



BRUNO DE OLIVEIRA SOUZA

**ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA
POTENCIAL NA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ
CENTRAL NA BACIA DO RIO URUCUIA
UTILIZANDO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI**

LAVRAS – MG

2016

BRUNO DE OLIVEIRA SOUZA

**ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA POTENCIAL NA IRRIGAÇÃO
POR PIVÔ CENTRAL NA BACIA DO RIO URUCUIA UTILIZANDO
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Elizabeth Ferreira

Orientadora

LAVRAS – MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Souza, Bruno de Oliveira.

Estimativa da demanda hídrica potencial na irrigação por pivô
central na bacia do Rio Urucuia utilizando índice de vegetação NDVI
/ Bruno de Oliveira Souza. – Lavras : UFLA, 2016.

88 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientadora: Elizabeth Ferreira.

Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Evapotranspiração. 3. Agricultura
irrigada. 4. Produtos MODIS. 5. Demanda hídrica. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

BRUNO DE OLIVEIRA SOUZA

**ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA POTENCIAL NA IRRIGAÇÃO
POR PIVÔ CENTRAL NA BACIA DO RIO URUCUIA UTILIZANDO
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 14 de março de 2016

Prof. Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas

UFLA

Prof. Dr. Arionaldo de Sá Júnior

IFSULDEMINAS

Profa. Dra. Elizabeth Ferreira
Orientadora

LAVRAS – MG

2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por todo amparo e pela presença constante em minha vida.

Aos meus pais, Silvano e Rosangela, pelo exemplo de caráter, luta, fé e perseverança.

À minha avó Rosa e à minha irmã Kamila por todo o apoio.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia (DEG), pelo acolhimento e por todo conhecimento transmitido.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Mestrado.

À professora Dra. Elizabeth Ferreira, pela orientação, dedicação, paciência e conhecimentos a mim repassados, estes de fundamental importância para a realização de todo o trabalho.

Ao professor, Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas, pelos ensinamentos e pela disponibilidade em participar como membro da banca examinadora no exame de qualificação bem como na defesa da dissertação.

Aos meus colegas de laboratório, em especial, ao meu amigo Otávio, sempre disposto a me ajudar.

Aos meus irmãos de fé, Daniel e Isael, presentes nos momentos mais difíceis, sinais de Deus em minha caminhada.

RESUMO

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de estimar a evapotranspiração, assim como a demanda hídrica dos cultivos irrigados por pivôs centrais na bacia do Rio Urucuia, no ano de 2013, utilizando séries temporais de produtos MODIS e dados de campo coletados na estação meteorológica de Arinos-MG. Ao todo foram mapeados 344 pivôs centrais na bacia, totalizando uma área de 30.032 ha. Unaí foi o município que apresentou maior concentração de pivôs centrais (31,4%), o município, também, registrou a maior demanda hídrica de toda a bacia. Os perfis temporais de NDVI permitiram a análise do ciclo das culturas agrícolas, ao longo dos meses do ano. Com o auxílio de séries temporais de EVI2 foi possível identificar qual cultura agrícola encontrava-se implantada sob determinado pivô central. Estimada a partir de uma eficiência de aplicação de 100%, a demanda hídrica das áreas irrigadas por pivôs centrais representou 18,9% da $Q_{7,10}$. Considerada uma eficiência de aplicação de 90%, tal valor correspondeu a 20,9% da $Q_{7,10}$. Por último, considerando a menor das eficiências de aplicação permitida (60%), a demanda hídrica alcançou 31,4% da $Q_{7,10}$, número preocupante, uma vez que ultrapassa os 30% permitidos. Considerando os resultados obtidos, conclui-se que a utilização de água, para irrigação na bacia estudada, está acima do recomendado, indicando a necessidade da reavaliação do uso da água voltada à agricultura irrigada da região.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Evapotranspiração. Agricultura irrigada. Produtos MODIS. Demanda hídrica.

ABSTRACT

This study was developed with the objective of estimating the evapotranspiration, as well as the hydric demand of irrigated crops by center pivots in the *Urucuia* River's basin, in the year of 2013, using temporal series of MODIS products and field data collected in the weather station of *Arinos-MG*. Altogether, 344 center pivots were mapped in the basin, with a total area of 30,3032 ha. *Unaí* was the county that had the highest concentration of center pivots (31.4%), the county also recorded the highest hydric demand of the entire basin. The temporal profiles of NDVI allowed the analysis of the cycle of agricultural crops throughout the months of the year, with the aid of temporal series of EVI2 was possible to identify which agricultural crop was implanted under determinate center pivot. Estimated from an application efficiency of 100%, the hydric demand of the irrigated areas by center pivots represented 18.9% of $Q_{7,10}$. Considered an application efficiency of 90%, this valor corresponded to 20.9% of $Q_{7,10}$. Lastly, considering the lowest application efficiency allowed (60%), the hydric demand reached 31.4% of $Q_{7,10}$, a disturbing number, once it surpasses the 30% allowed. Considering the results gotten, it is concluded that the use of water for irrigation in the studied basin is above the recommended, indicating the need of the reassessment of the use of water intended to irrigated agriculture in the region.

Keywords: Remote Sensing. Evapotranspiration. Irrigated agriculture. MODIS products. Hydro demand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Progressão sazonal de NDVI e K_c , em locais de calibração do modelo: campos irrigados, Nebraka, EUA.....	33
Figura 2 - Localização da área de estudo.	39
Figura 3 - Localização dos pivôs centrais na Bacia do Rio Urucuia.....	47
Figura 4 - Maiores áreas irrigadas por pivô central de cada município da Bacia do Rio Urucuia.	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual de equipamentos do tipo pivô central, de acordo com a área irrigada.	50
Gráfico 2 - Valores mensais de precipitação (mm.mês^{-1}).	51
Gráfico 3 - Valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelo método Penman-Monteith (FAO 56), para a bacia do Rio Urucuia, durante o ano de 2013.	52
Gráfico 4 - Valores mensais de evapotranspiração de referência, estimados pelo método Penman-Monteith (FAO 56), para a bacia do Rio Urucuia, durante o ano de 2013.	53
Gráfico 5 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 129 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Formoso.	56
Gráfico 6 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 141 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Buritis.	57
Gráfico 7 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 166 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Unaí.	58
Gráfico 8 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 85 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Chapada Gaúcha.	59

Gráfico 9 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 115 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Uruana de Minas.	60
Gráfico 10 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 137 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Bonfinópolis de Minas.	61
Gráfico 11 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 110 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Riachinho.	63
Gráfico 12 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 168 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Uruçuaia.	64
Gráfico 13 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 201 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de São Romão.	65
Gráfico 14 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 129 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Formoso.	66
Gráfico 15 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 141 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Buritis.	67

Gráfico 16 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 166 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Unaí.	68
Gráfico 17 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 85 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Chapada Gaúcha.	69
Gráfico 18 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 115 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Uruana de Minas.	70
Gráfico 19 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 137 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Bonfinópolis de Minas.	71
Gráfico 20 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 110 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Riachinho.	72
Gráfico 21 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 168 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Uruçuia.	73
Gráfico 22 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 201 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de São Romão.	74

Gráfico 23 - Demanda hídrica das áreas irrigadas por pivôs centrais, nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucua, no ano de 2013, com eficiências de aplicação de 100% (m ³ .mês ⁻¹).....	77
Gráfico 24 - Demanda hídrica das áreas irrigadas por pivôs centrais, nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucua, no ano de 2013, com eficiências de aplicação de 90% (m ³ .mês ⁻¹).....	78
Gráfico 25 - Demanda hídrica das áreas irrigadas por pivôs centrais, nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucua, no ano de 2013, com eficiências de aplicação de 60% (m ³ .mês ⁻¹).....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de 7 bandas espectrais do sensor MODIS.....	24
Tabela 2 - Número de pivôs centrais mapeados e área total irrigada por municípios.	48
Tabela 3 - ET _o máxima e mínima ocorrida nos meses de 2013.	52
Tabela 4 - Demanda hídrica anual das áreas irrigadas por pivôs centrais, nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucuia (m ³ .mês ⁻¹), para eficiências de aplicação de 100%, 90% e 60%.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Fundamentos do Sensoriamento Remoto	21
3.1.1	Comportamento espectral da vegetação	22
3.1.1.1	Produtos MOD13	24
3.1.2	Índices de vegetação	25
3.2	Evapotranspiração	28
3.2.1	Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o)	29
3.3	Coefficiente de cultura (K _c)	32
3.4	Relação entre K _c e os índices de vegetação	33
3.5	Sensoriamento remoto na agricultura irrigada	34
3.6	Demanda de água pela agricultura irrigada	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Caracterização da área de estudo	39
4.2	Identificação e mapeamento dos pivôs centrais na bacia do Rio Urucua	40
4.3	Obtenção das imagens e organização da série temporal	40
4.4	Extração dos valores máximos de NDVI e K _c para as áreas irrigadas pelos pivôs centrais	41
4.5	Cálculo da evapotranspiração de referência (ET _o)	42
4.6	Cálculo da evapotranspiração de cultura (ET _c)	43
4.7	Lâmina líquida, Lâmina bruta e Demanda hídrica da bacia do Rio Urucua	43
4.8	Vazão da bacia	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Identificação dos pivôs centrais	47
5.2	Precipitação	50
5.3	Evapotranspiração de referência (ET _o)	51
5.4	Valores máximos de NDVI e K _c	54
5.4.1	Formoso	56
5.4.2	Buritis	57
5.4.3	Unai	58
5.4.4	Chapada Gaúcha	59
5.4.5	Uruana de Minas	60
5.4.6	Bonfinópolis de Minas	61

5.4.7	Riachinho	63
5.4.8	São Romão	65
5.5	Evapotranspiração de cultura	66
5.5.1	Formoso	66
5.5.2	Buritis	67
5.5.3	Unai	68
5.5.4	Chapada Gaúcha	69
5.5.5	Uruana de Minas	70
5.5.6	Bonfinópolis de Minas	71
5.5.7	Riachinho	72
5.5.8	Urucuia	73
5.5.9	São Romão	74
6	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a utilização dos sistemas de irrigação tem exercido um importante papel, no desenvolvimento da agricultura, auxiliando o homem a produzir alimentos de qualidade em grandes quantidades.

Calcula-se que cerca de 70% de toda água utilizada no mundo seja destinada à agricultura irrigada. Tal valor pode chegar a 95% em países considerados em desenvolvimento (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2007). De acordo com o último relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2014, da Agência Nacional de Águas (ANA), a irrigação é a atividade responsável por 72% do consumo de água no Brasil (BRASIL, 2014).

Segundo o Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil (BRASIL, 2013), os sistemas do tipo pivôs centrais ocupam uma área de 1,18 milhão de hectares, em todo o território nacional, contabilizando, aproximadamente, 18 mil equipamentos.

A região Sudeste possui 1,58 milhão de hectares irrigados, o que representa 35,6% da área total irrigada do país. Este fato a coloca na posição de região com a maior área irrigada do Brasil (PAULINO et al., 2011).

No estado de Minas Gerais, predominam os métodos de irrigação por aspersão os quais representam 64,04% de toda área irrigada do estado (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2009). Ferreira et al. (2011) identificaram no estado 3.781 equipamentos de irrigação do tipo pivô central, cobrindo uma área de, aproximadamente, 254.875 ha. Em levantamento mais recente, realizado por meio de uma parceria entre ANA e Embrapa, a área irrigada por pivôs centrais, no estado de Minas Gerais, foi de 366.428 hectares e corresponde a 31% da área ocupada por estes equipamentos no país (BRASIL, 2013).

Tais números refletem a seriedade com que o assunto deve ser tratado, uma vez que a utilização destes equipamentos, de forma inadequada, pode acarretar a sobrecarga de mananciais, gerando conflitos entre os diversos setores da sociedade que fazem uso da água.

Com o crescente uso do sensoriamento remoto, proporcionado pelo desenvolvimento de sensores capazes de monitorar a superfície terrestre, em intervalos de tempo cada vez menores e com riqueza de detalhes e informações cada vez maiores, torna-se possível que imagens de satélites sejam utilizadas tanto no mapeamento como no monitoramento de áreas irrigadas.

Estimar a demanda hídrica dos cultivos irrigados, em uma bacia hidrográfica, utilizando produtos de sensoriamento remoto e dados de campo, para a quantificação da evapotranspiração, tem se mostrado um método promissor para monitorar o volume de água necessário à irrigação. Tais estimativas subsidiam o combate aos usos inadequados, aos desperdícios e permitem verificar se o uso do recurso encontra-se dentro do volume estabelecido por lei. Assim, alguns conflitos entre os diversos setores da economia e da sociedade podem ser minimizados pela garantia da disponibilidade dos recursos hídricos aos múltiplos usos da água existentes na bacia hidrográfica.

Inserida na bacia do São Francisco, a bacia hidrográfica do Rio Urucuia, localizada na mesorregião Noroeste do estado de Minas Gerais, apresenta uma área de drenagem de 25.135 km². Nesta bacia, encontra-se instalado um grande número de sistemas de irrigação do tipo pivô central, consequência do avanço da agricultura irrigada na região. Tal realidade implica a necessidade de estudos que auxiliem o monitoramento da demanda hídrica requerida pelos cultivos estabelecidos, nestas áreas, aplicando técnicas e recursos mais recentes de sensoriamento remoto.

Diante destes fatos, no presente trabalho, é apresentada uma estimativa da demanda hídrica das áreas irrigadas por pivô central, na bacia hidrográfica do Rio Urucuia, utilizando produtos de sensoriamento remoto, assim como dados de campo de uma estação meteorológica. No final, o volume de água utilizado pelos sistemas de irrigação por pivô central será comparado com o volume estabelecido pela lei de outorga nesta bacia.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de estimar a evapotranspiração de referência, assim como a demanda hídrica, das áreas irrigadas por pivôs centrais, na bacia do Rio Urucuia, no ano de 2013, por meio de produtos de sensoriamento remoto e dados de campo coletados em uma estação meteorológica.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar e mapear as áreas irrigadas por pivôs centrais na bacia do Rio Urucuia;
- b) Criar uma série temporal de imagens índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), para a área da bacia hidrográfica Urucuia, para o ano de 2013;
- c) Obter os valores máximos de NDVI, em todos os meses do ano de 2013, nas áreas irrigadas por pivôs centrais;
- d) Estimar os coeficientes de cultura (K_c) dos cultivos irrigados pelos pivôs centrais, para todos os meses do ano, a partir dos valores máximos de NDVI;
- e) Estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) da bacia, a partir de dados meteorológicos disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), para todos os meses do ano de 2013;
- f) Estimar a evapotranspiração de cultura (ET_c) nas áreas irrigadas por pivôs centrais, para todos os meses do ano de 2013;
- g) Obter a demanda hídrica requerida pelos cultivos, em diferentes níveis de eficiência de aplicação, ao longo do ano de 2013;

- h) Verificar se o volume de água gasto pelos pivôs centrais, no processo de irrigação, é compatível com o volume permitido pela lei de outorga da bacia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos do Sensoriamento Remoto

Novo (2010) define sensoriamento remoto como a utilização conjunta de sensores, equipamentos de processamento e transmissão de dados instalados a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas, tendo por objetivo o estudo de eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra, por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem, em suas diversas manifestações.

Moreira (2007) define sistemas sensores como dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, gerando informações que possam ser transformadas em produtos passíveis de interpretação, seja na forma de imagem, gráficos ou qualquer outro tipo de produto. Para o autor, quatro domínios de resolução caracterizam os sistemas sensores, sendo eles: espectral, espacial ou geométrica, temporal e radiométrica.

A resolução espectral refere-se a melhor ou a pior caracterização dos alvos em função da largura espectral e/ou número de bandas em que o sistema sensor opera. Já a resolução espacial pode ser entendida como a mínima distância entre dois objetos (alvos) na qual um sensor pode registrá-lo como sendo objetos distintos (ROSA, 2009).

