

# INDICADORES AGROMETEOROLÓGICOS OBTIDOS COM IMAGENS MODIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARACATU

Antônio Heriberto de Castro Teixeira<sup>1</sup> \* & Janice Freitas Leivas<sup>1</sup> & Gustavo Bayma-Silva<sup>1</sup>

**Resumo** – Para análises dos parâmetros hídricos e de vegetação com ênfases em pivôs de irrigação, usou-se o produto MODIS MOD13Q1, em conjunto com dados agrometeorológicos nas áreas envolvidas pelos municípios do Noroeste de Minas Gerais, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. A Evapotranspiração atual (ET) e a produção de biomassa (BIO) foram obtidas em toda a região de estudo sob diferentes condições termo hídricas, com aplicações do algoritmo SAFER e de Monteith. A produtividade da água (PA) nas áreas com pivôs, na maioria com a cultura do milho, foi estimada como a razão da BIO pela ET e o resultado multiplicado pelo índice de colheita (IH) para dar a produtividade da água da cultura (PAC). A razão da ET para a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi utilizada na elaboração de um modelo relacionando o coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) e os graus-dias acumulados (GD<sub>ac</sub>). Os resultados indicaram que a dinâmica dos parâmetros biofísicos em diferentes agros-ecossistemas pode ser monitorada nas resoluções espacial de 250 m e temporal de 16 dias e que o K<sub>c</sub> determinado com imagens MODIS usados operacionalmente no manejo de irrigação.

**Palavras-Chave** – Evapotranspiração; produção de biomassa; sensoriamento remoto,

## INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paracatu é uma das sub bacias do Rio São Francisco que vem apresentando grandes mudanças de uso da terra e problemas de estiagem em alguns anos. A partir da década de 1970, houve uma rápida expansão da agropecuária. De acordo com Schmidt et al. (2004), no ano de 2002, o Noroeste de Minas Gerais já possuía a maior concentração de pivôs de irrigação do Sudeste brasileiro. Estas mudanças podem ocasionar impactos ambientais e promover o uso intensivo de água para irrigação (Alvarenga, 2010).

Com a expansão da agricultura irrigada, a utilização dos recursos hídricos em determinadas áreas da bacia hidrográfica do Rio Paracatu vem aumentando, ocasionando conflitos entre os usuários da água em períodos de forte estiagem. Por outro lado, os prejuízos ambientais e conflitos, podem se agravar com a redução da vazão dos rios, juntamente com as estiagens (Pruski et al., 2007)

Diante destes cenários torna-se de grande importância o uso de ferramentas para a modelagem de indicadores hídricos e de vegetação em larga escala. O atual trabalho quantifica estes indicadores com aplicação do algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) e da radiação de Monteith (Teixeira et al., 2015), com ênfases em pivôs de irrigação na região do Noroeste de Minas Gerais, localizadas dentro da bacia hidrográfica de Paracatu.

## MATERIAL E MÉTODOS

---

<sup>1</sup>Embrapa Monitoramento por Satélite, {heriberto.teixeira; janice.leivas;gustavo.bayma}@embrapa.br  
heriberto.teixeira@embrapa.br; Fone 19 3211-6200; Fax: 19 3211-6222; www.cnpm.embrapa.br

A Figura 1 apresenta a área do Noroeste de Minas Gerais com as divisões municipais, as estações agrometeorológicas (EA) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) utilizadas e a localização dos pivôs de irrigação.

