

ÍNDICES HÍDRICOS PARA ÁREAS IRRIGADAS NA REGIÃO DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA PETROLINA/JUAZEIRO

**ANTÔNIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA¹; JANICE FREITAS LEIVAS¹;
GUSTAVO BAYMA-SILVA¹ E EDLENE APARECIDA MONTEIRO GARÇON¹**

¹Departamento de Geociências, Embrapa Monitoramento por Satélite, Av. Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Jardim Chapadão CEP: 13070-115 - Campinas - SP, heriberto.teixeira@embrapa.br, janice.leivas@embrapa.br, gustavo.bayma@embrapa.br, edlene.garcon@embrapa.br

1 RESUMO

Os algoritmos SAFER e o SUREAL foram usados com produtos MODIS na determinação da evapotranspiração atual (ET), sendo usada com dados de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET₀) para aplicação dos índices IH (P/ET) e ET_r (ET/ET₀), nas análises do balanço hídrico durante o ano de 2015, em áreas irrigadas da região de desenvolvimento agrícola Petrolina/Juazeiro, Nordeste do Brasil. Tanto para Petrolina como para Juazeiro, as maiores taxas da ET, chegando acima de 4,5 mm dia⁻¹, ocorreram em fevereiro, devido ao suprimento hídrico conjunto das águas das chuvas e de irrigação para as plantas. Os valores mais baixos em novembro (ET < 2,2 mm dia⁻¹) coincidiram com o final de ciclo generalizado das culturas agrícolas. Apesar de P na escala anual ter sido maior em Petrolina (230 mm) em 10% quando comparado com Juazeiro, a menor demanda atmosférica do segundo município resultou em um IH ligeiramente superior. Entretanto, as condições de umidade no solo em Petrolina (ET_r = 0,70) foram melhores que às de Juazeiro (ET_r = 0,61). Os resultados confirmam o potencial dos algoritmos para o monitoramento das condições hídricas das culturas irrigadas no semiárido brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Evapotranspiração, umidade de solo, irrigação.

**TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; BAYMA-SILVA, G.; GARÇON, E. A. M.
WATER INDICES FOR IRRIGATED AREAS IN THE PETROLINA/JUAZEIRO
AGRICULTURE DEVELOPMENT REGION**

2 ABSTRACT

The SAFER and SUREAL algorithms were applied along with MODIS products for determining the actual evapotranspiration (ET), and then used together with precipitation (P) and reference evapotranspiration (ET₀) data for application of the WI (P/ET) and ET_r (ET/ET₀) indices, for water balance analyses during the year 2015, in the irrigated areas of Petrolina/Juazeiro agriculture development region. Both for Petrolina and Juazeiro, the highest ET rates, reaching to above 4.5 mm d⁻¹, took place in February, due to the joint water supply from rainfall and irrigation systems. The lowest indices were observed in November (ET < 2.2 mm d⁻¹), coinciding with the end of the generalized irrigated crop growing cycles. Although P at the annual measurement being 10% higher in Petrolina (230 mm), when compared to Juazeiro, the lower atmospheric demand in the second municipality resulted in an WI slightly

higher. However, the soil moisture conditions in Petrolina ($ET_r = 0.70$) were better than those present in Juazeiro ($ET_r = 0.61$). These results state the potential of the algorithms for monitoring the irrigated crops water conditions in the Brazilian semi-arid region.

Keywords: Evapotranspiration, soil moisture, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

Nas condições de mudanças de uso da terra na região de desenvolvimento agrícola Petrolina/Juazeiro, estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil, geotecnologias para determinação de índices hídricos nas áreas irrigadas se destacam para o gerenciamento dos recursos hídricos em larga escala (TEIXEIRA et al., 2017a,b).

O uso da equação de Penman-Monteith (PM) tem sido sugerido para aplicação em conjunto com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, tanto na obtenção da evapotranspiração atual (ET) como para a razão desta para a evapotranspiração de referência (ET_0). A ET_r em boas condições de umidade na zona das raízes das plantas é denominada coeficiente de cultura (K_c) (ALLEN et al., 1998; KAMBLE et al., 2013), porém seus baixos valores indicam condições de estresse hídrico (LU et al., 2011).

