



Índices agrometeorológicos aplicados com imagens MODIS e dados climáticos no Estado de Minas Gerais

Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹
Janice Freitas Leivas¹
Gustavo Bayma-Silva¹
Celia Regina Grego¹

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM
CEP - 13070-115 - Campinas - SP, Brasil

{ heriberto.teixeira, janice.leivas, gustavo.bayma, celia.grego }@embrapa.br

Abstract. Minas Gerais state, Brazil, has experienced severe water scarcity in some areas, demanding large-scale water balance studies to subsidize water policies. The reflectance bands from the MOD13Q1 MODIS product were used together with agrometeorological data to acquire water balance indices in the state, during the years from 2012 to 2015, later extracting the main agricultural growing regions, North, Northwest and Minas Triangle. Precipitation (Prec) and reference evapotranspiration (ET_0) data from 36 weather stations were interpolated, while for the actual evapotranspiration (ET), the SAFER algorithm was used. A climatic water balance indicator was applied, the Water Balance Difference ($WB_d = Prec - ET$) and, for the surface moisture, the evapotranspiration ratio ($ET_r = ET/ET_0$) was used. Higher WB_d happened from the middle of October to the end of December, while the largest ET_r values were between March and May. According to the ET_r values, the soil moisture storage showed a gap in relation to the WB_d index, because the lapse time the soil to recover its retention capacity. Considering all studied years, ET attended the atmospheric demand by 50, 53 and 61% in the agricultural growing regions of North, Northwest and Minas Triangle. It was demonstrated the potential to monitor the water conditions for the 16-day periods on a large scale by combining weather measurements and MODIS products.

Palavras-chave: remote sensing, evapotranspiration, water balance, sensoriamento remoto, evapotranspiração, balanço hídrico.

1. Introdução

As quantificações dos componentes do balanço hídrico em largas escalas são importantes para subsidiar a produção de alimentos, lucros, desenvolvimento rural e benefícios ecológicos por unidade de água aplicada e/ou consumida. O uso de índices agrometeorológicos, além de promover um melhor manejo dos recursos hídricos, em geral, minimiza a água adicional na agricultura, resultando na sua maior disponibilidade para manutenção dos agros-ecossistemas (Cai et al., 2002).

Minas Gerais é um dos estados brasileiros mais marcados por desigualdades sociais entre as mesorregiões. As principais mesorregiões de expansão agrícola são o Triângulo Mineiro e Noroeste, devido às condições favoráveis de clima e de solo, em contraste com o Norte de Minas, que apresenta condições naturalmente mais secas. Entretanto o clima nesta última região favorece o desenvolvimento da agricultura irrigada, proporcionando uma rápida substituição da vegetação natural por culturas agrícolas (Teixeira et al., 2015a). Embora em algumas áreas do estado de Minas Gerais, a precipitação anual seja elevada, em alguns períodos do ano ocorrem deficiências de chuvas, trazendo a necessidade de estudos sobre a dinâmica dos componentes do balanço hídrico para racionalização do uso dos recursos naturais em larga escala. A atual situação do estado revela que mesmo com a água sendo usada produtivamente em algumas áreas agrícolas, promovendo desenvolvimento rural, além dos déficits hídricos que prejudicam o desenvolvimento das culturas, os excessos podem afetar a qualidade e fluxos da água; ambos localmente e à jusante dos rios.

O objetivo deste trabalho foi combinar geotecnologias para a modelagem de índices hídricas em larga escala. Dados climáticos foram interpolados e o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) foi usado com imagens MODIS para

estimativa da evapotranspiração (Teixeira et al., 2015b). Para as condições de umidade do clima e do solo estes parâmetros foram combinados para aplicação de dois índices em larga escala no estado de Minas Gerais, com ênfases nas mesorregiões de expansão agrícola.

2. Metodologia de trabalho

A Figura 1 apresenta a localização do estado de Minas Gerais (MG), Sudeste do Brasil, em conjunto com a rede de estações climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a máscara agrícola nas principais mesorregiões com mudanças de uso da terra do Estado.