A definição de resolução temporal indica o período de tempo que o satélite leva para voltar a recobrir determinada área de interesse (MOREIRA, 2007).

Por último, resolução radiométrica descreve a habilidade de um sensor em distinguir variações no nível de energia refletida, emitida ou retroespalhada que deixa a superfície do alvo (NOVO, 2010).

Elementos como forma, tamanho, sombra, tonalidade, cor, padrão e escala, presentes em fotografias e imagens de sensores remotos, possibilitam a correta identificação de objetos e fenômenos existentes em determinada parcela da superfície terrestre. Quanto maior for a capacidade de associação destes elementos por parte do intérprete maior será o número de informações extraídas (MOREIRA, 2007).

Por apresentarem diferentes propriedades físico-químicas e biológicas, os variados alvos, encontrados na superfície terrestre tais como, água, solo e vegetação, interagem de maneira diferenciada espectralmente com a energia eletromagnética incidente. Tais interações possibilitam o reconhecimento e a distinção destes alvos, em produtos de sensoriamento remoto, pois são reconhecidos devido à variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda (MORAES, 2002).

3.1.1 Comportamento espectral da vegetação

Uma série de fatores determina o comportamento da reflectância espectral da vegetação, dentre os mais importantes destacam-se: espécie de planta, tipo de solo, índice de área foliar, estado fenológico, biomassa, folha (forma, posição, pigmentação, concentração de água, estrutura interna, dentre outros), além das condições atmosféricas e o tipo de sistema sensor (ROSA, 2009).

O comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa pode ser dividido em três regiões: a) até 0,7 μm , onde a reflectância é baixa, sendo inferior a 20%, dominando a absorção da radiação incidente pelos pigmentos da planta em 0,48 μm (carotenoides) e em 0,62 μm (clorofila). Um pequeno aumento de reflectância é verificado em 0,56 μm , não superando níveis acima de 20%, tal reflectância é responsável pela cor verde da vegetação; b) de 0,7 a 1,3 μm , encontra-se a região dominada pela alta reflectância da vegetação (30% < p

< 40%), em razão da interferência da estrutura celular (estrutura do mesófilo); entre 1,3 μm e 2,5 μm , o conteúdo de água das folhas domina a reflectância da vegetação. São verificados, nesta região, os dois picos máximos de absorção pela água: 1,4 μm e 1,95 μm . Tal região corresponde às bandas de absorção atmosférica, fato explica o desenvolvimento de sensores com faixas espectrais situadas em regiões menos sujeitas à atenuação atmosférica. Vale ressaltar que o comportamento espectral da vegetação varia ao longo do seu ciclo vegetativo (NOVO, 2010).

3.1.3 Sensor MODIS

Principal instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) foi projetado com o objetivo de fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, assim como dos oceanos e da atmosfera nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético, cobrindo a terra em intervalos de dois dias.

Com sinais gravados em 12 bits, possui alta sensibilidade radiométrica, dispondo de 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007).

Sua resolução espacial varia de 250 a 1.000 m, de modo que duas bandas são obtidas na resolução de 250 m, outras cinco bandas na resolução de 500 m e as 29 bandas restantes possuem resolução de 1.000 m.

Em uma órbita circular, heliossincrônica, com altura de 705 km, imagea uma faixa de 2.330 km (ROSA, 2009).

A Tabela 1 apresenta as especificações das bandas 1-7 do sensor MODIS, bandas estas direcionadas a aplicações terrestres.

Tabela 1 - Especificações de 7 bandas espectrais do sensor MODIS.

Uso Preliminar	Bandas	Largura da banda (nm)
Terra/ Nuvens / Limites de aerossóis	1	620 – 670
	2	841 – 876
Terra/ Nuvens/ Propriedade de aerossóis	3	459 – 479
	4	545 – 565
	5	1230 – 1250
	6	1628 – 1652
	7	2105 - 2155

Fonte: Adaptada do website <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>

3.1.1.1 Produtos MOD13

Os produtos MODIS, relacionados ao estudo da vegetação, são basicamente três:

MOD15 – *Leaf Area Index* / fPAR e MOD17 - *Net Primary Production* /*Net Photosynthesis* e MOD13 – *Vegetation Indices* (VI). Por sua vez, o produto MOD13 VI subdivide-se em MOD13A1, MOD13A2, MOD13A3, MOD13C1, MOD13C2 e o MOD13Q1.

Desenvolvido com o objetivo de avaliar e monitorar os recursos vegetais, o produto MOD13 contém os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Ambos produzidos, globalmente, com resolução de 1 km, 500 m e 250 m, disponibilizados em mosaicos de 16 dias (reamostrados, corrigidos atmosféricamente e com presença mínima de nuvens) ou em composições de imagens. Permite a realização de estudos a respeito das condições da cobertura vegetal, ao longo do tempo, nas escalas global e regional (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007).

O produto MOD13Q1 apresenta uma síntese do máximo valor do índice de vegetação (NDVI e EVI), com intervalo de 16 dias e resolução espacial de

250 m. Já o produto MOD09GQ, superfície de refletância global diária, é disponibilizado, em duas bandas (1 e 2) de 250 m, que correspondem, respectivamente, ao vermelho e infravermelho próximo.

3.1.2 Índices de vegetação

Os índices de vegetação têm sido propostos com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Tais índices estão relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

O primeiro índice a ser utilizado foi o da razão simples (JORDAN, 1969), obtido por meio da divisão dos valores de FRB (fator de reflectância bidirecional) referentes à região do infravermelho próximo por valores de FRB correspondentes à região do vermelho, conforme a Equação (1).

$$SR = \frac{\rho_{ivp}}{\rho_v} \quad (1)$$

Em que:

SR = razão simples

ρ_{ivp} = FRB no infravermelho próximo

ρ_v = FRB no vermelho

Proposto por Rouse et al. (1973), o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) normalizou a razão simples compreendendo-a em um intervalo de -1 a +1, expressa pela Equação (2):

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (2)$$

Em que:

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

ρ_{ivp} = FRB no infravermelho próximo

ρ_v = FRB no vermelho

Já o Enhanced Vegetation Index (EVI), proposto por Huete et al. (1997), foi desenvolvido com o objetivo de aprimorar o sinal da vegetação incrementando a sensibilidade, em regiões com maiores densidades de biomassa, reduzindo as influências do sinal de fundo do dossel e da atmosfera (JUSTICE et al., 1998).

Amplamente utilizado na construção de perfis temporais, o NDVI permite a detecção de mudanças, na fenologia e sazonalidade da vegetação, além de possibilitar a análise do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

Risso et al. (2012) avaliaram o desempenho dos índices de vegetação NDVI e EVI (índice de vegetação realçado) do sensor MODIS, na discriminação de áreas de soja das áreas de cana-de-açúcar, pastagem, cerrado e floresta, no Estado do Mato Grosso. Os autores concluíram que o NDVI apresenta melhor desempenho, na discriminação das áreas de soja na entressafra, enquanto o EVI apresenta melhor desempenho no período de pleno desenvolvimento da cultura. Deste modo, os autores afirmam que o melhor resultado, para classificação da soja, no Estado do Mato Grosso, por meio de séries temporais do sensor MODIS, é obtido com uso combinado do NDVI na entressafra e do EVI no pleno desenvolvimento da soja.

Rosa et al. (2010) avaliaram um modelo agrometeorológico espectral, para estimar a produtividade de cafezais. Utilizaram-se imagens do sensor MODIS e dados agrometeorológicos do modelo regional de previsão do tempo (ETA), para fornecer as variáveis de entrada para o modelo agrometeorológico Spectral da mesorregião geográfica sul/sudoeste do estado de Minas Gerais nos

anos-agrícolas de 2003/2004 a 2007/2008. Por meio do NDVI, obtido de imagens MODIS, estimaram o índice de área foliar (IAF), variável espectral de entrada do modelo agrometeorológicos Spectral, utilizada no cálculo da produtividade máxima. Também utilizaram como variáveis de entrada do modelo: dados meteorológicos gerados pelo modelo ETA e a capacidade de água disponível no solo. Ao comparar a produtividade média estimada pelo modelo com a fornecida oficialmente pelo IBGE, as diferenças relativas, obtidas em escala regional, foram de: 0,4, 3,0, 5,3, 1,5 e 8,5% para os anos agrícolas 2003/2004, 2004/2005, 2005/2006, 2006/2007 e 2007/2008, respectivamente. Assim, concluíram que o modelo agrometeorológicos espectral, que tem como base o modelo de Doorenbos e Kassam (1979) - FAO 33, foi tão eficaz, para estimar a produtividade dos cafezais, quanto o modelo oficial do IBGE. Possibilitando também, a espacialização da quebra de produtividade e a previsão de 80% da produtividade final, na primeira quinzena de fevereiro, antes do início da colheita.

Jungues e Fontana (2009) elaboraram perfis temporais de NDVI/MODIS, mediante a construção de máscaras de cultivo, verificando as variações interanuais dos perfis associadas à variação do rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram que é possível gerar perfis temporais de NDVI que permitam monitorar o desenvolvimento das lavouras de cereais de inverno e que podem ser empregados no estudo das variações interanuais de rendimento de grãos de trigo. Verificaram, também, que os maiores rendimentos de grãos estão relacionados à manutenção de altos valores de NDVI (acima de 0,7) por um período maior de tempo.

Liesenberg, Ponzoni e Galvão (2007) utilizaram composições de 16 dias de índices de vegetação do sensor MODIS, com resolução espacial de 1km, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, na caracterização da dinâmica sazonal, em 2004, de cinco fitofisionomias de Cerrado e analisaram sua separabilidade

espectral. Ao comparar os índices NDVI e EVI, calculados a partir dos dados dos sensores de ambas as plataformas e de uma base comum de pixels, obtiveram os seguintes resultados: (a) dentre as fitofisionomias estudadas, a Floresta Estacional decídua apresentou uma dinâmica sazonal muito marcante, em função da perda de folhas da estação chuvosa para a seca (substancial redução nos índices) e do rápido verdejamento com o início da precipitação no final de outubro (rápido incremento de NDVI e EVI); (b) o NDVI mostrou maior variabilidade entre as classes de vegetação do que o EVI apenas na estação seca; (c) a discriminação entre as fitofisionomias melhorou da estação chuvosa para a seca; (d) o NDVI foi mais eficiente do que o EVI, para discriminar as classes de vegetação, na estação seca, ocorrendo o contrário na estação chuvosa; e (e) na maioria das datas selecionadas para o estudo, não houve diferenças estatisticamente significativas entre os índices de vegetação gerados de ambas as plataformas, apesar das variações na qualidade dos pixels selecionados para as composições de 16 dias e na geometria de iluminação e de visada.

3.2 Evapotranspiração

Thornthwaite e Wilm (1944) definem evapotranspiração como a transferência de água do solo vegetado para a atmosfera pela ação conjunta da evaporação e da transpiração. Este processo inclui a evaporação da água do solo, a evaporação da água depositada pela irrigação, chuva ou orvalho, na superfície das folhas e a transpiração vegetal. Pode ser expressa em valores totais, médios ou diários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, no período considerado.

A evapotranspiração é função da quantidade de energia solar que incide em uma determinada área. Fatores como tipo de planta, solo e clima

influenciam, diretamente, na quantidade de água evapotranspirada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

3.2.1 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)

A determinação da evapotranspiração pode ser realizada por meio de métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos podemos citar o do lisímetro, das parcelas experimentais e do controle de umidade do solo. Tais métodos apresentam bons resultados, entretanto em decorrência da complexidade e dos custos dos equipamentos, quase sempre se restringem à pesquisa. Por sua vez, os métodos indiretos utilizam de modelos físico-matemáticos, baseados em elementos climáticos disponibilizados por meio de estações meteorológicas (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Gardiman Junior, Magalhães e Cecilio (2012) compararam o desempenho das equações empíricas de Thornthwaite, Camargo, Camargo Simplificado e Garcia Lopez e física de Priestley Taylor, para estimativa da evapotranspiração de referência, comparando-as ao método universal de Penman-Monteith - FAO 56, para as condições climáticas da localidade de Linhares, no litoral norte do Estado do Espírito Santo. Assim, concluíram que em relação aos índices, parâmetros estudados e escalas de tempo, o método que apresentou melhor desempenho foi o de Garcia Lopez.

Utilizando um conjunto de dados mensais de 21 anos (1990 a 2010), com os elementos climáticos temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e insolação, Melo e Fernandes (2012) avaliaram o desempenho dos métodos de Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Linacre, Radiação Solar, Hargreaves-Samani, Makkink, Thornthwaite, Camargo, Priestley-Taylor e Penman Original, na estimativa da evapotranspiração potencial, em comparação com o método padrão Penman-Monteith – FAO 56, no município de Uberaba-MG. Quando os métodos empíricos, para a estimativa da ET_0 , foram comparados com o método

padrão, os métodos de Makkink e de Camargo apresentaram os melhores desempenhos. Já o método de Hargreaves-Samani apresentou a melhor relação linear com o método padrão, com coeficiente de correlação (r) de 0,88.

Araújo et al. (2011) compararam o desempenho dos métodos de estimativa de evapotranspiração de Camargo, Radiação - FAO 24, Blaney-Criddle - FAO 24, Hargreaves & Samani e Irrigâmetro, em relação ao método padrão, proposto pela FAO, Penman-Monteith - FAO 56, em intervalos de um, três, cinco e sete dias, nas condições climáticas do sul do Espírito Santo. Concluíram que, independentemente do intervalo analisado, o método do Irrigâmetro foi o que apresentou as melhores estimativas de evapotranspiração em relação ao método padrão Penman-Monteith - FAO 56. Os métodos de Camargo e Blaney-Criddle - FAO 24 subestimaram os valores de evapotranspiração, já os métodos da Radiação-FAO 24 e Hargreaves & Samani superestimam os valores de evapotranspiração, independentemente do intervalo analisado.

A partir de dados obtidos na estação meteorológica automática do DTCS/UNEB, Juazeiro, BA, Oliveira et al. (2010) avaliaram o desempenho do método do tanque classe A e dos métodos de Hargreaves-Samani e de Makkink, para a região norte da Bahia, comparando-os aos valores diários estimados pelo método de Penman-Monteith - FAO 56. Ao fim do estudo, os métodos de Hargreaves-Samani e de Makkink apresentaram bons desempenhos, ambos com coeficiente “ c ” = 0,76. Já o método do tanque classe A apresentou desempenho apenas regular, com coeficiente “ c ” = 0,62.

Tomando como referência o método de Penman-Monteith - FAO 56, Pereira et al. (2009) avaliaram o desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), durante os períodos chuvoso (outubro a março) e seco (abril a setembro), nas escalas diária e mensal, nos anos de 2007 e 2008, para a bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, região da Serra da

Mantiqueira, no estado de Minas Gerais. Concluíram que os métodos que envolvem radiação solar foram mais precisos na estimativa da ET_o , em relação aos métodos que envolvem apenas a temperatura do ar. As melhores estimativas foram obtidas pelos métodos de Jensen-Haise, FAO Radiação, Penman e Blaney-Criddle FAO, para ambos os períodos, com coeficientes de desempenho entre "muito bom" e "ótimo". Por último, os autores concluíram que, para a região da Serra da Mantiqueira, os métodos Jensen-Haise, FAO Radiação e Blaney-Criddle FAO são mais indicados, para estimativas em escala diária, pois apresentam maior precisão e formulações mais simples, enquanto o método de Jensen-Haise apresentou o menor erro padrão de estimativa (EPE) nas estimativas em escala mensal.