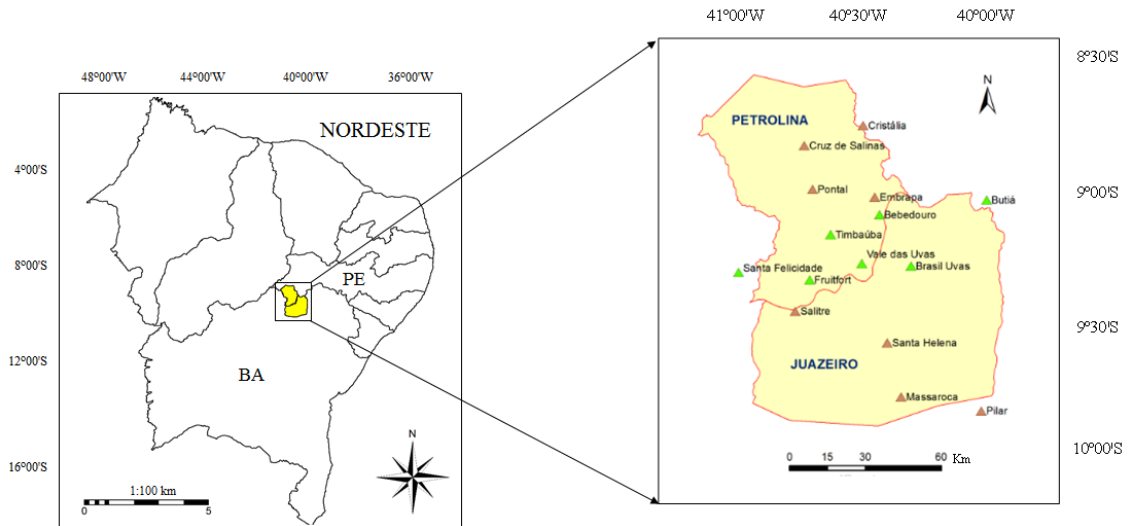
O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido para determinação das condições de umidade na zona das raízes e da ET, a qual juntamente com dados de precipitação (P) permite a aplicação do índice climático IH (P/ET) (TEIXEIRA et al., 2015). Um segundo modelo para calcular a resistência da superfície aos fluxos hídricos (r_s), o SUREAL (*Surface Resistance Algorithm*) foi elaborado para classificação da vegetação. Ambos, o SAFER e o SUREAL foram validados com medições simultâneas de campo e por satélites (TEIXEIRA et al., 2017a,b).

O objetivo do atual trabalho é a aplicação dos algoritmos SAFER e SUREAL em conjunto com uma rede de estações agrometeorológicas, ao longo do ano de 2015, para a determinação dos índices ET_r e IH em culturas irrigadas da região de crescimento agrícola Petrolina/Juazeiro, nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, na região do Nordeste do Brasil.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a localização das estações agrometeorológicas utilizadas em conjunto com o produto MODIS MOD13Q1 nos municípios de Petrolina, estado de Pernambuco (PE) e Juazeiro, estado da Bahia (BA), na região semiárida do Nordeste do Brasil.

Figura 1. Localização das estações agrometeorológicas nos municípios na de Petrolina e Juazeiro, estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil. Triângulos verdes simbolizam as estações dentro de fazendas irrigadas, enquanto que os marrons indicam aquelas em áreas de vegetação natural.



Segundo Teixeira (2015), a região apresenta valores médios de temperatura do ar (T_a) acima de 24 °C. Os meses mais quentes são outubro e novembro, e os mais frios são junho e julho. A homogeneidade térmica contrasta fortemente com a heterogeneidade espacial e temporal do regime pluviométrico, com a maioria das chuvas durante o primeiro quadrimestre do ano.

O produto MOD13Q1 utilizado fornece um total de 23 imagens das reflectâncias nas bandas 1 e 2 ao longo do ano, as quais em conjunto com dados climáticos, possibilitaram a obtenção da ET_r e da ET ao longo de 2015, na escala temporal de 16 dias (TEIXEIRA et al., 2015). Detalhes da metodologia são descritos em (TEIXEIRA et al., 2015, 2017a,b) sendo aqui resumida.

O algoritmo SAFER foi usado para modelar a razão da ET para a ET_0 , a ET_r :

$$ET_r = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \text{NDVI}} \right) \right] \quad (1)$$

onde α_0 é o albedo da superfície e NDVI é o Índice da Diferença de Vegetação Normalizado, ambos calculados com as bandas 1 e 2; T_0 a temperatura da superfície estimada por resíduo no balanço de radiação; e a e b são coeficientes de regressão.

