



LORENA SANTOS CORDEIRO DA SILVA

**USO DE IMAGENS DE SATÉLITE COMO
SUPORTE À ESTIMATIVA DA DEMANDA
HÍDRICA NA SUB-BACIA DO
RIO URUCUIA, MG**

LAVRAS - MG

2011

LORENA SANTOS CORDEIRO DA SILVA

**USO DE IMAGENS DE SATÉLITE COMO SUPORTE À ESTIMATIVA
DA DEMANDA HÍDRICA NA SUB-BACIA DO RIO URUCUIA, MG**

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

Orientadora

Dra. Elizabeth Ferreira

Coorientadora

Dra. Gláucia Miranda Ramirez

LAVRAS – MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Silva, Lorena Santos Cordeiro da.

Uso de imagens de satélite como suporte à estimativa da demanda hídrica na sub-bacia do Rio Urucuia, MG / Lorena Santos Cordeiro da Silva. – Lavras : UFLA, 2011.

84 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Elizabeth Ferreira.

Bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Agricultura irrigada. 3. Sensoriamento remoto. 4. Evapotranspiração. 5. Interpretação visual de imagens. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 526.99

LORENA SANTOS CORDEIRO DA SILVA

**USO DE IMAGENS DE SATÉLITE COMO SUPORTE À ESTIMATIVA
DA DEMANDA HÍDRICA NA SUB-BACIA DO RIO URUCUIA, MG**

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

APROVADA em 30 de setembro de 2011.

Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas UFLA

Dr. Júlio César Dalla Mora Esquerdo EMBRAPA

Dra. Elizabeth Ferreira
Orientadora

LAVRAS – MG

2011

AGRADECIMENTOS

À Deus, por mais uma vitória.

Aos meus pais, Wilson e Marília, pelo incondicional amor.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo nº CAG-APQ-02004-09.

Aos professores do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos e harmoniosa convivência.

À professora Dra. Elizabeth Ferreira pela orientação, paciência, amizade, dedicação e seus ensinamentos que foram de grande relevância para a realização deste trabalho e meu crescimento profissional.

À professora Gláucia Miranda Ramirez, pela amizade, companheirismo e ensinamentos, que foram de grande valia para este trabalho.

Ao professor Antonio Augusto Aguilár Dantas pelos conhecimentos repassados e se dispôs a participar como membro na banca examinadora.

Ao Dr. Júlio César Dalla Mora Esquerdo pela disponibilidade e conselhos.

Aos amigos Joice e Rafael pela preciosa ajuda na condução do projeto.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estimar a demanda hídrica destinada à irrigação na sub-bacia Urucuia, MG, utilizando dados de sensoriamento remoto e comparar os resultados obtidos com a disponibilidade hídrica da sub-bacia. Para estimativa da demanda hídrica foi calculada a evapotranspiração de referência a partir dos dados coletados da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) do município de Santa Fé de Minas e, posteriormente, foi calculada a evapotranspiração das culturas existentes na área. Através de imagens Landsat5/TM fez-se a interpretação visual para quantificar os pivôs centrais existentes em cada município da sub-bacia e determinar sua área irrigada. As culturas existentes foram estimadas a partir dos registros do IBGE para o ano analisado, considerando que a porcentagem de cada cultura sobre a área total seria a mesma para a área irrigada. Nas imagens foram analisados os pivôs centrais e determinado o estágio de desenvolvimento das culturas. Foram consideradas culturas em estágio inicial de desenvolvimento, secundário e de produção, confrontando estes resultados com a disponibilidade hídrica da sub-bacia. Para o cálculo da demanda hídrica utilizada na irrigação, considerou-se uma eficiência de aplicação dos equipamentos de 100%, 90% e 60%. Os resultados mostraram que a demanda de água destinada à irrigação foi equivalente a 43% da disponibilidade hídrica da sub-bacia. Considerando uma eficiência de aplicação de 100% e analisando os coeficientes de cultura, se toda a área fosse irrigada com a utilização do Kc de produção a demanda hídrica da sub-bacia seria de 47%, e utilizando-se o Kc inicial esta demanda cairia para 28%. Considerando os resultados obtidos é possível concluir que na região avaliada há potencial para o crescimento da irrigação, entretanto deve-se considerar a aptidão agrícola da área e a disponibilidade hídrica do local a fim de amenizar futuros problemas.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Agricultura irrigada. Sensoriamento Remoto. Evapotranspiração. Interpretação Visual de Imagens.

ABSTRACT

This work aimed at estimating the demand for irrigation water in the Urucuia sub-basin, Minas Gerais state, using remote sensing data and comparing the results obtained with the water availability in the sub-basin. In order to estimate the irrigation water demand, the reference evapotranspiration was calculated using data collected at the Ground Automatic Meteorological Station (PCD) in the municipality of Santa Fé de Minas. Afterward, it was calculated the plant growth-evapotranspiration relation in the researched area. Landsat5/TM images were used to quantify and analyze the center pivots in each of the municipalities in the sub-basin in order to determine its irrigated area. The growth rates of plants were estimated using IBGE data from the year under review and the percentages obtained of such were used to estimate the irrigated area. It was considered the primary and the secondary stages of the plant development, the analyses of which were confronted with the water availability in the Urucuia sub-basin. To calculate the water required by irrigation, water application efficiencies were established for 60, 90 and 100% of attainable efficiency. The results showed that the demand for irrigation water was equivalent to 43% of the water availability in the sub-basin. Considering the water application efficiency of 100% and analyzing the crop coefficients, if the total area was to be irrigated with by applying Kc value for crop production, the irrigation water need in the sub-basin would demand 47% water. Applying the crop Kc value for plants at the initial growth stage, the demand for irrigation water would be 28%. Thus, it is possible to conclude that in the Urucuia sub-basin there is potential for irrigation development. However, it is important to consider the agricultural area suitability and the local water availability with the intention of mitigating future problems regarding the water usage.

Keywords: Water Resources. Irrigated Agriculture. Remote Sensing. Evapotranspiration. Visual Interpretation of images.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1	Curva espectral do solo	20
Gráfico 2	Valores de evapotranspiração da cultura para diferentes aplicações de Kc	73
Gráfico 3	Variação da precipitação acumulada para o ano de 2010	75
Figura 1	Espectro eletromagnético	12
Figura 2	Assinatura espectral da vegetação.....	18
Figura 3	Localização da área de estudo.....	34
Figura 4	Mosaico de imagens Landsat 5/TM (composição 543/RGB, cenas de janeiro/2010.....	37
Figura 5	Identificação de pivôs centrais em área de vegetação similar a cultura irrigada. Landsat5/TM, composição 543/RGB	48
Figura 6	Localização dos pivôs centrais na sub-bacia Urucuia.....	49
Figura 7	Cultivos agrícolas sob pivôs centrais em imagem Landsat5/TM, 543/RGB, município de Unai, janeiro/2010	55
Figura 8	Identificação das culturas em estágio intermediário de desenvolvimento, Landsat5/TM, 543/RGB, fevereiro/2010.....	56
Figura 9	Identificação das culturas em estágio inicial de desenvolvimento e produção, Landsat5/TM, 543/RGB, abril/2010.....	57
Figura 10	Identificação dos pivôs com mais de uma cultura, Landsat5/TM, 543/RGB, maio/2010	58
Figura 11	Identificação das culturas em fase inicial de desenvolvimento, Landsat 5/TM, 543/RGB, junho/2010	59
Figura 12	Identificação de pivô com cultura em 2 estádios de desenvolvimento, Landsat5/TM, 543/RGB, julho/2010	60
Figura 13	Visualização das culturas em agosto/2010, Landsat5/TM, 543/RGB	61
Figura 14	Visualização das culturas em setembro/2010, Landsat5/TM, 543/RGB	61
Figura 15	Visualização das culturas em novembro/2010, Landsat5/TM, 543/RGB	62
Figura 16	Visualização das culturas em dezembro/2010, Landsat5/TM, 543/RGBb	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Conceitos gerais de sensoriamento remoto.....	11
2.2	Satélites para recursos terrestres	14
2.2.1	Satélite CBERS	14
2.2.2	Satélite Landsat.....	15
2.3	Comportamento espectral de alvos terrestres	17
2.3.1	Comportamento espectral da vegetação	17
2.3.2	Comportamento espectral dos solos	19
2.4	Estimativa da evapotranspiração	21
2.4.1	Métodos para estimativa de evapotranspiração.....	22
2.4.1.1	Equação de Penman-Monteith	23
2.4.1.2	Equação de Makkink.....	24
2.4.1.3	Equação de Jensen-Haise	24
2.4.1.4	Equação de Camargo.....	25
2.4.1.5	Balanco de energia	25
2.4.2	Métodos para estimativa da evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto.....	26
2.5	Demanda de água pela agricultura irrigada	28
2.6	Uso do sensoriamento remoto na agricultura irrigada.....	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Aquisição e georreferenciamento das imagens.....	35
3.2	Interpretação visual das imagens	38
3.3	Determinação da evapotranspiração de referência	39
3.4	Determinação da evapotranspiração da cultura	40
3.5	Demanda hídrica.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Identificação dos pivôs centrais	47
4.2	Evapotranspiração de referência	50
4.3	Estádio de desenvolvimento da cultura para atribuição de Kc ...	52
4.4	Determinação dos estádios de produção.....	53
4.5	Água destinada à irrigação na sub-bacia Urucuia.....	67
4.6	Água destinada à irrigação em relação aos coeficientes de cultura	73
5	CONCLUSÃO.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão, nos seus diferentes sistemas, como o convencional, autopropelido e principalmente o pivô central, compreende um grande percentual da área irrigada no Brasil. Esse método tem a preferência de empresários agrícolas e produtores que utilizam bons níveis de tecnologia, embora sua implantação implique em custos iniciais elevados.

Em certas regiões agrícolas o uso desta tecnologia está gerando alta demanda dos mananciais devido ao grande número de equipamentos instalados e suas dimensões.

A agricultura irrigada tem sido uma importante estratégia para otimização da produção mundial de alimentos, porém, com o crescimento dos métodos de irrigação, dentre eles o pivô central, os conflitos hídricos podem aumentar e em muitos casos a água pode tornar-se fator limitante para o desenvolvimento agrícola.

Como a demanda de água destinada à irrigação vem crescendo substancialmente ao longo dos anos, o sensoriamento remoto surge como uma ferramenta eficaz para monitorar terras irrigadas através da extração de várias informações do uso da terra.

Na tentativa de assegurar a disponibilidade de água para os perímetros irrigados de bacias hidrográficas, os gerentes hídricos devem dispor de ferramentas precisas para a quantificação da evapotranspiração em larga escala. Através do sensoriamento remoto e dados de campo coletados em estações agrometeorológicas, modelos simples para a obtenção da evapotranspiração podem ser obtidos para estimar a demanda de água destinada à irrigação.

A bacia do São Francisco possui uma elevada demanda de água, cujo principal usuário é a irrigação, por isso é importante o estudo detalhado de cada

pedido de outorga, minimizando os prejuízos socioeconômicos e ambientais advindos de retiradas de água.

A sub-bacia do Urucuia representa 4% da área da bacia do São Francisco, abrangendo uma área de aproximadamente 25.000 km² e apresenta uma elevada quantidade de equipamentos do tipo pivô central. Como consequência da grande expansão da agricultura irrigada nas sub-bacias, há a necessidade da correta implantação dos equipamentos para minimizar o impacto advindo dos projetos de irrigação.

Tendo em vista a importância da caracterização da demanda hídrica para o planejamento das atividades agrícolas, o objetivo do presente estudo foi estimar a demanda hídrica destinada à irrigação na sub-bacia Urucuia, MG, utilizando dados de sensoriamento remoto e comparar seus resultados com a disponibilidade hídrica da sub-bacia, para o ano de 2010.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos gerais de sensoriamento remoto

Segundo Crepani (1983) e Novo (1989) o sensoriamento remoto pode ser definido como a utilização de sensores para aquisição de informações sobre objetos, superfícies e ou fenômenos sem que haja contato direto com os mesmos. Figueiredo (2005) afirma que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto é viabilizada através do cumprimento de diversas etapas, caracterizada principalmente pelo fenômeno de reflexão da radiação, coleta de dados, registro através de um sensor e análise desses dados.

As técnicas tem como objetivo principal expandir a percepção sensorial do ser humano seja através da visão panorâmica, proporcionada pela aquisição de informações aéreas ou espaciais, seja pela possibilidade de se obter informações inacessíveis à visão (NOVO, 1989).

A energia refletida ou emitida pela superfície terrestre é captada por sensores eletrônicos, instalados em satélites artificiais, sendo transformada em sinais elétricos que são registrados e transmitidos para estações de recepção na Terra e transformados em dados na forma de gráficos, tabelas ou imagens (FLORENZANO, 2002).

Estes sensores operam em intervalos específicos do espectro eletromagnético, atuando em diferentes faixas espectrais na região do visível e do infravermelho.

Na Figura 1 são mostradas as regiões do espectro eletromagnético utilizadas em sensoriamento remoto.

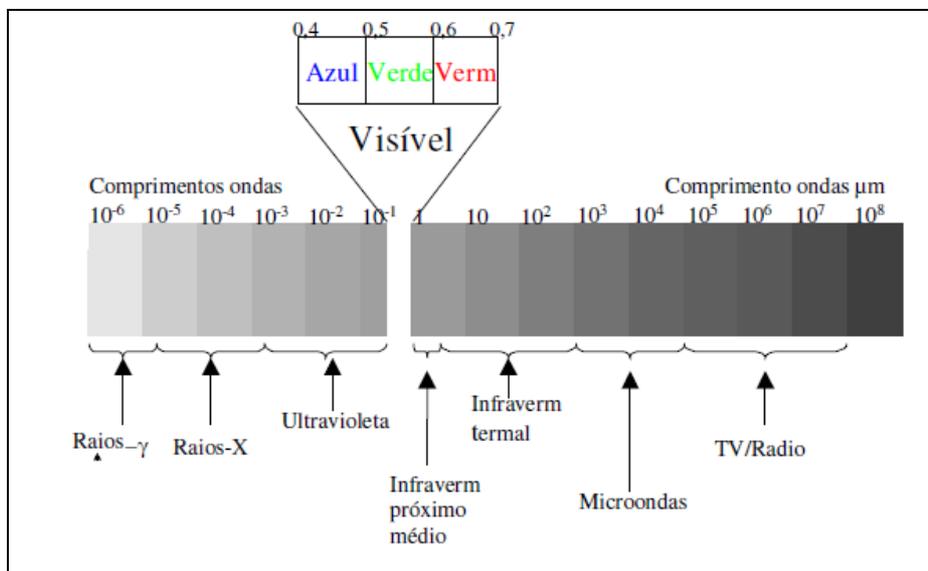


Figura 1 Espectro eletromagnético
 Fonte: Figueiredo (2005)

De acordo com Moreira (2001), as características dos sistemas sensores são expressas por quatro domínios de resolução: espectral, espacial ou geométrica, temporal e radiométrica.

