

# Evapotranspiração, biomassa e produtividade da água em cana-de-açúcar por sensoriamento remoto na microrregião de Teresina, PI



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Meio-Norte  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

## **DOCUMENTOS 249**

# Evapotranspiração, biomassa e produtividade da água em cana-de-açúcar por sensoriamento remoto na microrregião de Teresina, PI

*Aderson Soares de Andrade Júnior  
Magna Soelma Beserra de Moura  
Tais Lima Bandeira  
Elizandra dos Santos Sousa da Silva*

**Embrapa Meio-Norte**  
*Teresina, PI*  
2018

Exemplares desta publicação  
podem ser adquiridos na:

**Embrapa Meio-Norte**  
Av. Duque de Caxias, 5.650,  
Bairro Buenos Aires  
Caixa Postal 01  
CEP 64008-780, Teresina, PI  
Fone: (86) 3198-0500  
Fax: (86) 3198-0530  
www.embrapa.br/meio-norte]  
Serviço de Atendimento ao  
Cidadão(SAC)  
www.embrapa.br/fale-conosco/  
sac

Comitê Local de Publicações  
da Unidade Responsável

Presidente  
*Danielle Maria Machado Ribeiro Azevedo*

Secretário-administrativo  
*Jeudys Araújo de Oliveira*

Membros  
*Edvaldo Sagrilo, Orlane da Silva Maia, Luciana  
Pereira dos S. Fernandes, Ligia Maria Rolim  
Bandeira, Humberto Umbelino de Sousa, Pedro  
Rodrigues de Araújo Neto, Antônio de Padua Soeiro  
Machado, Alexandre Kemenes, Ana Lúcia Horta  
Barreto, Braz Henrique Nunes Rodrigues, Francisco  
José de Seixas Santos, João Avelar Magalhães,  
Rosa Maria Cardoso Mota de Alcantara,*

Supervisão editorial: *Ligia Maria Rolim Bandeira*  
Revisão de texto: *Ligia Maria Rolim Bandeira*

Normalização bibliográfica  
*Orlane da Silva Maia*

Editoração eletrônica  
*Jorimá Marques Ferreira*

Fotos  
*Aderson Soares de Andrade Júnior*

**1ª edição**  
1ª impressão (2018): formato digital

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais  
(Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Meio-Norte

---

Evapotranspiração, biomassa e produtividade da água em cana-de-açúcar por  
sensoriamento remoto na microrregião de Teresina, PI / Aderson Soares de An-  
drade Junior[ ... [et al]. – Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2018.

34 p. : il. ; 16 cm x 22 cm. - (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-  
866X ; 249).

1. Irrigação suplementar. 2. Clima. 3. Umidade do solo. I. Andrade Júnior,  
Aderson Soares de. II. Embrapa Meio-Norte. III. Série. CDD 631.7 (21. ed.)

## **Autores**

### **Aderson Soares de Andrade Júnior**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

### **Magna Soelma Beserra de Moura**

Engenheira-agrônoma, doutora em Agrometeorologia, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

### **Tais Lima Bandeira**

Estudante de graduação em Agronomia, CCA – UFPI, bolsista na Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

### **Elizandra dos Santos Sousa da Silva**

Estudante de graduação em Agronomia, CCA – UFPI, bolsista na Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

## Apresentação

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Os estados do Maranhão e do Piauí são considerados como áreas promissoras de expansão da cana-de-açúcar, por possuir características de solo e clima favoráveis.

Porém, as áreas potenciais ao cultivo da cana-de-açúcar nesses estados situam-se em regiões com climas semiárido e subúmido seco, com distribuição irregular e insuficiente de precipitação, que não satisfaz a exigência hídrica da cultura de forma adequada durante o ciclo, o que requer a adoção da prática da irrigação suplementar para o alcance de níveis satisfatórios de produção de biomassa, com a máxima eficiência de água.

Nesse sentido, este trabalho traz contribuição importante para o setor sucroalcooleiro instalado e/ou a ser implantado na microrregião de Teresina, PI, por apresentar metodologia, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, com imagens de satélite, que permitem a estimativa da evapotranspiração, da produção de biomassa e da produtividade da água em áreas de cultivo comercial de cana-de-açúcar, essenciais para o monitoramento da eficiência da irrigação aplicada na usina.

Os resultados apresentados demonstram a viabilidade do emprego da técnica do sensoriamento remoto como ferramenta de planejamento, visando o monitoramento da evapotranspiração, da produção de biomassa e da eficiência do uso de água no âmbito da área comercial de cana-de-açúcar.