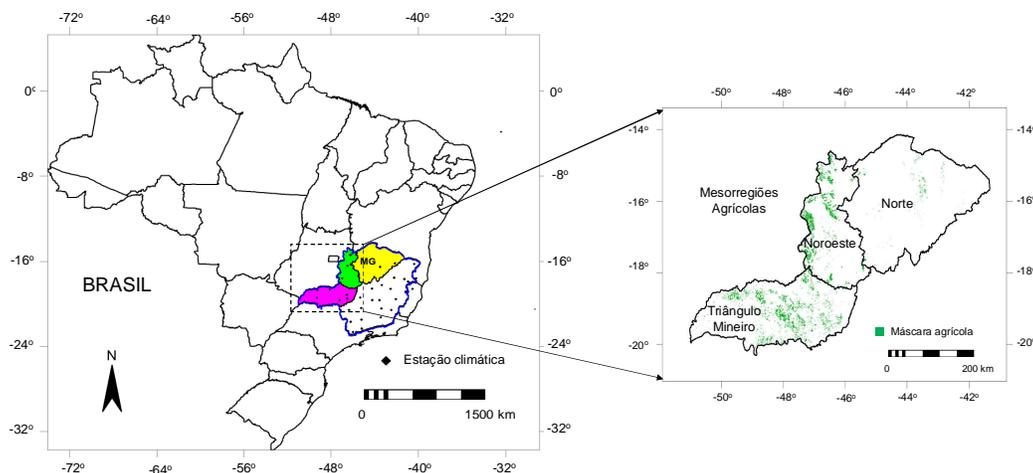


Figura 1. Localização do estado de Minas Gerais (MG), Sudeste do Brasil, a rede de estações climáticas, e a máscara agrícola nas principais mesorregiões com mudanças de uso da terra.

Embora estando próximo do litoral, o estado de Minas Gerais não tem contato com o Oceano Atlântico. Mais de 90% do Estado apresenta altitudes superiores a 300 m, sendo em torno de 25% entre 600 m e 1500 m. Os valores médios diários de temperatura do ar situam-se entre 17 e 23 °C e os totais anuais de precipitação (Prec) de 750 a 1800 mm ano⁻¹. As bacias hidrográficas são basicamente constituídas pelos rios São Francisco e Paraná (Golfari, 1978).

Os parâmetros climáticos obtidos de 36 estações climáticas do INMET foram a radiação solar global incidente (R_G), a temperatura (T_a) e umidade relativa (UR) do ar e velocidade do vento (u). Estes foram usados para o cálculo da ET_0 em larga escala pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). R_G , T_a e Prec foram também usados em conjunto com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto para a aplicação dos índices hídricos. A máscara agrícola foi obtida do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e usada para auxílio no entendimento dos efeitos da substituição da vegetação natural por culturas agrícolas nas mesorregiões Norte, Noroeste e Triângulo Mineiro.

Os parâmetros climáticos de entrada foram escalados para o período de 16 dias do produto MOD13Q1 (resolução espacial de 250 m). Processo similar de extrapolação espacial e temporal foi realizado na Austrália (Cleugh et al., 2007). A temperatura da superfície (T_0) foi estimada como resíduo no balanço de radiação após estimativas das emissividades da atmosfera e da superfície (Teixeira et al., 2015b).

De acordo com Teixeira et al. (2015b), o SAFER foi usado para obtenção do índice de umidade do solo, razão da evapotranspiração ($ET_r = ET/ET_0$)

$$ET_r = \left\{ \exp \left[f + g \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \text{NDVI}} \right) \right] \right\} \frac{ET_{0\text{ano}}}{5} \quad (1)$$

onde α_0 e T_0 são respectivamente o albedo e a temperatura da superfície, NDVI é o Índice da diferença da Vegetação Normalizado e f e g são os coeficientes de regressão originais, 1.8 e -0.008, respectivamente. O fator de correção ($ET_{0ano}/5$) foi aplicado, em que ET_{0ano} é a grade anual da ET_0 nos anos de 2012 a 2015, e 5 mm é o valor de ET_{0ano} no período de modelagem original no Nordeste do Brasil (Teixeira et al., 2015b).