A resolução espectral refere-se ao número de bandas espectrais em operação. Se um sistema sensor possui detectores operando em mais de uma faixa espectral, registra a radiação eletromagnética proveniente dos alvos em várias faixas.

Segundo Chuvieco (2000) a resolução espectral indica o número e a largura das bandas do espectro eletromagnético que o sensor pode distinguir. Portanto, quanto maior o número de bandas, mais sensível será este sensor, uma vez que isto facilita a caracterização espectral das distintas coberturas na superfície terrestre. É caracterizada como alta resolução espectral, quando as bandas de um sistema sensor são estreitas e ou quando se utiliza um maior número de bandas espectrais.

A resolução espacial refere-se à capacidade de um sensor em distinguir objetos da superfície terrestre, sendo definida como o menor elemento ou superfície distinguível por um sensor.

A resolução temporal indica o intervalo de tempo necessário para que o satélite retorne à área de interesse e a resolução radiométrica refere-se à capacidade de poder discriminar alvos que apresentam diferenças da radiação refletida e/ou emitida em certas regiões do espectro eletromagnético, ou seja, quantos níveis de cinza o sensor apresenta.

Conforme Florenzano (2002), os objetos da superfície terrestre como a vegetação, a água e o solo refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda. As variações da energia refletida pelos objetos podem ser representadas através de curvas espectrais, devido a estas variações, é possível distinguir os objetos da superfície terrestre nas imagens, variando do branco (quando refletem muita energia) ao preto (quando refletem pouca energia).

As imagens obtidas por sensores remotos, independente da resolução, apresentam os elementos básicos de análise de interpretação, tonalidade/cor, textura, tamanho, forma, sombra, altura, padrão e localização, a partir dos quais se extraem informações (FLORENZANO, 2002).

Crosta (1999) afirma que do ponto de vista técnico-científico, imagens de sensoriamento remoto vêm servindo de fontes de dados para estudos e levantamentos geológicos, ambientais, agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, oceanográficos, entre outros. Acima de tudo, as imagens passaram a representar uma das formas viáveis de monitoramento ambiental em escala local e global, devido à rapidez, eficiência e periodicidade.

2.2 Satélites para recursos terrestres

2.2.1 Satélite CBERS

Os satélites do programa CBERS, *China-Brazil Earth Resources Satellite*, surgiram de um acordo governamental assinado no dia 6 de Julho de 1998, entre a China e o Brasil. Este acordo de parceria envolvia duas grandes instituições, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a CAST (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial) (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2010).

Os satélites CBERS-1 e CBERS-2 foram lançados com sucesso em outubro de 1999 e outubro de 2003, respectivamente (BEZERRA; SANO; FERREIRA, 2007). Em 2002 foi assinado um acordo para a continuação do programa CBERS com a construção de dois novos satélites, os CBERS 3 e 4, com previsão de lançamento para 2011 e 2013 respectivamente, com novas cargas úteis e uma nova divisão de investimentos. Porém, o Brasil e a China, em 2004 decidiram construir o CBERS 2B e lançá-lo em 2007 (INPE, 2010).

O CBERS leva a bordo um sistema de coleta de dados que retransmite, em tempo real, dados ambientais coletados na Terra. Com uma órbita circular, quase polar, síncrona com o Sol, ele está a uma altitude de 778 km. Neste tipo de órbita o satélite sempre cruza o Equador as 10:30h da manhã, hora local, provendo assim as mesmas condições de iluminação solar (FLORENZANO, 2002).

A câmera CCD (*charge-coupled device*), a bordo do satélite, fornece as seguintes informações de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 Características da câmera imageadora CCD

Bandas espectrais	(Banda 1) 0,45 - 0,52 μm (azul) (Banda 2) 0,52 - 0,59 μm (verde) (Banda 3) 0,63 - 0,69 μm (vermelho) (Banda 4) 0,77 - 0,89 μm (infravermelho próximo) 0,51 - 0,73 μm (pancromático)
Resolução espacial	20 x 20 metros
Largura da faixa imageada	113 km
Resolução temporal	24 dias
Resolução radiométrica	8 bits

Fonte: INPE (2010)

Alguns trabalhos têm mostrado a eficácia no uso do satélite CBERS/CCD, dentre eles, Bezerra, Sano e Ferreira (2007) que avaliaram o desempenho do CBERS com sensores CCD e IR-MSS no mapeamento da cobertura da terra e mostraram que os mesmos são apropriados para discriminação de grupos de classes de cobertura da terra.

2.2.2 Satélite Landsat

Desde o lançamento do primeiro Landsat-1 (*Land Remote Sensing Satellite*) em 1972, denominado ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) é contínuo seu avanço no desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações espaciais, oferecendo continuidade aos trabalhos e metodologias desenvolvidas com os produtos do Landsat (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2009).

Desenvolvido para atuar diretamente em pesquisas de recursos naturais, o satélite Landsat 5, lançado em 1984, se encontra em operação até o momento, propiciando bons resultados de utilização.

O satélite Landsat 5 se encontra com o sensor TM ativo, constituindo um dos mais bem sucedidos sensores de observação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Na Tabela 2, podem-se observar suas principais características.

Tabela 2 Características da câmera imageadora TM (Landsat 5)

Bandas espectrais	(Banda 1) 0,45 - 0,52 μm (azul)
	(Banda 2) 0,52 - 0,60 μm (verde)
	(Banda 3) 0,63 - 0,69 μm (vermelho)
	(Banda 4) 0,76 - 0,90 μm (infravermelho próximo)
	(Banda 5) 1,55 - 1,75 μm (infravermelho próximo)
	(Banda 6) 2,08 - 2,35 μm (infravermelho próximo)
Resolução espacial	30 x 30 metros
Largura da faixa imageada	185 km
Resolução temporal	16 dias
Resolução radiométrica	8 bits

Fonte: EMBRAPA (2009)

Utilizando imagens Landsat, Rizzi e Rudorff (2003) estimaram a área plantada com soja através da classificação digital, com o uso da segmentação e classificação visual na região de maior produção de soja no Rio Grande do Sul.

Os autores afirmaram que sua utilização mostrou-se viável para a identificação e delimitação de áreas com soja, e, desde que se disponha de imagens em períodos críticos, estas podem ser utilizadas como suporte aos levantamentos agrícolas tradicionais.

Weber et al. (2005) compararam os resultados de classificação de imagens Landsat e CBERS para estimativa da área plantada com soja no Rio Grande do Sul. Utilizando a classificação não supervisionada Isodata, evidenciaram que as imagens dos satélites apresentaram desempenho similar, podendo ser utilizadas para complementar períodos em que alguma destas imagens não puder ser obtida, em função da cobertura de nuvens.

2.3 Comportamento espectral de alvos terrestres

2.3.1 Comportamento espectral da vegetação

A vegetação exerce papel importante no ciclo hidrológico, e o sensoriamento remoto é essencial para mapear e monitorar estas informações.

O sinal registrado por um sensor é dependente das características espectrais da superfície observada, e os fatores que estão diretamente envolvidos na interceptação e na absorção da radiação fotossinteticamente ativa, segundo Bernardes (1987), podem ser classificados em morfológicos e fisiológicos.

De acordo com Moreira (2001), entre os fatores morfológicos, os mais importantes estão relacionados à organização espacial das folhas, ou seja, densidade de cobertura vegetal, distribuição espacial e vertical de folhas e o ângulo de inserção foliar.

Entre os fatores fisiológicos ou funcionais, destaca-se a idade da planta, relacionada com a capacidade das folhas de realizar fotossíntese, déficit hídrico, tipo e espessura das folhas que podem ser influenciados pela duração e pelo

comprimento de onda da luz, porém, as diferenças na intensidade de luz é que são responsáveis pela variação no tamanho da folha, nutrientes e conteúdo de água na folha. Todos estes fatores possuem grande influência na refletância das plantas.

Segundo Hoffer (1978), a refletância de uma vegetação verde é completamente variável com o comprimento de onda, podendo ser observado na Figura 2. A energia refletida por uma área cultivada é, na realidade, uma integração dos valores de refletância da planta e da superfície de fundo, o solo. (JOAQUIM, 1998).

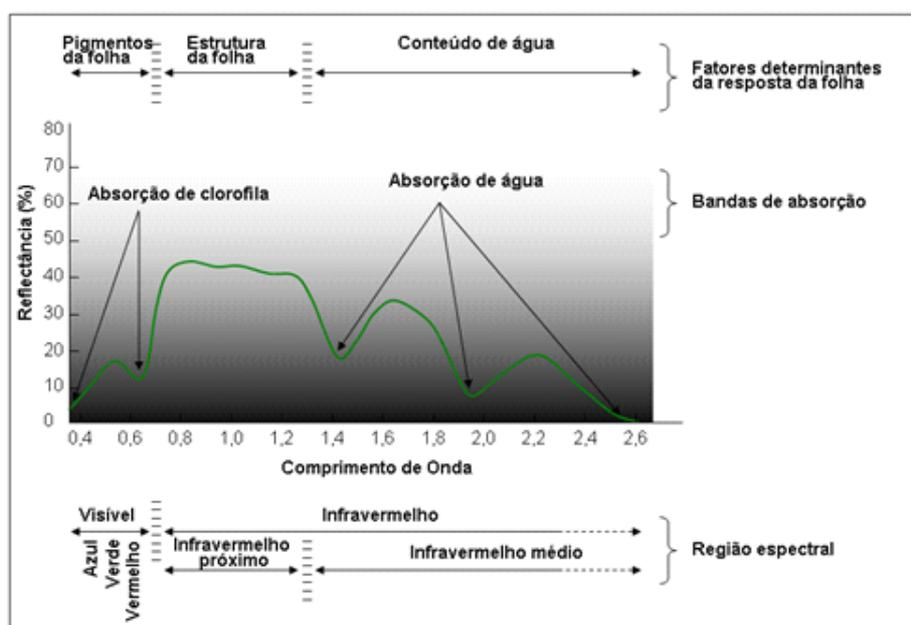


Figura 2 Assinatura espectral da vegetação

Fonte: Adaptado do LABGIS (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - UERJ, 2011)

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no Brasil para o estudo da vegetação teve início com os primeiros mapeamentos temáticos realizados na década de 40 a partir de fotografias aéreas. Eram trabalhos pontuais e com objetivos bastante específicos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Desde então, diversos trabalhos já foram realizados com o auxílio do sensoriamento remoto mostrando bons resultados e de grande importância mundial.

Kollenkark et al. (1982) afirmam que o padrão de crescimento das culturas, práticas culturais como variações no espaçamento, população de plantas e data de plantio podem alterar a refletância espectral de culturas agrícolas.

Apesar da refletância de um dossel ser consideravelmente menor que a de uma folha, embora os formatos das curvas sejam semelhantes, suas atenuações estão associadas a fatores como variações no ângulo de incidência da radiação, orientação das folhas e resposta de outros elementos do dossel como sombras e superfície de fundo, ou seja, o solo (GUYOT, 1989; KNIPLING, 1970).

No entanto, procura-se estudar a resposta espectral da plantação como um todo, visando otimizar a extração de informações a partir de imagens de sensoriamento remoto.

2.3.2 Comportamento espectral dos solos

A refletância espectral do solo é influenciada por diversos fatores, entre eles pode-se destacar a umidade, o teor de matéria orgânica, a estrutura, a granulometria, o material de origem e o teor de ferro (JOAQUIM, 1998) sendo que a energia refletida pode ser representada por meio de curvas espectrais.

A diferença na radiação refletida pelos objetos faz com que seja possível identificá-los e diferenciá-los nas imagens obtidas por sensores remotos, a Gráfico 1 ilustra o comportamento espectral do solo.

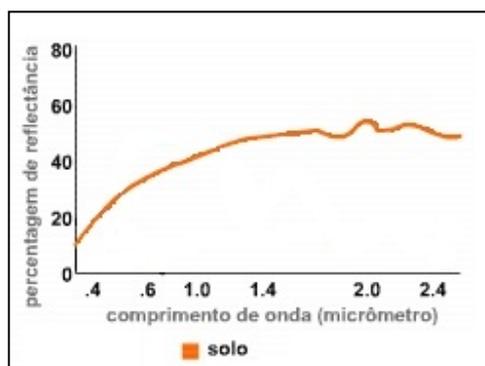


Gráfico 1 Curva espectral do solo
Fonte: Adaptado do Instituto Geográfico Português (2011)

Conhecendo, portanto, os efeitos da resposta espectral dos solos no comportamento espectral da vegetação, diversos autores vêm se preocupando em separar seus efeitos, a fim de melhor caracterizar a vegetação e permitir que dados espectrais, como índices de vegetação, possam ser utilizados no monitoramento temporal das culturas (HUETE, 1988; QI et al., 1994).

Dalmolin et al. (2005) discutiram o comportamento espectral dos solos em função de seus constituintes, como matéria orgânica, óxidos de ferro, cor, minerais da fração argila e umidade. Segundo os autores, com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto obtêm-se informações de maneira rápida e não destrutiva da constituição dos solos. Mostram ainda que pesquisas para melhor entender as relações existentes entre os diversos componentes do solo e a refletância são necessárias, mas pode-se afirmar que esta ferramenta tem tido importância crescente na pedologia.

