídas é maior devido a época das águas e isso faz com que tenha maior frequência de nuvens. Na Figura 9 pode se observar o comportamento da variável pelos diferentes métodos de obtenção e os dados de ETc atual se limitam a partir do 71º dia do ciclo da cultura, dificultando a extidão dos dados e eficientes conclusões.

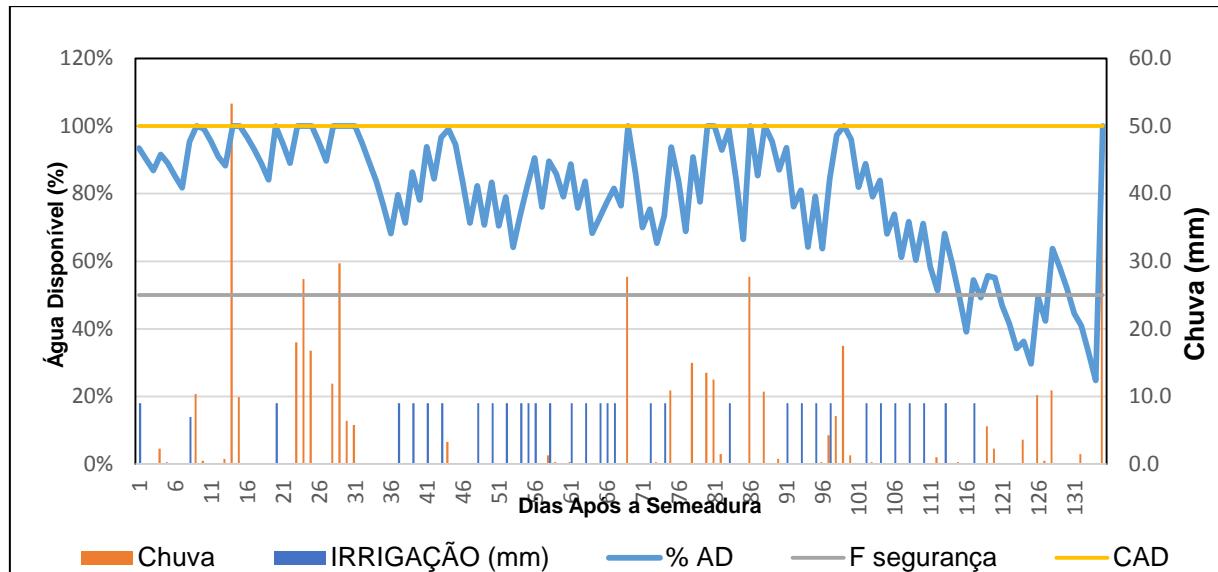
Os coeficientes de cultivo para a área em estudo no segundo semestre, teve uma média de 0,87 quando obtidos pelo método FAO 56 e quando comparados com o método GDac a diferença é insignificante, registrando 0,88. Os Kc obtidos pelas imagens de satélite variaram de 0,08 até 0,64, conforme apresenta a Figura 10, pode-se perceber que os valores iniciais do Kc foram semelhantes, na fase de desenvolvimento vegetativo os valores aumentaram até que a avaliação foi interrompida por não ter imagens limpas para a análise.

Figura 10. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016 na área do pivô central.



Em relação ao ciclo de milho no segundo semestre, a diferença da necessidade hídrica pelos diferentes métodos de obtenção dos coeficientes de cultura (Kc) não se mostrou mais que 5% de diferença, no entanto se identifica um requerimento de água pela cultura um pouco maior, com 493 milímetros estimados, e o registro de chuvas se aproximando dos 430 milímetros durante o período (Figura 11). Em compensação, a necessidade de irrigação foi de 295 milímetros quando encontradas pelo método da FAO, e não pode ser aproveitado e 40% da agua da chuva.