Syperreck et al. (2008) compararam a eficiência dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência de Thornthwaite, Camargo e Hargreaves-Samani, em relação ao método de FAO Penman-Monteith, na região de Palotina, estado do Paraná. Os dados meteorológicos utilizados foram coletados, na estação meteorológica da rede do Iapar, compreendendo o período de 1994 a 2003. As médias diárias da evapotranspiração de referência variaram entre 2,58 e 3,62 mm.dia^{-1} . Em escala diária, os métodos avaliados apresentaram bom ajuste, quando comparados ao método de FAO Penman-Monteith, apresentando coeficientes de correlação (r) que variaram de 0,85 a 0,86. O coeficiente de exatidão ou de concordância (d) apresentou valores que variaram entre 0,82 e 0,85. Em relação ao método de FAO Penman-Monteith, os métodos de Hargreaves-Samani, Thornthwaite e Camargo apresentaram bom desempenho, quando avaliados pelo índice "c", tendo o método de Hargreaves-Samani apresentado o melhor índice de desempenho (0,73).

Vescove e Turco (2005) compararam com o método padrão de Penman-Monteith três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) sendo eles: Radiação Solar (RS), Makkink (MAK) e Tanque Classe A (TCA),

em dois períodos distintos das fases de desenvolvimento da cultura de citros, por meio de dados médios quinzenais, para os períodos inverno-primavera e verão-outono de uma fazenda de citros, em Araraquara - SP, onde foi instalada uma estação meteorológica automatizada e um tanque Classe A. Ao fim do estudo, os resultados obtidos pelos autores mostraram que o método do TCA superestimou a ET_o em 26% no período verão-outono e em 24% no período inverno-primavera. Já o método de Makkink subestimou a ET_o , nos dois períodos analisados, enquanto o método da RS superestimou a ET_o .

3.3 Coeficiente de cultura (K_c)

O coeficiente de cultura (K_c) é expresso pela razão entre a evapotranspiração máxima de uma determinada cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o); varia conforme o tipo de cultura, o estágio de desenvolvimento e a duração do ciclo vegetativo. Obtido por meio da Equação 3:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (3)$$

Em que:

K_c = coeficiente de cultura

ET_c = evapotranspiração de cultura

ET_o = evapotranspiração de referência

A ET_c pode ser medida diretamente pela transferência de massa, pelo método do balanço de energia ou, ainda, derivada de estudos do balanço hídrico do solo determinados a partir de campos cultivados ou pelo uso de lisímetros (ALLEN et al., 1998).

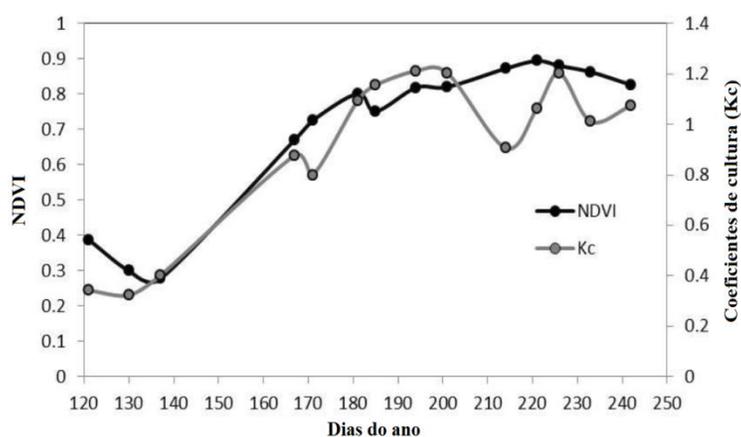
A ET_o pode ser calculada, por meio de dados climáticos, assim como pela combinação direta da resistência da cultura, albedo e fatores de resistência

do ar utilizando a equação de Penman (1948). Tal método é recomendado como padrão pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), para estimar a ET_o , conhecido como método FAO 56 (ALLEN et al., 1998), capaz de prever com grande confiabilidade a ET_o numa vasta variedade de climas e locais.

3.4 Relação entre K_c e os índices de vegetação

Utilizando séries temporais de produtos de índice de vegetação NDVI do sensor MODIS com resolução de 250 m, Kamble, Kilic e Hubbard (2013) desenvolveram um modelo de regressão linear simples, para estabelecer uma correlação entre os valores de NDVI e K_c , no qual obtiveram uma forte correlação entre os valores de K_c estimados (K_{cNDVI}) e os valores de K_c observados (FAO – 56), para as culturas do milho e da soja, em diferentes sistemas de produção agrícola, nas altas planícies dos Estados Unidos, com r^2 de 0,91 e 0,90. A figura 1 mostra a progressão sazonal dos valores de NDVI e K_c , em locais de calibração do modelo, em que predominam campos irrigados, no estado de Nebraska, EUA.

Figura 1 - Progressão sazonal de NDVI e K_c , em locais de calibração do modelo: campos irrigados, Nebraska, EUA.



Bezerra et al. (2010) afirmam que a reflectância espectral das culturas agrícolas é capaz de fornecer uma estimativa indireta dos valores de K_c . Fato que, também, pode ser visto por meio da semelhança entre as curvas de K_c e as dos índices de vegetação.

Também, com o objetivo de estabelecer uma relação entre valores de NDVI e K_c apresentados pelas culturas de milho, soja, sorgo e alfafa, na região centro-sul do estado de Nebraska, Singh e Irmak (2009) desenvolveram um modelo de regressão linear e obtiveram como resultado uma alta correlação entre os valores de NDVI e K_c , com destaque às culturas irrigadas.

Dessa forma, verifica-se que o modelo de regressão linear mostra-se um método prático e eficaz no estabelecimento e análise da relação entre valores de NDVI e K_c .

3.5 Sensoriamento remoto na agricultura irrigada

A partir de imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 7, datadas do ano de 2001, Schmidt et al. (2004) mapearam as áreas de concentração dos sistemas de irrigação por pivô central, nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. O estado de Minas Gerais apresentou o maior número de equipamentos, contabilizando um total de 2.485 pivôs centrais. Por sua vez, no estado de São Paulo, foram identificados 1.305 equipamentos, cobrindo uma área de 254.360 ha. Em trabalho mais recente, Landau et al. (2014) identificaram, no estado de São Paulo, 3.528 equipamentos, contabilizando uma área de 168.674,19 ha. Rio de Janeiro mostrou-se o estado com o menor número de equipamentos num total de 15, também, colocando-se como estado com a menor área ocupada pelos pivôs centrais, totalizando 6.620 ha. Ao fim, os autores concluíram que a metodologia utilizada mostrou-se válida, para a determinação do número e distribuição de equipamentos de irrigação do tipo

pivô central, podendo servir de complemento a informações disponibilizadas por outras fontes.

Utilizando imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 7, além de ferramentas de geoprocessamento, Sano et al. (2005) estimaram a demanda hídrica dos sistemas de irrigação por pivôs centrais, no Distrito Federal, assim como determinaram a variação da área irrigada por estes sistemas entre os anos de 1992 e 2002, a fim de verificar sua importância em relação ao consumo humano. Os autores verificaram que de 1992 para 2002 o número de pivôs centrais, no Distrito Federal, passou de 55 para 104, a área irrigada de 3.894 ha para 6.823 ha e o consumo de 23,36 para 40,94 milhões de $m^3 \text{ ano}^{-1}$. Concluíram que o uso de água para irrigação por pivô central, no Distrito Federal, mostra-se menos representativo do que o consumo de água, para o abastecimento humano, contudo a demanda para a irrigação tem crescido de forma acelerada, indicando uma possível alteração desse quadro.

Utilizando imagens do satélite CBERS2B/CCD, Ferreira et al. (2011) realizaram um mapeamento cadastral das áreas irrigadas por pivôs centrais, no Estado de Minas Gerais, de modo a suprir a pouca informação relativa à agricultura irrigada na região. Ao fim do trabalho, os autores identificaram 3.781 sistemas de irrigação do tipo pivô central. A maior área irrigada foi de 192,6 hectares, enquanto a menor foi de 4,6 hectares. Os municípios de Unai e Paracatu apresentaram os maiores números de equipamentos instalados, num total de 495 e 455 sistemas, respectivamente.

3.6 Demanda de água pela agricultura irrigada

Estima-se que 17% de toda a terra agricultável, no mundo, correspondam a áreas irrigadas, sendo responsáveis pela produção de mais de 40% de todo alimento consumido no mundo (PAULINO et al., 2011). De acordo com a United States Geological Survey - USGS (2010), 60% de toda a água

doce mundial são destinadas à irrigação de culturas agrícolas. No Brasil, segundo o Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2014, a irrigação é responsável pela maior parcela de vazão consumida (72%), assim como pela (PEREIRA JÚNIOR; NICÁCIO, 2014) maior parcela de vazão retirada, algo em torno de 54% do total. O valor estimado pela Agência Nacional de Águas, em relação à área irrigada, em 2012, foi de 5,8 milhões de hectares, ou 19,6% do potencial nacional de 29,6 milhões de hectares.

Apesar de ser o principal uso consuntivo no país e, por isso, demandar maior atenção dos órgãos gestores, visando ao uso racional de água, a agricultura irrigada propicia o aumento da produtividade de alimentos e, conseqüentemente, preços menores em relação àqueles produzidos em áreas de sequeiro. Em especial nas regiões onde o déficit hídrico é significativo, a irrigação constitui-se em fator essencial para a produção agrícola (BRASIL, 2014).

A $Q_{7,10}$ (vazão específica mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos) corresponde a um valor que, em média, a cada 10 anos, será igualado ou inferiorizado pelo escoamento médio de estiagem do rio em quaisquer 7 dias consecutivos.

De acordo com a portaria 010/98 do Instituto Mineiro de Gestão da Água-IGAM, é fixado, para o estado de Minas Gerais, o percentual de 30% da $Q_{7,10}$ como limite máximo de derivações consuntivas a serem outorgadas, em cada seção da bacia hidrográfica considerada, garantindo, assim, vazões residuais mínimas, a jusante, equivalentes a 70% da $Q_{7,10}$ (HIDROTEC UFV, 2009).

Ferreira, Silva e Dantas (2014) utilizaram dados de sensoriamento remoto, para estimar a demanda hídrica requerida pela irrigação na bacia do Rio Urucuia, MG, no ano de 2010, comparando os resultados obtidos com a disponibilidade hídrica da bacia. A estimativa da demanda hídrica foi realizada a

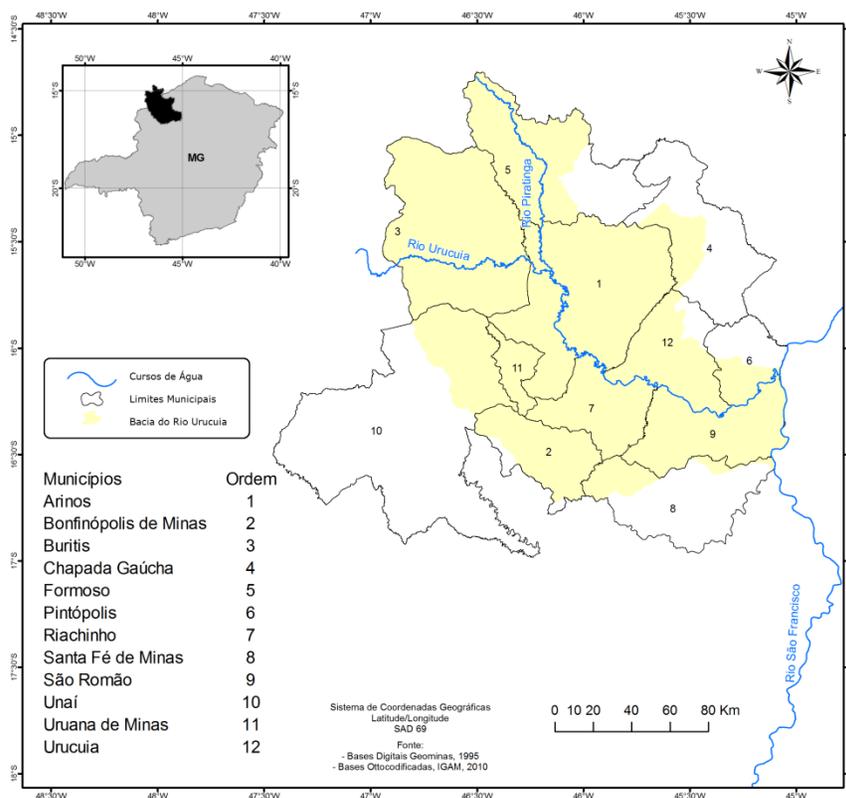
partir da evapotranspiração de referência bem como da evapotranspiração das culturas agrícolas presentes na área. Ao final do estudo, os autores concluíram que, para o ano de 2010, as demandas hídricas requeridas pelos pivôs centrais de irrigação excediam o limite de 30% da $Q_{7,10}$ (vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência), estabelecida como vazão de referência a ser utilizada, para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial na bacia hidrográfica do Rio Urucuia, de acordo com a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março 2012 (MINAS GERAIS, 2012). Considerado as eficiências de aplicação de 100%, 90% e 60%, para os equipamentos, a demanda de água requerida por eles foi, respectivamente, 43%, 48% e 72% da disponibilidade hídrica da bacia, extrapolando, desta forma, o valor permitido pela lei vigente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A área estudada foi a bacia do Rio Urucuia, localizada na mesorregião noroeste do estado de Minas Gerais, pertencente à Bacia do Rio São Francisco. Apresenta uma área de 25.135 km² e está situada entre as coordenadas geográficas de 14°30' a 17°00' de Latitude Sul e 45°00' a 47°00' de Longitude Oeste de Greenwich. Doze municípios encontram-se inseridos na bacia, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM (2014).

De acordo com os índices de umidade de Thornthwaite, o clima na região é considerado subúmido e subúmido seco (C2 e C1, respectivamente), registrando uma temperatura média anual de 23°C. As médias anuais de precipitação ficam em torno de 990 a 1.414 mm. Predominam na bacia os latossolos com chapadas e planícies. A região se destaca pela intensa atividade do agronegócio, sendo comum a utilização de práticas de irrigação (FERREIRA; SILVA; DANTAS, 2014).

4.2 Identificação e mapeamento dos pivôs centrais na bacia do Rio Urucuia

A identificação e o mapeamento dos pivôs centrais, existentes na bacia do Rio Urucuia, foram realizados, com o auxílio de imagens de satélite, disponibilizadas pelo Google Earth. Foi adotado, como critério, apenas o uso de imagens do ano de 2013.

Para a geração dos polígonos, representativos das áreas irrigadas por pivôs centrais, foram marcadas as coordenadas geográficas do centro de cada um dos pivôs, assim como seus respectivos raios. Estas informações foram organizadas, na forma de planilha eletrônica, possibilitando a importação para o sistema de informação geográfica Quantum GIS® (Open Source Geospatial Foundation - OSGeo).

No sistema de informação geográfica QGIS, foram importadas as coordenadas geográficas e o raio referente a cada um dos pivôs centrais encontrados no perímetro da bacia. Isto permitiu a realização da operação “*buffer*” que produziu um arquivo no formato vetorial com os círculos correspondentes às áreas irrigadas por cada um dos pivôs centrais existentes na bacia do Rio Urucuia.

4.3 Obtenção das imagens e organização da série temporal

Os produtos utilizados no estudo foram obtidos, por meio do Banco de Produtos MODIS, na Base Estadual Brasileira, disponível em:

<http://www.modis.cnptia.embrapa.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Foram obtidos os produtos de índice de vegetação MOD13Q1-NDVI, desenvolvidos com o objetivo de fornecer comparações espaciais e temporais consistentes das condições da vegetação terrestre. Tais produtos possuem frequência temporal de 16 dias e resolução espacial de 250 metros.

Para uma melhor manipulação das informações, os produtos obtidos foram organizados na forma de séries temporais, sendo o procedimento realizado com o auxílio do aplicativo ILWIS (Integrated Land and Water Information System – 52° North). A primeira imagem da série referiu-se à data de 01/01/2013, enquanto a última data foi 19/12/2013. Ao todo, vinte e três imagens foram utilizadas, espaçadas entre si por um intervalo de 16 dias, contemplando, desta forma, todos os meses do ano de 2013.