Avaliando as agressões antrópicas a uma bacia experimental da Represa de Jurumirim, São Paulo, Dainese (2001) analisou as mudanças temporais

significativas no uso do solo entre os anos de 1965 a 1999. Neste trabalho observaram-se mudanças em todas as classes de ocupação do solo e o uso do sensoriamento remoto mostrou-se útil para monitorar tais mudanças, permitindo localizar os focos com problemas, além de ser um procedimento relativamente barato.

Epiphanyo et al. (1992) avaliaram o comportamento espectral dos solos no estado de São Paulo, analisando os fatores de refletância de amostras de solos selecionadas, que tornaram evidente uma grande diversidade nas curvas espectrais. As classificações de tais curvas forneceram informações gerais quanto às propriedades dos solos, como matéria orgânica, distribuição de tamanho de partículas, material de origem, cor, umidade e sua influência no comportamento espectral dos solos.

Nota-se assim a relevância de se conhecer as curvas espectrais indicativas de refletância espectral em solos de regiões determinadas, para um melhor resultado de futuras pesquisas e aplicabilidade.

2.4 Estimativa da evapotranspiração

A quantificação da evapotranspiração (ET), que é a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta, é um parâmetro importante, principalmente, no dimensionamento de projetos e no manejo de sistemas de irrigação, pois, conhecendo-se a perda de água pelas culturas, é possível determinar quanto irrigar.

A evapotranspiração pode ser obtida por meio de medidas diretas ou por métodos empíricos. As medidas diretas exigem estruturas apropriadas e normalmente são utilizadas em condições de pesquisa. Em contraste, existem vários métodos empíricos que são classificados conforme os princípios envolvidos em seu desenvolvimento. Mesmo com a precisão oferecida pelas

medidas diretas ou por alguns métodos empíricos, a ET é normalmente estimada de forma pontual (LIMA et al., 2009).

2.4.1 Métodos para estimativa de evapotranspiração

Com base na equação de Penman-Monteith (1948) e Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (1956), vários autores compararam diversos métodos de estimativa de evapotranspiração, confrontando seus resultados.

Dos trabalhos observados, os resultados das equações de Makkink, Jensen-Haise, Camargo, Balanço de energia e Thornthwaite se mostraram satisfatórios.

A equação de Makkink mostrou-se viável em diversos trabalhos, dentre eles, Silva e Costa (2000) compararam os valores de evapotranspiração na região Bragantina, PA. Das equações empíricas avaliadas, os métodos de Makkink e Jensen-Haise apresentaram os melhores resultados comparados com a evaporação observada.

Medeiros (2008) analisou a evapotranspiração de referência em nove equações empírico-teóricas, com base na equação de Penman-Monteith, na região de Jaboticabal, SP. Segundo o autor, os resultados obtidos através da equação de Makkink apresentaram excelente concordância com a equação de Penman-Monteith, seguidas da estimativa de Camargo (1971), Balanço de energia e Thornthwaite (1948). O autor afirma que estas metodologias, apesar de apresentarem desempenho inferior ao método de Makkink, ainda são recomendáveis.

Vescove e Turco (2005) também comprovaram os melhores resultados da equação de Makkink quando comparado a equação de Radiação Solar e Tanque Classe A, na região de Araraquara, SP.

Pereira et al. (2009) afirmam que na Serra da Mantiqueira, MG, os métodos de estimativa da evapotranspiração que empregam a radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar. Os autores concluíram que o método de Jensen-Haise apresentou os melhores resultados em relação à Radiação, Penman e Blaney-Criddle. Também utilizando como referência o método de Penman-Monteith – FAO.

2.4.1.1 Equação de Penman-Monteith

A equação padronizada pelo boletim 56 da FAO (1956) e utilizada por muitos pesquisadores como referência em relação a outras metodologias é a equação de Penman-Monteith, (Equação 1). O método apresenta boa precisão, porém exige determinação de grande número de dados meteorológicos, sendo a maioria dos parâmetros medidos ou calculados.

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

Onde:

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

Δ = Declividade da curva de pressão de vapor versus temperatura ($kPa.C^{-1}$),

R_n = Radiação líquida ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$),

G = Densidade do fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$),

γ = Constante psicrométrica ($kPa.C^{-1}$),

T = Temperatura média diária do ar a 2 metros de altura ($^{\circ}C$),

u_2 = Velocidade do vento a 2 metros de altura ($m.s^{-1}$),

e_s = Pressão de vapor de saturação (kPa),

e_a = Pressão de vapor atual (kPa).

2.4.1.2 Equação de Makkink

Makkink (1957) propôs a seguinte equação para estimar a evapotranspiração potencial (ou de referência) baseando-se na correlação entre evapotranspiração potencial diária e a radiação solar.

$$Eto = 0,61 .Rs. \frac{s}{s + \gamma} - 0,12 \quad (2)$$

Onde:

Eto = Evapotranspiração de referência ($mm.dia^{-1}$),

Rs = Radiação solar global ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$),

s = Declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água ($kPa.°C^{-1}$),

γ = Coeficiente psicrométrico ($kPa.°C^{-1}$).

2.4.1.3 Equação de Jensen-Haise

Jensen e Haise (1963), determinaram uma equação para estimativa da evapotranspiração.

$$Eto = Rs(0,0252.T + 0,078) \quad (3)$$

Onde:

E_{to} = Evapotranspiração de referência ($mm.dia^{-1}$),

R_s = Radiação solar ($mm.dia^{-1}$),

T = Temperatura média diária ($^{\circ}C$).

2.4.1.4 Equação de Camargo

A equação de Camargo (1971) é baseada na equação de Thorthwaite, mas com uma fórmula mais simples, em períodos de 10 ou 30 dias. Apresentando-se da seguinte forma.

$$E_{to} = F.Q_0.T.ND \quad (5)$$

Onde:

E_{to} = Evapotranspiração de referência ($mm.dia^{-1}$),

F = Fator de ajuste em função da temperatura média anual do local,

Q_0 = Radiação solar extraterrestre diária ($mm.dia^{-1}$),

T = Temperatura média dia ($^{\circ}C$),

ND = Número de dias do período.

2.4.1.5 Balanço de energia

O processo de evapotranspiração é controlado pela energia disponível e pela capacidade evaporativa da água de ser transferida de uma superfície, de forma que utilizando a expressão do balanço de energia numa cobertura vegetal, desconsiderando-se o armazenamento de energia no solo e/ou biomassa e a quantidade de energia utilizada na fotossíntese, a energia resultante é

aproximadamente a energia necessária para ocorrer Eto (MEDEIROS, 2008), podendo ser estimada por:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (6)$$

Onde:

β = Razão de Bowen,

H = Fluxo de calor sensível do ar ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$),

λE = Fluxo de calor latente de evaporação ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$).

2.4.2 Métodos para estimativa da evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto

Técnicas de sensoriamento remoto, juntamente com o processamento digital das imagens tem sido amplamente utilizados para obtenção de dados de vegetação, podendo ser úteis para estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em locais onde existem poucas estações meteorológicas de monitoramento contínuo.

Estimar a evapotranspiração com o auxílio do sensoriamento remoto pode otimizar operações e resultados, principalmente para áreas extensas.

Schirmbeck et al. (2009) propuseram uma parametrização para aplicação do modelo Penman-Monteith simplificado, para sensoriamento remoto, a partir de imagens MODIS em área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani, no estado do Rio Grande do Sul. Os valores de evapotranspiração foram estimados aplicando uma equação linear que relaciona a evapotranspiração com mapas de temperatura de superfície. Os resultados foram comparados com dados de estações localizadas na área de estudo, demonstrando que o modelo proposto é consistente e possibilita a obtenção da distribuição espacial da evapotranspiração

em grandes áreas com uma reduzida quantidade de informações de terreno. Sendo o modelo utilizado não limitado ao sensor utilizado.

Com o objetivo de avaliar a distribuição espacial da evapotranspiração, Schirmbeck e Rivas (2009) empregaram a equação de balanço de energia com sensoriamento remoto e dados meteorológicos, utilizando o satélite Landsat7/ETM+. Transformando os valores digitais das bandas em parâmetros físicos, como radiância e refletância e, radiância e temperatura, estimaram as variáveis envolvidas na equação do balanço de energia. Os resultados obtidos indicaram que a metodologia é válida e pode ser utilizada na área avaliada, no centro da província de Buenos Aires e em outras áreas de condições similares.

Teixeira et al. (2009) elaboraram um algoritmo simplificado na determinação da evapotranspiração, baseado na razão da evapotranspiração atual e na evapotranspiração de referência. O modelo foi aplicado no perímetro de irrigação Nilo Coelho, em Petrolina, PE. Comparações dos valores da razão descrita no momento da passagem do satélite Landsat5/TM para aqueles de 24 horas evidenciaram a não necessidade de correção. Com a disponibilidade de uma rede de estações agrometeorológicas para a interpolação dos valores diários o algoritmo se apresentou com ótimo potencial para o monitoramento das condições hídricas de perímetros irrigados, bem como na escala de bacias hidrográficas. Os autores evidenciaram a sua simplicidade e a não necessidade de elaboração de mapas de classificação de culturas.

Ferreira Junior et al. (2011) estimaram a evapotranspiração da soja no leste do Pará. Através de imagens Landsat5/TM estimaram as componentes do balanço de energia, o qual necessita de poucas informações da superfície, como radiação líquida, o fluxo de calor para o solo e o fluxo de calor. Os resultados mostraram que as taxas estimadas foram muito semelhantes às observadas, revelando a importância de se utilizar métodos que viabilizam análises em larga escala espacial, como as possibilitadas pelo sensoriamento remoto.

Bezerra, Silva e Ferreira (2008) estimaram a evapotranspiração real diária na mesorregião do Cariri, Ceará. Utilizando imagens digitais Landsat5/TM em escala local e regional com dados complementares coletados em estação meteorológica, calcularam a evapotranspiração real diária utilizando o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*). Este método baseia-se na conversão de medições radiométricas de sensores a bordo de satélites em evapotranspiração real, utilizando imagens que ofereçam informações do espectro eletromagnético visível, infravermelho próximo e termal e dados complementares de superfície. Os resultados obtidos foram comparados com medidas efetuadas em campos irrigados apresentando diferença inferior a $1,0 \text{ mm.dia}^{-1}$.

Nota-se assim que as técnicas de sensoriamento remoto possibilitam estimar de forma eficiente e econômica os valores de evapotranspiração porque consideram características inerentes como cobertura vegetal, tipo de solo, relevo, etc.; ao contrário dos métodos convencionais que necessitam de uma série de informações climatológicas (FERREIRA JUNIOR et al., 2011).

2.5 Demanda de água pela agricultura irrigada

A água para irrigação de culturas é provavelmente um dos mais importantes usos da água, sendo que 60% de toda água doce mundial vão para irrigação (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS, 2010). No Brasil o setor de irrigação possui a maior parcela de vazão de retirada, cerca de 47% do total e 69% da vazão de consumo. Devido a esta demanda, os órgãos competentes necessitam de informações confiáveis sobre o tipo de cultura instalada, área plantada e distribuição espacial dentro de uma determinada região para tomada de decisões, planejamento, definição de prioridades e liberação de financiamentos (SÁ et al., 2007).

Segundo a Agência Nacional das Águas (2009) o setor rural brasileiro consome aproximadamente 82% da água disponível, sendo o crescimento da exploração econômica na Bacia do São Francisco, sobretudo pela agricultura irrigada, intensificado a partir de 1976.

Machado (2007) calculou a disponibilidade hídrica na Bacia Lagoa Mirim, localizada no Rio Grande do Sul e Uruguai. Foi medida a velocidade das águas superficiais e realizado o cálculo das vazões. Com base em um conjunto de dados pré existentes levantados por instituições e trabalhos científicos, verificou-se que 99,78% da demanda total uruguaia foram destinadas à irrigação, considerando todos os métodos, e apenas 0,02% destinado ao abastecimento industrial.

Pruski et al. (2007) avaliaram ao longo da bacia do Rio Paracatu o impacto das vazões demandadas pela irrigação. Foram estimadas as vazões com base no período de 1970 a 1996, determinando a vazão média anual de longa duração, a vazão mínima de sete dias de duração e o período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e a vazão associada à permanência de 95% com base em dados diários para 18 estações fluviométricas. A vazão de retirada pela irrigação foi estimada com base na irrigação total necessária e na área irrigada para cada cultura. Os autores evidenciaram que as vazões de retirada pela irrigação no mês de maior demanda variaram de 4,3% a 85% em relação à $Q_{7,10}$.

Vários autores constataram o crescente aumento da irrigação por pivô central em várias regiões. Sano et al. (2005) concluíram que a demanda de água para irrigação cresceu de forma mais acelerada no Distrito Federal entre os anos de 1992 a 2002, indicando uma tendência de alteração entre o consumo de água para irrigação e o consumo de água para o abastecimento humano na região.

2.6 Uso do sensoriamento remoto na agricultura irrigada

Como os usos da terra mudam constantemente, as exigências quanto ao planejamento espacial e monitoramento do meio ambiente aumentam invariavelmente (BLASCHKE; KUX, 2007). Dados básicos sobre planejamento, ou seja, informações sobre as condições atuais de uso do solo precisam estar atualizadas e disponíveis de modo a facilitar o planejamento agrícola e ambiental de uma região.

Schmidt et al. (2004) avaliaram a distribuição espacial de pivôs no Brasil utilizando o satélite Landsat e obtiveram resultados satisfatórios utilizando um mapa com a distribuição do número de outorgas de água concedidas em Minas Gerais, para Minas Gerais e um mapa com a distribuição do número de agricultores irrigantes usuários de pivôs em São Paulo, em ambos os casos houve uma sobreposição significativa entre as áreas.

Imagens de satélite e ferramentas de geoprocessamento permitem reduzir os custos, o trabalho e o tempo para levantamentos destes dados (MENDES; CIRILO, 2001; MOREIRA, 2001).

Portillo et al. (2003), afirmam que o sensoriamento remoto fornece um amplo conjunto de conhecimentos e técnicas úteis para caracterizar fenômenos dinâmicos que acontecem nas áreas agrícolas, além de auxiliar nas fiscalizações por parte dos órgãos ambientais.

Braga e Oliveira (2005) também concluíram que o sensoriamento remoto, aliado a técnicas de processamento de imagens, é uma ferramenta alternativa para o mapeamento e monitoramento de áreas irrigadas por pivô central.