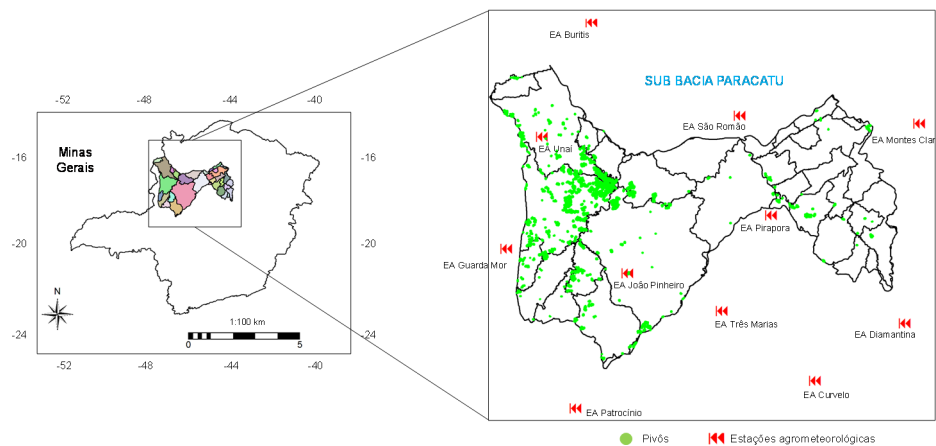


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica Paracatu com as divisões municipais no Noroeste de Minas Gerais e detalhes para as estações agrometeorológicas e os pivôs de irrigação.

A bacia hidrográfica do rio Paracatu localiza-se entre os paralelos 15°30' e 19°30' de latitude sul e os meridianos 45°10' e 47°30' de longitude oeste, quase totalmente dentro do Estado de Minas Gerais (Região Noroeste), com pequenas áreas no Estado de Goiás e no Distrito Federal. O Noroeste de Minas abrange 13 sedes municipais sobre o Bioma Cerrado, compreendendo veredas, cerradão, campo cerrado, parque de cerrado. Também estão presentes ecossistemas de mata fluvial ciliar e mata seca, bem como sistemas hidro mórficos (Vasconcelos et al., 2012). Estes tipos de vegetação natural vêm sendo substituídos por culturas irrigadas, em sua maioria por pivôs centrais, principalmente nos municípios de Paracatu e Unai (Schmidt et al., 2004). O clima da bacia Paracatu apresenta temperaturas elevadas e precipitações concentradas no período de outubro a abril, quando chove em média 93% do total anual (Mulholland 2009).

Para a modelagem dos parâmetros hídricos e de vegetação foram utilizados as reflectâncias das bandas 1 e 2 extraídas do produto MODIS MOD13Q1, em conjunto com os dados climáticos interpolados de 11 EA do INMET representadas na Figura 1. A radiação solar global ( $R_G$ ),  $T_a$ ,  $ET_0$  e  $P$  foram interpolados para períodos de 16 dias, coincidindo com a escala temporal do MOD13Q1 (resolução espacial de 250 m). Em Teixeira et al. (2015), a metodologia é descrita em detalhes sendo aqui resumidas as principais equações.

O albedo da superfície ( $\alpha_0$ ) foi calculado usando o modelo linear:

$$\alpha_0 = c + d\alpha_{p1} + f\alpha_{p2} \quad (1)$$

onde  $\alpha_{p1}$  e  $\alpha_{p2}$  são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do sensor MODIS e  $c$ ,  $d$  e  $f$  são os coeficientes de regressão.

A temperatura da superfície ( $T_0$ ), em larga escala, na escala diária, foi estimada como:

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{\sigma \epsilon_s}{R_s}} \quad (2)$$

em que  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $\epsilon_s$  a emissividade da superfície e  $R_s$  a radiação emitida pela superfície.

Os valores da razão  $ET_r = ET/ET_0$  foram modelados e multiplicados pelas grades diárias de  $ET_0$  obtidas das estações agrometeorológicas, para estimativa da ET em larga escala:

$$ET_r = \exp \left[ a_{sf} + b_{sf} \left( \frac{T_0}{\alpha_0 \cdot NDVI} \right) \right] f_c \quad (3)$$

em que  $a_{sf}$  e  $b_{sf}$  são os coeficientes de regressão e o fator de correção ( $f_c = ET_0/5$ ) é para consideração dos efeitos das condições da demanda atmosférica diferenciada daquela em que o SAFER foi elaborado ( $ET_0$  média de 5 mm dia, considerando-se o período de 1 ano).

A produção de biomassa (BIO) foi quantificada como:

$$BIO = \sum \left( \varepsilon_{\max} \frac{ET}{ET_0} ARAF 0,864 \right) \quad (4)$$

onde ARAF é a radiação fotossinteticamente ativa obtida pela combinação de  $R_G$  e NDVI,  $\varepsilon_{\max}$  é eficiência máxima de uso da luz, a qual depende se as espécies são c3 ou c4 e 0,864 é um fator de conversão. A produtividade da água (PA) foi considerada como a razão da ET para a BIO.