4.4 Extração dos valores máximos de NDVI e K_c para as áreas irrigadas pelos pivôs centrais

A organização dos produtos MOD13Q1-NDVI, em série temporal, no aplicativo ILWIS, juntamente com a importação do arquivo de polígonos em formato vetorial, contendo os círculos correspondentes às áreas irrigadas pelos pivôs centrais da bacia do Rio Urucuia, permitiu a extração dos máximos valores de NDVI, observados em cada um dos pivôs centrais, ao longo de todo o ano de 2013.

Desta forma, foram obtidos os valores máximos de NDVI, para cada área irrigada por pivô central, nas vinte e três imagens utilizadas. Posteriormente, estes valores foram organizados, de forma mensal, de modo a facilitar a análise dos resultados obtidos e a integração com novas informações.

Após a obtenção dos valores máximos mensais de NDVI, para cada um dos pivôs centrais mapeados na bacia do Rio Urucuia, foram calculados os coeficientes de cultura (K_c), para cada uma das áreas irrigadas pelos pivôs

centrais, para cada mês do ano de 2013. Tal procedimento foi realizado, utilizando o modelo de regressão linear simples (EQUAÇÃO 4), proposto por Kamble, Kilic e Hubbard (2013). Desta forma, foram estabelecidos valores mensais de K_c , a partir dos valores máximos mensais de NDVI.

$$K_c = 1,457 NDVI - 0,1725 \quad (4)$$

4.5 Cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o)

Para o cálculo da evapotranspiração de referência da bacia do Rio Urucuia, foi utilizada a metodologia, proposta por Penman-Montheih – FAO56 (ALLEN et al., 1998), expressa pela Equação (5):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1+0,34 u_2)} \quad (5)$$

Em que ET_o é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (mm.dia^{-1}); R_n , a radiação líquida ($\text{MJ.m}^2 .\text{dia}^{-1}$); G , o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^2 .\text{dia}^{-1}$); T , a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 a velocidade do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}); e_s a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a a pressão real de vapor (kPa); Δ a tangente da curva de saturação ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); e γ a constante psicométrica ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Foram utilizados dados meteorológicos da estação de Arinos-MG, administrada pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Para o ano de 2013, foram coletados dados horários de temperatura do bulbo seco, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento, bem como os dados diários de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima. Como não havia registros de dados de insolação solar diária para essa estação, a estimativa de R_n foi feita seguindo uma metodologia proposta por Allen et al. (1998). Assim que obtidos todos os dados necessários, para o cálculo da evapotranspiração de

referência, eles foram organizados na forma de planilha eletrônica. Ao final do procedimento, foram obtidos os valores de evapotranspiração de referência, da bacia do Rio Urucuia, para os 365 dias do ano de 2013. Posteriormente, estes valores foram somados, sendo agrupados em intervalos mensais.

4.6 Cálculo da evapotranspiração de cultura (ET_c)

A partir dos valores de K_c , obtidos em cada área irrigada por pivô central, para todos os meses do ano de 2013, juntamente com os valores de evapotranspiração de referência, foram obtidos os valores da evapotranspiração de cultura em $mm.mês^{-1}$, por meio da Equação 6 (ALLEN et al., 1998):

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (6)$$

Em que:

ET_c = Evapotranspiração da cultura ($mm.mês^{-1}$),

ET_o = Evapotranspiração de referência ($mm.mês^{-1}$),

K_c = Coeficiente de cultura.

4.7 Lâmina líquida, Lâmina bruta e Demanda hídrica da bacia do Rio Urucuia

A lâmina líquida de irrigação, entendida como a quantidade de água que deve ser reposta no solo, corresponde aos valores de evapotranspiração da cultura. Com estes valores, calculou-se a lâmina bruta acumulada de irrigação (volume de água destinado à irrigação), obtida pela divisão da lâmina líquida pela eficiência de aplicação da irrigação, segundo Equação 7 (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

$$LB = \frac{ET_c}{E_a} \quad (7)$$

Em que:

LB = Lâmina bruta acumulada de irrigação ($mm.mês^{-1}$),

ET_c = Evapotranspiração da cultura ($mm.mês^{-1}$),
 Ea = Eficiência de aplicação da irrigação (*decimal*).

Foram consideradas eficiências de aplicação dos equipamentos de 100% (sistema ideal), 90% e 60%. Percentuais de eficiência abaixo de 60% não foram considerados, uma vez que são considerados inaceitáveis na irrigação.

Pela medida do raio de cada um dos pivôs centrais de irrigação, foi possível extrair a informação da área ocupada.

Obtidos os valores de lâmina bruta e de área irrigada, para cada um dos pivôs centrais, foi possível estimar a demanda hídrica, entendida como a quantidade de água utilizada na irrigação, explicitada pela Equação 8 (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

$$DH = LB \cdot \text{Área} \quad (8)$$

Em que:

DH = Demanda hídrica ($litros.mês^{-1}$),

LB = Lâmina bruta acumulada de irrigação ($mm.mês^{-1}$),

Área = Área irrigada (m^2).

4.8 Vazão da bacia

Os dados de vazão da bacia foram obtidos, por meio do Atlas Digital das Águas de Minas, elaborado pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, MG, em parceria com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) e a Secretaria de Estado de Agricultura Pecuária e Abastecimento (SEAPA).

Tomando por referência o exutório da bacia, foi utilizado o valor da $Q_{7,10}$, que é a vazão mínima de 7 dias consecutivos com período de recorrência de 10 anos. Este valor é adotado como referência para concessão das outorgas e,

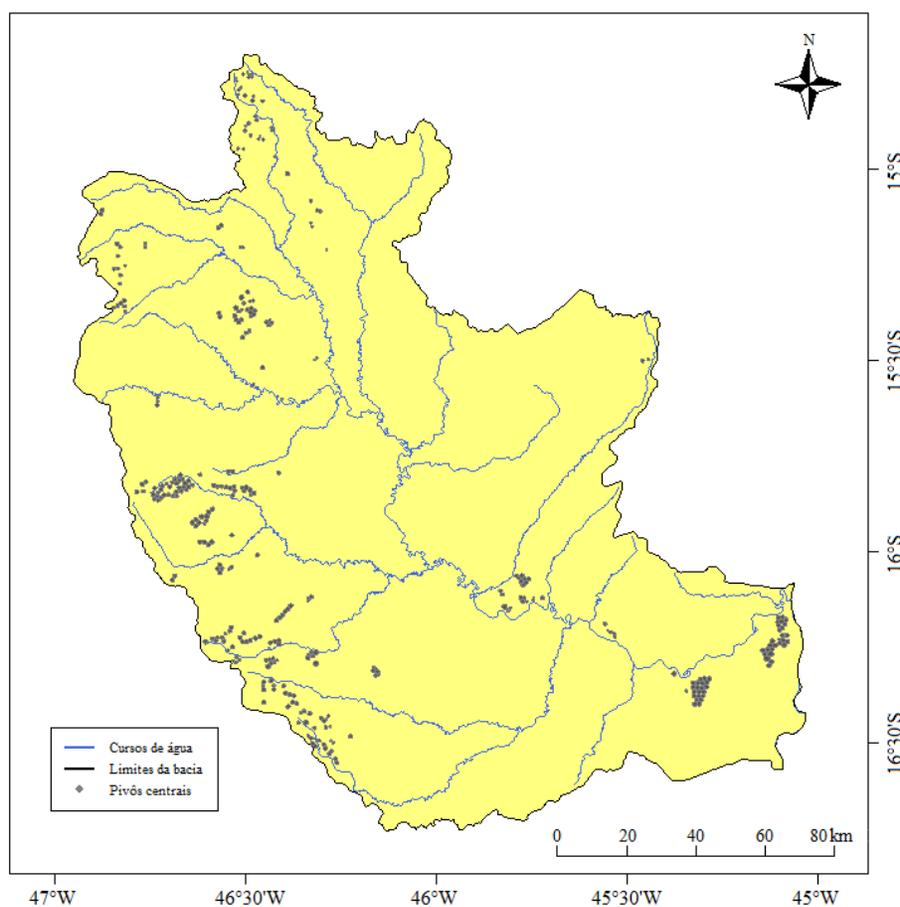
também, para definição da situação hídrica no Estado de Minas Gerais, fornecendo a estimativa estatística da disponibilidade hídrica dos escoamentos naturais de água. No Estado de Minas Gerais são destinados à irrigação 30% do valor da $Q_{7,10}$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Identificação dos pivôs centrais

Por meio de imagens disponibilizadas pelo Google Earth, datadas do ano de 2013, foram mapeados 344 pivôs centrais de irrigação, na bacia do Rio Urucuia, conforme mostra a Figura 3, totalizando uma área de 30.032 ha. Esse número representa, aproximadamente, 1,2% da área total da bacia.

Figura 3 - Localização dos pivôs centrais na Bacia do Rio Urucuia.



Utilizando imagens Landsat 5, datadas do ano de 2010, Silva e Ferreira (2011) encontraram, na mesma área de estudo, por meio de interpretação visual, 334 pivôs centrais de irrigação. Isto significa que houve um aumento de 3% no número de equipamentos instalados neste período.

Na Tabela 2 é mostrada a distribuição dos pivôs centrais por município bem como sua área irrigada total, em hectares.

Tabela 2 - Número de pivôs centrais mapeados e área total irrigada por municípios.

Município	Pivôs centrais	Área total irrigada (ha)
Unaí	108	10.395
Buritis	66	5.447
São Romão	50	5.722
Bonfinópolis de Minas	45	3.716
Formoso	36	1.957
Urucuaia	27	1.988
Riachinho	6	394
Uruana de Minas	4	285
Chapada Gaúcha	2	128
Arinos	0	0
Santa Fé de Minas	0	0
Pintópolis	0	0

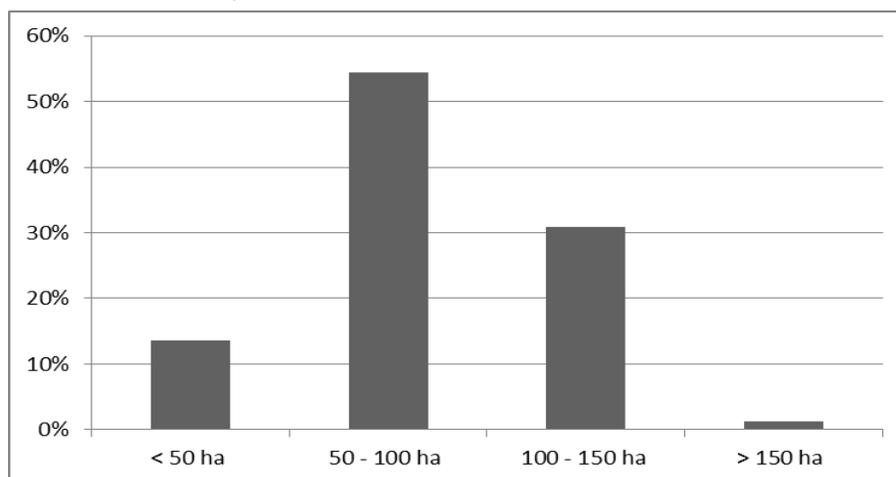
Os municípios de Unaí, Buritis, São Romão e Bonfinópolis de Minas, juntos, possuem 78,2% do total de pivôs centrais instalados na bacia. Os municípios de Arinos, Santa Fé de Minas e Pintópolis não apresentaram nenhum equipamento instalado.

A área média observada dos equipamentos instalados na bacia foi de 87 ha e o maior deles encontra-se no município de São Romão e possui área de 201 ha. O menor equipamento está localizado no município de Urucuia e possui uma área de 18,5 ha.

A área total irrigada por pivôs centrais, nos doze municípios, que compõem a bacia é de 30.032 ha (TABELA 2). Já a população é de 189.124 habitantes. De acordo com Christofidis (2006), o indicador mundial de superfície anual irrigada, per capita, apresentava-se no patamar de $463 \text{ m}^2 \text{ hab}^{-1}$, tendo ocorrido, no final do século XX, uma redução para o valor de $453 \text{ m}^2 \text{ hab}^{-1}$. Dessa forma, ter-se-á, para os municípios que compõem a bacia, um valor de $1587,9 \text{ m}^2 \text{ hab}^{-1}$, número expressivo e bem superior ao indicador mundial.

O Gráfico 1 mostra o percentual de equipamentos do tipo pivô central, de acordo com a área irrigada na bacia do Rio Urucuia. Observa-se que 54,4% dos equipamentos cobrem áreas que variam de 50 a 100 hectares, num total de 187 pivôs. O menor percentual verificado é o de equipamentos com área de cobertura superior a 150 hectares, num total de 4 equipamentos, o que corresponde a 1,2%. Já os equipamentos que cobrem áreas com até 50 hectares e entre 100 e 150 hectares correspondem, respectivamente, a 13,6% e 30,8%.

Gráfico 1 - Percentual de equipamentos do tipo pivô central, de acordo com a área irrigada.

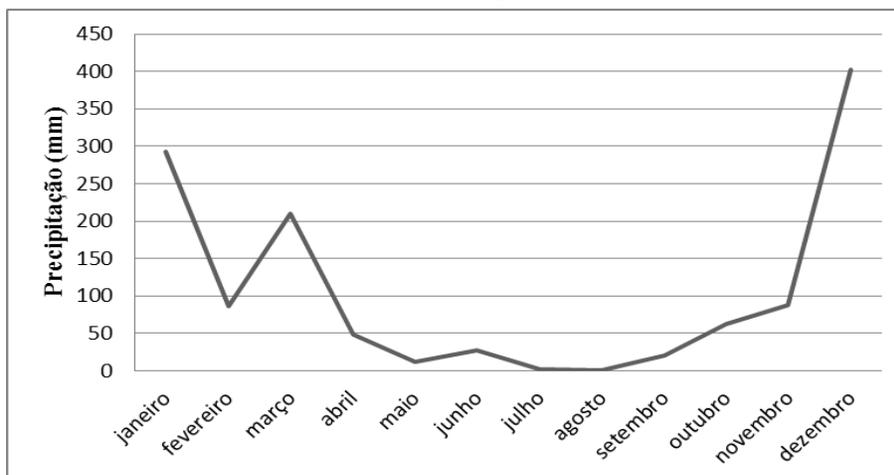


Nos anos de 2008 e 2009, Ferreira et al. (2011) contabilizaram, no município de Unaí, um total de 495 pivôs centrais. No presente trabalho foram mapeados 108 equipamentos, distribuídos no perímetro da bacia Urucuia, os demais equipamentos encontram-se localizados no perímetro da bacia do Rio Paracatu.

A região mostra um grande potencial agrícola, confirmado pelo grande número de equipamentos de irrigação do tipo pivô central instalados, bem como o aumento no seu número ao longo dos últimos anos.

5.2 Precipitação

Na estação meteorológica de Arinos-MG, foram coletados, em intervalos diários, dados de precipitação, posteriormente, foram agrupados em intervalos mensais, conforme mostra o Gráfico 2:

Gráfico 2 - Valores mensais de precipitação (mm.mês^{-1}).

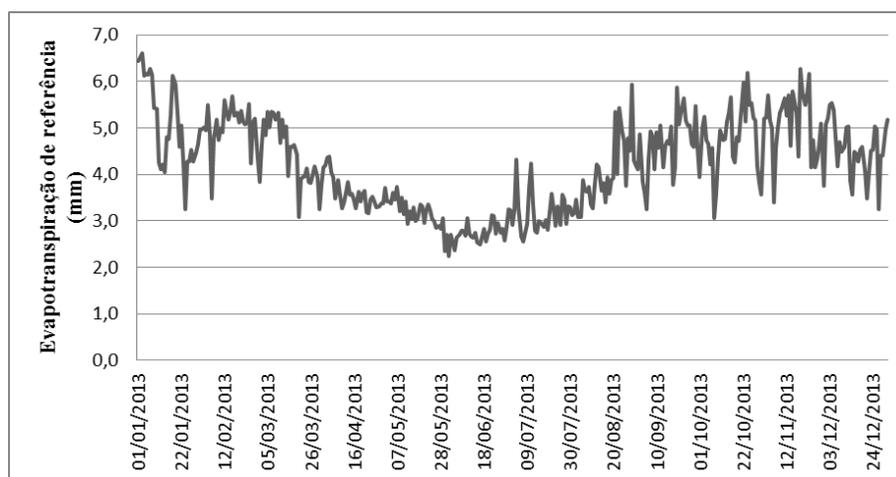
Os dados mostram que os meses mais chuvosos do ano de 2013 foram janeiro, março e dezembro com precipitações mensais de 293, 210 e 403 mm, respectivamente. Já os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro fecharam o ano com precipitações mensais inferiores a 30 mm.