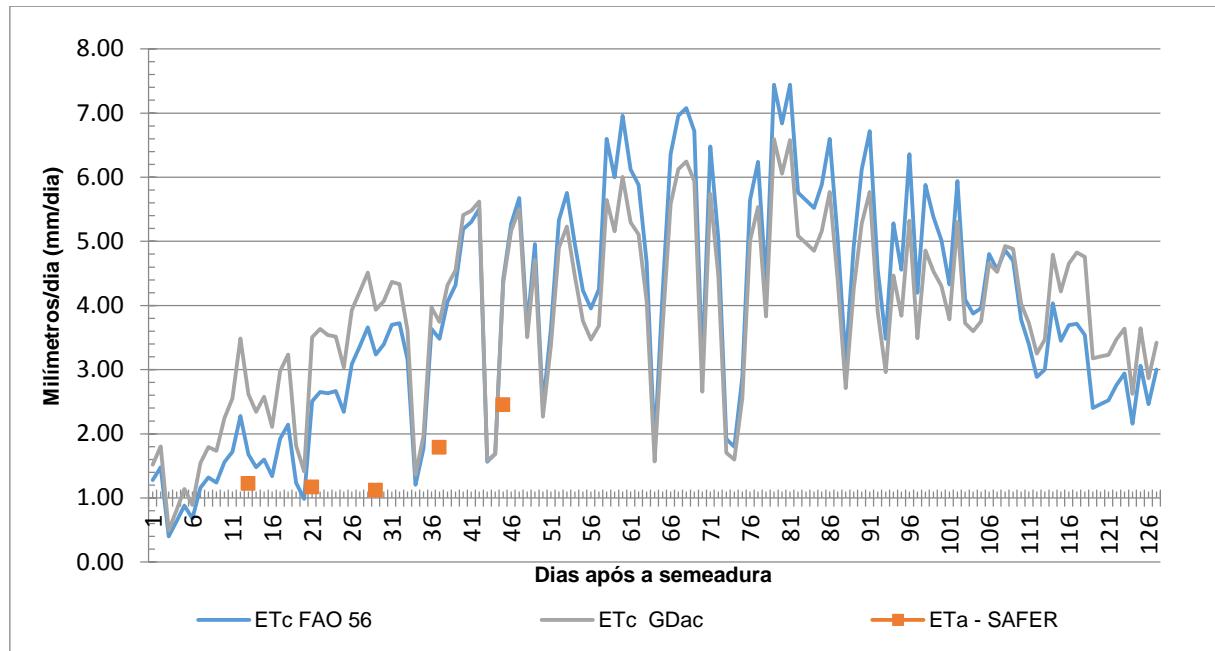
Figura 11. Armazenamento de água no solo na cultura do milho semeado em 07 de agosto de 2016 utilizando os coeficientes de cultura (Kc) propostos pelo Boletim FAO 56.



Na mesma fazenda comercial, também se cultiva milho irrigado pelo sistema de irrigação do tipo Carretel enrolador. Assim foi possível acompanhar o ciclo desta lavoura durante os meses de setembro, quando semeou, até janeiro na colheita. De todas as áreas em estudo, esta foi a mais prejudicada em relação aos dados obtidos por imagens de satélite, devido tratar-se de uma época úmida, a ocorrência de nuvens é frequente, e com isso impossibilita a obtenção de dados.

A necessidade hídrica nessa área de aproximadamente 75 hectares irrigado por carretel foi de aproximadamente 488 milímetros quando calculada pelo método FAO 56, apresentando uma média de 3,8 mm/dia. A Figura 12 apresenta o comportamento da ET_c e é notável que em relação a ET_a obtida pelo SAFER, se tem poucos valores.

Figura 12. Evapotranspiração da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016, área irrigada por carretel.



A Figura 13 permite observar as altas taxas de Evapotranspiração de referência (ET₀) que ocorreu na época do ciclo da cultura registrando a média de 4,3 mm/dia. Tais valores oscilaram bastante durante o período, que registraram de 1 milímetro no dia 4 de setembro até 6,1 milímetro no dia 11 de novembro de 2016.