Os valores de  $K_c$  ( $ET/ET_0$  em condições ótimas) foram obtidos nas áreas com os pivôs de irrigação, utilizando-se médias dos pixels, e então um modelo deste coeficiente, em função dos graus-dias acumulados ( $GD_{ac}$ ), foi elaborado para uma temperatura basal ( $T_b$ ) de 10 °C:

$$K_c = a_k GD_{ac}^2 + b_k GD_{ac} + c_k \quad (5)$$

onde os coeficientes de regressão  $a_k$ ,  $b_k$  e  $c_k$  foram determinados para as condições dos pivôs de irrigação.

## RESULTADOS DE DISCUSSÃO

Como os parâmetros hídricos e de vegetação são influenciados pelas chuvas e a demanda atmosférica, as tendências das médias dos pixels de P e  $ET_0$  ao longo dos anos de 2011, 2013 e 2015, para cada intervalo de 16 dias das imagens MODIS, são primeiramente apresentadas e analisadas para toda a região envolvendo os municípios do Noroeste de Minas dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu (Figura 2).

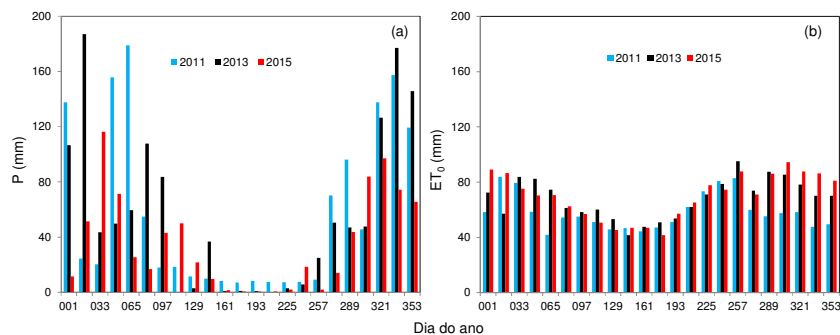


Figura 2 – Médias dos totais de precipitação (P) e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para intervalos de 16 dias nos anos de 2011, 2013 e 2015 nas áreas envolvendo os municípios do Noroeste de Minas dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

Considerando P, para os anos analisados, ocorreram períodos de concentração das chuvas de outubro a abril, com as quantidades respectivas representando 93, 94 e 87% dos totais anuais, os

quais foram 1216, 1232 e 715 mm. Apenas o ano de 2015 esteve abaixo das condições pluviométricas médias, de acordo com Mulholland (2009). Com relação as demandas atmosféricas, representadas pelos valores de  $ET_0$ , embora as amplitudes anuais sendo inferiores com relação a P, os valores mais baixos ocorreram no período de maio a junho, coincidindo com pouca ou com ausência de chuvas, época do solstício de inverno no Hemisfério Sul.

Tomando-se a razão  $P/ET_0$  como uma medida preliminar do balanço hídrico, constata-se que no ano de 2015, com valor desta razão de 0,51, P atendeu apenas 50% da demanda atmosférica, enquanto que no ano mais úmido de 2011, com esta razão de 0,97, a ocorrência de deficiências hídricas foi bem menor. O ano de 2013 apresentou-se intermediário com relação as disponibilidades hídricas, com as chuvas atendendo 83% ( $P/ET = 0,83$ ) as taxas de  $ET_0$ . Similarmente para todos os anos analisadas, o período com deficiência natural de água mais crítico é de maio a setembro, quando a quantidade de chuvas ficou abaixo de 50% da  $ET_0$ . Neste período, apesar de apresentar a menor demanda atmosférica do ano, ocorre uma maior demanda por água para irrigação como consequência das baixas precipitações.