As grades diárias de ET_0 foram multiplicadas por ET_r para obtenção da evapotranspiração atual (ET) e similarmente ao que foi realizado em larga escala na Austrália (Cleugh et al., 2007), um o índice diferença no balanço hídrico (BH_d) foi aplicado.

$$BH_d = Prec - ET \quad (2)$$

3. Resultados e Discussão

Como os índices hídricos envolvem a entrada e saída de água no sistema e a demanda atmosférica, Prec, ET_0 e ET para períodos de 16 dias das imagens MODIS foram analisados durante os anos de 2012 a 2015. A Figura 2 apresenta suas tendências em termos de dia do ano (DA), considerando primeiramente as médias dos pixels para todo o estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

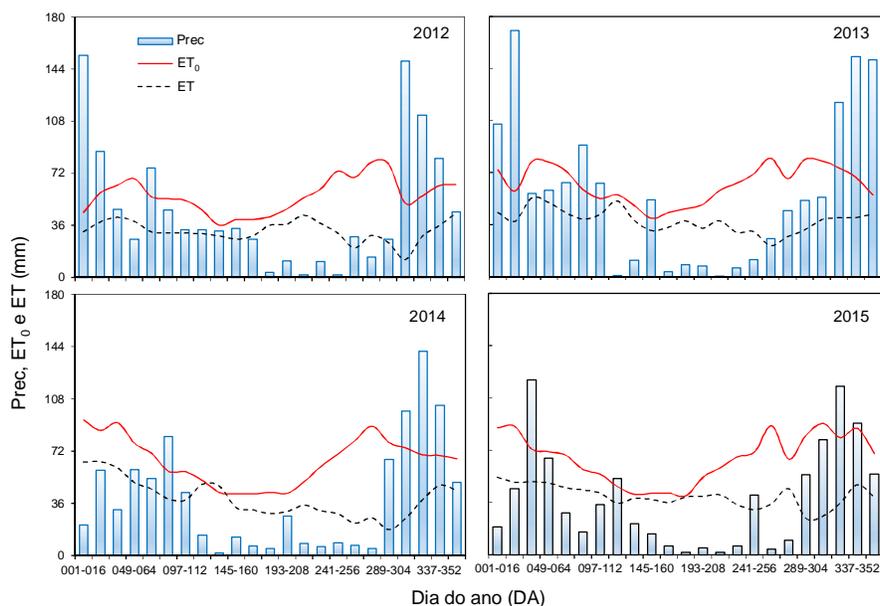


Figura 2. Médias de 16 dias dos pixels para precipitação (Prec), evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração atual (ET) durante os anos de 2012 a 2014 no estado de Minas Gerais (MG), Sudeste do Brasil.

Considerando Prec, durante o período de 2012 a 2015, pode-se ver dois períodos de concentração de chuvas de janeiro a abril (DA 001 a 112) e da segunda metade de outubro ao final de dezembro (DA 289–365). Os períodos mais secos foram da segunda metade de junho ao final de setembro (DA 177–272), sendo mais prolongado no ano 2014. Considerando-se os valores anuais para todo o estado, o ano de 2015 foi o mais seco, com totais médios dos pixels de 891 mm ano^{-1} e o de 2013 foi o mais úmido com 1318 mm ano^{-1} .

Com relação a demanda atmosférica, os valores de ET_0 tiveram menores oscilações ao longo dos anos, quando comparados aos de Prec. O período com menor demanda coincidiram com o final das estações chuvosas. Após este período ocorreram crescimentos contínuos da ET_0 da segunda metade de junho ao final de outubro (DA 177 a 304) enquanto que os valores de Prec declinaram subindo novamente na segunda quinzena de outubro (DA 289). Ao ano

mais seco de 2015 correspondeu o maior valor total de ET_0 (1533 mm ano^{-1}), enquanto que o ano de 2012, com 1304 mm ano^{-1} , apresentou a menor demanda atmosférica.