Ferreira et al. (2011) identificaram e quantificaram as áreas irrigadas por pivô central no Estado de Minas Gerais, utilizando imagens do satélite CBERS2B/CCD. Os autores afirmam que além de identificar e quantificar é

importante que sejam associadas informações a estas áreas, gerando mapas cadastrais, e que o uso do sensoriamento remoto associado ao sistema de informações geográficas é uma técnica válida para mapear áreas irrigadas, possibilitando uma economia considerável de recursos.

Sano e Ferreira (2005) comentam que áreas com pivôs centrais normalmente apresentam grande heterogeneidade espectral (tonalidade) devido a diferenças no manejo da cultura, solo e água. Analisando áreas com pivôs centrais os autores distinguiram quatro classes espectrais diferentes: 1 = cultura agrícola com biomassa verde relativamente densa; 2 = solo coberto com palhada seca; 3 = cultura agrícola num estágio inicial de desenvolvimento, isto é, com biomassa verde relativamente baixa; e 4 = solo predominantemente exposto e com elevada porcentagem de umidade.

Neste trabalho foram interpretadas três classes: o estágio inicial de desenvolvimento, o secundário e de produção.

Silva et al. (2011) utilizaram imagens do satélite ResourceSat/LISS3 para estimativa da demanda hídrica na região noroeste do Estado de Minas Gerais. Através da identificação visual dos pivôs centrais na região, calculou-se a evapotranspiração de referência pelo método de Blaney Cridlle e a evapotranspiração das culturas, estimando a quantidade de água destinada à irrigação, sendo esta 41 vezes maior que o consumo urbano.

Santos et al. (2007) estimaram a demanda hídrica bruta em um projeto de irrigação no Vale do Goruruba, Janaúba – Minas Gerais, utilizando imagens CBERS. Através de técnicas de classificação supervisionada de imagens orbitais, os autores mapearam as áreas irrigadas e por meio de visita a campo identificaram as principais classes de uso e ocupação do solo. Com a análise multi-temporal simplificada e de visita a campo, verificaram que a maioria da área irrigada encontrava-se ocupada por culturas perenes e semi-perenes. As imagens classificadas foram exportadas para um sistema de informações

geográficas e obtidos o número de *pixels* pertencentes a área total ocupada por cada classe, estimando a demanda hídrica de modo simplificado, considerando a demanda unitária (média) de cada cultura observada.

Klemp e Zeilhofer (2009), com o objetivo de compreender a dinâmica do vertiginoso crescimento da irrigação, por meio do sistema pivô central, realizaram uma análise desta dinâmica na bacia hidrográfica do Alto Rio das Mortes, Mato Grosso. No desenvolvimento do estudo foram utilizadas imagens Landsat e CBERS, comprovando a aptidão física para a instalação de sistemas de pivôs centrais e que não há possibilidade de ampliação da área plantada irrigada por pivô central na região, devido à tentativa de aumentar a produtividade.

Ozdogan et al. (2010) avaliaram a capacidade do sensoriamento remoto para solução de problemas na agricultura irrigada. Segundo os autores dados de satélite oferecem inúmeras vantagens e vários métodos tem sido desenvolvidos para esta finalidade. Resultados satisfatórios podem exigir técnicas específicas para o local, analisando caso a caso, mas a fusão de dados fornecem modelos eficientes para aplicações de sensoriamento remoto.

Logo, o monitoramento das áreas irrigadas torna-se necessário para controlar abusos no uso dos recursos hídricos. Usar as tradicionais técnicas de aplicação de questionários para o monitoramento das áreas irrigadas é oneroso, demorado. O sensoriamento remoto surge como resposta a esta necessidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo foi a sub-bacia do Rio Urucuia, localizada na Bacia do Rio São Francisco. Apresenta uma área de 25.135 km² e está inserida na mesorregião noroeste do estado de Minas Gerais. A área 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 (Figura 4).

A sub-bacia do Rio Urucuia engloba doze municípios: Arinos, Bonfinópolis de Minas, Buritis, Chapada Gaúcha, Formoso, Pintópolis, Riachinho, Santa Fé de Minas, São Romão, Uruana de Minas, Urucuia e Unai.

O clima na região com base nos índices de umidade de Thornthwaite é considerado subúmido e subúmido seco (C2 e C1 respectivamente) e temperatura média anual de 23°C, com o predomínio de cultivos irrigados.

De modo geral, as médias anuais de precipitação ficam em torno de 990 a 1.414 mm. Na bacia há a predominância de latossolos com chapadas e planícies, sendo uma área de intensa atuação do agronegócio que atinge inclusive áreas de relevo acidentado.

3.1 Aquisição e georreferenciamento das imagens

Para cobrir a área de estudo foram necessárias 5 cenas do satélite Landsat5/TM, com órbitas-pontos de 219/071, 219/072, 220/070, 220/071 e 220/072. As imagens foram obtidas mensalmente no ano de 2010 e fez-se a avaliação da cobertura vegetal sob pivô central.

Na Tabela 3 são mostradas as cenas do satélite Landsat5/TM com as respectivas datas de passagem.

Tabela 3 Cenas do satélite Landsat5/TM e datas de coleta para o ano de 2010

órbita ponto	219-071	219-072	220-070	220-071	220-072
Janeiro	12/01/2010	12/01/2010	19/01/2010	19/01/2010	19/01/2010
Fevereiro	-	13/02/2010	04/02/2010	04/02/2010	04/02/2010
Março	-	-	-	-	-
Abril	18/04/2010	18/04/2010	25/04/2010	25/04/2010	09/04/2010
Maio	04/05/2010	04/05/2010	27/05/2010	27/05/2010	27/05/2010
Junho	05/06/2010	21/06/2010	12/06/2010	12/06/2010	12/06/2010
Julho	07/07/2010	07/07/2010	14/07/2010	14/07/2010	14/07/2010
Agosto	24/08/2010	24/08/2010	15/08/2010	15/08/2010	15/08/2010
Setembro	09/09/2010	09/09/2010	16/09/2010	16/09/2010	16/09/2010
Outubro	-	11/10/2010	-	-	-
Novembro	-	-	-	19/11/2010	-
Dezembro	-	-	-	21/12/2010	-

Foram utilizadas cenas com o menor recobrimento de nuvens para serem analisados os pivôs centrais da região, tal fato explica a não aquisição de cenas no período das chuvas.

Para os períodos em que não se obteve cenas Landsat, foram considerados os critérios utilizados para o mês anterior.

O *software* utilizado para o registro, georreferenciamento, mosaicagem das imagens e recorte da área de estudo foi o ENVI 4.7 (*Environment Visualizing Images*).

As cenas empregadas do satélite CBERS2B/CCD foram utilizadas para o georreferenciamento das cenas do satélite Landsat, e todas foram adquiridas gratuitamente através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Para o georreferenciamento das imagens Landsat fez-se primeiramente o georreferenciamento automático das imagens CBERS pelo ENVI 4.7. Foram selecionados 50 pontos em cada cena, apresentando um erro quadrático médio de 2 pixels. Com as imagens georreferenciadas fez-se o mosaico da sub-bacia, como ilustra Figura 4.

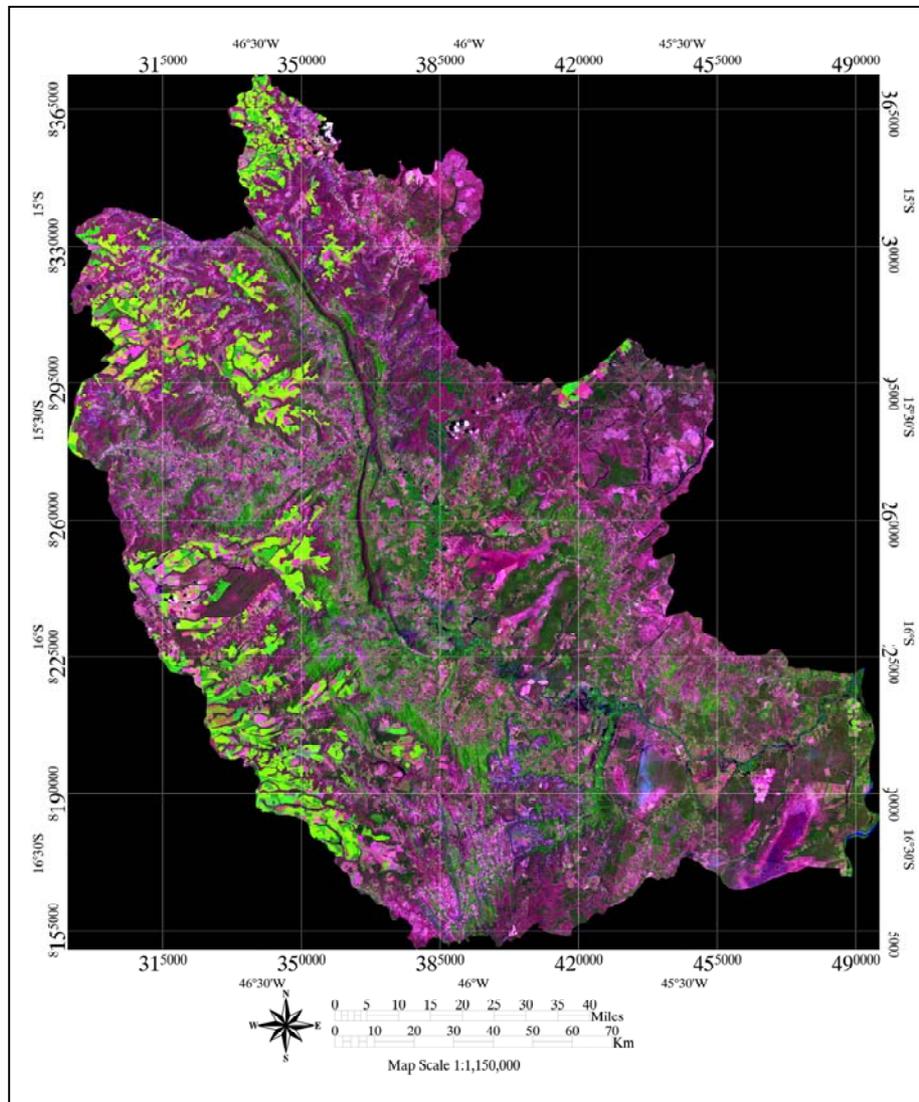


Figura 4 Mosaico de imagens Landsat 5/TM (composição 543/RGB, cenas de janeiro/2010)

3.2 Interpretação visual das imagens

A interpretação visual das imagens na tela do computador teve como objetivo identificar os pivôs centrais, delimitá-los e avaliá-los quanto às culturas.

A interpretação da imagem foi realizada de acordo com o procedimento convencional de fotointerpretação observando-se, conforme descrito por Florenzano (2002), as características dos elementos de acordo com a forma, a tonalidade, a textura, o padrão e a associação com outros aspectos do meio.

Sano e Ferreira (2005) apresentaram uma nova proposta metodológica para o mapeamento detalhado (escala 1:50.000) de uso antrópico do Cerrado, utilizando imagens Landsat5/TM e sugeriram que as classes devem ser mapeadas na seguinte ordem: áreas com pivô-central; áreas urbanas; reservatórios de água; reflorestamento; culturas agrícolas; e pastagens cultivadas. Segundo os autores essas classes estão ordenadas de acordo com a facilidade de identificação nas imagens e ainda ressaltaram que as áreas com pivôs centrais devem ser mapeadas usando-se a função de delimitação de polígonos regulares.

Os critérios mais utilizados na interpretação foram a forma e a tonalidade. Devido a característica circular das áreas irrigadas, a forma foi empregada para o mapeamento dos pivôs centrais existentes utilizando-se uma ferramenta de traçado elipse. Posteriormente foi encontrada a área de cada um deles, através do *software* ENVI 4.7.

Com os pivôs delimitados foi avaliada a tonalidade das culturas sob pivô central, sendo utilizada a composição colorida 543/RGB para definição dos estádios de produção.

Estes estádios ainda foram associados ao calendário agrícola, definindo os períodos de plantio e de colheita das principais culturas.

Para efeito de comparação, foram avaliados os resultados considerando toda a área em estágio inicial de desenvolvimento e toda a área em estágio de produção.

3.3 Determinação da evapotranspiração de referência

No cálculo da evapotranspiração de referência, as variáveis necessárias foram adquiridas através da Plataforma de Coleta de Dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Foram coletados os dados agrometeorológicos para todos os meses do ano de 2010 da Estação de Santa Fé de Minas, situada a 115 km de distância do centro da sub-bacia e calculada a evapotranspiração de referência diária pela fórmula de Makkink (Equação 2).

Este método foi concebido com dados de um lisímetro em gramado de lençol freático constante e correlaciona linearmente a evapotranspiração potencial com a radiação solar (R_s), onde W é um índice que depende do coeficiente psicrométrico γ e da tangente da curva de pressão de vapor em relação à temperatura Δ . Essa equação determina a evapotranspiração potencial em escala diária.

$$E_{to} = 0,61.R_s \cdot \frac{s}{s + \gamma} - 0,12 \quad (2)$$

Onde:

E_{to} = Evapotranspiração de referência ($mm.dia^{-1}$),

R_s = Radiação solar global ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$),

s = Declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água ($kPa.^{\circ}C^{-1}$), equação 7,

γ = Coeficiente psicrométrico ($kPa.^{\circ}C^{-1}$), equação 9.

$$s = 4098 \frac{e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (7)$$

Onde:

e_s = Pressão de saturação (kPa), equação 8,

T = Temperatura média ($^{\circ}C$),

$$e_s = 0,611 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{237,3 + T}} \quad (8)$$

$$\gamma = 0,0016286 \cdot \frac{P}{\lambda} \quad (9)$$

Onde:

P = Pressão atmosférica média do dia (kPa),

λ = Calor latente de evaporação da água (equação 10)

$$\lambda = 2,501 - (0,002361 \cdot T_{ar}) \quad (10)$$

Onde:

T_{ar} = Temperatura média ($^{\circ}C$).

3.4 Determinação da evapotranspiração da cultura

O cálculo da evapotranspiração da cultura foi obtida através da equação 13.

$$Etc = Eto.Kc \quad (11)$$

Onde:

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

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

Kc = Coeficiente de cultura.