A ET_r é então multiplicada pelas grades diárias de ET_0 fornecendo os valores da ET para 24 horas:

$$ET = ET_r ET_0 \quad (2)$$

De posse de dados de precipitação (P), interpolados das estações representadas na Figura 1, o índice de balanço hídrico climático (IH) foi considerado como:

$$IH = \frac{P}{ET} \quad (3)$$

Para a classificação da vegetação em culturas irrigadas e vegetação natural, o modelo SUREAL foi aplicado:

$$r_s = \exp \left[c \left(\frac{T_0}{\alpha_0} \right) (1 - NDVI) + d \right] \quad (4)$$

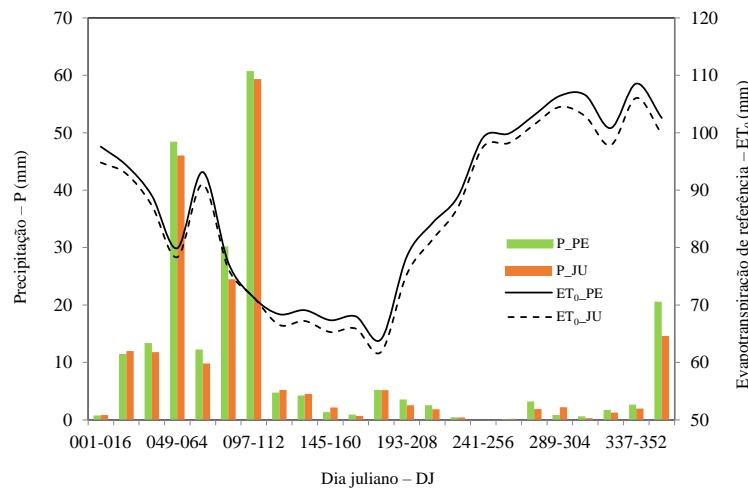
onde r_s é a resistência da superfície aos fluxos hídricos, e a e b são coeficientes de regressão.

Considerando as imagens do período mais seco da região, pixels com valores de r_s abaixo de 800 s m^{-1} e NDVI acima de 0.2 foram considerados culturas irrigadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precipitação (P) e a evapotranspiração de referência (ET_0) são apresentadas na Figura 2 em termos de Dia Juliano (DJ), para os municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil.

Figura 2. Tendências dos valores diários da precipitação (P) e da evapotranspiração de referência (ET_0), em termos de dia juliano (DJ), durante o ano de 2015 nos municípios de Petrolina (PE), e de Juazeiro (JU), estados de Pernambuco e da Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil.



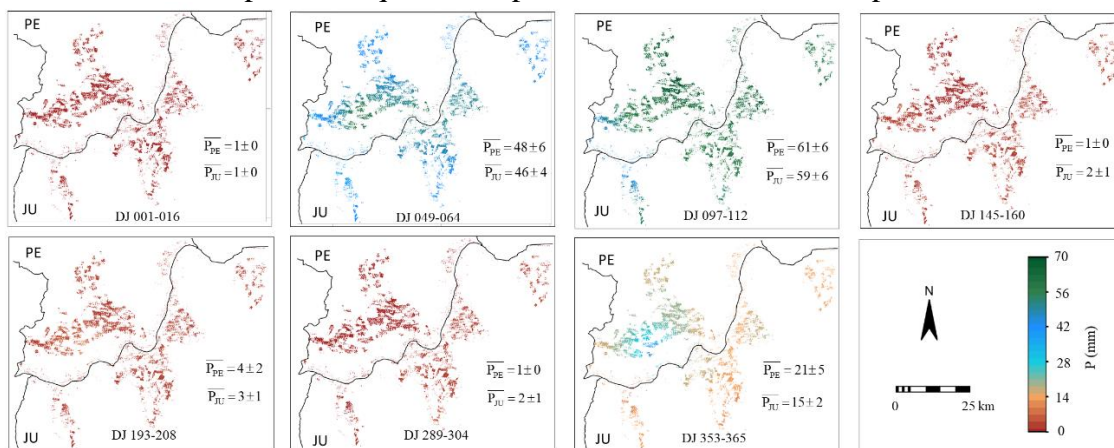
As chuvas concentraram-se nos quatro primeiros meses do ano com valores quinzenais de P acima de 45 mm da segunda quinzena de fevereiro (DJ 049) ao início de março (DJ 064), sendo que a partir daí até ao final da segunda quinzena de dezembro (DJ 352) caíram abaixo de 5 mm, caracterizando-se como um período climaticamente muito seco, de acordo com o padrão climatológico. Petrolina, com total de chuvas de 230 mm ano^{-1} , teve maior suprimento hídrico natural para as culturas agrícolas que Juazeiro (209 mm ano^{-1}).