Os valores mais elevados da ET ocorreram dentro dos períodos chuvosos, de janeiro a maio (DA 001 a 144) e de novembro a dezembro (DA 321 a 365), quando os fluxos hídricos quinzenais ultrapassando 40 mm. As menores taxas nesta escala de tempo, abaixo de 30 mm, aconteceram do final de agosto (DA 241) ao final da primeira quinzena de novembro (DA 320). Considerando a escala anual para todo o estado de Minas Gerais, o ano com maior ET (928 mm ano^{-1}) foi 2015 enquanto que o de menor foi 2012 (737 mm ano^{-1}).

ET_0 e ET representaram respectivamente faixas entre 112% e 68% (2013) a 165% e 99% (2014) de Prec. Pelos cenários apresentados na Figura 2 torna-se claro que o período mais crítico com relação a escassez natural de água foi do final de abril (DA 113) a primeira quinzena de outubro (DA 288) no ano de 2014. Para minimização deste problema, técnicas para armazenamento de água nas áreas previamente apresentando períodos com excesso hídrico devem ser incentivadas nas políticas públicas.

Separando-se os valores médios dos pixels quadrimestrais e anuais dos totais da Prec, ET_0 e ET para as mesorregiões de produção agrícola no estado de Minas Gerais, Norte (N), Noroeste (NO) e Triângulo Mineiro (TM), durante os anos de 2012 a 2015 estes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores quadrimestrais (Q) e anuais dos componentes do balanço hídrico, durante os anos de 2012 a 2015, nas mesorregiões mineiras Norte (N), Noroeste (NO) e Triângulo Mineiro (TM) no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil. Totais de precipitação (Prec), evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração atual (ET).

Ano	2012			2013			2014			2015		
	Prec (mm)	ET_0 (mm)	ET (mm)	Prec (mm)	ET_0 (mm)	ET (mm)	Prec (mm)	ET_0 (mm)	ET (mm)	Prec (mm)	ET_0 (mm)	ET (mm)
Mesorregião Norte (N)												
1	577	441	266	449	609	371	307	608	395	259	609	365
2	153	327	172	27	405	188	41	374	184	25	395	201
3	459	548	184	618	647	236	440	643	216	271	735	234
Total	1189	1316	622	1093	1660	796	788	1625	795	555	1740	800
Mesorregião Noroeste (NO)												
1	489	455	247	683	552	371	457	592	385	423	563	366
2	90	346	192	49	397	229	50	386	224	38	395	267
3	428	579	165	595	656	255	526	636	185	412	684	261
Total	1007	1381	604	1327	1605	855	1033	1613	794	872	1643	894
Mesorregião Triângulo Mineiro (TM)												
1	507	441	266	734	511	379	452	590	408	491	538	368
2	118	319	231	125	383	264	77	370	234	59	382	302
3	504	542	191	565	645	289	540	622	226	596	639	301
Total	1129	1301	688	1423	1539	932	1068	1581	868	1146	1559	972

Em geral, os quadrimestres (Q) com maiores quantidades de chuvas nas três mesorregiões foram o primeiro (Q1) e o terceiro (Q3) com os maiores valores acontecendo na mesorregião TM. O quadrimestre mais seco foi de maio a agosto (Q2) com o menor valor no ano de 2015 para a mesorregião N.

Com relação a demanda atmosférica, Q3 foi o quadrimestre com maiores valores de ET_0 , com destaque para o ano de 2015 na mesorregião N, quando o total foi acima de 700 mm. As menores demandas aconteceram no Q2, com valores inferiores a 400 mm, ficando TM com o limite inferior. Tomando-se os valores anuais, em geral, 2015 foi o ano de maior e 2012 o menor valores de ET_0 .