A Figura 3 apresenta a variação espacial dos valores quadrimestrais da ET nos anos de 2011, 2013 e 2015, na área compreendendo os municípios do Noroeste de Minas Gerais, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

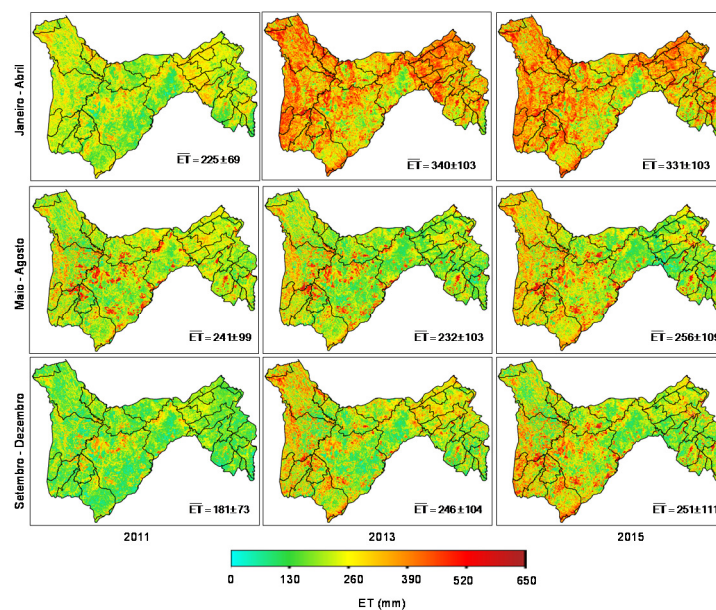


Figura 3 – Variação espacial dos totais de evapotranspiração atual (ET) para cada quadrimestre nos anos de 2011, 2013 e 2015 nas áreas envolvendo os municípios do Noroeste de Minas dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

Para todos os anos analisados percebem-se claramente as variações espaciais e temporais da quantidade de água transferida para atmosfera nos diferentes agros-ecossistemas e quadrimestres. Os maiores valores de ET, com exceção do ano de 2011, aconteceram no primeiro quadrimestre, com valores médios acima de 300 mm, enquanto que os menores, com exceção do ano de 2013, ocorreram no terceiro quadrimestre. Os maiores valores, de janeiro a abril, são devidos ao efeito conjunto da grande quantidade de chuvas acumuladas a partir de outubro e da elevada demanda atmosférica. Os anos de 2013 e 2015 tiveram maiores variações espaciais quando comparados com o ano de 2011, como pode-se ver pelos valores de desvio padrão. A razão da menor variação

espacial da ET em 2011 pode ser explicada pela maior e mais distribuída quantidade de chuvas (ver Figura 2). Em geral, no segundo quadrimestre ocorre maior distinção entre as áreas irrigadas e as de vegetação natural, quando se compara as Figuras 1 e 3. Entretanto este último ecossistema ainda apresentou taxas razoáveis da ET mesmo em condições de menor valores de P e de  $ET_0$ , devido a umidade no solo ainda remanescente na zona das raízes após as chuvas prévias.

A Figura 4 apresenta a variação espacial dos valores quadrimestrais da BIO nos anos de 2011, 2013 e 2015, na área compreendendo os municípios do Noroeste de Minas Gerais, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

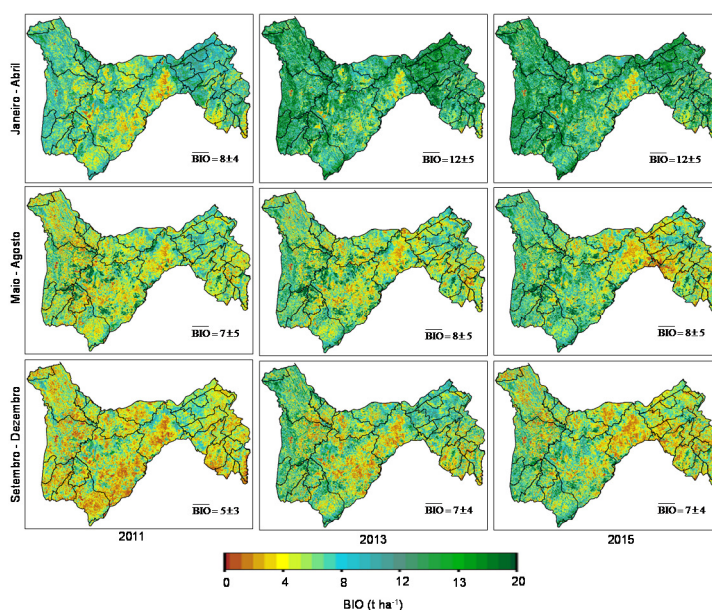


Figura 4 – Variação espacial da produção de biomassa (BIO) para cada quadrimestre nos anos de 2011, 2013 e 2015 nas áreas envolvendo os municípios do Noroeste de Minas dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