Com relação à demanda atmosférica, como a localização é próxima do equador, a amplitude da ET_0 durante o ano é pequena, com os valores mais elevados ocorrendo a partir do

final de setembro (DJ 273), quando coincide com o final do período climaticamente mais seco do ano, com as médias quinzenais de ET_0 ultrapassando 100 mm. A menor demanda atmosférica em Juazeiro ($ET_0 = 1971 \text{ mm ano}^{-1}$) com relação a Petrolina (2018 mm ano^{-1}) compensou a menor quantidade de chuvas no balanço hídrico climático.

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial e valores médios da precipitação (P), em termos de Dia Juliano (DJ), nas áreas irrigadas dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil.

Figura 3. Distribuição espacial da precipitação (P), em termos de Dia Juliano (DJ), nas áreas irrigadas dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil. As barras significam médias dos pixels, as quais são apresentadas com os desvios padrões.

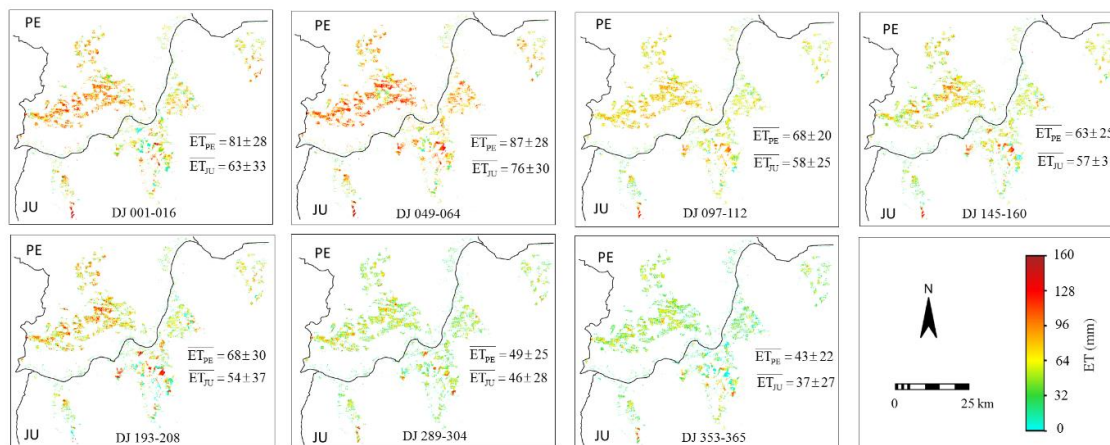


As variações sazonais de P ao longo do ano de 2015 são claras, com os maiores valores da segunda quinzena de fevereiro a primeira quinzena de março (DJ 049-112), sendo em Juazeiro 96% daqueles em Petrolina. Entretanto, as variações espaciais são pequenas, chegando a um máximo de desvio padrão de 6 mm em abril (DJ 097-112) para ambos os municípios. De forma não usual, na primeira quinzena de janeiro praticamente não ocorreram chuvas, demandando mais água de irrigação para as culturas agrícolas.

Apesar de que em Juazeiro tenha ocorrido menor quantidade de chuvas, de acordo com os valores de desvio padrão de P, as variações espaciais durante o ano foram 61% daquelas no município de Petrolina. Isto evidencia maiores diferenças na disponibilidade natural de água nas áreas irrigadas de Petrolina. Na escala anual, a precipitação foi bem abaixo do valor climatológico, em torno de 40% dos totais médios para 50 anos.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial e valores médios da evapotranspiração atual (ET), em termos de Dia Juliano (DJ), nas áreas irrigadas nos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil.

Figura 4. Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET), em termos de Dia Juliano (DJ), nas áreas irrigadas dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil. As barras significam médias dos pixels, as quais são apresentadas com os desvios padrões.