Os valores do coeficiente de cultura variam com o tipo de cultura, estágio de desenvolvimento, comprimento do ciclo vegetativo e das condições climáticas locais, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 Coeficiente de cultura para algumas espécies vegetativas, em função dos estádios de desenvolvimento e das condições climáticas (DOORENBOS; PRUITT, 1977)

Cultura	Estádio	Urmin > 70%		UR mín <20%	
		Vento (m/s)		Vento (m/s)	
		0 a 5	5 a 8	0 a 5	5 a 8
Algodão	3	1,05	1,15	1,20	1,25
	4	0,65	0,65	0,65	0,70
Milho	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,55	0,55	0,60	0,60
Soja	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,45	0,45	0,45	0,45
Feijão	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,30	0,30	0,25	0,25
Sorgo	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,50	0,50	0,55	0,55
Trigo	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,25	0,25	0,20	0,20
Amendoim	3	0,95	1,00	1,05	1,10
	4	0,55	0,55	0,60	0,60
Grãos	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,30	0,30	0,25	0,25

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977)

De acordo com Doorenbos e Pruitt (1977 citados por BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006), pode-se utilizar os seguintes valores de Kc nas condições do Brasil, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 Coeficiente de cultura em função de seu estágio de desenvolvimento

Estádio de Desenvolvimento	Caracterização do estágio	Kc
Inicial (1)	Da germinação até a cultura cobrir 10% da superfície do terreno, ou 10 a 15% do seu desenvolvimento vegetativo	0,2 a 1,0
Secundário ou de desenvolvimento vegetativo (2)	do final do primeiro estágio até a cultura cobrir de 70% a 80% da superfície do terreno ou atingir de 70 a 80 % do seu desenvolvimento vegetativo	Varia linearmente entre os valores no primeiro e terceiro estágios
Intermediário ou de produção	Do final do segundo estágio até o início da maturação, também denominado estágio de produção	0,9 a 1,25
Final ou de maturação (4)	Do início da maturação até a colheita ou final da maturação	Varia linearmente entre os valores no terceiro estágio e de 0,3 a 1,0

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977)

Os valores de Kc foram estimados de acordo com as Tabelas 4 e 5, citada por Bernardo, Soares e Mantovani (2006) em função dos estágios de desenvolvimento e das condições climáticas.

Para a determinação de Kc no estágio 1, fez-se uma média da variação de seus valores e utilizou-se 0,60. Os valores de Kc no estágio 2 também foram

estimados através da média entre os valores do primeiro estágio, ou seja, 0,6 e os valores do terceiro estágio.

Para a inferência do Kc a partir das imagens Landsat5/TM foi utilizada a composição colorida 543/RGB. Nesta, analisou-se os pivôs centrais que estavam com culturas agrícolas em estágio de produção, estágio inicial de desenvolvimento e intermediário, indicando a necessidade de se utilizar o coeficiente de cultura (Kc) em estágio inicial de desenvolvimento, secundário e de produção.

A porcentagem abrangente de cada cultura sob pivô central foi estimada com base na área total de todas as culturas, obtidas no Banco de Dados Agregados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de acordo com a Tabela 6. A Tabela 6 indica a área de cada cultura sobre o município bem como a área total plantada. Com os valores indicados de área plantada para os anos de 2009 e 2010, fez-se a porcentagem dos pivôs centrais que estavam com determinado plantio. Como exemplo, o município de São Romão possui 50% de sua área total plantada com milho, como a área total de pivôs é de 4.344,45 ha tem-se que 2.172,225 ha estão com plantio de milho.

Tabela 6 Área de cada cultura por município e área total plantada para o ano de 2010

Municípios	Área de cada cultura (hectares) e área total plantada								
	Algod*	Amen*	arroz	milho	soja	feijão	sorgo	trigo	Total
Arinos	-	-	250	3200	6100	610	1200	-	11360
Bonfinópolis de Minas	-	130	-	7800	13000	4100	1500	-	26530
Buritís	2500	-	960	20400	66800	10700	6000	160	107520
Chapada Gaúcha	-	-	1585	1400	15000	590	-	-	18575
Formoso	-	-	300	6100	21500	3700	700	-	32300
Pintópolis	-	13	180	1600	-	550	-	-	2343
Riachinho	-	-	500	2100	1600	1100	-	-	5300
Santa Fé de Minas	-	-	80	400	-	125	-	-	605
São Romão	-	-	112	1500	580	800	-	-	2992
Unaí	2463	-	600	36500	96000	48000	12500	1915	197978
Uruana de Minas	600	200	200	1450	2000	200	100	100	4850
Urucuia	-	-	200	650	-	220	-	-	1070

*Algod = Algodão

*Amen. = Amendoim

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2011)

3.5 Demanda hídrica

Determinada a porcentagem da cultura sobre o município, como descrito no item 3.4, foi avaliado o ciclo de produção, para utilização dos Kc's nos meses corretos.

Como os valores de evapotranspiração da cultura correspondem a lâmina líquida de irrigação, ou seja, a quantidade de água que deve ser repostada no solo, calculou-se a lâmina bruta de irrigação, dividindo-se a lâmina líquida

pela eficiência de irrigação, conforme equação 14, sendo esta a água destinada à irrigação.

$$LB = \frac{ETc}{Ea} \quad (14)$$

Onde:

LB = Lâmina bruta de irrigação ($mm/mês$),

ETc = Evapotranspiração da cultura ($mm/mês$),

Ea = Eficiência de aplicação da irrigação (*decimal*)

Considerou-se uma eficiência de aplicação dos equipamentos de 100%, 90% e 60%, já que eficiências de aplicação inferiores a 60% se tornam inaceitáveis.

Supondo que a demanda de água está de acordo com estas premissas, e sabendo-se que cada mm corresponde a 1 $litro.m^{-2}$, multiplicou-se a lâmina bruta pela área irrigada total da cultura, estimando assim sua necessidade de água, ou seja, a quantidade de água destinada à irrigação (Equação 15).

$$DH = LB \cdot Área \quad (15)$$

Onde:

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

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

$Área$ = Área irrigada (m^2).

Os dados de vazão disponível da sub-bacia foram adquiridos por meio da Universidade Federal de Viçosa, MG, através do Atlas Digital das Águas de Minas, elaborado pelo Departamento de Engenharia Agrícola em parceria com a Secretaria de Estado de Agricultura Pecuária e Abastecimento (SEAPA) e a

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV, 2011).

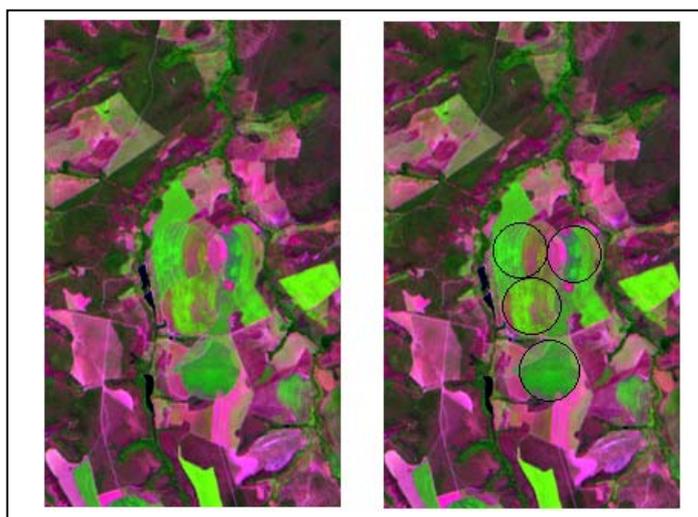
Foi utilizado o valor da $Q_{7,10}$, ou seja, a vazão mínima de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos, sendo um importante parâmetro hidrológico com grande aplicação nos estudos de planejamento e gestão do uso dos recursos hídricos. Constitui um importante instrumento da Política Nacional dos Recursos Hídricos do Brasil e fornece a estimativa estatística da disponibilidade hídrica dos escoamentos naturais de água.

Para o Estado de Minas Gerais são destinados à irrigação 30% do valor da $Q_{7,10}$. Como a água disponível nesta sub-bacia é de 26,4% $m^3.s^{-1}$, ‘os valores de demanda hídrica foram confrontados com a vazão disponível para irrigação, sendo de 7,92 $m^3.s^{-1}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Identificação dos pivôs centrais

No período de 01/01/2010 a 31/12/2010 foram coletadas imagens Landsat para contabilizar os pivôs centrais em cada município da área estudo. Após o georreferenciamento e recorte da área, foram contabilizados os pivôs centrais através da interpretação visual. A localização e identificação dos pivôs centrais apresentaram-se confusas em certas regiões. Sano e Ferreira (2005) caracterizaram as áreas ocupadas por pivôs centrais como sendo facilmente visualizadas nas imagens, devido à sua forma circular, mas no caso em questão as áreas com pivôs apresentaram grande homogeneidade espectral com o entorno. O uso do solo foi semelhante dentro e fora da área do pivô, dificultando a sua delimitação, como ilustrado na Figura 5.



(a) Visualização dos pivôs

(b) Identificação dos pivôs

Figura 5 Identificação de pivôs centrais em área de vegetação similar a cultura irrigada. Landsat5/TM, composição 543/RGB

Através da interpretação visual foram delimitados 334 pivôs centrais nos municípios da sub-bacia Urucuia, totalizando uma área de 30.215,4 ha. Esta área representa 1,2% do total de área da sub-bacia, como ilustra a Figura 6. Este número não foi constante em toda a sub-bacia, mas como menos de 5% da área apresentaram novos equipamentos instalados, considerou-se o valor total de equipamentos visualizados em dezembro de 2010.

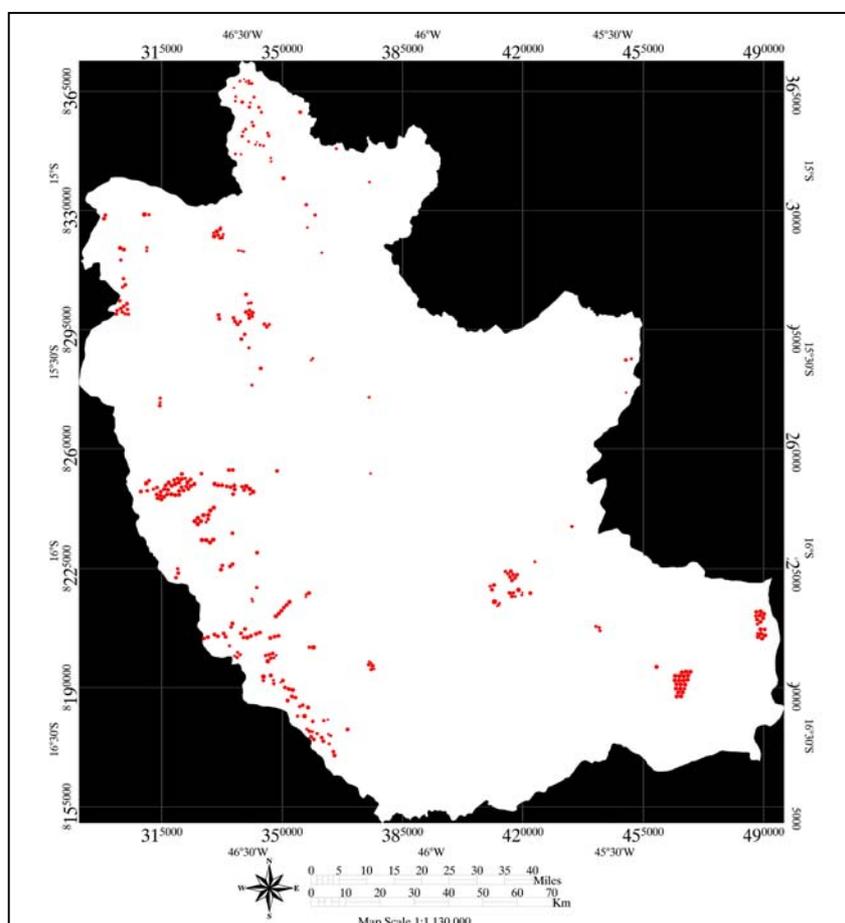


Figura 6 Localização dos pivôs centrais na sub-bacia Urucua

Ferreira et al. (2011), utilizando imagens CBERS para o ano de 2008 e 2009, encontraram 294 pivôs na mesma área de estudo avaliada, representando assim um crescimento da área irrigada de 13,6%.

Na Tabela 7 podem ser visualizados os números de pivôs centrais por município como também sua área irrigada total (ha).

Tabela 7 Número de pivôs centrais e área total irrigada por municípios

Município	Pivôs centrais visualizados	Área irrigada total (ha)
Arinos	2	103,2
Bonfinópolis de Minas	39*	3.457,4
Buritis	70	6.075,7
Chapada Gaúcha	3*	190,1
Formoso	39*	2.202,6
Riachinho	6	415,7
Santa Fé de Minas	0*	0,0
São Romão	38	4.344,6
Uruana de Minas	4	386,7
Urucuaia	29*	2.346,2
Unaí	104*	10.692,9
Pintópolis	0*	0,0

*Refere-se à parte do município que pertence à sub-bacia Urucuaia

Quanto à distribuição dos pivôs nos municípios, observou-se que 35,4% deles se localizam no município de Unaí, já os municípios de Santa Fé de Minas e Pintópolis não apresentaram equipamentos instalados.

Ferreira et al. (2011) observaram que o município de Unaí possuía nos anos de 2008 e 2009, 495 pivôs. No presente trabalho foram delimitados 104 pivôs, sendo estes localizados na sub-bacia Urucuaia, o restante está localizado na sub-bacia do rio Paracatu.

O potencial agrícola da região é grande, registrado pelo aumento do número de equipamentos instalados ao longo dos anos.

Devido às condições favoráveis à irrigação, necessita-se de atenções especiais pelos usuários e gestores públicos dos recursos naturais que normalmente se refletem na disponibilidade dos recursos hídricos naturais, relevando a importância do planejamento dos sistemas irrigados na região.