*Luiz Fernando Carvalho Leite*  
*Chefe-Geral da Embrapa Meio-Norte*

## Sumário

Introdução.....	9
Metodologia .....	11
Estimativa da evapotranspiração (ET) .....	12
Estimativa da produção de biomassa.....	14
Estimativa da produtividade da água .....	17
Resultados e Discussão .....	17
Condições climáticas e fases de desenvolvimento da cultura .....	17
Evapotranspiração da cultura (ET).....	20
Indicador de umidade do solo versus coeficiente de cultura.....	24
Produção de biomassa.....	26
Produtividade da água.....	28
Conclusões.....	30
Referências .....	30

## Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com uma área total cultivada, em 2017, de aproximadamente 9,05 milhões de hectares e uma produção anual de 657,2 milhões de toneladas, gerando reflexos importantes na economia brasileira (Acompanhamento..., 2017).

Os estados do Nordeste, especialmente Maranhão e Piauí, são considerados como áreas promissoras de expansão da cana-de-açúcar, por possuir características de solo e clima favoráveis, bem como pelas condições de logística de exportação de álcool (existência de portos e ferrovias), que facilitam o rápido escoamento do produto, chegando ao consumidor com a qualidade exigida pelo mercado internacional.

Contudo, as áreas potenciais ao cultivo da cana-de-açúcar nesses estados situam-se em regiões com climas semiárido e subúmido seco, com distribuição espacial da precipitação pluviométrica irregular, insuficiente e que não satisfaz a exigência hídrica da cultura, de forma adequada, durante o ciclo. Por isso, a adoção da irrigação suplementar torna-se fundamental para elevar-se a produção de biomassa e a eficiência de uso da água, que exige a adequada quantificação da evapotranspiração (ET) da cultura. Como a cana-de-açúcar é explorada normalmente em larga escala, a aplicação do sensoriamento remoto é primordial para a viabilização desses estudos (Rudorff et al., 2010; Claverie et al., 2012; Adak et al., 2013; Teixeira et al., 2014, 2015).

A ET da cana-de-açúcar é geralmente determinada por medidas pontuais. Silva et al. (2011) usaram o método do balanço de energia por Bowen Ratio em área de produção comercial irrigada na região semiárida. Andrade Júnior et al. (2017), com a mesma metodologia, quantificaram a ET e a demanda hídrica da cana-de-açúcar em área comercial situada em região de transição caatinga – cerrado. Cabral et al. (2013), no estado de São Paulo, realizaram medidas de ET em cana-de-açúcar pelo método de “Eddy Correlation”, em condições de cultivo de sequeiro. No entanto, esses estudos

fornece estimativas pontuais e específicas de ET válidas apenas para o local, não sendo adequadas para análises da produtividade da água em larga escala (Teixeira et al., 2016).

A quantificação do balanço de energia apenas com medições de campo, em cultivos explorados em larga escala, é dificultosa, ressaltando a importância do uso da ferramenta do sensoriamento remoto nessas situações, comprovada em diversos estudos (Rudorff et al., 2010; Claverie et al., 2012; Teixeira et al., 2014, 2016, Miranda et al., 2017).

A produção de biomassa é um indicador chave para qualquer ecossistema e seus valores são altamente variáveis tanto no espaço quanto no tempo. Em ambientes de oferta hídrica limitada, o desafio é a otimização da produção de biomassa com práticas de gerenciamentos sustentáveis (Teixeira et al., 2016). Para a quantificação da biomassa em larga escala, o conceito de eficiência de uso de radiação proposto por Monteith (1972), baseado na interceptação da radiação solar pelas plantas, tem sido aplicado a imagens de satélite, apesar das incertezas relativas às variabilidades de umidade do solo e cultivares. Estudos para a quantificação da produção de biomassa em cana-de-açúcar foram executados em diferentes regiões e sistemas de cultivo (Silva; Costa, 2012; Cabral et al., 2013).

Diversos estudos já foram conduzidos em diferentes condições edafoclimáticas e ambientes de produção para estimativa da ET, biomassa e produtividade da água em cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2013b, 2014; Andrade et al., 2014) utilizando-se da técnica do sensoriamento remoto. Porém, ainda não foram executados estudos visando à aplicação e validação da técnica nas condições edafoclimáticas e a nível de área comercial de cana-de-açúcar na microrregião de Teresina, PI.