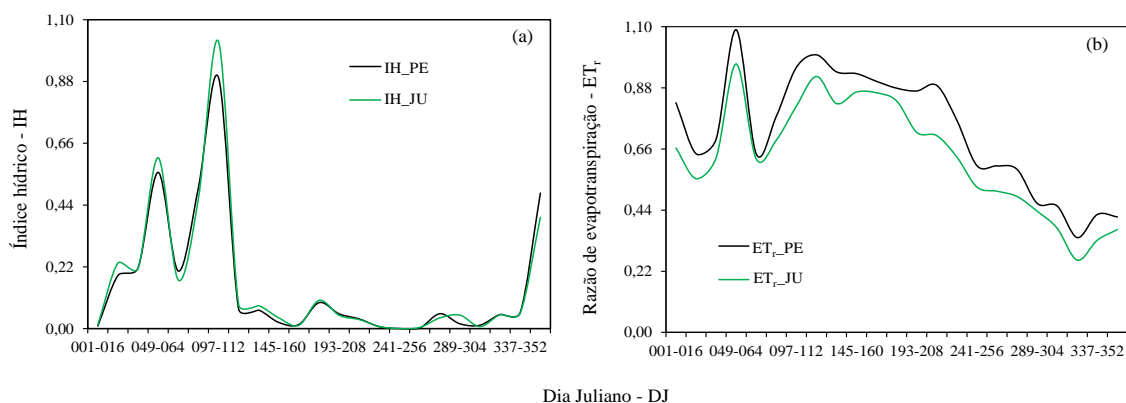
As variações espaciais e sazonais da ET ao longo do ano de 2015 nas áreas irrigadas da região de crescimento agrícola Petrolina/Juazeiro são maiores que no caso de P, mais marcantes quando se compara os períodos dentro da estação chuvosa com aqueles mais secos, confirmando a sensibilidade do SAFER para detectar as diferentes condições hídricas e de vegetação. Os valores de 16 dias das imagens MODIS, apresentados para períodos específicos do ano na Figura 4, representaram taxas diárias da ET para as culturas irrigadas entre 2,2 e 5,4 mm dia⁻¹ para Petrolina e de 1,6 a 4,7 mm dia⁻¹ em Juazeiro.

Santos et al. (2010), aplicando os algoritmos SEBAL e S-SEBS com imagens Landsat, reportaram valores máximos de ET de 6,0 mm d⁻¹ para a cultura do algodoeiro irrigado nas condições do semiárido brasileiro. Também nesta região, mas neste caso usando o modelo METRIC, Folhes et al. (2009) encontraram taxas da ET entre 3,0 a 6,0 mm d⁻¹ para fruteiras irrigadas, similares aos do estudo corrente.

Apesar de Petrolina e Juazeiro terem apresentado dinâmicas similares nas taxas evapotranspiratórias ao longo do ano de 2015, no segundo município estas representaram 85% daquelas do primeiro. Mesmo com menores quantidades de chuvas em Juazeiro, estas foram compensadas no balanço hídrico por uma demanda atmosférica mais baixa, com P atendendo 11% da ET_0 em ambos os municípios. Então uma das razões para os menores valores da ET em Juazeiro pode ser os menores consumos da água de irrigação.

A Figura 5 apresenta as tendências dos valores médios dos índices hídricos IH e ET_r , em termos de Dia Juliano (DJ), nas áreas irrigadas nos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil.

Figura 5. Médias dos índices hídricos, em termos de Dia Juliano (DJ), nas áreas irrigadas dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (JU), nos estados de Pernambuco e Bahia, respectivamente, Nordeste do Brasil. (a) Índice Hídrico baseado no balanço hídrico (IH); e (b) razão de evapotranspiração (ET_r).



Os valores de IH consideram as condições termo hídricas. Valores próximos de 1,00 significa que boa disponibilidade natural de água para as culturas agrícolas, dependendo do estágio fenológico e da capacidade de retenção de umidade no solo. Por outro lado, valores muito maiores que 1,00 podem indicar problemas de excesso de água para as culturas, independentemente da quantidade de água aplicada na irrigação, embora estes excessos possam ser armazenados para períodos posteriores naturalmente mais secos. Baixos valores de IH significa possibilidade de deficiência hídrica e o grau de necessidade de irrigação de acordo com a fenologia das culturas (TEIXEIRA et al., 2015, 2016)

Dois picos para IH são observados durante o período chuvoso, de DJ 049-064 (fevereiro a março) e de DJ 097-112, em abril (Figura 5a). Por outro lado, valores próximos de 0,00 após estes períodos sinalizam condições de escassez hídrica natural, causando estresse nas plantas caso os requerimentos hídricos não sejam satisfeitos via irrigação. Estas condições ocorreram desde a segunda quinzena de abril até o final de dezembro (DJ 352).

As baixas quantidades de chuvas com relação às médias históricas, significam que para as culturas manterem os níveis ideais de produção, muita água do Rio São Francisco foi utilizada, visto que no período mais seco houve um crescimento contínuo da demanda atmosférica (ver Figuras 2 e 5). Como em Juazeiro, apesar de ter ocorrido menor quantidade de chuvas, este município teve uma menor demanda atmosférica quando comparado a Petrolina, fazendo com que os valores de IH em geral ficassem maiores ao longo do ano, com valor médio anual de 0,18 contra 0,16 em Petrolina.