As tendências da ET foram similares àquelas para ET_0 sob boas condições de umidade no solo, entretanto, para todas as mesorregiões, a redução de Prec em Q2 promoveu um forte

declínio nas proporções ET/ET_0 no Q3. Enquanto que esta razão esteve acima de 70% em Q1 e Q2 ao longo dos anos estudados, em Q3 esta chegou a apenas 30%, com os menores valores acontecendo na mesorregião NO em 2012. Baixos valores de ET/ET_0 no último quadrimestre, mesmo sob condições de elevada Prec, evidenciam uma lacuna entre Prec e ET relacionada com o tempo que o solo leva para recuperar as boas condições de umidade. Na Austrália, de acordo com Cleugh et al. (2007), a ET refletiu variações de acordo com as condições de chuvas, energia disponível e temperatura do ar.

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial dos valores médios dos pixels de BH_d para períodos específicos de 16 dias das imagens MODIS, envolvendo diferentes condições termo hídricas durante os anos de 2012 a 2015, no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

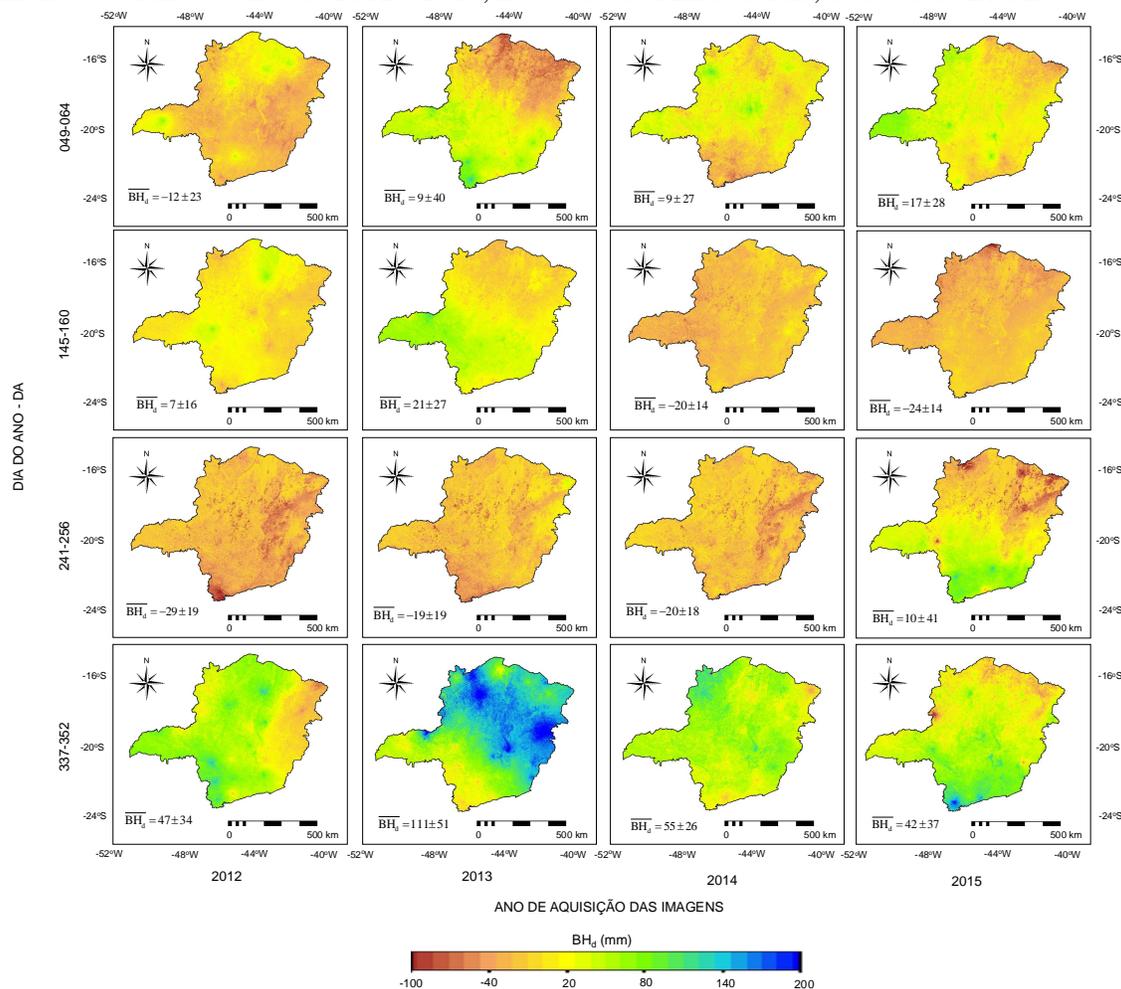


Figura 3. Distribuição espacial dos valores médios de 16 dias para o índice BH_d durante os anos de 2012 a 2015, no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil. As barras significam médias dos pixels apresentadas juntamente com os desvios padrões.

As variações espaciais e temporais dos valores de BH_d são evidentes ao longo dos anos de 2012 a 2015. Os valores positivos ($P > ET$) máximos ocorreram no período de DA 337-352 no mês de dezembro, com vários pixels acima de 150 mm no ano de 2013. Os menores e negativos valores ($P < ET$) aconteceram com maior frequência no período de DA 241-256 de agosto para setembro, com pixels inferiores a -45 mm em grande parte do Estado. Pelas tendências dos componentes do balanço hídrico representadas pela Figura 3 percebem-se

variações ano a ano e diferentes possibilidades de armazenamento de água das chuvas para posterior uso nos períodos climaticamente mais secos.

A Figura 4 apresenta as variações estacionais dos índices hídricos BH_d e ET_r nas mesorregiões mineiras Norte (N), Noroeste (NO) e Triângulo Mineiro (TM), para os períodos de 16 dias das imagens MODIS, ao longo dos anos de 2012 a 2015, no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