A diferença do método comparado para o método padrão, da FAO 56, é notado no inicio e no final do estadio da cultura, e claramente, os coeficientes da cultura quando são comparados os dois métodos, é notado, como nos demais dados já apresentados, que o K_c inicial proposto pela FAO 56 é sempre menor que os do método GDac e, na fase intermediaria a os valores do K_c (FAO 56) são maiores, por fim, na fase final ocorre o mesmo comportamento da fase inicial como mostra a Figura 14.

Figura 13. Comportamento da evapotranspiração de referência no segundo ciclo da cultura.

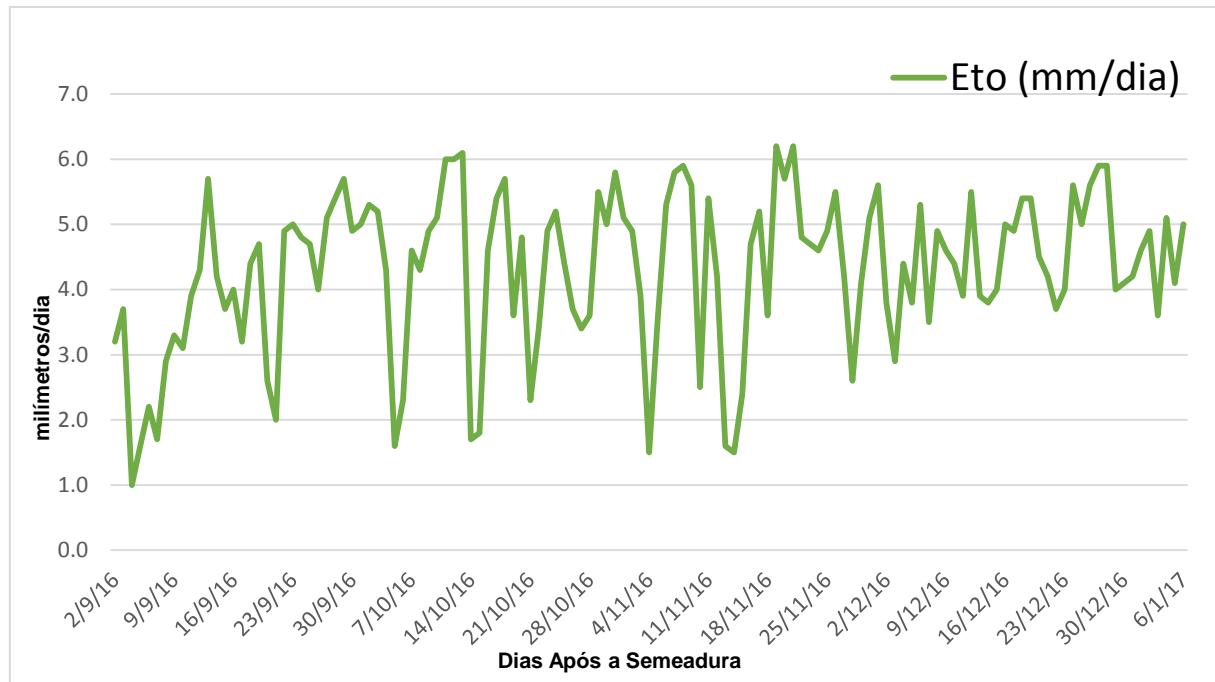
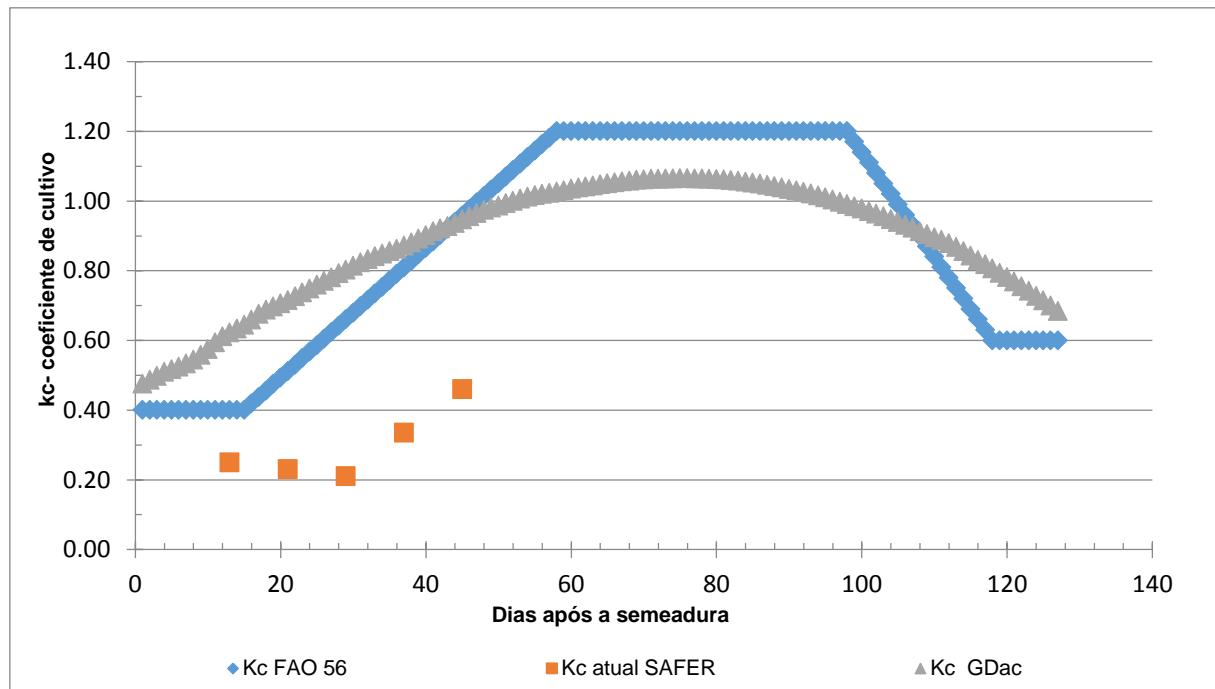
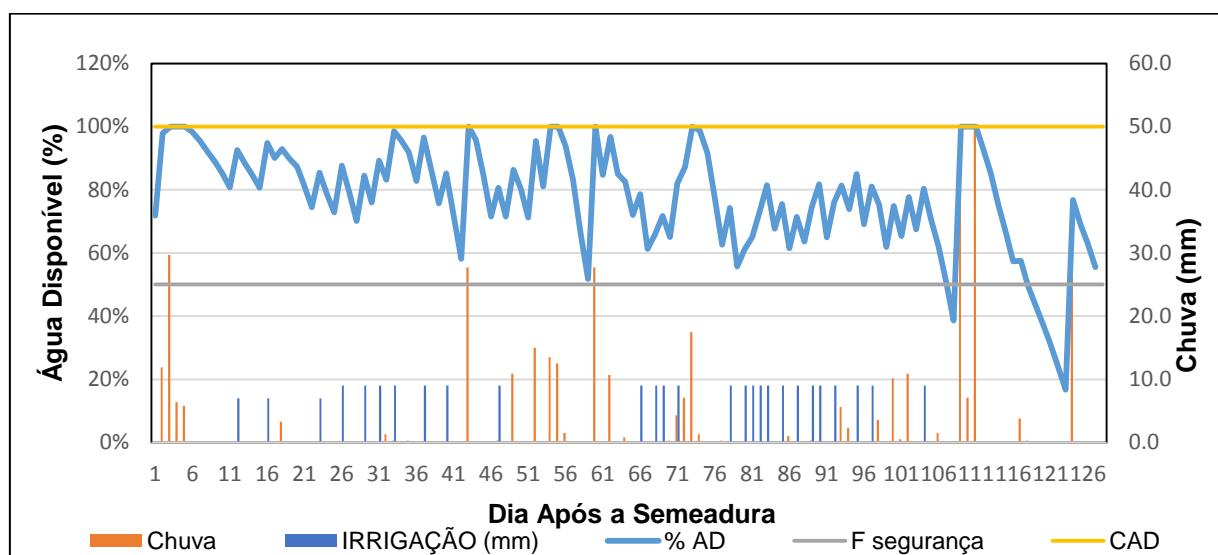