4.2 Evapotranspiração de referência

No cálculo da evapotranspiração de referência, utilizaram-se as seguintes variáveis: radiação solar, temperatura média, umidade relativa e pressão atmosférica. Através do cálculo da evapotranspiração diária obtiveram-se os valores de evapotranspiração mensais, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 Valores de evapotranspiração de referência

Mês	Evapotranspiração de referência ($mm.mês^{-1}$)
Janeiro	133,72
Fevereiro	124,8
Março	112,94
Abril	106,51
Mai	89,42
Junho	86,98
Julho	82,85
Agosto	95,84
Setembro	106,93
Outubro	117,54
Novembro	85,96
Dezembro	113,94

Os valores de evapotranspiração apresentaram-se variáveis de um mês para outro, a evapotranspiração máxima foi no mês de janeiro, sendo de 133,72 *mm* e a mínima foi no mês de julho, 82,85 *mm*.

Santana (2000) desenvolveu um sistema de geoespacialização da demanda de irrigação para o estado de Minas Gerais, para tal, foram necessários valores de evapotranspiração de referência. Na região noroeste do Estado, estes valores variaram de 260 *mm* a 340 *mm*, sendo o valor acumulado do período de 1º de maio a 30 de julho de 1999.

Para o ano de 2010 este valor diminuiu, apresentando para o mesmo período uma evapotranspiração acumulada de 259,25 *mm*.

O mesmo autor avaliou também os valores de evapotranspiração no período de 15 de setembro a 14 de dezembro, variando de 340 *mm* a 420 *mm*.

Para o ano de 2010 e fazendo-se o cálculo acumulado de evapotranspiração de 1º de setembro a 31 de dezembro o resultado foi de 424,37 *mm*. Este resultado apresentou-se dentro dos limites apresentados pelo autor.

Lemos Filho et al. (2007) analisaram a demanda hídrica em Minas Gerais, representada pela evapotranspiração de referência, sendo os valores estimados por Penman-Monteith-FAO a partir de dados de estações climatológicas. Afirmaram que os menores valores de evapotranspiração de referência ocorreram no mês de junho e os maiores no mês de janeiro, para todo o Estado de Minas Gerais, sendo o trimestre mais seco formado pelos meses de junho, julho e agosto. Logo, na sub-bacia Urucuia não foi muito diferente, o maior valor apresentou-se em janeiro, já o menor valor foi no mês de julho e os menores valores apresentaram-se nos meses de maio a agosto.

Os autores supracitados afirmaram que as menores variações temporais de evapotranspiração foram registradas no noroeste, oeste e sudeste de Minas Gerais, provavelmente por apresentarem climas mais estáveis. Pode-se então comprovar isto neste trabalho, as variações não foram tão bruscas, gerando demandas hídricas semelhantes todos os anos e facilitando a prática da irrigação.

4.3 Estádio de desenvolvimento da cultura para atribuição de K_c

As principais culturas produzidas sob pivô central na região são soja, milho, feijão e sorgo.

A Tabela 9 indica a porcentagem das culturas produzidas sobre a área total, de acordo com o IBGE, para o ano de 2010.

Tabela 9 Porcentagem das culturas produzidas por município

Municípios	Porcentagem das culturas produzidas por município							
	algodão	amendoim	arroz	milho	soja	feijão	sorgo	trigo
Arinos	-	-	2,20	28,17	53,70	5,37	10,56	-
Bonfinópolis de Minas	-	0,49	-	29,40	49,00	15,45	5,65	-
Buritis	2,33	-	0,89	18,97	62,13	9,95	5,58	0,15
Chapada Gaúcha	-	-	8,53	7,54	80,75	3,18	-	-
Formoso	-	-	0,93	18,89	66,56	11,46	2,17	-
Pintópolis	-	0,55	7,68	68,29	-	23,47	-	-
Riachinho	-	-	9,43	39,62	30,19	20,75	-	-
Santa Fé de Minas	-	-	13,22	66,12	-	20,66	-	-
São Romão	-	-	3,74	50,13	19,39	26,74	-	-
Unai	1,24	-	0,30	18,44	48,49	24,25	6,31	0,97
Uruana de Minas	12,37	4,12	4,12	29,90	41,24	4,12	2,06	2,06
Uruçuia	-	-	18,69	60,75	-	20,56	-	-

Fonte: IBGE (2011)

Determinada a porcentagem que cada cultura ocupa sobre todo o município, considerou-se que estas porcentagens são as mesmas para as áreas irrigadas por pivô central.

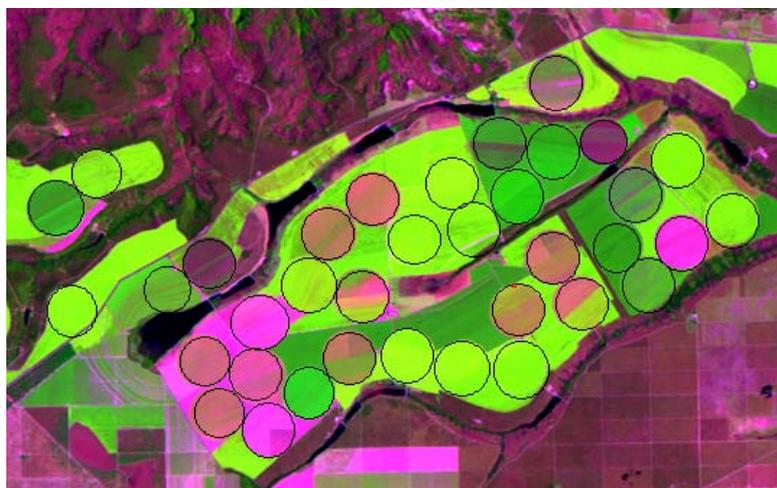
Em toda a sub-bacia, 36% da área plantada são cultivadas com milho e 37,6% com soja, representando 73,6% dos cultivos da região.

Com base na Tabela 9 nota-se que há uma grande variabilidade de cultivos. O município de Uruana de Minas apresentou oito culturas diferentes sobressaindo as culturas de soja e milho. Os municípios de Buritis e Unai apresentaram sete cultivos diferentes, sendo que a maior parte da área é cultivada com soja.

4.4 Determinação dos estádios de produção

Através da interpretação visual das imagens, fez-se a análise dos pivôs centrais mensalmente, para determinação das culturas em estágio inicial de desenvolvimento, secundário e de produção.

As Figuras 7 a 16 exemplificam estas mudanças ao longo do ano e a quantificação dos pivôs centrais para cada fase de desenvolvimento da cultura.



(a) delimitação dos pivôs



(b) Identificação dos pivôs em estágio secundário de produção

Figura 7 Cultivos agrícolas sob pivôs centrais em imagem Landsat5/TM, 543/RGB, município de Unai, janeiro/2010

Na Figura 7(a) foram delimitados trinta e seis pivôs centrais, destes, dezessete se encontram em estágio secundário, conforme a Figura 7(b) e o restante em estágio de produção em janeiro de 2010. Pode-se notar na Figura 7 b um pivô (seta indicativa) que apresenta sua metade em estágio secundário e a outra metade em produção.



Figura 8 Identificação das culturas em estágio intermediário de desenvolvimento, Landsat5/TM, 543/RGB, fevereiro/2010

Na Figura 8, em fevereiro de 2010, dezessete pivôs se encontram em estágio secundário e dezenove em estágio de produção. Para o mês de março não foi possível a aquisição de cenas pelo Landsat5/TM. O estágio de desenvolvimento da cultura foi determinado avaliando os pivôs do mês de fevereiro e abril.



Figura 9 Identificação das culturas em estágio inicial de desenvolvimento e produção, Landsat5/TM, 543/RGB, abril/2010

Na Figura 9, em abril de 2010, nota-se o desenvolvimento de algumas culturas sob pivô central e também a presença de áreas mais claras (seta indicativa), nas quais se utilizou o Kc para culturas em início de desenvolvimento.



Figura 10 Identificação dos pivôs com mais de uma cultura, Landsat5/TM, 543/RGB, maio/2010

Na Figura 10, em maio de 2010, nota-se o aumento das áreas com culturas em início de desenvolvimento.



Figura 11 Identificação das culturas em fase inicial de desenvolvimento, Landsat 5/TM, 543/RGB, junho/2010

Na Figura 11, em junho de 2010, quatorze pivôs se encontram na fase inicial de desenvolvimento. Como dois pivôs não apresentam a sua totalidade em fase inicial (setas indicativas), considerou-se apenas uma porcentagem do mesmo.



Figura 12 Identificação de pivô com cultura em 2 estádios de desenvolvimento, Landsat5/TM, 543/RGB, julho/2010

Na Figura 12, em julho de 2010, notam-se pivôs com metade da sua área com cultura em produção e outra metade com fase inicial de desenvolvimento.



Figura 13 Visualização das culturas em agosto/2010, Landsat5/TM, 543/RGB



Figura 14 Visualização das culturas em setembro/2010, Landsat5/TM, 543/RGB

Na Figura 14, em setembro de 2010, as culturas se apresentam em estágio de produção e início de desenvolvimento.



Figura 15 Visualização das culturas em novembro/2010, Landsat5/TM, 543/RGB

Na Figura 15, em novembro de 2010 muitos pivôs já se encontram em produção ou fase secundária. Como não foram obtidas cenas em outubro/2010, considerou-ser que a maioria dos pivôs para este mês apresentava-se em fase secundária.

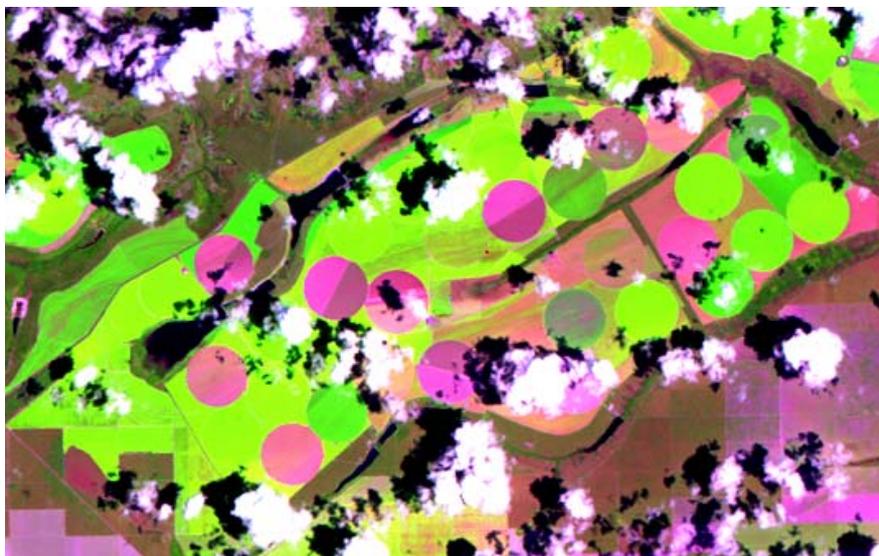


Figura 16 Visualização das culturas em dezembro/2010, Landsat5/TM, 543/RGBb

Na Figura 16, em dezembro de 2010 há a predominância de pivôs em estágio de produção e secundária.

Apesar da presença de algumas nuvens para o mês de dezembro, pode-se contabilizar os pivôs sobre parte dos municípios, pois a maioria se localizava na cena 220/71. Como não foi possível a aquisição de cenas para serem analisados os pivôs sobre os municípios de São Romão (órbita-ponto 220/70) e Formoso (órbita-ponto 219/71), fez-se uma estimativa do estágio de desenvolvimento da cultura baseado no mês anterior.

As Tabelas 10, 11 e 12 mostram a porcentagem da área total irrigada que se apresentou em estágio de produção, secundário e inicial de desenvolvimento, respectivamente, para todos os municípios no ano de 2010.

Tabela 10 Porcentagem da área total irrigada em função do estágio vegetativo de produção

Municípios	% da área total irrigada em estágio de produção
------------	---

	mês												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Arinos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	50
Bonfinópolis de Minas	87	70	50	45	39	45	64	65	30	39	58	88	
Buritit	57	62	50	46	35	42	62	53	15	61	57	81	
Chapada Gaúcha	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	25	25
Formoso	85	70	65	61	51	23	45	49	19	55	49	87	
Pintópolis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Riachinho	100	100	-	83	83	33	33	50	50	-	50	67	
Santa Fé de Minas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
São Romão	47	31	22	14	20	35	56	51	23	38	20	65	
Unai	70	71	50	36	45	45	44	54	31	63	12	73	
Uruana de Minas	25	75	25	25	25	25	50	-	-	-	-	25	
Urucuia	83	56	61	67	62	52	51	43	22	48	32	82	

Tabela 11 Porcentagem da área total irrigada em função do estágio secundário

Municípios	% da área total irrigada em estágio secundário												
	mês												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Arinos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	50	50
Bonfinópolis de Minas	13	30	50	50	42	33	13	15	32	35	42	12	
Buritit	43	38	50	54	41	43	27	32	49	33	39	19	
Chapada Gaúcha	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	50	75	75

Formoso	15	30	35	39	39	58	41	32	47	38	39	13
Pintópolis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Riachinho	-	-	-	17	17	17	58	50	50	-	50	33
Santa Fé de Minas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
São Romão	13	21	60	86	60	37	23	37	48	42	71	23
Unaí	30	29	50	56	41	24	44	29	23	33	77	27
Uruana de Minas	75	25	75	75	75	75	50	-	-	50	100	75
Urucuia	14	36	30	26	22	19	30	28	20	49	60	10

Tabela 12 Porcentagem da área total irrigada em função do estágio inicial

Municípios	% da área total irrigada em estágio inicial											
	mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arinos	-	-	-	-	-	-	-	-	100	50	-	-
Bonfinópolis de Minas	-	-	-	5	19	22	23	20	38	26	-	-
Buritit	-	-	-	-	24	15	11	15	36	6	4	-
Chapada Gaúcha	-	-	-	-	-	-	-	-	100	50	-	-
Formoso	-	-	-	-	10	19	14	19	34	7	12	-
Pintópolis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Riachinho	-	-	100	-	-	50	9	-	-	100	-	-
Santa Fé de Minas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
São Romão	40	48	18	-	20	28	21	12	29	20	9	12
Unaí	-	-	-	8	14	31	12	17	46	4	11	-
Uruana de Minas	-	-	-	-	-	-	-	100	100	50	-	-
Urucuia	3	8	9	7	16	29	19	29	58	3	8	8

Para o município de Arinos, os pivôs encontrados não apresentaram alterações até agosto. Então se calculou a evapotranspiração da cultura para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.