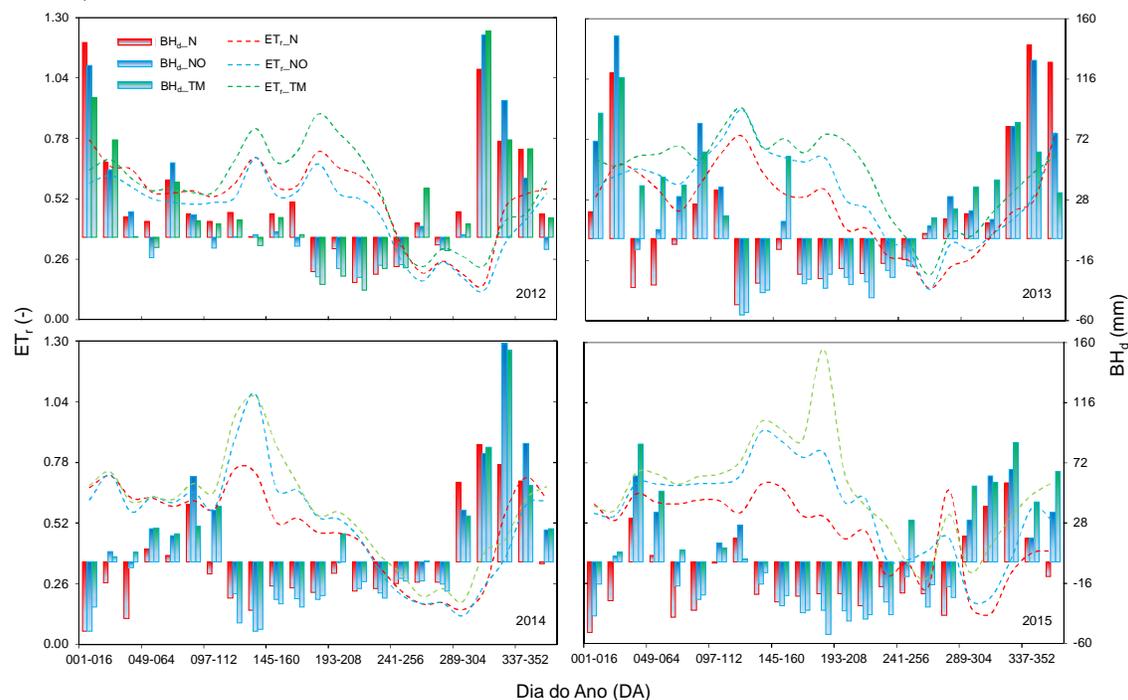


Figura 4. Variações estacionais das médias dos pixels para os índices hídricos BH_d e ET_r , durante os anos de 2012 a 2015, nas mesorregiões mineiras Norte (N), Noroeste (NO) e Triângulo Mineiro (TM), estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

Os valores positivos de BH_d indicam a magnitude dos possíveis excessos hídricos com percolação ou escoamento da água, dependendo da capacidade de retenção do solo, enquanto que valores negativos podem indicar possibilidades de deficiência hídrica natural. Ao longo dos períodos estudados há concentrações de valores positivos no início e final do ano em todas as mesorregiões abordadas. Entretanto nos anos de 2014 e 2015, constatam-se situações de deficiências de janeiro a fevereiro, o que deve ter afetado a agricultura dependente de chuvas. De acordo com Cleugh et al. (2007) valores pequenos de BH_d refletem reduções de chuvas e/ou aumentos na ET. Das três mesorregiões analisadas a Norte (N) com valor de BH_d anual de -245 mm ano^{-1} em 2015 foi a que apresentou condições naturais mais secas.

Em geral os maiores valores de ET_r foram de DA 081 (março) a 128 (maio), chegando, em alguns casos a ET ser acima de 70% da ET_0 , indicando boas condições de umidade do solo. Por um lado, em culturas agrícolas bem irrigadas, os valores de ET_r (denominados como coeficiente de cultura – K_c), podem ser usados para estimativas dos requerimentos hídricos em diferentes escalas espaciais (Teixeira et al., 2015b). Por outro lado, em vegetação natural, ET_r pode ser usado para caracterizar as condições hídricas na zona das raízes (Lu et al., 2011). Zang et al. (2012), estudando vegetação natural em deserto da Mongólia, China, encontraram variações de ET_r com valores médios diários de 0,16 a 0,75, similares em vários casos no estudo corrente. Entretanto Lu et al. (2011), na mesma região chinesa, reportaram valores maiores que 1,00 para seis diferentes ecossistemas, enquanto que Summer & Jacobs (2005) encontraram valores de ET_r entre 0,47 e 0,92 em pastagem não irrigada na Flórida (Estados