Figura 14. Coeficiente da cultura do milho irrigado obtidos pelos métodos FAO 56, GDac e algoritmo SAFER no segundo semestre do ano de 2016, carretel.



O demanda hídrica no início de setembro até o início de janeiro foi de aproximadamente 488 milímetros, no entanto desse total, apenas 131 milímetros foram utilizados pela cultura, devido a distribuição dos mesmos no período e a CAD do solo. Quando se trata do cálculo utilizando os coeficientes de cultura (Kc) da FAO 56 foi necessário irrigar 255 milímetros, ou seja, 50% da agua utilizada na safra foi proveniente da irrigação, conforme indicado na Figura 13.

Figura 15. Armazenamento de água no solo na cultura do milho semeado em 2 de setembro de 2016 utilizando os coeficientes de cultura (Kc) propostos pelo Boletim FAO 56.



5. CONCLUSÕES

O balanço hídrico realizado diariamente mostrou que é necessária a utilização de sistemas de irrigação no desenvolvimento da cultura de milho nos dois ciclos produtivos do ano, notando que as requisições por irrigação são maiores no milho cultivado no segundo semestre e o que se mostra indispensável no milho cultivado no primeiro semestre, encontrado ainda uma necessidade de água maior quando o coeficiente de cultivo (Kc) é calculado pelo método dos Graus-dias acumulados (GDac).

O estudo permitiu encontrar diferentes valores nos resultados obtidos da evapotranspiração da cultura e a atual, e desta forma diferencia os coeficientes de cultura entre o método SAFER, os recomendados pela literatura tradicional e os calculados pelo método graus dias acumulados, evidenciando que mais estudos devem ser realizados para a região e desta forma realizar um bom gerenciamento da irrigação na cultura do milho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_17_168200511157.html>. Acesso em: 20 de dez. de 2018.

ALBUQUERQUE, P.E.P.; GUIMARÃES, D.P. **Gestão da água na agricultura: Coeficientes de cultivo (Kc) e de Tanque Classe A (Kp)**. Revista Irrigação e Tecnologia Moderna - ITEM, ABID, n.63, p.12-19, 2004.

ALBUQUERQUE, P.E.P. **Manejo de irrigação na cultura do milho. Embrapa Milho e Sorgo**. Sistema de Produção, 1 ISSN 1679-012X, Versão Eletrônica - 6^a edição Set., 2010.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, p.297, 1998.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos**. 2017. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel-1.pdf>. Acesso em: 3 de novembro de 2018.

ARIZA, A. **Descripción y corrección de productos landsat 8 - LDCM (Landsat Data Continuity Mission)**. Bogota: IGAC, 2013. v. 1, 46 p.

BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)**. 1. Formulation. Journal of Hydrology, v. 212-213, p.198-212, 1998.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BIANCHI, C.A.M.; MULLER, A.G.; COMIRANI, F.; HECKLER, B.M.M. **Déficit Hídrico e Produtividade na Cultura do Milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 7. Ed. Viçosa. MG, 2011. 611 p.