Novamente se percebe as sensibilidades dos modelos aplicados em larga escala, sendo os pixels mais elevados da BIO nas áreas dos pivôs de irrigação durante o quadrimestre de maio a agosto, acima de  $15 \text{ t ha}^{-1}$ . Como em geral há uma relação entre a BIO e a ET, os valores médios mais e menos elevados da BIO também aconteceram no primeiro e terceiro quadrimestres, respectivamente. A menor variação espacial da BIO ocorreu no terceiro quadrimestre de 2011. Apesar de neste último ano ter ocorrido maiores quantidade de chuvas, as condições energéticas foram menores, promovendo valores inferiores de  $ET_0$  e então da BIO, com relação aos outros anos (ver Figuras 2, 3 e 4).

Os valores da ET e da BIO tanto para os ecossistemas naturais como para condições de irrigadas são sensíveis à distribuição espacial de P e da umidade do solo (Claverie et al., 2012), entretanto nas culturas agrícolas, as diferenças entre os agros-ecossistemas aumentam com a variação dos níveis de adubação e com os estágios fenológicos (Wu et al., 2010). Maiores valores da BIO e menores da ET favorecem a produtividade da água (PA).

Extraíndo-se os pivôs de irrigação de toda a área representada em verde na Figura 1 e a PA como a razão da BIO pela ET, a Figura 5 apresenta as tendências dos valores médios e desvios padrões da PA em intervalos de 16 dias, ao longo dos anos de 2011, 2013 e 2015, nas áreas do Noroeste de Minas Gerais dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

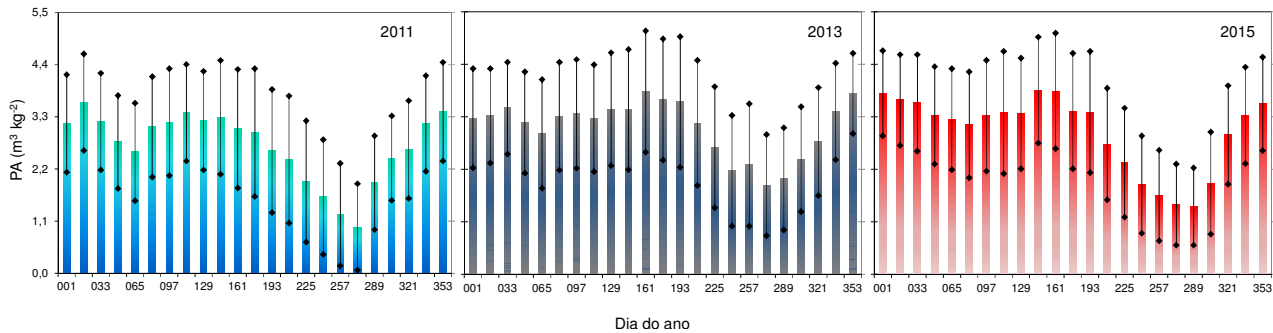


Figura 5 – Médias e desvios padrões da produtividade de água (PA) para intervalos de 16 dias nos anos de 2011, 2013 e 2015 nas áreas envolvendo os pivôs de irrigação no Noroeste de Minas Gerais, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