Unidos), similares a poucos casos do atual estudo após o período chuvoso no Estado de Minas Gerais, Brasil.

Zhou & Zhou (2009) concluíram que a temperatura e umidade do ar e a energia disponível foram os parâmetros mais importantes para as variações dos valores de ET_r no Nordeste da China. No atual estudo, o fator mais importante para os valores mais altos de ET_r foram os períodos prévios de abastecimento da umidade do solo pelas chuvas. Entretanto, os valores de ET_r em ecossistemas naturais dependem também do mecanismo de regulação da abertura e fechamento dos estômatos e da adaptação das espécies às condições de escassez hídrica (Mata-González et al., 2005).

Dentro de um ano específico, tendências similares de BH_d e ET_r entre as mesorregiões abordadas foram observadas, porém estas foram diferentes entre os anos analisados, variando principalmente com a distribuição e quantidade das chuvas (ver Figuras 2 e 4). Pelas variações dos índices hídricos percebe-se que, em geral, após os períodos chuvosos, mesmo em situações de BH_d negativo, a irrigação não seria necessária para satisfação dos requerimentos hídricos das culturas. Entretanto irrigações suplementares são recomendáveis do final de agosto (DA 241) para o término da primeira quinzena de novembro (DA 320), quando os valores de ET_r caem abaixo de 0,50. Neste último caso os locais e períodos com maiores valores positivos BH_d indicam as possibilidades de armazenamento da água da chuva para posterior suplementação dos requerimentos hídricos via irrigação. Considerando todos os anos estudados, ET atendeu a demanda atmosférica em 50%, 53% e 61% respectivamente nas mesorregiões Norte (N), Noroeste (NO) e Triângulo Mineiro (TM).