CARVALHO, R.I.; KORCELSKI, C.; PELISSARI, G.; HANUS, A.D.; ROSA, G.M. **Demanda hídrica das culturas de interesse agronômico**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p.969 - 985, 2013.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectiva para a agropecuária** – Volume 5. Safra 2016/2017: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra Brasileira de Grãos**. Abril de 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 30 de maio de 2018.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileiro** – grãos: V6 – Safra 2018/2019. Quarto levantamento, janeiro de 2019 – safra 2018/2019. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2019.

DAMIÃO, J.O.; HERNANDEZ, F.B.T.; SANTOS, G.O.; ZOCOLER, J.L. **Balanço hídrico da região de ilha solteira, noroeste paulista**. In: **Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**. Uberaba, 2010. Disponível em: http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/conird2010_damiao.pdf. Acesso em: 25 maio 2018.

EMBRAPA. Agência de Informação Embrapa. **Embrapa Milho e Sorgo: Cultivo do Milho**. Sete Lagoas – MG. Sistema de Produção, ISSN 1679-012X. Novembro de 2015.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2013. **World Land and Water prospects**. Rome: Land and Water Development Division.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Irrigation Water Management, Chapter 7: Choosing an Irrigation Method**. 2016. Disponível em:<<http://www.fao.org/docrep/S8684E/s8684e08.htm>>. Acesso em: 3 de novembro de 2018.

HERNANDEZ, F.B.T.; NEALE, C.; TAGHVAEIAN, S. TEIXEIRA, A.H.C. **Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15, 2011, Curitiba. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Curitiba: INPE, p.5209 - 5216, 2011.

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.

HERNANDEZ, F.B.T. **Manejo da irrigação.** In: Capacitação em Agricultura Irrigada, 2003 Disponivel em: <<http://feis.unesp.br/irrigacao/nomcurso.htm>>. Acesso em: 29 de novembro 2018.

INPE- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.inpe.br>>.Acesso em: 20 mar. 2016.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; CARNEIRO, N.P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho.** Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, p. 1-23, 2003. Disponivel em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/15429128.pdf>>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

OLIVEIRA, M. A. A.; CARVALHO, D. F. **Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays L.*) em Seropédica e Campos, estado do Rio de Janeiro.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, n. 2, p. 132–135, 1998.

PEIXOTO, C.M. **O milho no Brasil, sua importância e evolução.** Dupont-Pioneer. 2014. Disponível em: <<http://www.pioneersementes.com.br/media-center/artigos/165/o-milho-no-brasil-sua-importancia-e-evolucao>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

SANTOS. G.O.; HERNANDEZ. F.B.T.; ROSSETTI. J.C. **Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do Estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.4, n.3, p.142-149, 2010.

SQUIZATO, M. **Evolução e identificação da área irrigada por pivô central no Noroeste Paulista.** Trabalho de Graduação (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. 39 p.

SILVA, Y.F. **Evapotranspiração na cultura de citrus no noroeste paulista.** 2014. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira. 2014.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; VICTORIA, D.C.; BOLFE, L.E. **Irrigation performance assessments for corn crop whith landsat imagens in the São Paulo State, Brazil.** Water Resources and Irrigation Management, v.3, n.2, p. 91 - 100, 2014.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; VICTORIA, D.C.; BOLFE, L.E. **Distribuição espacial do requerimento hídrico da cultura do milho no Estado de São Paulo.** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belém - PA, 2013. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/congresso_brasileiro_agrometeorologia_2013.pdf>. Acesso em: 9 de mar. de 2016.

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.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L.H. **Modelagem espaço-temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro.** Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 2013. 32p. (Documentos, 99).

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

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Acesso à base diária: Canal CLIMA. Ilha Solteira: UNESP - Faculdade de Engenharia - Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural e Solos - Área de Hidráulica e Irrigação, 2019. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br>.

VANHELLEMONT, Q.; RUDDICK, K. **Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8.** Remote sensing of environment, New York, v. 145, p. 105-115, 2014.