Dessa forma, conduziu-se o estudo com o objetivo de estimar a ET, a produção de biomassa e a produtividade da água em cultivo comercial de cana-de-açúcar na Usina Comvap, União, PI, ciclo de cultivo 2011-2012, utilizando imagens do satélite Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) associadas a dados climáticos de estação agrometeorológica em campo.

## Metodologia

O estudo foi conduzido na Usina Comvap – Açúcar e Álcool Ltda, União, PI ( $4^{\circ}51'15''\text{S}$ ,  $42^{\circ}52'57''\text{W}$  e 60 m de altitude) – durante o ciclo de cultivo de agosto de 2011 a julho de 2012. Utilizou-se o plano de cultivo de três fazendas da usina: Centro do Sítio (90 talhões  $\approx 1.244$  ha), Sítio (94 talhões  $\approx 824$  ha) e Melancias (183 talhões  $\approx 1.630$  ha), perfazendo uma área total de 3.698 ha (Figura 1).

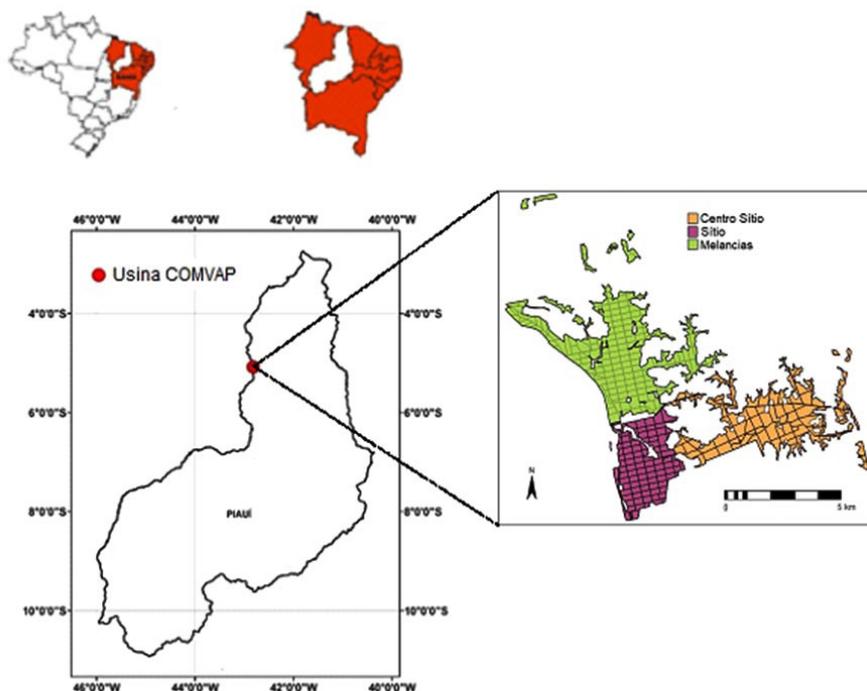


Figura 1. Localização da área de estudo. Usina Comvap, União, PI.

O clima da região, segundo a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), é do tipo C1sA'a' (subúmido seco, megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão). A estação chuvosa concentra-se de dezembro a maio, sendo março o mês com maior precipitação ( $\approx 300$  mm) e os meses de agosto a outubro os mais secos ( $\approx 25$  mm). Segundo registros históricos do período de 1980-2014, a precipitação total anual é de 1.342 mm. A temperatura média do ar anual é de 28,1 °C, com mínima de 20,5 °C (julho) e máxima de 35 °C (outubro) (Bastos; Andrade Junior, 2016).

Foram utilizadas imagens do satélite MODIS, obtidas dos produtos MOD13Q1 (resolução espacial de 250 m) e MOD16A2 (resolução espacial de 500 m), disponibilizadas de forma gratuita no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

Os dados climáticos de radiação solar global (RG), temperatura do ar (Ta), umidade relativa (RH) e velocidade do vento (u) foram obtidos de uma estação agrometeorológica automática, instalada próxima das áreas de cultivo. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi efetuada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