De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Urucuia, 90% da chuva anual estende-se de outubro a março, enquanto o período seco vai de abril a setembro. A precipitação anual foi de 1.251 mm, ficando acima da média anual histórica, cujo valor é 1.175 mm (IGAM, 2014).

5.3 Evapotranspiração de referência (ET_0)

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0), foram utilizados os seguintes dados: temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade média, pressão média, velocidade média do vento e insolação solar diária; esta última estimada a partir da metodologia proposta por Allen et al. (1998). A ET_0 foi obtida, em intervalos diários, conforme mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3 - Valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelo método Penman-Monteith (FAO 56), para a bacia do Rio Urucua, durante o ano de 2013.



Na Tabela 3, são apresentados os valores máximos e mínimos de ET_o ocorridos dentro de cada um dos meses do ano de 2013.

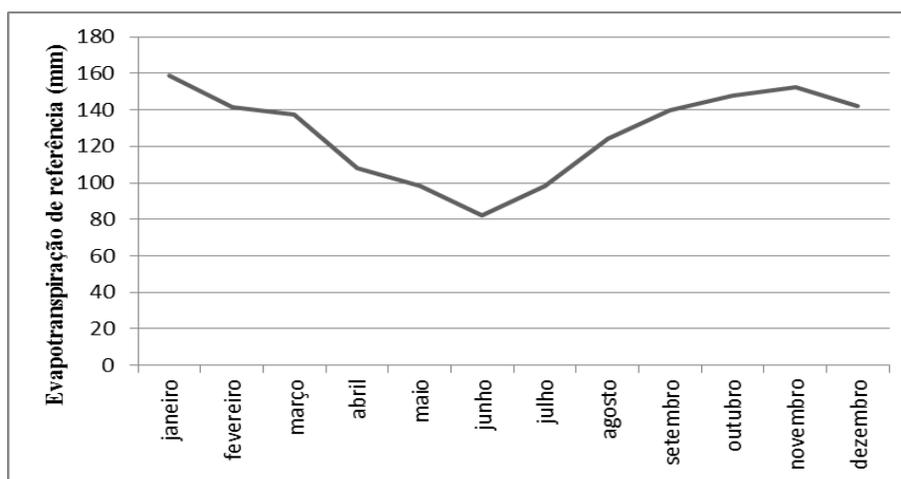
Tabela 3 - ET_o máxima e mínima ocorrida nos meses de 2013.

Mês	ET_o máxima	Data (ET_o máxima)	ET_o mínima	Data (ET_o mínima)
janeiro	6,61 mm	03/01/2013	3,24 mm	24/01/2013
fevereiro	5,69 mm	16/02/2013	3,48 mm	06/02/2013
março	5,35 mm	05/03/2013	3,07 mm	20/03/2013
abril	4,37 mm	04/04/2013	3,17 mm	23/04/2013
maio	3,73 mm	07/05/2013	2,34 mm	30/05/2013
junho	3,24 mm	30/06/2013	2,25 mm	01/06/2013
julho	4,32 mm	04/07/2013	2,54 mm	07/07/2013
agosto	5,94 mm	29/08/2013	3,07 mm	03/08/2013
setembro	5,86 mm	20/09/2013	3,25 mm	05/09/2013
outubro	6,19 mm	24/10/2013	3,06 mm	08/10/2013
novembro	6,28 mm	19/11/2013	3,39 mm	06/11/2013
dezembro	5,54 mm	04/12/2013	3,25 mm	27/12/2013

As maiores amplitudes de valores de ET_o foram verificadas, nos meses de janeiro, outubro e novembro, com estes meses variando de 3,24 a 6,61 mm.dia^{-1} (janeiro), 3,06 a 6,19 mm.dia^{-1} (outubro) e 3,39 a 6,28 mm.dia^{-1} (novembro). Por sua vez, os meses de junho, abril e maio apresentaram, respectivamente, os comportamentos mais homogêneos de ET_o , com amplitudes inferiores a 1,4 mm.dia^{-1} .

Posteriormente, os valores de ET_o foram agrupados de forma mensal, conforme mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Valores mensais de evapotranspiração de referência, estimados pelo método Penman-Monteith (FAO 56), para a bacia do Rio Urucuia, durante o ano de 2013.



Com relação aos valores de ET_o calculados e analisando o Gráfico 4, verifica-se que de janeiro a junho os valores apresentam-se decrescentes, tornando-se crescentes de julho a dezembro. Janeiro, novembro e outubro registraram, respectivamente, os maiores valores, enquanto junho, julho e maio, apresentaram, respectivamente, os menores valores de evapotranspiração calculados. Tais resultados estão de acordo com os publicados no Plano Diretor

de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Urucuia (IGAM, 2014), no qual a evapotranspiração variou de 99 mm.mês⁻¹ em junho a 143 mm.mês⁻¹ em outubro, sendo os meses de menor evapotranspiração de maio a julho. Medindo o grau de correlação entre os valores de ET_o obtidos e os apresentados no plano diretor da bacia, obteve-se ρ de Pearson igual a 0,82. Tal resultado indica uma forte correlação entre os resultados encontrados em ambos os trabalhos.

A evapotranspiração anual calculada na bacia foi de 1.530 mm, ficando pouco acima da média anual histórica que é de 1.481 mm. Comportamento similar foi verificado por Lemos Filho et al. (2007), ao analisar a demanda hídrica do estado de Minas Gerais, por meio de valores de ET_o estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO. Em seus resultados, o autor conclui que os menores valores estimados de ET_o ocorreram, no período de abril a agosto, tendo os valores mínimos sido encontrados no mês de junho. Já os maiores valores estimados de ET_o, para as estações de Minas Gerais, foram registrados no mês de janeiro. O autor, ainda, afirma que as regiões Noroeste e do Triângulo apresentaram as menores variações espaciais da ET_o, enquanto as menores variações temporais da ET_o foram registradas no noroeste, no oeste, no sul e no sudeste (Zona da mata) de Minas.

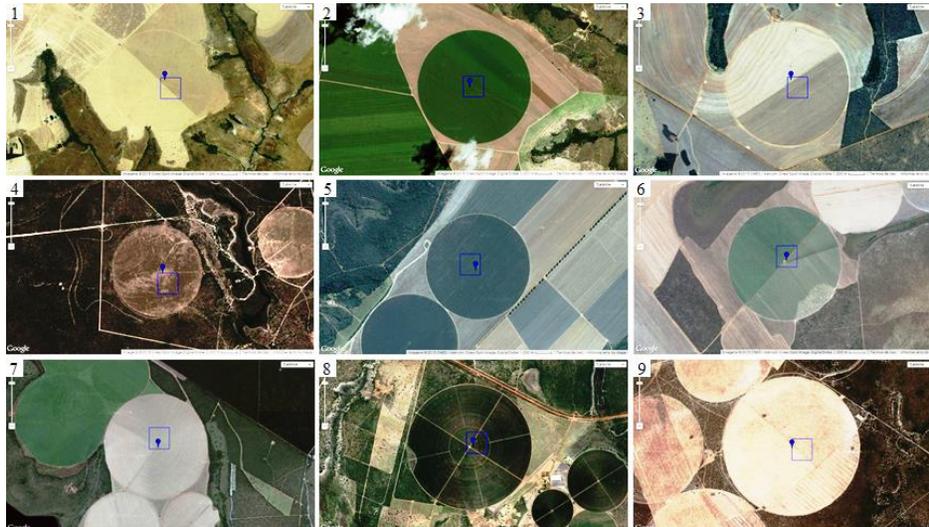
5.4 Valores máximos de NDVI e K_c

Extraídos os valores máximos de NDVI, de cada uma das áreas irrigadas pelos pivôs centrais, para todos os meses do ano de 2013 e utilizando o modelo de regressão linear, proposto por Kamble (EQUAÇÃO 4), foram obtidos os valores de K_c baseados nos valores de NDVI. Como o índice de vegetação NDVI foi utilizado, para estimar os valores de K_c, o coeficiente da cultura será aqui denominado K_{cNDVI}.

Os gráficos seguintes apresentam séries temporais dos valores máximos de NDVI, juntamente com os valores de K_c baseados nos valores de NDVI

(K_{cNDVI}). Para ilustrar o que foi realizado, nas 344 áreas irrigadas por pivô central, foram escolhidos os pivôs centrais que apresentavam a maior área irrigada de cada município da bacia estudada (FIGURA 4).

Figura 4 - Maiores áreas irrigadas por pivô central de cada município da Bacia do Rio Urucuia.



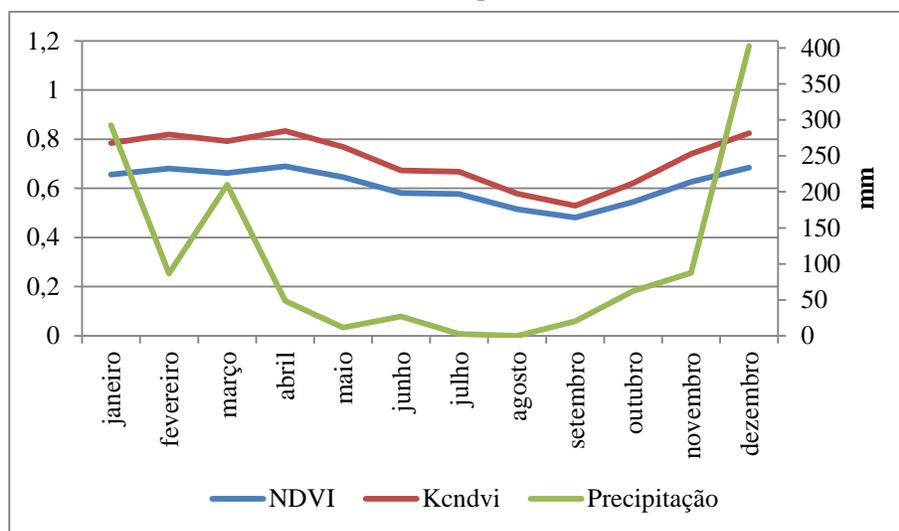
Legenda: (1) Formoso, 129 ha; (2) Buritis, 141 ha; (3) Unaí, 166 ha; (4) Chapada Gaúcha, 85 ha; (5) Uruana de Minas, 115 ha; (6) Bonfinópolis de Minas, 137 ha; (7) Riachinho, 110 ha; (8) Urucuia, 168 ha; (9) São Romão, 201 ha.

Fonte: Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta (FREITAS et al., 2011).

A partir da análise dos perfis temporais de NDVI e K_{cNDVI} , juntamente com o auxílio de séries temporais de EVI2 disponibilizadas pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta, foi identificada a cultura agrícola presente na maior área irrigada de cada município.

5.4.1 Formoso

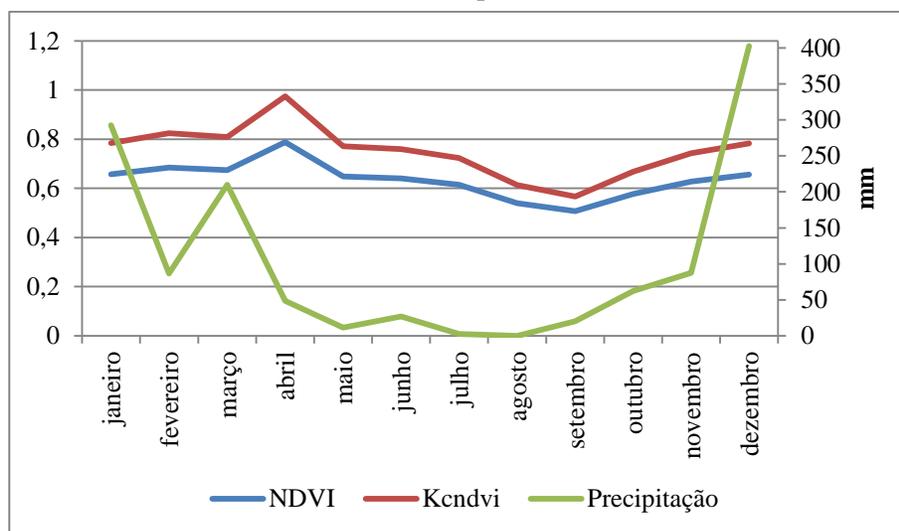
Gráfico 5 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 129 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Formoso.



A cultura agrícola presente na área trata-se de cana-soca. De janeiro a abril, conforme mostra o Gráfico 5, nota-se um gradativo aumento nos valores de K_{cNDVI} (com exceção do mês de março, em que há uma ligeira queda), os quais, também, são os maiores valores, ao longo de todos os meses do ano e abril registra o maior deles 0,83. Tal comportamento indica o estágio de desenvolvimento, incremento de biomassa e a maturação da cultura. Altos índices de precipitação são verificados, neste mesmo período, merecendo destaque os meses de janeiro e março, nos quais choveu, respectivamente, 292,7 e 209,9 mm. O período que vai de maio a setembro foi o mais seco do ano, neste mesmo período verifica-se uma gradativa queda nos valores de K_{c} , o menor deles registrado no mês de setembro (0,53). A partir de outubro, os valores de K_{c} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da planta.

5.4.2 Buritis

Gráfico 6 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 141 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Buritis.



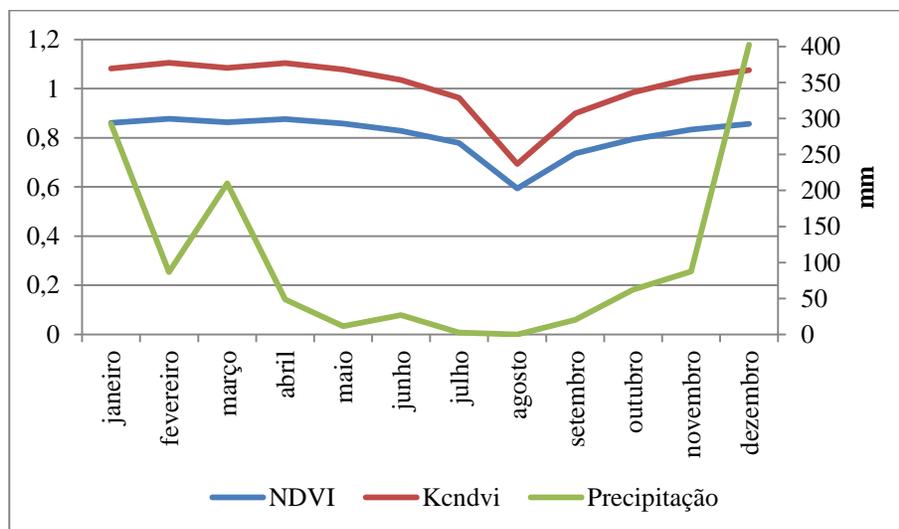
A cultura agrícola, plantada na área, trata-se de milho. De janeiro a junho, conforme mostra o Gráfico 6, são encontrados os maiores valores de K_{cNDVI} , o que indica o desenvolvimento e a maturação da cultura e este período coincide com a safra de verão. O mês de abril apresenta o maior valor de K_{cNDVI} em todo ano 0,97. Neste mesmo período, a precipitação atingiu valores significativos, com destaque aos meses de janeiro e março, nos quais choveu, respectivamente, 292,7 e 209,9 mm. A partir do mês de julho, os valores de K_{cNDVI} começam a diminuir, tal fato ocorre até o mês de outubro. Esta gradativa diminuição indica a realização da colheita da cultura, o mês de setembro registra o menor valor de K_{cNDVI} de todo o ano 0,57, valor este influenciado pela presença de palhada resultante da colheita, assim como uma maior exposição do solo. Neste período, a precipitação diminui, significativamente, destaque para o

mês de agosto no qual não choveu. Em novembro, os valores de K_{cNDVI} voltam a subir, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da cultura.