As tendências da PA ao longo dos anos analisados foram similares, caracterizando-se flutuações típicas para dois períodos distintos, durante a estação chuvosa no início e final do ano e no período climaticamente mais seco no meio do ano, ambos chegando a picos acima de  $3,0 \text{ kg m}^{-3}$ . Elevados valores de desvios padrões demonstram o efeito das variações espaciais tanto hídricas como fenológicas entre e dentro dos pivôs. Durante o período climaticamente mais seco no meio do ano no Noroeste de Minas Gerais, a tendência da PA representa, em geral, o ciclo produtivo da cultura do milho sob condições de irrigação. Aplicando-se o índice de colheita (IH) de 0,48 para a cultura do milho (Claverie et al., 2012), a produtividade da água da cultura (PAC) variou de  $1,3$  a  $1,6 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente nos anos de 2011 e 2013. Na região semiárida de Mongólia, Yuan et al. (2013) encontraram, sob condições de irrigação, valores de PAC entre  $1,1$  e  $1,3 \text{ kg m}^{-3}$  para aveia;  $1,5$  e  $2,6 \text{ kg m}^{-3}$  para girassol;  $0,5$  e  $1,1 \text{ kg m}^{-3}$  para legumes; e  $3,1$  a  $4,4 \text{ kg m}^{-3}$  para batata. Os valores do atual estudo estiveram inferiores àqueles para girassol e batata.

A razão  $ET_r$  além de ser usada na determinação da ET no SAFER, com a disponibilidade de dados de  $ET_0$ , é também um indicador de umidade no solo fornecendo o grau de deficiência hídrica na zona das raízes da vegetação (Lu et al., 2011) e, em condições hídricas ótimas, representa os valores de coeficiente de cultura ( $K_c$ ) para serem usadas no manejo de irrigação (Allen et al., 1998). A Figura 6 mostra a tendência da  $ET_r$  para intervalos de 16 dias (Figura 6a) e a curva da relação do  $K_c$  com os graus-dias acumulados ( $GD_{ac}$ ) para uma temperatura basal de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  considerando-se as médias dos pixels dentro das áreas com pivôs de irrigação (Figura 6b).

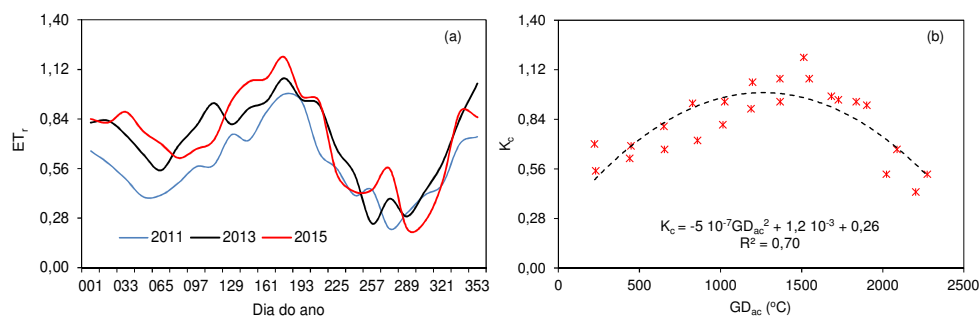


Figura 6 – Valores médios de indicadores agrometeorológicos na área envolvendo os pivôs de irrigação no Noroeste de Minas Gerais, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. (a) razão da

evapotranspiração atual para a de referência ( $ET_r$ ); (b) relação entre o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) com os graus dias acumulados ( $GD_{ac}$ ).

Na Figura 6a, percebe-se um padrão similar das condições de umidade, porém com valores de  $ET_r$  distintos entre os anos. Como o mapeamento dos pivôs representados na Figura 1 foi realizado em 2013, a principal razão dos valores inferiores de  $ET_r$  em 2011 pode ser devido a não existência destes em algumas áreas posteriormente mapeadas, enquanto que as diferenças entre os anos de 2013 e 2015 podem ser atribuídas às suas diferentes condições termo hídricas. Entretanto, como nas tendências dos valores de PA, para  $ET_r$  são evidentes a existência de dois ciclos produtivos das culturas ao longo do ano, um no período chuvoso e outro nas condições naturalmente mais secas da bacia hidrográfica do rio Paracatu. Os valores de  $ET_r$  em 2013 e 2015 variaram entre 0,4 e 1,2. Esta faixa de valores está de acordo com aqueles encontrados para Colorado (USA) para a cultura do milho (Dejonge et al., 2012) e nos valores padrões de  $K_c$  tabelados por Allen et al. (1998) o que fornece mais confiança na aplicação do SAFER na bacia do Rio Paracatu. No atual trabalho foi então elaborado um modelo relacionando os valores de  $K_c$  com  $GD_{ac}$ , tomando-se os dados dos anos de 2013 e 2015 para o período do ciclo caracterizado nestas últimas condições (Figura 6b). A equação obtida pode ser testada na cultura do milho irrigado, pois é a grande maioria no Noroeste de Minas Gerais para o período de abril a setembro, sendo útil tanto para o manejo racional da irrigação como para o zoneamento de aptidão agroclimática em todo o Estado de Minas Gerais.