## **Estimativa da evapotranspiração (ET)**

Foram utilizadas imagens do produto MODIS MOD16A2, que fornece a ET total para períodos de 8 dias (ET8D), durante o período de 01/08/2011 a 31/07/2012, em um total de 46 imagens. As imagens tiveram suas escalas originais ajustadas para mm, multiplicando-se todos os pixels pelo fator de escala 0,1, com a calculadora raster do QGIS, versão 2.18 (QGIS..., 2018). Posteriormente, as imagens de ET8D, dentro da mesma quinzena, foram adicionadas para obtenção das imagens de ET para períodos de 16 dias (ET16D). Fez-se a retirada dos pixels contaminados com nuvens e posterior preenchimento com a ferramenta “preencher sem dados” do QGIS (QGIS..., 2018). As imagens de ET16D foram reprojatadas para ajuste da resolução espacial de pixels de 500 m para pixels de 250 m (QGIS..., 2018). Esse pro-

cedimento foi necessário para a estimativa da produtividade da água (WP), usando-se imagens com a mesma escala de tempo e resolução espacial, já que para a estimativa de biomassa (BIO), utilizou-se o produto MOD13Q1 fornecido na escala de 16 dias e resolução espacial de 250 m.

A estimativa da ET, fornecida pelo produto MOD16A2, é processada usando-se dois componentes: (i) dados meteorológicos e (ii) dados baseados em sensoriamento remoto, inter-relacionados por meio da equação 1 (Mu et al., 2007, 2011), que se constitui em uma modificação da equação descrita por Cleugh et al. (2007), que por sua vez é uma abordagem de Penman – Monteith para estimar ET (Allen et al., 1998).

$$ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

Em que:  $R_n$  é a radiação líquida diária ( $J m^{-2} d^{-1}$ ),  $G$  o fluxo de calor no solo ( $J m^{-2} d^{-1}$ ),  $\rho$  a densidade do ar ( $kg m^{-3}$ ),  $C_p$  o calor específico do ar a pressão constante ( $1013 J kg^{-1} K^{-1}$ ),  $e_s$  pressão de vapor de saturação (Pa),  $e_a$  pressão atual de vapor (Pa),  $\Delta$  a inclinação da curva de pressão versus temperatura do ar ( $Pa K^{-1}$ )  $\lambda$  a constante psicométrica ( $kPa K^{-1}$ ).

Os dados meteorológicos para a equação são sempre fornecidos pelo Global Modelling and Assimilation Office (GMAO) e incluem a radiação solar diária ( $RS$ ;  $MJ m^{-2} d^{-1}$ ), a temperatura média diária do ar ( $T$ ,  $^{\circ}C$ ), as temperaturas do ar diurna e noturna ( $TD$ ,  $TN$ ;  $^{\circ}C$ ), a temperatura mínima diária do ar ( $T_{min}$ ,  $^{\circ}C$ ) e a pressão de vapor ( $e_s$ ,  $e_a$ , kPa), todas na resolução espacial de  $1,0^{\circ}C \times 1,25^{\circ}C$ . Os dados de superfície são obtidos a partir de três produtos MODIS, com resolução espacial de  $500 m^2$  a  $1.000 m^2$ : MOD12Q1 (Friedl et al., 2002), MOD15A2 (Myneni et al., 1997) e MCD43B2/B3 (Salomon et al., 2006). Mais detalhes do algoritmo MOD16A2 podem ser obtidos em Mu et al. (2011).

## Estimativa da produção de biomassa

A produção de biomassa da cana-de-açúcar (kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) foi estimada pela equação 2 (Teixeira et al., 2016):

$$\text{BIO} = \varepsilon_{\max} E_f \text{APAR} 0.864 \quad (2)$$

Em que:  $\varepsilon_{\max}$  é a eficiência máxima de uso da luz, que considerou o valor médio de 2,14 g MJ<sup>-1</sup> para a cana-de-açúcar (Donaldson et al. 2008), e 0,864 é um fator de conversão de unidades (Teixeira et al., 2013b).

A fração evaporativa ( $E_f$ ), equação 3, foi incluída para levar em conta os efeitos da umidade do solo, sendo definida como o fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ), dividido pela energia disponível, que por sua vez é a diferença entre a  $R_n$  e o fluxo de calor do solo ( $G$ ):

$$E_f = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (3)$$

Em que:  $\lambda E$  é obtido pela transformação de ET em unidades de energia, com todos os termos de energia considerados em MJ m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>.