Ao determinar o coeficiente de cultura do milho no Campo Experimental da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, Souza et al. (2010) verificaram, na fase de crescimento máximo, o mesmo valor de K_c encontrado, em Buritis, no mês de abril, 0,97. Bastos et al. (2008), ao determinar o K_c do milho, utilizando lisímetros na região dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, encontraram valores de K_c oscilando entre 0,5 e 0,7 na fase de brotação e estabelecimento da cultura.

5.4.3 Unaí

Gráfico 7 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 166 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Unaí.



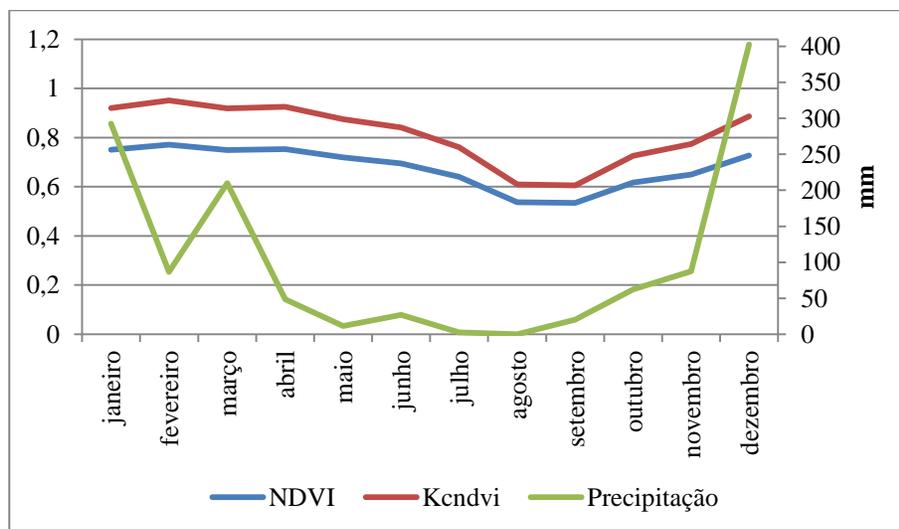
A cultura agrícola implantada na área trata-se de cana-soca. De janeiro a junho, conforme mostra o Gráfico 7, são encontrados os maiores valores de K_{cNDVI} , o que indica o período de desenvolvimento e maturação da cultura,

destaque para o mês de fevereiro que registra o maior valor de todo o ano 1,1. Neste mesmo período, os índices de precipitação são significativos e o mês no qual mais choveu foi janeiro, com 292,7 mm, seguido de março com 209,9 mm de precipitação. De julho a setembro, os valores de K_{cNDVI} sofrem uma queda significativa e o mês de agosto, no qual não houve chuva, registrou o menor K_{cNDVI} de todo o ano, 0,69. A partir de outubro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da cultura.

Os valores de K_c obtidos mostram-se muito próximos aos encontrados por Silva et al. (2012) que, ao determinar a exigência de água e os coeficientes de culturas de uma área comercial de cana-de-açúcar, no município de Juazeiro – BA, obtiveram K_{cs} que variaram de 0,64 a 0,71, na fase de brotação e estabelecimento e de 0,95 a 1,15 na fase de crescimento máximo.

5.4.4 Chapada Gaúcha

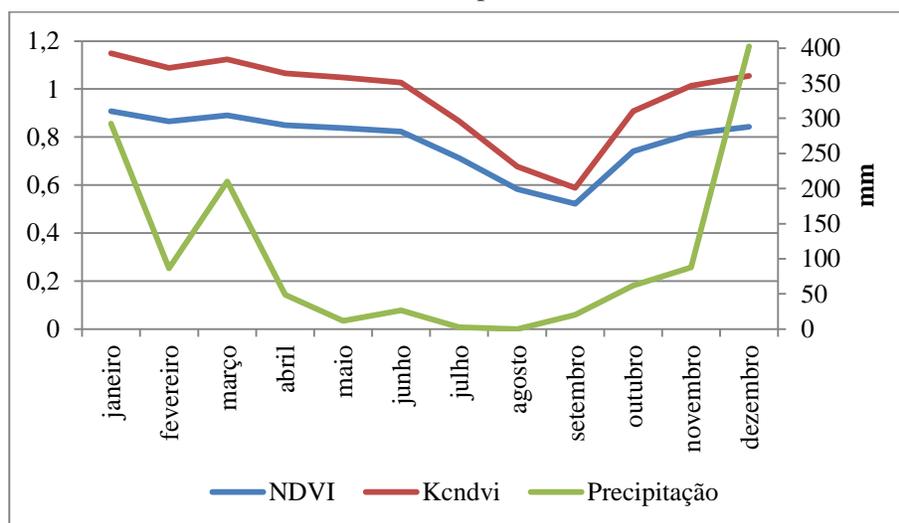
Gráfico 8 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 85 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Chapada Gaúcha.



A cultura agrícola implantada na área trata-se de cana-soca. Os valores mais altos de K_{cNDVI} são encontrados no período que vai de janeiro a abril, conforme mostra o Gráfico 8, indicando o desenvolvimento vegetativo da cultura e incremento de biomassa e o maior deles, 0,95, é registrado no mês de fevereiro. Neste mesmo período (janeiro a abril), a precipitação atinge valores significativos, com destaque para o mês de janeiro, no qual choveu 292,7 mm. A partir do mês de maio, os valores de K_{cNDVI} começam diminuir, indicando o período de colheita da cultura. Tal fato ocorre até o mês de setembro, que registra o menor valor de K_{cNDVI} , em todo ano (0,6), consequência da presença de solo exposto e palhada, resultantes da colheita realizada. Este mesmo período (abril a setembro), de acordo com os valores de precipitação, é considerado o semestre mais seco do ano, com destaque para o mês de agosto, no qual não choveu. Em outubro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da planta.

5.4.5 Uruana de Minas

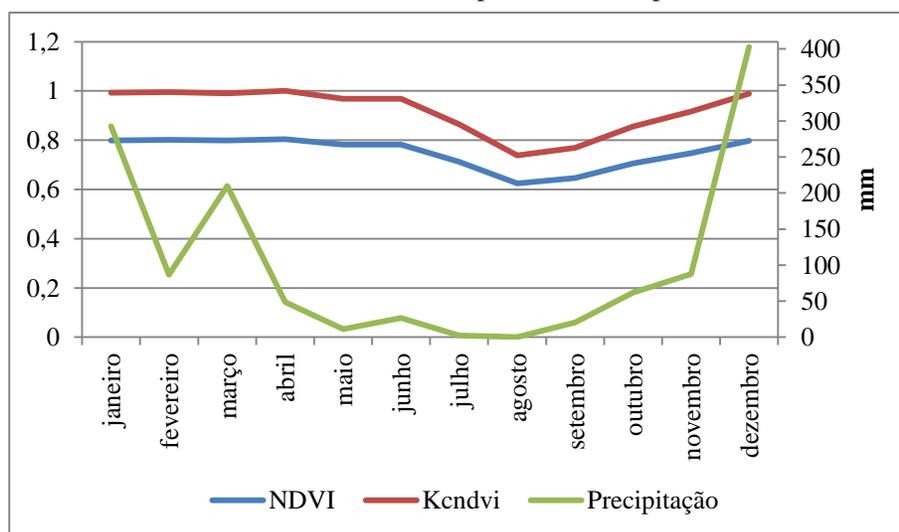
Gráfico 9 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 115 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Uruana de Minas.



A cultura agrícola implantada na área trata-se de soja. De janeiro a junho, conforme mostra o Gráfico 9, são registrados os maiores valores de K_{cNDVI} , indicando o desenvolvimento e aumento de biomassa da cultura. O mês de janeiro registra o maior K_{cNDVI} de todo ano, 1,15. Mês este em que a precipitação foi significativa, 292,7 mm. De julho a setembro, os valores de K_{cNDVI} entram em declínio, indicando a colheita da cultura. O mês de setembro registra o menor K_{cNDVI} de todo o ano, 0,59, neste mesmo mês, a precipitação não alcançou valores significativos, sendo a terceira mais baixa de todos os meses do ano (20,3 mm). A partir de outubro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da cultura.

5.4.6 Bonfinópolis de Minas

Gráfico 10 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 137 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Bonfinópolis de Minas.



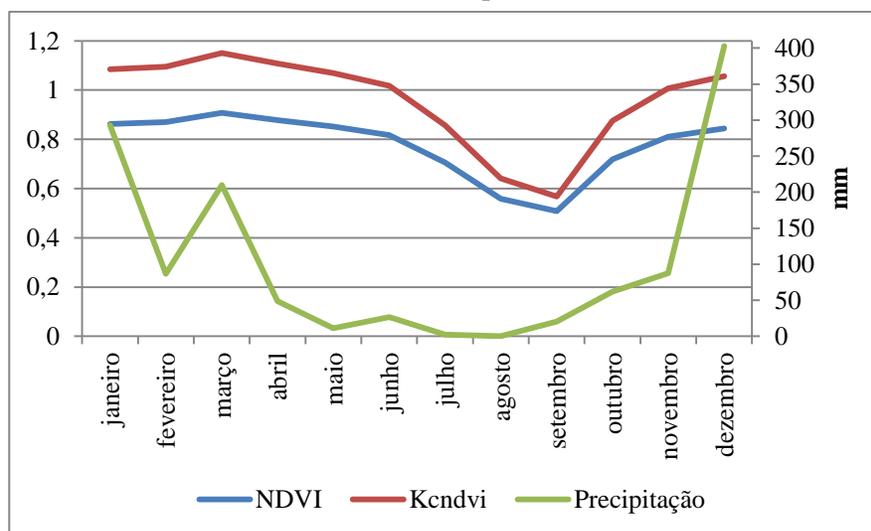
A cultura implantada na área trata-se de soja. De janeiro a junho, conforme mostra o Gráfico 10, são registrados os maiores valores de K_{cNDVI} , os

quais apresentam grande constância, variando de 1,0 nos meses de fevereiro e abril a 0,97 nos meses de maio e junho. Nos três primeiros meses deste período, a precipitação atinge valores significativos, com destaque aos meses de janeiro e março, nos quais choveu, respectivamente, 292,7 e 209,9 mm. A partir de julho, os valores de K_{cNDVI} começam a diminuir, indicando o início da colheita da cultura, o menor deles é registrado no mês agosto (0,74), para o qual a precipitação foi nula. Em novembro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da cultura.

Os valores de K_c encontrados corroboram os obtidos por Doorenbos e Pruitt (1977), no estágio de produção da cultura, os quais variaram de 1,0 a 1,15. Bastos et al. (2007), ao determinar os coeficientes de cultivo da soja, em uma área experimental da Embrapa Meio Norte, localizada em Alvorada do Gurguéia, Piauí, obtiveram valores de K_c que variam de 1,04 a 1,29 entre os estágios de crescimento máximo e maturação, respectivamente. No estágio de maturidade da cultura, o valor de K_c obtido pelos autores acima citados foi de 0,8.

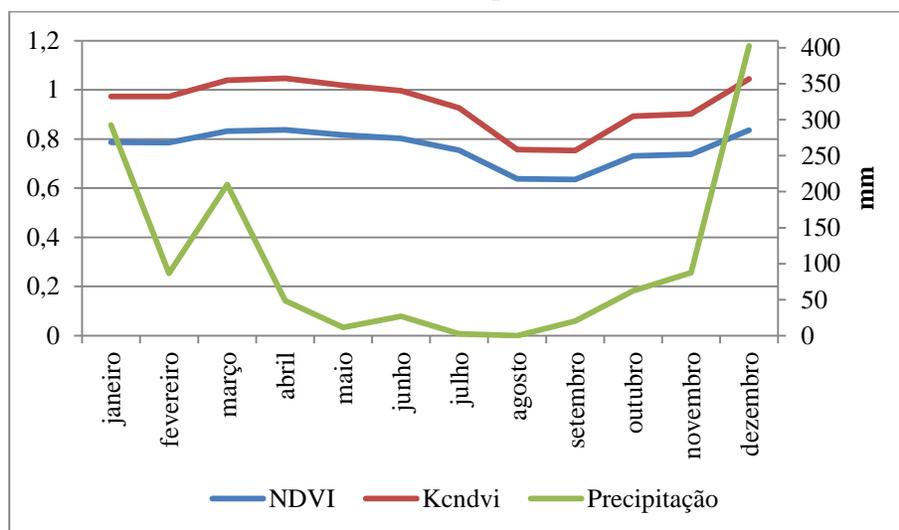
5.4.7 Riachinho

Gráfico 11 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 110 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Riachinho.



A cultura agrícola implantada na área trata-se de soja. De janeiro a junho, conforme mostra o Gráfico 11, são registrados os maiores valores de K_{cNDVI} , indicando o desenvolvimento e aumento de biomassa da cultura. O mês de março registra o maior K_{cNDVI} de todo ano, 1,150. Mês este em que a precipitação foi significativa, 209,9 mm. De julho a setembro, os valores de K_{cNDVI} entram em declínio, indicando a colheita da cultura. O mês de setembro registra o menor K_{cNDVI} de todo o ano, 0,567; neste mesmo mês a precipitação não alcançou valores significativos, sendo a terceira mais baixa de todos os meses do ano (20,3 mm). A partir de outubro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da cultura.

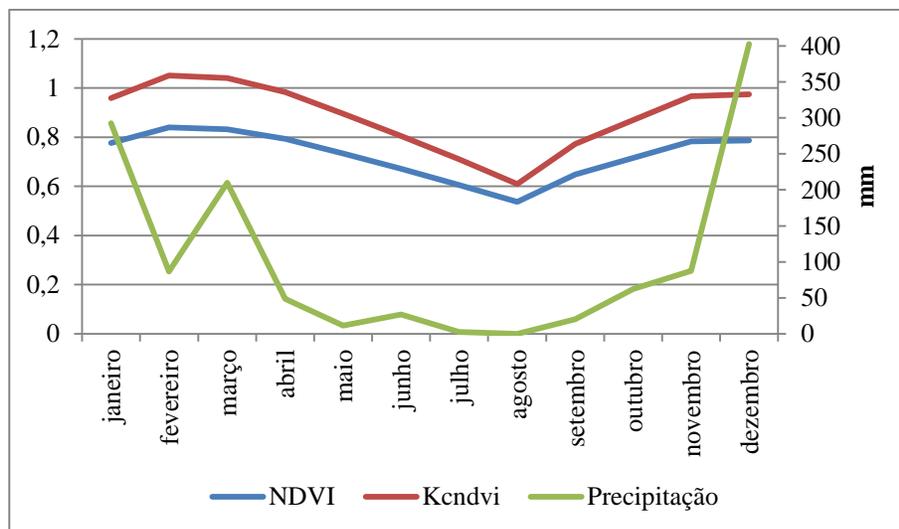
Gráfico 12 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 168 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Urucuia.



A cultura agrícola implantada na área trata-se de milho. De janeiro a julho, conforme mostra o Gráfico 12, são registrados os maiores valores de K_{cNDVI} , indicando o desenvolvimento e aumento de biomassa da cultura. O mês de abril registra o maior K_{cNDVI} de todo ano, 1,046. Cabe dizer que, no mês anterior (março), a precipitação foi significativa, atingindo 209,9 mm. De agosto a outubro, os valores de K_{cNDVI} entram em declínio, indicando a colheita da cultura. O mês de setembro registra o menor K_{cNDVI} de todo o ano, 0,753; neste mesmo mês, a precipitação não alcançou valores significativos, sendo a terceira mais baixa de todos os meses do ano (20,3 mm). A partir de outubro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da cultura.