Devido à importância para o desenvolvimento rural diante dos cenários de escassez hídricas, a agricultura dependente de chuvas com irrigação suplementar deve ser estimulada no estado de Minas Gerais, principalmente no Triângulo Mineiro, que é a mesorregião onde a agricultura apresenta melhor produtividade da água.

4. Conclusões

O uso conjunto de parâmetros obtidos de imagens MODIS e dados climáticos permitiram a aplicação de índices hídricos ao longo dos anos de 2012 a 2015 no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil. Estes índices podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica dos componentes do balanço hídrico, importante para apreciação do impacto das condições atuais de escassez de água.

Analisando-se os resultados para quatro anos de dados nas mesorregiões Norte, Noroeste e Triângulo Mineiro, pôde-se concluir que esta última se apresenta com condições mais úmidas, enquanto que a mesorregião Norte mostrou-se com menores condições de umidade do solo, com períodos mais críticos de julho a novembro.

Foi demonstrado que as tendências das condições hídricas em larga escala podem ser analisadas a partir das medições das radiações espectrais das bandas do vermelho e infra-vermelho próximo, respectivamente bandas 1 e 2 do sensor MODIS, através da modelagem das evapotranspirações atual e de referência, no momento da passagem do satélite. A combinação das imagens com estações climáticas destaca-se no monitoramento dos componentes do balanço hídrico, contribuindo para políticas de enfrentamento dos problemas gerados pela escassez de água em algumas áreas do Sudeste do Brasil.

Referências Bibliográficas

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 1998.

- Cai, X.; Mckinney. C.; Lasdon. S. A framework for sustainable analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. **Water Resources Research**, v. 38, p. 21-24, 2002.
- Cleugh, H.A.; Leuning, R.; Mu, Q.; Running, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, 285-304, 2007.
- Golfari, L. **Zoning for reforestation in Brazil and trials with tropical Eucalyptus and Pines in Central - Region.** Technical Report. 1978. 25p (PNUD/FAO. Project BRA/76/027).
- Lu, N.; Chen, S.; Wilske, B.; Sun, G.; Chen, J. Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. **Journal of Plant Ecology**, v. 4, p. 49-60, 2011.
- Mata-González, R., McLendon, T. and Martin, D.W. The inappropriate use of crop transpiration coefficients (K_c) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: a review. **Arid Land Research and Management**. v. 19, p. 285-295, 2005.
- Sumner, D.M.; Jacobs, J. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 308, p. 81-104, 2005.
- Teixeira, A.H. de C.; Andrade, R.G.; Leivas, J.F.; Victoria, D. de C.; Bolfe, E.L. Balanço de energia e produtividade da água em larga escala: caracterização, modelagem e aplicação no Norte de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v.36, p.101-108, 2015a.
- Teixeira, A.H. de C.; Hernandez, F.B.T.; Scherer-Warren, M.; Andrade, R.G.; Victoria, D. de C.; Bolfe, E.L.; Thenkabail, P.S.; Franco, R.A.M. Water Productivity Studies from Earth Observation Data: Characterization, Modeling, and Mapping Water Use and Water Productivity. In: Thenkabail, P.S. (Org.). **Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies**. Boca Raton, Florida: Editora Taylor and Francis, 2015b, v.III, p. 101-126.
- Zhang, F.; Zhou, G.; Wang, Y.; Yan, F.; Christer Nilsson, C. Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 379-386, 2012.
- Zhou, L.; Zhou, G. Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. **Journal of Hydrology**, v. 372, p. 41-47, 2009.