Para a estimativa dos valores diários de  $R_n$ , foram utilizadas as equações 4 e 5 propostas por Teixeira et al. (2014):

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_G - a_L \tau \quad (4)$$

$$a_L = d T_a - e \quad (5)$$

Em que:  $\alpha_0$  é o albedo na superfície,  $R_G$  a radiação solar global incidente na superfície ( $W m^{-2}$ ),  $\tau$  a transmissividade atmosférica de onda curta, obtida pela relação entre  $R_G$ ,  $W m^{-2}$  e a radiação solar no topo da atmosfera ( $Q_0$ ,  $W m^{-2}$ ),  $T_a$  a temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ),  $d$  e  $e$  coeficientes de regressão iguais a 6,99 e 39,93 (Teixeira et al., 2008).

Para o cálculo do albedo ( $\alpha_0$ ), foi aplicada a equação 6 (Valiente et al., 1995):

$$\alpha_0 = a + b\alpha_1 + c\alpha_2 \quad (6)$$

Em que:  $\alpha_2$  e  $\alpha_1$  representam as reflectâncias sobre os intervalos de comprimentos de onda nas regiões do infravermelho próximo ( $\alpha_2$ ) e vermelho ( $\alpha_1$ ) do espectro solar extraídas do produto MOD13Q1;  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes de regressão, considerados como 0,08, 0,41, 0,14, obtidos sob diferentes tipos de vegetação e condições climáticas (Teixeira, 2010). O produto MOD13Q1 forneceu imagens temporárias sem nuvens, em períodos de 16 dias, em todo o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar.

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) foi obtido da relação com a  $R_n$  (equação 7) (Teixeira et al., 2016):

$$\frac{G}{R_n} = a_G \exp(b_G \alpha_0) \quad (7)$$

Em que:  $a_G$  e  $b_G$  são coeficientes de regressão iguais a 3,98 e -25,47, respectivamente.

Valores diários de  $R_G$  foram utilizados para a estimativa da radiação fotosinteticamente ativa (PAR) em períodos de 24 horas (equação 8) (Teixeira et al., 2016):

$$PAR = hR_G \quad (8)$$

Em que:  $h = 0,44$  é a constante da equação de regressão encontrada nas condições brasileiras, que reflete a porção da  $R_G$ , que pode ser usada pela clorofila foliar no processo de fotossíntese (Teixeira et al., 2016).

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) foi calculada pela equação 9:

$$APAR = f_{PAR} PAR \quad (9)$$

O fator  $f_{PAR}$  é estimado a partir do NDVI (equação 10) (Teixeira et al., 2009):

$$f_{PAR} = iNDVI + j \quad (10)$$

Em que: NDVI é o índice de vegetação de diferença normalizada e os coeficientes  $i$  e  $j$  são iguais a 1,257 e -0,161, relatados para uma mistura de tipos de cultivos.

O NDVI é um indicador relacionado às condições de cobertura e de umidade do solo obtidas das imagens MODIS da seguinte forma (equação 11) (Teixeira et al., 2013a):

$$NDVI = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1} \quad (11)$$

Considerou-se também a estimativa de um indicador climático para se aferir o status de umidade do solo (WI) nas condições de cultivo da cana-de-açúcar (equação 12) proposto por Teixeira et al. (2015):

$$WI = P / ET \quad (12)$$

Esse indicador permite a caracterização do status de água no solo em relação à exigência hídrica da cultura, já que contabiliza a entrada (P) e a saída de água (ET) para a cultura, indicando a disponibilidade potencial de umidade na zona radicular da cana-de-açúcar.

## Estimativa da produtividade da água

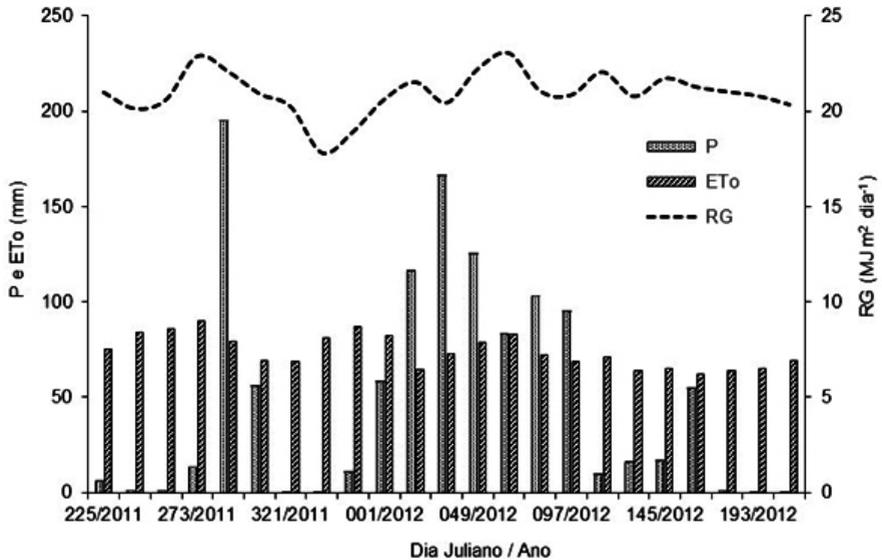
A produtividade da água (WP), com base na evapotranspiração e produção de biomassa da cultura, foi estimada pela equação 13 (Teixeira et al., 2013b, 2014):