## CONCLUSÕES

A modelagem em larga escala através do produto MODIS MOD13Q1 em conjunto com dados climáticos, possibilitou o mapeamento de parâmetros hídricos e de vegetação durante os anos de 2011, 2013 e 2015, nas áreas compreendendo os municípios do Noroeste de Minas Gerais, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. Os maiores valores de evapotranspiração e de produção de biomassa, aconteceram no primeiro quadrimestre dos anos analisados, enquanto que os menores foram para o último quadrimestre. Extraíndo-se as áreas com pivôs de irrigação, os valores de produtividade da água caracterizaram dois períodos distintos, um durante a estação chuvosa no início e final do ano e outro no período climaticamente mais seco no meio do ano. Considerando-se o ciclo generalizado da cultura do milho no período climaticamente mais seco do ano, um modelo para o coeficiente de cultura em função dos graus-deias acumulados foi elaborado, o qual é útil no manejo de irrigação e zoneamento da aptidão agroclimática, fornecendo critérios de expansão da cultura no Estado de Minas Gerais.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy; 300 p.

ALVARENGA, L.J. (2010). *Avaliação geológico-ambiental da compatibilidade da legislação atual à conservação do Cerrado*. Dissertação de Mestrado. DEGEO-UFOP. 120 p.

CLAVERIE, M.Ç; DEMAREZ, V.; DUCHEMIN, B.; HAGOLLE, O.; DUCROT, D.; MARAIS-SICRE, C.; DEJUOUX, JEAN-FRANÇOIS; HUC, M.; KERAVEC, P.; BÉZIAT, P.; FIEUZAL,

R.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. (2012) Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, (124), pp. 884–857.

LU, N., CHEN, S., WILSKE1, B., SUN, G., CHEN, J. (2011). Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology* (4), pp. 49–60.

MULHOLLAND, D.S. (2009). *Geoquímica Aplicada à Avaliação de Qualidade de Sistemas Aquáticos da Bacia do Rio Paracatu (MG)*. Dissertação de Mestrado. Brasília-DF: IG/UNB. 95p.

PRUSKI, F.F.; RODRIGUEZ, R.G.; NOVAES, L.F.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M.; TEIXEIRA, A.F. (2007). Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na Bacia do Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11(2), pp. 199–210.

SCHMIDT, W.; COELHO, R.D.; JACOMAZZI, M.A.; ANTUNES, M.A.H. (2004). Distribuição espacial de pivôs centrais no Brasil: I - Região Sudeste. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 8(2-3), pp. 330–333.

TEIXEIRA, A.H. de C., HERNANDEZ, F.B.T., SCHERER-WARREN, M., ANDRADE, R.G, LEIVAS, J.F., VICTORIA, D. de C., BOLFE, E.L., THENKABAIL, P.S., FRANCO, R.A.M. (2015) Water Productivity Studies from Earth Observation Data: Characterization, Modeling, and Mapping Water Use and Water Productivity. In *Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies*, Org. por Prasad, S.T., ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, pp. 101–126.

VASCONCELOS, V.V.; MARTINS JUNIOR, P.P.M.; HADAD, R.M. (2012). *Caracterização ambiental da Bacia do Paracatu (SF7)*. Projeto SACD, 76p.

WU, C.; MUNGER, J.W.; NIU, Z.; KUANG, D. (2010). Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. *Remote Sensing of Environment* 114, pp. 2925–2939.

YUAN, M.; ZHANG, L.; GOU, F. SU, Z.; SPIERTZ, J.H.J.; WERF, W.; van DER (2013) Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in the semi-arid Inner Mongolia. *Agricultural Water Management* (122), pp. 28.38