No município de Chapada Gaúcha, nos meses de abril a agosto, os pivôs não apresentaram mudanças. Como no mês de novembro 75% dos pivôs se apresentavam em estágio secundário e 25% em produção, o cálculo de

evapotranspiração foi avaliado novamente a partir de setembro. Estes foram os municípios que apresentaram o menor número de pivôs.

No município de Uruana de Minas e Riachinho, apesar da área irrigada ser pequena, os pivôs apresentaram mudanças, evidenciando assim a presença de cultivos irrigados na região.

Nos demais municípios pode-se considerar que se planta durante o ano todo, pois através das análises visuais de tonalidade de cor foi possível analisar estas mudanças.

Através das Tabelas 10, 11 e 12 nota-se que em setembro concentra-se a maioria das culturas em estágio inicial de desenvolvimento, e nos meses de janeiro e fevereiro culturas em estágio de produção.

Há uma grande variabilidade dos valores tabelados em todos os meses, evidenciando a presença de cultivos irrigados em todo o ano e muitos pivôs irrigando culturas diferentes.

De acordo com o estágio da cultura (Figuras 7 a 16) atribuiu-se os valores de Kc conforme a Tabela 7, baseado nos valores de umidade relativa e velocidade do vento. Na Tabela 13 estão apresentados os valores de coeficiente de cultura utilizados.

Tabela 13 Valores utilizados de Kc para diferentes culturas

Cultura	Kc de produção	Kc secundário	Kc inicial
algodão	1,05	0,825	0,6
amendoim	0,95	0,775	0,6
arroz	1,05	0,825	0,6
milho	1,05	0,825	0,6
soja	1,00	0,8	0,6
feijão	1,05	0,825	0,6

sorgo	1,00	0,8	0,6
trigo	1,05	0,825	0,6

4.5 Água destinada à irrigação na sub-bacia Urucuia

Determinada a proporção de área irrigada em função da fase de desenvolvimento da cultura sobre a sub-bacia, conforme as Tabelas 10, 11 e 12 e os Kc's, pode-se calcular a evapotranspiração da cultura mensalmente e posteriormente a demanda de água destinada à irrigação.

Como exemplo, o município de Urucuia apresentou 29 pivôs. No mês de janeiro, 24 estavam em produção, 4 em fase secundária e 1 na fase inicial, ou seja, 83%, 14% e 3% da área irrigada por pivô (Tabelas 10, 11 e 12).

Para o município de Urucuia, dos pivôs que se encontravam em produção, 18,69% possuíam arroz, 60,75% milho e 20,56% feijão, conforme a Tabela 9. Foi utilizado o Kc de produção para estas áreas (Tabela 13). Como o valor de evapotranspiração de referência foi para a área total, multiplicou-se pela proporção que a cultura ocupa sobre a área total irrigada, e posteriormente pelo valor de Kc. A Tabela 14 apresenta os valores de evapotranspiração total da cultura para cada município, no ano de 2010.

Determinado os valores de evapotranspiração da cultura, calculou-se a demanda necessária para irrigação em $m^3.mês^{-1}$, utilizando-se a eficiência de aplicação de 100%, 90% e 60%. As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam estes resultados.

Tabela 14 Evapotranspiração total da cultura para cada município no ano de 2010

Município	Evapotranspiração total da cultura ($mm.mês^{-1}$)											
	mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arinos	-	-	-	-	-	-	-	-	64,2	82,8	78,5	104,1
Bonfinópolis de Minas	132,7	119,9	103,7	95,6	76,4	74,9	74,5	87,0	85,0	98,7	80,4	113,8
Buritís	123,9	116,7	102,8	96,1	74,2	75,0	75,6	84,8	81,6	108,2	78,8	111,0
Chapada Gaúcha	107,6	100,4	114,0	-	-	-	-	-	64,2	82,6	73,6	97,5
Formoso	131,6	119,0	106,5	99,5	79,9	71,0	72,3	83,4	83,0	106,7	76,0	112,6
Riachinho	138,4	129,2	67,8	106,3	89,2	67,9	72,0	88,8	99,0	70,5	79,6	109,7
São Romão	111,7	97,7	93,6	90,6	73,3	72,7	74,3	86,8	86,3	101,1	72,6	106,7
Unáí	128,2	119,9	103,5	92,7	78,4	73,1	72,8	85,2	83,4	110,0	69,9	110,0
Uruana de Minas	108,7	114,6	92,6	87,4	73,3	71,3	72,0	55,0	61,4	79,1	66,3	93,4
Urucuia	133,8	116,4	106,4	102,2	83,0	76,3	74,3	82,1	79,6	108,9	75,6	113,0

Tabela 15 Demanda de água para irrigação no ano de 2010 com uma eficiência de aplicação de 100% ($m^3.mês^{-1}$)

Município	mês					
	1	2	3	4	5	6
Arinos	-	-	-	-	-	-
Bonfinópolis de Minas	4586290	4145969	3586194	3303854	2642484	2589529
Buritís	7528376	7089235	6245279	5836198	4506599	4558452
Chapada Gaúcha	204568	190922	216747	-	-	-
Formoso	2899553	2620445	2345570	2192529	1758866	1563559
Riachinho	575277	536902	281695	441849	370953	282205
São Romão	4854295	4243997	4067533	3937831	3186249	3157542
Unai	13710876	12824448	11070228	9910921	8381237	7818690
Uruana de Minas	420287	443293	358196	337803	283601	275863
Urucuia	3138907	2731878	2496110	2398980	1947967	1789205
	mês					
	7	8	9	10	11	12
Arinos	-	-	66211	85453	81029	107403
Bonfinópolis de Minas	2576020	3008047,64	2940194	3413084	2779965	3935708
Buritís	4591791	5155221,31	4959226	6573475	4785753	6744287
Chapada Gaúcha	-	-	121954	156935	139870	185398
Formoso	1591712	1836888,62	1829185	2349640	1675070	2481079
Riachinho	299511	368996,183	411694	293168	330957	456193
São Romão	3229500	3772518,42	3748807	4390597	3153402	4637557
Unai	7784144	9112808,13	8911879	11759956	7474700	11759925
Uruana de Minas	278525	212803,754	237428	305706	256275	361368
Urucuia	1743613	1925924,26	1866541	2554341	1772762	2650538

Tabela 16 Demanda de água para irrigação no ano de 2010 com uma eficiência de aplicação de 90% ($m^3.mês^{-1}$)

Município	mês					
	1	2	3	4	5	6
Arinos	-	-	-	-	-	-
Bonfinópolis de Minas	5095878	4606632	3984660	3670949	2936093	2877254
Buritit	8364862	7876928	6939199	6484664	5007332	5064947
Chapada Gaúcha	227297,8	212135,6	240830	-	-	-
Formoso	3221726	2911606	2606189	2436143	1954296	1737288
Riachinho	639196,7	596557,8	312994,4	490943,3	412170	313561,1
São Romão	5393661	4715552	4519481	4375368	3540277	3508380
Unai	15234307	14249387	12300253	11012134	9312486	8687433
Uruana de Minas	466985,6	492547,8	397995,6	375336,7	315112,2	306514,4
Uruçua	3487674	3035420	2773456	2665533	2164408	1988006
	mês					
	7	8	9	10	11	12
Arinos	-	-	73567,78	94947,78	90032,22	119336,7
Bonfinópolis de Minas	2862244	3342275	3266882	3792316	3088850	4373009
Buritit	5101990	5728024	5510251	7303861	5317503	7493652
Chapada Gaúcha	-	-	135504,4	174372,2	155411,1	205997,8
Formoso	1768569	2040987	2032428	2610711	1861189	2756754
Riachinho	332790	409995,8	457437,8	325742,2	367730	506881,1
São Romão	3588333	4191687	4165341	4878441	3503780	5152841
Unai	8649049	10125342	9902088	13066618	8305222	13066583
Uruana de Minas	309472,2	236448,6	263808,9	339673,3	284750	401520
Uruçua	1937348	2139916	2073934	2838157	1969736	2945042

Tabela 17 Demanda de água para irrigação no ano de 2010 com uma eficiência de aplicação de 60% ($m^3.mês^{-1}$)

Município	mês					
	1	2	3	4	5	6
Arinos	-	-	-	-	-	-
Bonfinópolis de Minas	7643817	6909948	5976990	5506423	4404140	4315882
Buritís	12547293	11815392	10408798	9726997	7510998	7597420
Chapada Gaúcha	340946,7	318203,3	361245	-	-	-
Formoso	4832588	4367408	3909283	3654215	2931443	2605932
Riachinho	958795	894836,7	469491,7	736415	618255	470341,7
São Romão	8090492	7073328	6779222	6563052	5310415	5262570
Unáí	22851460	21374080	18450380	16518202	13968728	13031150
Uruana de Minas	700478,3	738821,7	596993,3	563005	472668,3	459771,7
Uruçua	5231512	4553130	4160183	3998300	3246612	2982008
	mês					
	7	8	9	10	11	12
Arinos	-	-	110351,7	142421,7	135048,3	179005
Bonfinópolis de Minas	4293367	5013413	4900323	5688473	4633275	6559513
Buritís	7652985	8592036	8265377	10955792	7976255	11240478
Chapada Gaúcha	-	-	-	261558,3	233116,7	308996,7
Formoso	2652853	3061481	3048642	3916067	2791783	4135132
Riachinho	499185	614993,6	686156,7	488613,3	551595	760321,7
São Romão	5382500	6287531	6248012	7317662	5255670	7729262
Unáí	12973573	15188014	14853132	19599927	12457833	19599875
Uruana de Minas	464208,3	354672,9	395713,3	509510	427125	602280
Uruçua	2906022	3209874	3110902	4257235	2954603	4417563

Nas Tabelas 15, 16 e 17 pode-se notar o crescente aumento da demanda de água destinada à irrigação quando a eficiência de aplicação do equipamento diminui.

A demanda de água total necessária para irrigação, de acordo com a Tabela 17 foi de $358.576.600 \text{ m}^3$ para o ano de 2010. Nas Tabelas 18 e 19 este valor foi de $374.576.415 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ e $561.661.366 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ com eficiências de aplicação de 90% e 60% respectivamente. Isto representou um aumento de 37% e 33,3% em relação à eficiência de 100%.

A vazão disponível da sub-bacia é de $26,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, ou seja, $821.145.600 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$. Logo, a demanda de água necessária à irrigação por pivô central, utilizando os coeficientes de cultura analisados através das imagens, correspondeu a 43% da disponibilidade hídrica da sub-bacia, mais que os 30% disponíveis à irrigação, isto com eficiência de aplicação da irrigação de 100%. Já para as eficiências de 90% e 60% os valores de demanda corresponderiam a 45,6% e 68% respectivamente.

É importante ressaltar que a influência da eficiência de aplicação contribui para o aumento da demanda hídrica, sendo importante avaliar a correta manutenção dos equipamentos e sua adequada utilização, além dos pré requisitos de instalação.

Nota-se que apesar da proporção de pivôs centrais sobre a sub-bacia ser baixa, apenas de 1,2% conforme a Figura 6, a demanda de água destinada apenas à irrigação por pivô é elevada.

Silva et al. (2011) avaliaram a demanda de água necessária à irrigação nos meses de junho e julho de 2010 na região noroeste do Estado de Minas Gerais. Os autores ressaltaram que dos municípios analisados, Buritis, São Romão e Bonfinópolis de Minas se destacaram pela alta demanda de água destinada à irrigação.

Neste estudo, estes municípios também se destacam juntamente com Unai, representando cerca de 33,6% da demanda total destinada à irrigação na sub-bacia.

4.6 Água destinada à irrigação em relação aos coeficientes de cultura

A análise dos coeficientes de cultura torna-se importante, pois é um dos fatores para determinar a correta quantidade de água que a cultura necessita.

Como os valores de demanda hídrica para irrigação são diretamente proporcionais a evapotranspiração da cultura, utilizando-se o Kc inicial em toda a área e/ou o Kc de produção para toda a área pode-se notar alterações significativas na demanda hídrica. O Gráfico 2 apresenta os valores de evapotranspiração da cultura com a utilização somente do Kc inicial, os Kc's avaliando as imagens (Real), e considerando somente o Kc de produção.

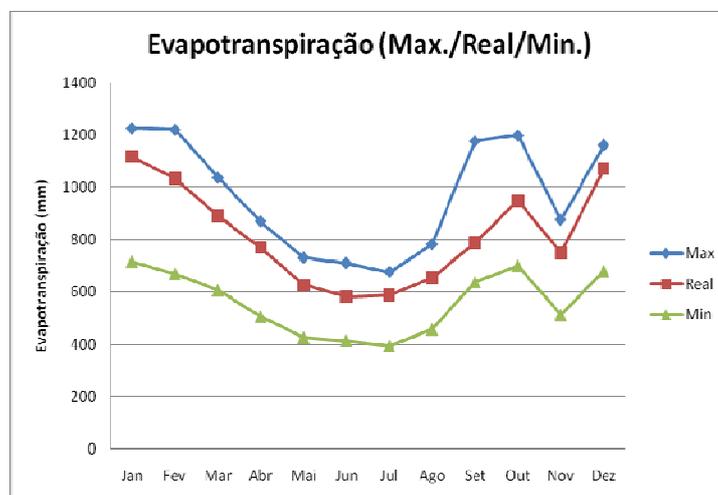


Gráfico 2 Valores de evapotranspiração da cultura para diferentes aplicações de Kc

Utilizando-se o Kc correspondente ao estágio inicial de desenvolvimento em toda a sub-bacia e posteriormente o Kc de produção, a demanda de água destinada à irrigação correspondeu a $228.750.154 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ e $387.746.459 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ respectivamente. Estes valores representam 28% e 47% da disponibilidade da sub-bacia, no entanto, eles subestimam e superestimam os resultados, evidenciando que as utilizações de imagens de sensoriamento remoto contribuem para um resultado mais preciso.

Sano et al. (2005) afirmam que uma forma de reduzir os custos, o trabalho e o tempo para levantamento de dados sobre a oferta e demanda de água constitui-se no uso de imagens de satélite. Neste trabalho nota-se a utilidade destas imagens e confirmam que sua utilização colabora para o melhor resultado.