Apesar da água de irrigação ser fornecida para as culturas agrícolas regularmente com frequência diária, as variações de ET_r de acordo com os estágios fenológicos ao longo do ano de 2015 são claras (Figura 5b), confirmando novamente a sensibilidade do SAFER. Em geral, os valores superiores da curva de ET_r são similares aos coeficientes de cultura (K_c), com exceção do período de DJ 049-064, quando a grande quantidade de chuvas favoreceu uma maior porção da ET como evaporação direta do solo. No final do ano a queda da curva de ET_r está relacionada com o generalizado final de ciclo das culturas irrigadas (ALLEN et al., 1998; TEIXEIRA, 2009).

Percebe-se que ao contrário do índice IH, os maiores valores de ET_r são para o município de Petrolina, em torno de 15% maiores, o que pode indicar melhor armazenamento de umidade no solo, ou melhor manejo das culturas, que Juazeiro. Considerando-se que os valores de ET_r variaram de 0,26 a 1,09 e que grande parte desta faixa de DJ 081 (segunda quinzena de março)

a DJ 272 (final de setembro), correspondem as fases generalizadas dos ciclos das culturas na região, estes podem ser considerados como K_c mistos, cujos valores neste período estiveram entre 0,60 e 1,00.

Silva et al. (2012) reportaram valor médio da K_c de 0,73, em plantio de coqueiro anão irrigado, dentro da faixa encontrada para os agros-ecossistemas mistos do estudo corrente. Para a cultura da cana de açúcar, cobrindo totalmente o solo, Eksteen et al. (2014) encontraram valores entre 1,10 e 1,50. Em Petrolina, medições de balanço hídrico no solo em mangueiras por Azevedo et al. (2003) resultaram em valores médios de K_c de 0,71, enquanto que na mesma região Teixeira (2009) encontraram valores de K_c entre 0,63 e 0,91 para videiras nas condições semiárida do Nordeste do Brasil. A similaridade dos resultados na literatura com os do estudo corrente aponta a viabilidade dos usos do SAFER e SUREAL com o produto MOD13Q1 para o monitoramento da área irrigada no semiárido brasileiro.

6 CONCLUSÕES

O uso conjunto de medições das radiações na faixa do visível e infravermelho próximo do produto MOD13Q1 e uma rede de estações agrometeorológicas automáticas na região semiárida do Brasil, permitiu a aplicação de indicadores hídricos com através dos modelos de uso conjunto de imagens de satélites e dados climáticos nas áreas irrigadas da região de crescimento agrícola de Petrolina/Juazeiro, Nordeste do Brasil. Pela sensibilidade dos modelos na detecção de diferentes níveis de umidade do clima e do solo, os resultados revelam confiança nas aplicações para o monitoramento das condições das culturas agrícolas em áreas com substituição da vegetação natural por culturas irrigadas.

7 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo suporte financeiro aos projetos de balanços de energia e de água, processo 446136/2015-8

8 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. FAO, Rome, v. 300.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. da; SILVA, V. P. R. da. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.58, n.1, p. 241-254. 2003.

EKSTEEN, A.; SINGELS, A.; NGXALIWE, S. Water relations of two contrasting sugarcane genotypes. **Field Crops Research**, v. 168, p. 86-100, 2014.

FOLHES, M.T.; RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1398-1408, 2009.

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

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.

SANTOS, C. A. C. dos; BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; RAO, T. V. R. Assessment of daily evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 383-392, 2010.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M. de; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1218-1226, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C., 2009. **Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region**. LAP Lambert Academic Publishing: Saarbrücken, Germany, 226p.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. de C.; BOLFE, E. L.; SILVA, G. B. Water balance indicators from MODIS images and agrometeorological data in Minas Gerais state, Brazil. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, v. 9637, p. 963700-1-963700-14, 2015.

TEIXEIRA, A. H. de C.; TONIETTO, J.; LEIVAS, J. F. Large-scale water balance indicators for different pruning dates of tropical wine grape. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 849-857, 2016.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, p. 016030, 2017a.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F. Determinação da produtividade da água com imagens Landsat 8 na região semiárida do Brasil. **Revista Conexões - Ciência e Tecnologia**, v. 11, p. 22-34, 2017b.