5.4.8 São Romão

Gráfico 13 - Séries temporais de precipitação (mm.mês^{-1}) e valores máximos de NDVI e K_{cNDVI} de uma área de 201 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de São Romão.



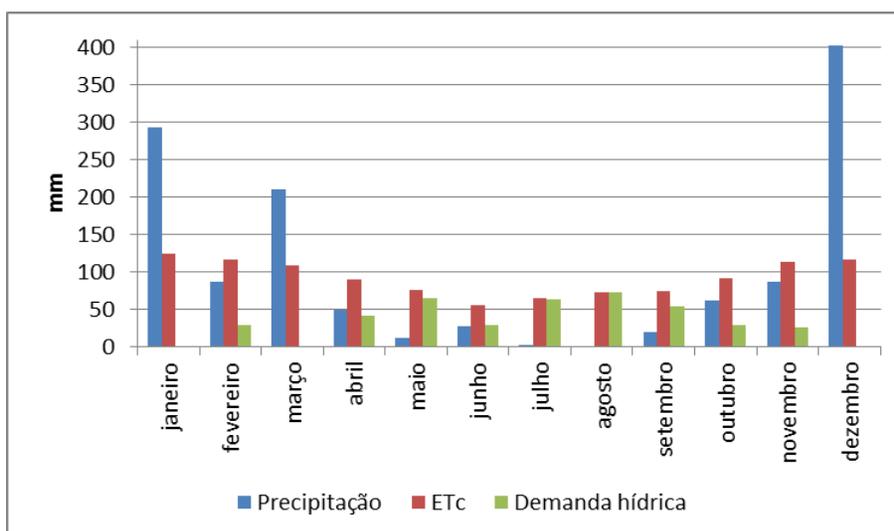
A cultura presente na área trata-se de cana-soca. De janeiro a março, conforme mostra o Gráfico 13, verifica-se um gradativo aumento nos valores de K_{cNDVI} . Tal comportamento indica o período de desenvolvimento e maturação da cultura, o mês de fevereiro é o que registra o maior valor de K_{cNDVI} (1,051). Neste mesmo período, que vai de janeiro a março, a precipitação é significativa, merecendo destaque o mês de janeiro no qual choveu 292,7 mm. De abril a agosto, os valores de K_{cNDVI} diminuem, gradativamente, indicando o início da colheita da cultura e o menor deles (0,609) é registrado em agosto, mês no qual não houve chuva. Juntamente com o mês de setembro, este é o período mais seco do ano. A partir de setembro, os valores de K_{cNDVI} voltam a crescer, indicando um novo ciclo de desenvolvimento da planta.

5.5 Evapotranspiração de cultura

A partir dos valores de K_{cNDVI} , foram estimadas as ET_c das áreas irrigadas de cada município da bacia, conforme apresentado na Equação 6. Os gráficos a seguir ilustram séries temporais de evapotranspiração de cultura, precipitação e necessidade hídrica ($ET_c - \text{precipitação}$), obtidas em cada uma das áreas, para cada município.

5.5.1 Formoso

Gráfico 14 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 129 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Formoso.



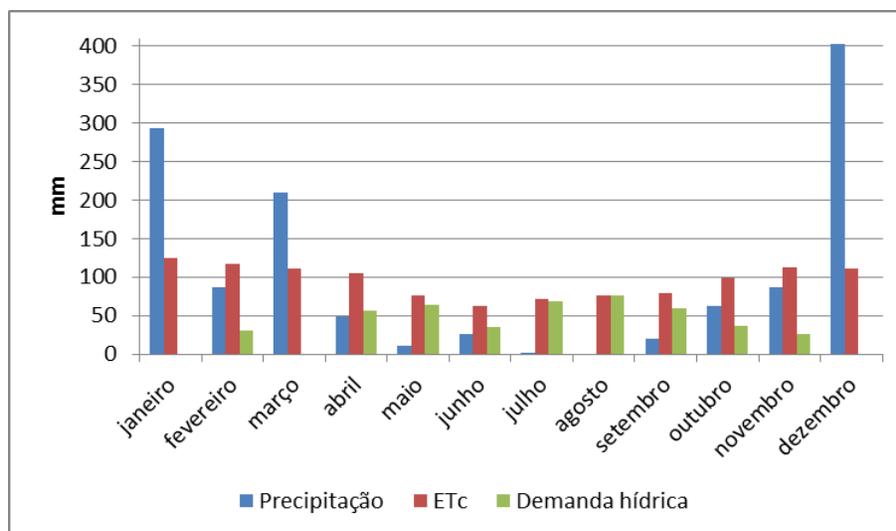
Altos índices de precipitação foram verificados de janeiro a abril, conforme mostra o Gráfico 14, merecendo destaque aos meses de janeiro e março, nos quais choveu, respectivamente, 292,7 e 209,9 mm. O período que vai de maio a setembro foi o mais seco do ano e, no mês de julho, a precipitação foi de apenas 2,4 mm, enquanto no mês de agosto não houve chuva. A partir de

outubro, a precipitação retoma valores crescentes, destaque para dezembro, mês mais chuvoso do ano, no qual foi registrado um total de 402,7 mm de precipitação.

Quanto à ET_c , esta assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 124,3 mm. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 55,1 mm em junho. No mês seguinte, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em dezembro, mês no qual a ET_c foi de 117 mm.

5.5.2 Buritis

Gráfico 15 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 141 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Buritis.

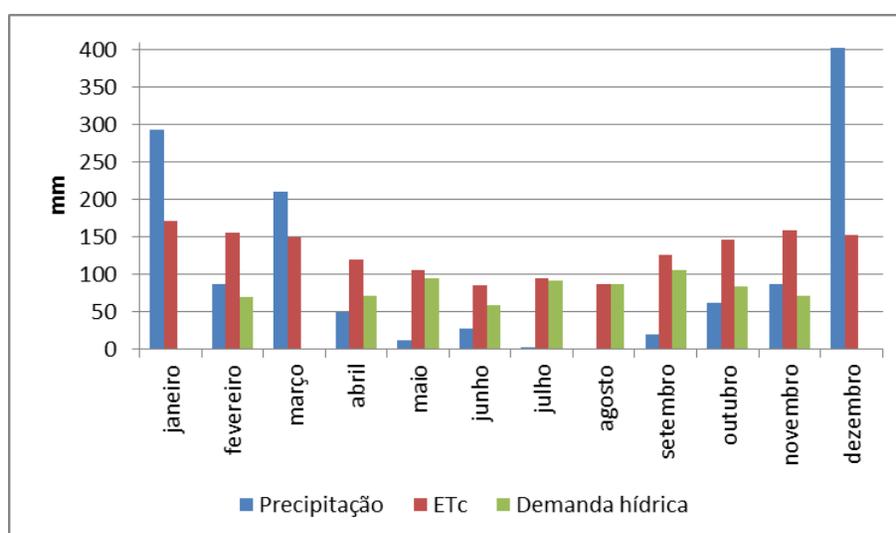


A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 124,4 mm, conforme mostra o Gráfico 15. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 62,2 mm em junho. No mês

seguinte, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em novembro, mês no qual a ET_c foi de 113,2 mm.

5.5.3 Unaí

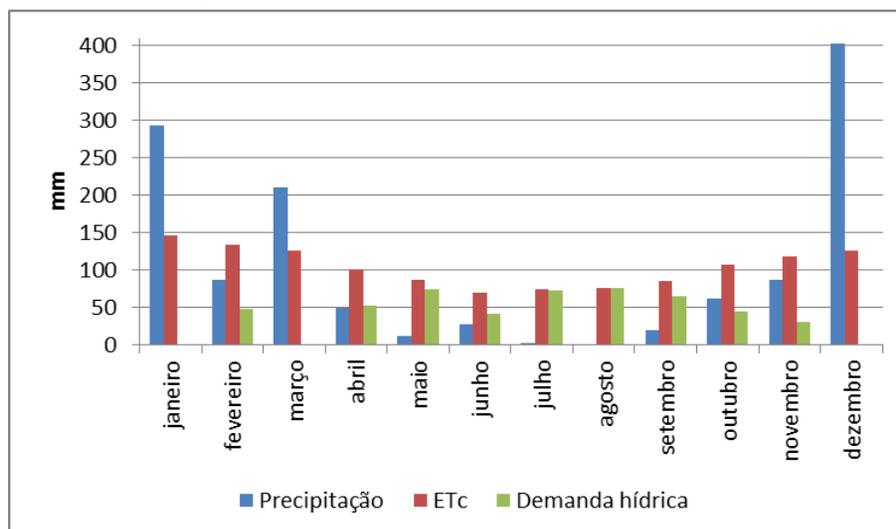
Gráfico 16 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 166 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Unaí.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 171,6 mm, conforme mostra o Gráfico 16. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 84,7 mm em junho. No mês seguinte, a ET_c atinge 94,4 mm. Em agosto, o valor registrado diminuiu, novamente, ficando em 86,2 mm. A partir de setembro, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em novembro, mês no qual a ET_c foi de 158,9 mm.

5.5.4 Chapada Gaúcha

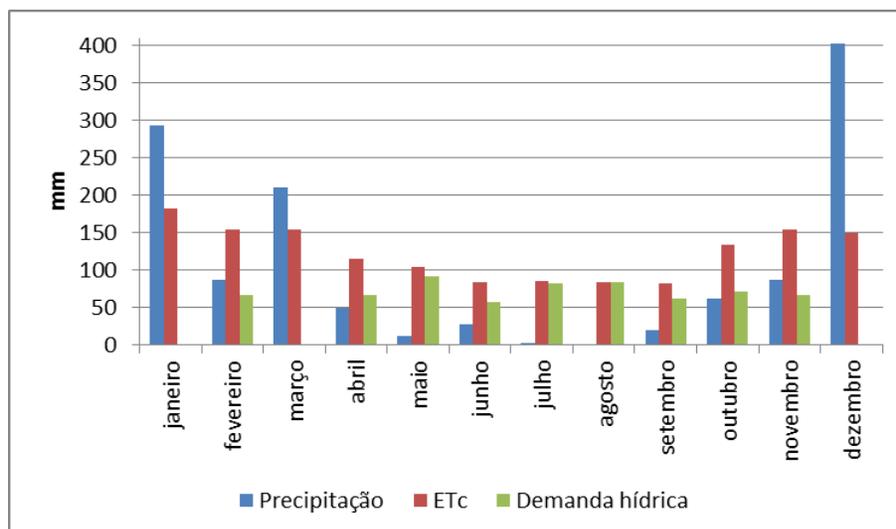
Gráfico 17 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 85 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Chapada Gaúcha.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 146 mm, conforme mostra o Gráfico 17. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 68,8 mm em junho. No mês seguinte, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em dezembro, mês no qual a ET_c foi de 125,8 mm.

5.5.5 Uruana de Minas

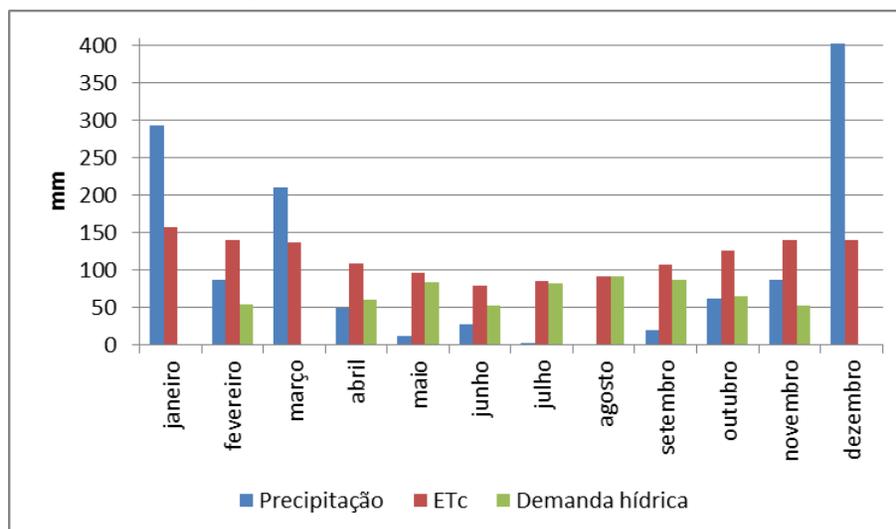
Gráfico 18 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 115 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Uruana de Minas.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 182,3 mm, conforme mostra o Gráfico 18. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 82,3 mm em setembro. Em outubro, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em novembro, mês no qual a ET_c foi de 154,6 mm.

5.5.6 Bonfinópolis de Minas

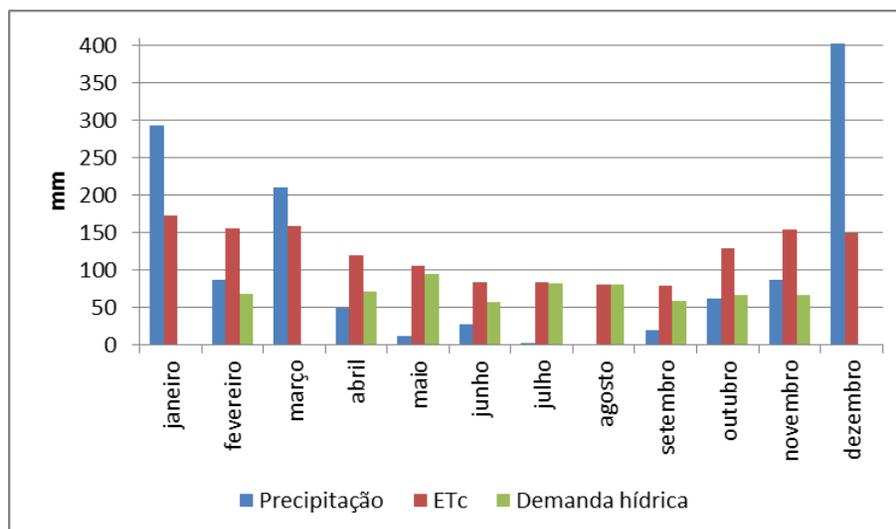
Gráfico 19 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 137 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Bonfinópolis de Minas.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 157,4 mm, conforme mostra o Gráfico 19. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 79,3 mm em junho. No mês seguinte, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em dezembro, mês no qual a ET_c foi de 140,4 mm.

5.5.7 Riachinho

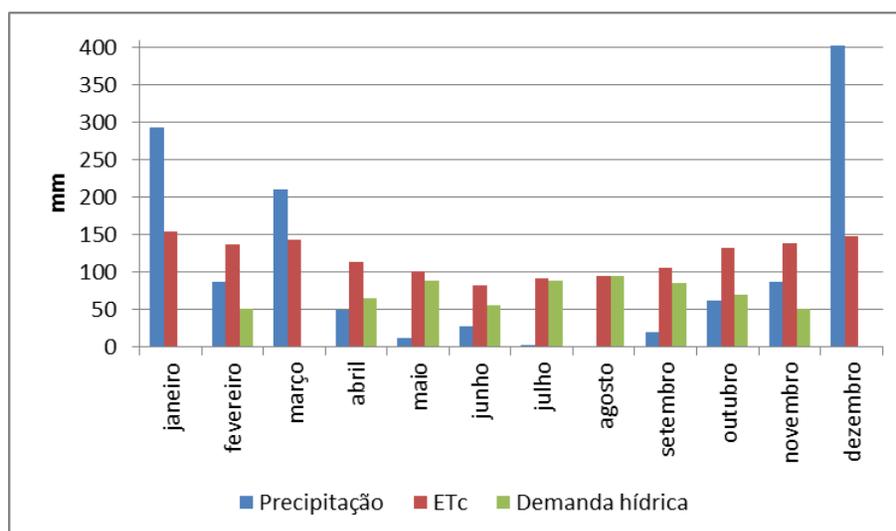
Gráfico 20 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 110 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Riachinho.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 172 mm, conforme mostra o Gráfico 20. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 79,3 mm em setembro. Em outubro, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em novembro, mês no qual a ET_c foi de 153,7 mm.