A precipitação acumulada mensal na região é muito variável, como ilustra o Gráfico 3.

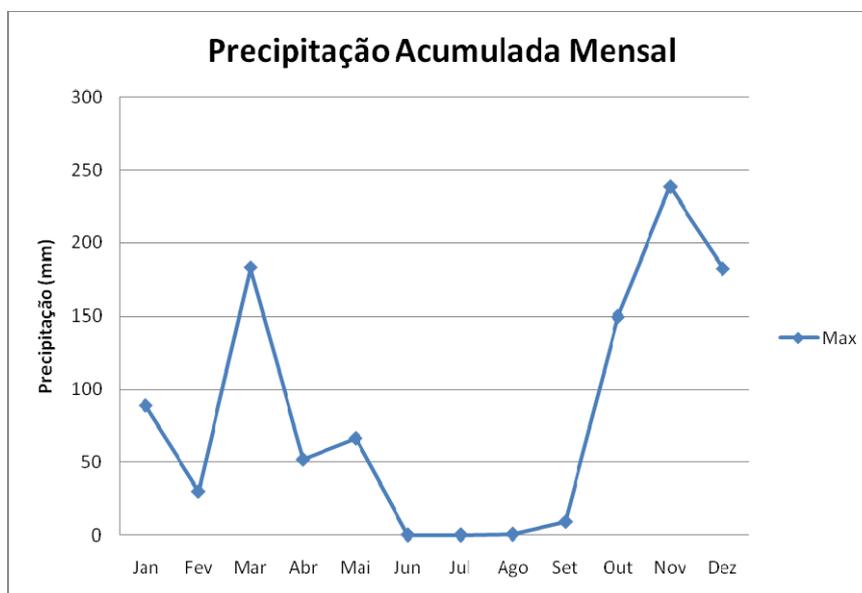


Gráfico 3 Variação da precipitação acumulada para o ano de 2010

Fonte: INPE (2011)

Nota-se que a sub-bacia Urucuia apresentou as maiores pluviosidades nos meses de março, outubro, novembro e dezembro. Em todos estes meses os valores foram superiores a 140,0 *mm*. O valor mensal mais elevado desta sub-bacia foi medido no mês de novembro, sendo este igual a 238,75 *mm*.

Machado (2007) afirma que a sustentabilidade hídrica de uma bacia é ameaçada pelos altos valores de evapotranspiração e evaporação. Tal fato pode ser confirmado a partir da comparação entre a precipitação e os valores de evapotranspiração, pois nos meses de fevereiro, junho, julho, agosto e setembro notam-se uma evapotranspiração de cultura elevada para valores nulos ou muito baixos de precipitação, ou seja, há a retirada de água dos rios ou córregos e nestes não há recarga nestes meses.

No entanto, a demanda de água para irrigação apresentou-se relativamente baixa quando comparada a trabalhos de disponibilidade *versus* demanda.

Machado (2007) concluiu que a demanda hídrica para irrigação correspondeu a 99,78% da demanda total da zona uruguaia da Bacia Lagoa Mirim. Para o estudo, foram calculados os valores de vazões, e os dados de irrigação foram adquiridos com base em um conjunto de dados pré existentes. Quase toda a demanda hídrica da Bacia foi destinada à irrigação, sendo considerados todos os métodos de irrigação.

No presente trabalho considerou-se apenas a irrigação por aspersão através do pivô central, um dos métodos em que há a maior utilização de água quando comparado aos métodos de irrigação como o gotejamento superficial e micro aspersão. Logo, a demanda de água destinada à irrigação, analisando todos os métodos de irrigação será provavelmente maior que metade de toda a demanda da sub-bacia, considerando a eficiência de aplicação de 100%.

Comprovando assim que a água para irrigação é um dos mais importantes usos da água.

Sano et al. (2005) comprovaram o aumento da demanda hídrica para irrigação entre os anos de 1992 a 2002 e o seu crescimento de forma bastante acelerada no Distrito Federal. O consumo de água para irrigação apresentou um aumento de 75,3%.

Na região avaliada há potencial para o crescimento da irrigação, tendo em vista que os resultados foram estimados. Considerando que este percentual foi superior ao da vazão máxima concedida para outorga no Estado de Minas Gerais, que é de 30% da $Q_{7,10}$, deve-se avaliar a aptidão agrícola da área e a disponibilidade hídrica do local a fim de amenizar futuros conflitos.

Pruski et al. (2007) ressaltaram a construção de reservatório na bacia apesar da vazão total consumida apresentar pouca influência na vazão média de longa duração. Como neste trabalho não foram feitas análises pontuais nas áreas irrigadas, deve-se destacar que os métodos de captação de água influenciam no resultado. Águas retiradas diretamente do rio e lagoas influenciam diretamente na disponibilidade hídrica de uma bacia, no entanto, quando a área é irrigada com captação em barragens, por exemplo, pode-se expandir a área irrigada.

5 CONCLUSÃO

A utilização de imagens de satélite de média resolução Landsat5/TM se mostrou viável para visualização dos equipamentos pivô central, para o cálculo da evapotranspiração mensal e demanda hídrica para irrigação.

O consumo de água para irrigação por pivô central nos municípios da sub-bacia Urucuia apresentou-se relativamente alto quando comparado à porcentagem que estes equipamentos ocupam sobre a sub-bacia, sendo de 1,2% da área total.

O município que apresentou a maior quantidade de equipamentos instalados, representando 35,4% do total e a maior diversidade de culturas foi Unai.

A demanda de água destinada à irrigação representou 43% da disponibilidade hídrica da sub-bacia Urucuia utilizando uma eficiência de aplicação da irrigação de 100%. Já para uma eficiência de aplicação de 90% a demanda para irrigação corresponderia a 45,6% da disponibilidade da sub-bacia.

Quando o valor da eficiência de aplicação é menor, de 60%, a demanda hídrica correspondeu a 68% da disponibilidade da sub-bacia, muito acima dos 30% permitidos da $Q_{7,10}$. Ressaltando a importância da manutenção dos equipamentos e do correto manejo.

Considerando uma eficiência de aplicação de 100% e analisando os coeficientes de cultura, se toda a área fosse irrigada com a utilização do Kc de produção a demanda hídrica da sub-bacia seria de 47%, e utilizando-se o Kc inicial esta demanda cairia para 28%.

As imagens de sensoriamento remoto se mostraram úteis para a correta análise das culturas sob pivô central e utilização dos corretos valores de coeficiente de cultura.

Na área avaliada há potencial para o crescimento da irrigação, no entanto deve-se ser avaliado caso a caso, já que a demanda destinada à irrigação ultrapassou os 30% permitidos da $Q_{7,10}$, mas há também a necessidade de melhorar a eficiência do uso.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Água e desenvolvimento**: relatório final do GT. Brasília, 2009. v. 1, 24 p.
- BERNARDES, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 1987. cap. 2, p. 13-45.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. da.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, set. 2008.
- BEZERRA, H. S.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. Desempenho do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres CBERS-2 no mapeamento da cobertura da terra no Distrito Federal, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 25, p. 171-185, abr./jun. 2007.
- BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados**: novos sistemas e sensores inovadores. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 304 p.
- BRAGA, A. L.; OLIVEIRA, J. C. Identificação de áreas irrigadas por pivô central utilizando imagens CCD/CBERS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 849-856.
- CAMARGO, A. P. **Balanco hídrico no estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1971. 24 p. (Boletim, 116).
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. 3. ed. rev. Madrid: RIALP, 2000. 586 p.
- CREPANI, E. **Princípios básicos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 1983. 45 p.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1999. 170 p.

DAINESE, R. C. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparação entre classificação não supervisionada e análise visual**. 2001. 210 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

DALMOLIN, R. S. D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, mar./abr. 2005.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas orbitais de monitoramento e gestão territorial**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

EPIPHANIO, J. C. N. et al. **Comportamento espectral de solos do estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE/MCT, 1992. 132 p.

FERREIRA, E. et al. Cadastral maps of irrigated áreas by center pivots in the state of Minas Gerais, using CBERS-2B/CCD satellite imaging. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 771-780, July/Aug. 2011.

FERREIRA JUNIOR, P. P. et al. Estimativa da evapotranspiração da soja via sensoriamento remoto no leste do Pará: uma avaliação quantitativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1997-2003.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>. Acesso em: 17 out. 2011.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONAL OF THE UNITED NATIONS. **Notas sobre semillas forestales**. Roma, 1956. 370 p. (Caderno de fomento florestal, 5).

GUYOT, G. **Signatures spectrales des surfaces naturelles**. Caen: Édition Paradigme, 1989. 178 p. (Collection “Télédétection stellitaire”).

HOFFER, R. M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. (Ed.). **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw Hill, 1978. chap. 5, p. 227-265.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de recuperação automática**. Disponível em:
<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=t&o=3>>.
Acesso em: 12 jun. 2011.

INSTITUTO GEOGRÁFICO PORTUGUÊS. **Utilização de imagens de satélite para cartografia automática de cortes e novas plantações florestais**. Lisboa, 2011. Disponível em:
<http://www.igeo.pt/gdr/index.php?princ=PROJECTOS/AGRO130&sessao=m_projectos> . Acesso em: 12 set. 2011.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Comitê da bacia hidrográfica da sub-bacia mineira do rio Urucuia**. Disponível em:
<http://comites.igam.mg.gov.br/new/index.php?option=com_content&task=view&id=245&Itemid=157>. Acesso em: 17 out. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Cachoeira Paulista, Divisão de Geração de Imagem (DGI)**. Disponível em:
<<http://www.cbbers.inpe.br/?content=descricao1e2e2b>>. Acesso em: 31 nov. 2010.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 89, p. 15-41, Dec. 1963.

JOAQUIM, A. C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara - SP, através de análise de nível de cinza em imagens Landsat/TM.** 1998. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

KLEMP, S. M.; ZEILHOFER, P. Análise preliminar da dinâmica de implantação de pivôs de irrigação central, de 1985-2005 na bacia hidrográfica do Alto rio das Mortes - MT, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 4731-4738.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 1, n. 3, p. 155-159, 1970.

KOLLENKARK, J. C. et al. Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 751-758, July/Aug. 1982.

LEMOS FILHO, L. C. de 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.

LIMA, E. P. et al. Estimativa da evapotranspiração em áreas irrigadas utilizando imagem do Landsat 5 - TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 247-254.

MACHADO, G. Demanda e disponibilidade hídrica no Sistema Lagoa Mirim - São Gonçalo - Rio Grande do Sul. **Revista Discente Expressões Geográficas**, Florianópolis, n. 3, p. 61-82, maio 2007.

MAKKINK, G. F. Testing the penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, New York, v. 11, p. 277-288, 1957.

MEDEIROS, P. V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith.** 2008. 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 536 p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2001. 307 p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São José dos Campos: E. Blucher, 1989. 308 p.

OZDOGAN, M. et al. Remote sensing of irrigated agriculture: opportunities and challenges. **Remote Sensing**, Ottawa, v. 2, n. 9, p. 2274-2304, Sept. 2010.

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, Apr. 1948.

PEREIRA, D. dos R. et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, dez. 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 136 p.

PORTILLO, J. E. et al. Evolução da superfície cultivada com as principais culturas agrícolas em Guará, Ipuã e São Joaquim da Barra – SP, via imagens de satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 215-222.

PRUSKI, F. F. et al. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na Bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 199-210, mar./abr. 2007.

QI, J. et al. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 48, n. 2, p. 119-126, May 1994.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens Landsat na estimativa da área plantada com soja em municípios do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 231-238.

SÁ, I. I. S. et al. Dinâmica da agricultura irrigada em uma área do Vale do São Francisco utilizando técnicas de sensoriamento remoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais...** Aracajú: EMBRAPA, 2007.

SANO, E. E. et al. Estimativa da variação da demanda de água para irrigação por pivô central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 508-515, maio/ago. 2005.

SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. Monitoramento semidetalhado (escala de 1:250.000) de ocupação de solos do Cerrado: considerações e proposta metodológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3309-3316.

SANTANA, M. O. **Sistema de geoespacialização da demanda de irrigação suplementar para o Estado de Minas Gerais em tempo quase real**. 2000. 88 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

SANTOS, R. M. et al. Uso de imagens CBERS-2/CCD no mapeamento das áreas irrigadas e estimativa da demanda hídrica bruta no projeto de irrigação Vale do Gortuba, Janaúba - MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1095-1101.

SCHIRMBECK, J. et al. Estimativa de evapotranspiração em área de ocorrência do sistema aquífero guarani desde imagens Modis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 4859-4866.

SCHIRMBECK, J.; RIVAS, R. Uso do balanço de energia desde imagens ETM+ para avaliar a distribuição espacial da evapotranspiração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 4851-4858.

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, n. 2/3, p. 330-333, maio/dez. 2004.

SILVA, L. S. C. da et al. Uso de imagens do satélite ResourceSat_LISS3 para estimativa da demanda hídrica na região noroeste do Estado de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 376-382.

SILVA, M. M. da; COSTA, A. C. L. da. Estudo comparativo da evapotranspiração em área de floresta de manguezal na região Bragantina-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p. 418-421.

TEIXEIRA, A. H. de C. et al. Determinação da evapotranspiração regional usando parâmetros de sensoriamento remoto e dados de evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2009. 1 CD-ROM.

THORNTHWAITE, C. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geophysical Review**, London, v. 38, n. 1, p. 55-94, Jan. 1948.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2010**. Washington, 2010. 193 p.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Laboratório de Geoprocessamento – LABGIS**. Interações da energia eletromagnética com a atmosfera. Disponível em: <<http://www.labgis.uerj.br/>>. Acesso em: 12 set. 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Atlas digital da águas de minas**. Viçosa, MG: Departamento de Engenharia Agrícola, 2011. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/unidades_de_planejamento_e_gestao_dos_recursos_hidricos_home.html>. Acesso em: 12 set. 2011.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara - SP. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 713-721, jul./set. 2005.

WEBER, E. et al. Comparação entre resultados de classificação de imagens Landsat e CBERS para estimativa de área cultivada com soja no planalto do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 321-328.