5.5.8 Urucua

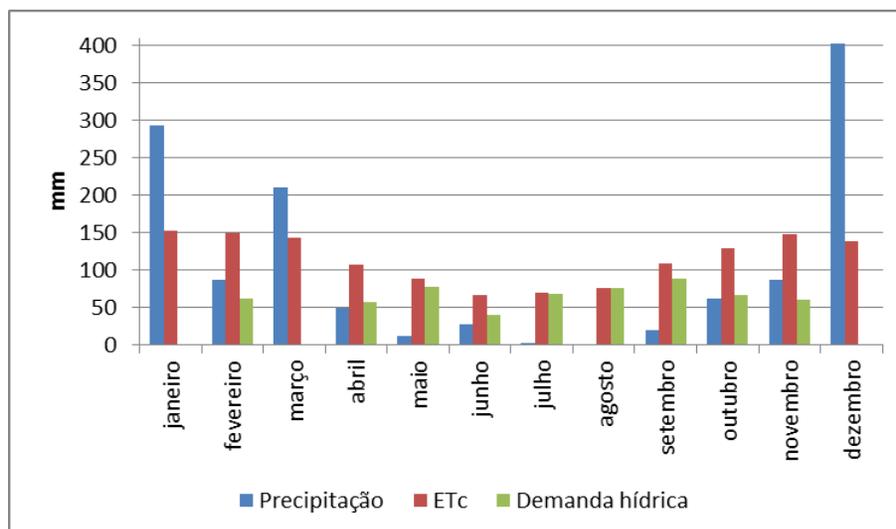
Gráfico 21 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 168 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de Urucua.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 154,4 mm, conforme mostra o Gráfico 21. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 81,6 mm em junho. No mês seguinte, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em dezembro, mês no qual a ET_c foi de 148,2 mm.

5.5.9 São Romão

Gráfico 22 - Séries temporais de valores de precipitação (mm.mês^{-1}), ET_c (mm.mês^{-1}) e demanda hídrica (mm.mês^{-1}) de uma área de 201 hectares, irrigada por pivô central, localizada no município de São Romão.



A ET_c assume seu valor mais elevado no mês de janeiro com 152 mm, conforme mostra o Gráfico 22. A partir de fevereiro, os valores diminuem, gradativamente, alcançando a mínima anual de 66 mm em junho. No mês seguinte, os valores voltam a crescer, alcançando um novo pico em novembro, mês no qual a ET_c foi de 147,5 mm.

Para a obtenção da demanda hídrica das áreas irrigadas pelos pivôs centrais, mapeados na bacia do Rio Urucuia, primeiramente, foram calculadas as lâminas brutas de irrigação. Neste cálculo, foram descontados dos valores de evapotranspiração de cultura (ET_c), a precipitação mensal, registrada ao longo do ano, na bacia. Uma vez que, quando os valores de precipitação são maiores ou iguais aos de evapotranspiração de cultura (ET_c), não se faz necessário irrigar.

As lâminas brutas foram obtidas, para diferentes níveis de eficiência de aplicação, sendo estas eficiências de 100%, 90% e 60% e foram multiplicadas pela área de cada um dos pivôs centrais. Os valores resultantes desta operação corresponderam à demanda hídrica de cada uma das áreas irrigadas. Tais valores foram agrupados, para cada um dos municípios, onde foram mapeadas áreas irrigadas por pivôs centrais, como mostra a Tabela 4:

Tabela 4 - Demanda hídrica anual das áreas irrigadas por pivôs centrais, nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucuia ($\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$), para eficiências de aplicação de 100%, 90% e 60%.

Município	Demanda hídrica anual (eficiência 100%)	Demanda hídrica anual (eficiência 90%)	Demanda hídrica anual (eficiência 60%)
Unai	55.754.795	61.949.771	92.924.657
São Romão	33.313.511	37.015.013	55.522.519
Buritís	24.820.241	27.578.046	41.367.069
Bonfinópolis de Minas	18.129.128	20.143.476	30.215.214
Urucuia	11.171.451	12.412.723	18.619.084
Formoso	7.140.397	7.933.774	11.900.661
Riachinho	2.514.097	2.793.441	4.190.161
Uruana de Minas	1.304.342	1.449.269	2.173.904
Chapada Gaúcha	668.919	743.244	1.114.866
TOTAL	154.816.881	172.018.757	258.028.135

Os municípios de Unai, São Romão e Buritís apresentaram as maiores demandas hídricas da bacia, uma vez que estes municípios apresentaram as maiores áreas irrigadas, conforme mostrado na Tabela 4. Esta mesma relação, também, foi verificada nos municípios de Chapada Gaúcha, Uruana de Minas e Riachinho, que apresentaram as menores demandas hídricas da bacia.

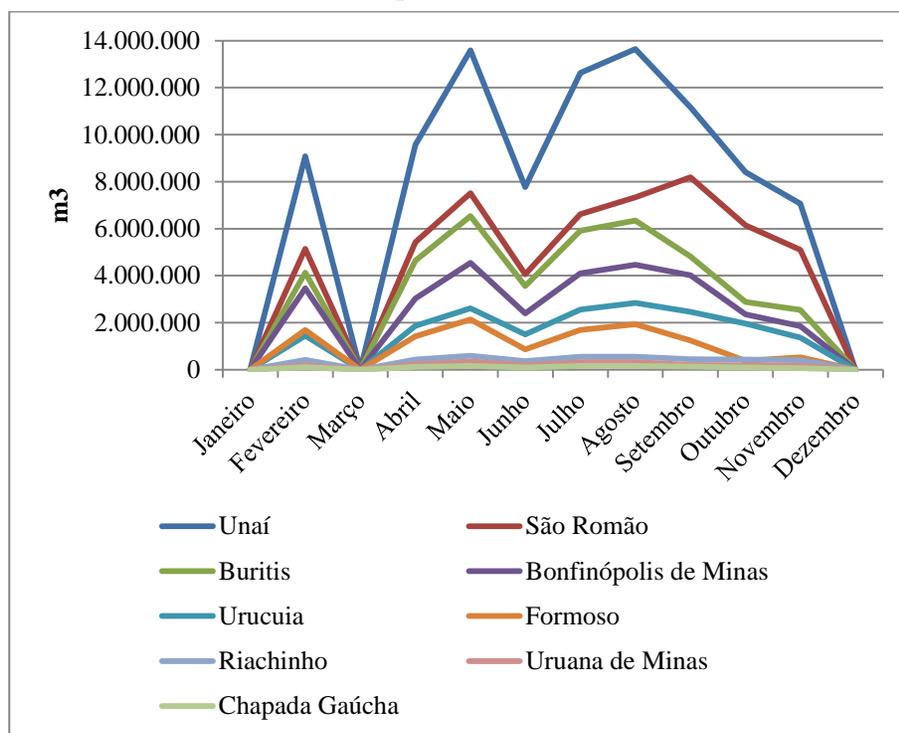
Quando analisadas em intervalos mensais, verificou-se que as maiores demandas hídricas concentraram-se nos meses de maio, julho e agosto (com exceção do município de São Romão, em que setembro destaca-se como o mês de maior demanda hídrica), não por coincidência, o trimestre citado foi o que registrou as menores precipitações do ano, havendo, assim, uma maior demanda de irrigação por parte dos pivôs.

Nos meses de janeiro, março e dezembro, os quais registraram as maiores precipitações do ano, a precipitação foi capaz de suprir a demanda hídrica das áreas onde os pivôs encontram-se instalados, não havendo, assim, a necessidade de irrigação por parte deles. Fevereiro, junho, outubro e novembro, também, registraram demandas hídricas mais baixas, consequência de um volume maior de precipitação nestes meses.

Tais resultados corroboram os obtidos por Pereira Júnior e Nicácio (2014) que, ao realizarem um balanço entre a oferta e a demanda hídrica, para a irrigação por pivôs centrais, no estado de Goiás e no Distrito Federal, considerando os equipamentos existentes no ano de 2013, observaram que o período de maior demanda hídrica foi entre os meses de abril e setembro, enquanto os meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro apresentaram as menores demandas.

Os gráficos 23, 24 e 25 mostram as demandas hídricas das áreas irrigadas por pivôs centrais com eficiências de aplicação de 100%, 90% e 60% nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucuia ($m^3.mês^{-1}$):

Gráfico 25 - Demanda hídrica das áreas irrigadas por pivôs centrais, nos municípios pertencentes à bacia do Rio Urucuia, no ano de 2013, com eficiências de aplicação de 60% ($\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$).



Considerada a eficiência de aplicação de 100%, a demanda hídrica total necessária à irrigação das áreas onde os pivôs centrais encontram-se instalados foi de $154.816.881 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$. Tal valor representa 18,9 % da vazão disponível da bacia. Levando em conta as eficiências de aplicação de 90% e 60%, a demanda hídrica dessas áreas foi de $172.018.757 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ e $258.028.135 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, fato que representa, respectivamente, 20,9% e 31,4% da vazão disponível da bacia.

6 CONCLUSÃO

Com 31,4% dos equipamentos instalados, Unai foi o município que apresentou maior concentração de pivôs centrais de irrigação, não por coincidência, o município foi o que registrou a maior demanda hídrica de toda a bacia.

Com o auxílio dos perfis temporais de índices de vegetação, foi possível identificar as principais culturas agrícolas irrigadas por pivôs centrais, na bacia do Rio Urucuia, no ano de 2013.

A obtenção dos valores máximos de NDVI, para cada uma das áreas irrigadas pelos pivôs centrais, permitiu estimar os coeficientes de cultura (K_{cNDVI}) destas áreas, mostrando-se uma alternativa eficiente para a obtenção do coeficiente de cultura (K_c).

Com os valores de K_{cNDVI} e o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), foi possível obter as lâminas líquida e bruta das áreas irrigadas por pivôs centrais, da bacia do Rio Urucuia, bem como a sua demanda hídrica.

Avaliada a partir de uma eficiência de aplicação de 100%, a demanda hídrica das áreas irrigadas por pivôs centrais, na bacia do Rio Urucuia, representou 18,9% da $Q_{7,10}$. Quando considerada uma eficiência de aplicação de 90%, tal valor passa a corresponder a 20,9% da vazão disponível. Em última análise, levando em conta a menor das eficiências de aplicação permitidas (60%), a demanda hídrica necessária à irrigação das áreas cobertas por pivôs centrais, presentes na bacia, alcança 31,4% da vazão disponível, tal número mostra-se preocupante, uma vez que ultrapassa os 30% permitidos pela $Q_{7,10}$.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAUJO, G. L. et al. Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, p. 84-95, jun. 2011.
- BASTOS, E. A. et al. Coeficiente de cultivo da soja no vale do Gurguéia, PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2007. 1 CD-ROM.
- BASTOS, E. A. et al. Coeficiente de cultivo do milho nos Tabuleiros Litorâneos do Piauí. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina, 2008. p. 1-5.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 625 p.
- BEZERRA, B. et al. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, p. 404-414, set. 2010.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil informe 2014**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 10 out. 2015.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12669>. Acesso em: 12 maio 2015.
- CHRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos dos cerrados e seu potencial de utilização na irrigação. **Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 69/70, p. 87-97, 2006.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

FERREIRA, E. et al. Cadastral maps of irrigated areas by center pivots in the State of Minas Gerais, using cbers-2b/ccd satellite imaging. **Engenharia Agrícola (Online)**, Jaboticabal, v. 31, p. 771-780, jul./ago. 2011.

FERREIRA, E.; SILVA, L. S. C. D.; DANTAS, A. A. A. Uso de imagens de satélite como suporte à estimativa da demanda hídrica em uma área irrigada por pivôs centrais. In: CONGRESSO CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: COBRAC, 2014. 1 CD-ROM.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Agriculture and water scarcity: a programmatic approach to water use efficiency and agricultural productivity**. Rome, 2007. 10 p.

FREITAS, R. M. et al. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, São José dos Campos, v. 2, n. 1, p. 57-68, Mar. 2011.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, A. L.; CECILIO, R. A. Comparação entre diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) para Linhares, ES. **Nucleus**, Ituverava, v. 9, p. 103-112, out. 2012.

HIDROTEC UFV. **Atlas digital das águas de Minas: metodologias utilizadas no desenvolvimento do “atlas digital das águas de minas”, e considerações gerais sobre os resultados**. Viçosa, MG, 2009. Disponível em: <http://www.hidrotec.ufv.br/metodologia_resultados.html#1.1>. Acesso em: 10 out. 2015.

HUETE, A. R. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, p. 440-451, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006**. Rio de Janeiro, 2009. 777 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Urucuia - SF8**. Belo Horizonte, 2014. 903 p.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf área index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, Ithaca, v. 50, p. 663-666, July 1969.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Desenvolvimento das culturas de cereais de inverno no Rio Grande do Sul por meio de perfis temporais do índice de vegetação por diferença normalizada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1349-1355, ago. 2009.

JUSTICE, C. O. et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 36, p. 1228-1249, July 1998.

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

LANDAU, E. C. et al. **Concentração de áreas irrigadas por pivôs centrais no Estado de São Paulo, Brasil**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2014. 38 p.

LEMO FILHO, L. C. D. A. et al. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1462-1469, set./out. 2007.

LIESENBERG, V.; PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/TERRA e AQUA. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 295-305, mar. 2007.

MELO, G. L.; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, state of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, p. 875-888, set./out. 2012.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Resolução Conjunta nº 1548**, de 29 de março 2012. Dispõe sobre a vazão de referência para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/CTIG/4-r-c-semad-igam-no-1548-versao-publicada.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

MORAES, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. 22 p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2007. 320 p.

NOVO, E. M. L. D. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. rev. São Paulo: E. Blucher, 2010. 387 p.

OLIVEIRA, G. M. D. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região norte da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, p. 104-109, jun. 2010.

PAULINO, J. et al. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 6, n. 2, p. 163-176, jun. 2011.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, D. D. R. et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 2488-2493, dez. 2009.

PEREIRA JÚNIOR, L. C.; NICÁCIO, P. P. D. S. Demanda hídrica para irrigação por pivôs centrais no Estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 34, p. 443-463, dez. 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.

RISSO, J. et al. Índices de vegetação Modis aplicados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, set. 2012.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7. ed. Uberlândia: UFU, 2009. 248 p.

ROSA, V. G. C. et al. Estimativa da produtividade do café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1478-1488, dez. 2010.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: _____. **Earth resources technology satellite-1 symposium**. Washington: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y.; CEBALLOS, J. C. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

SANO, E. E. et al. Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, p. 508-515, ago. 2005.

SCHMIDT, W. et al. Distribuição espacial de pivôs centrais no Brasil: I., região Sudeste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, p. 330-333, abr. 2004.

SILVA, L. S. C. D.; FERREIRA, E. **Uso de imagens de satélite como suporte à estimativa da demanda hídrica na sub-bacia do Rio Urucuia, MG**. Lavras: UFLA, 2011. 85 p.

SILVA, T. G. F. et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64-71, nov. 2012.

SINGH, R.; IRMAK, A. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 135, p. 597-608, out. 2009.

SOUZA, L. S. B. et al. Determinação do coeficiente de cultura do milho (*Zea mays* L.) sob condições de semiárido brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010. p. 1-5.

SYPERRECK, V. L. G. et al. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, p. 603-609, fev. 2008.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the commite on evapotranspiration and transpiration. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 25, p. 686-693, 1944.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Irrigation water use**. 2010. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/wuir.html>>. Acesso em: 17 nov. 2014.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara, SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, p. 713-721, dez. 2005.