$$WP = BIO / ET \quad (13)$$

## Resultados e Discussão

### Condições climáticas e fases de desenvolvimento da cultura

As tendências para os totais de precipitação (P) e ETo, em conjunto com as médias diárias de RG, são apresentadas na Figura 2. Os valores apresentados referem-se a cada período de 16 dias das imagens MODIS, dentro da estação de cultivo da cana-de-açúcar na Usina Comvap, microrregião de Teresina, PI, de agosto de 2011 a julho de 2012, em termos de dia do ano ou dia Juliano (DJ).



**Figura 2.** Variações sazonais dos valores médios de radiação solar global (RG), precipitação total (P) e evapotranspiração de referência (ETo)

Segundo Silva et al. (2011), as fases da cana-de-açúcar podem ser divididas em quatro: fase 1 – Germinação e estabelecimento; fase 2 – Perfilhamento; fase 3 – Crescimento vegetativo intenso e fase 4 - Amadurecimento e maturação. A fase 1 indica ativação e subsequente brotação do botão vegetativo. É influenciada pela umidade, temperatura e aeração do solo. A fase 2 começa a partir de cerca de 40 dias após o início do plantio e tem duração de até 120 dias. Variedade, RG, Ta, umidade do solo e fertilização influenciam essa fase. A fase 3 começa a partir de 120 dias após o plantio e se prolonga por até 270 dias, para cultivares com colheita aos 12 meses. Altos níveis de umidade do solo e RG favorecem o alongamento da cana durante essa fase. A fase 4, para variedade com ciclo de 12 meses, tem duração de cerca de 90 dias, estendendo-se dos 270 aos 360 dias após o plantio. Níveis elevados de RG e baixa disponibilidade de água no solo são favoráveis durante essa fase. Essa última fase caracteriza-se por uma atividade de crescimento mais lenta (Silva et al., 2011).

Os valores de RG variaram de 17,82 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, no início do mês de novembro (DJ 337/2011), a 22,88 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, observado no início de setembro (DJ 273/2011). Portanto, uma variação pequena e de apenas 5,06 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> ao longo do ciclo de cultivo. A média geral de RG, durante a estação de cultivo, foi de 20,97 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, valor dentro da faixa de variação da série histórica de dados de 1980-2014 para essa região (Bastos; Andrade Junior, 2016). A elevada disponibilidade e a reduzida variação da radiação solar global ao longo do ano são características típicas de regiões de baixa latitude (Pereira et al., 2002).

A variação dos valores de ETo seguiu a disponibilidade de RG ao longo do ciclo de cultivo. A ETo variou de 64,8 mm (≈ 4,0 mm d<sup>-1</sup>), durante o mês de janeiro (DJ 017/2012), a 89,7 mm (≈ 5,6 mm d<sup>-1</sup>), observado no início de setembro (DJ 273/2011). Ou seja, uma variação de apenas 1,6 mm d<sup>-1</sup> ao longo do ciclo de cultivo. A baixa variação da ETo é em parte explicada pela baixa amplitude observada na RG ao longo do ciclo de cultivo. Teixeira et al. (2016) observaram que taxas de RG acima de 20 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> promoveram valores de ETo acima de 4,5 mm d<sup>-1</sup>, sendo favorável à produção de biomassa.

A precipitação total, durante o ciclo de cultivo, foi de 1.128 mm, apesar de estar um pouco abaixo da média histórica da região (1.342 mm) (Bastos; Andrade Júnior, 2016), foi relativamente bem distribuída ao longo da fase 3 da cultura (DJ 001 a 097/2012), durante os meses de janeiro a março, com um total de 747 mm, que corresponde a 70% da precipitação ocorrida durante todo o ciclo de cultivo. Desde que com boa distribuição temporal, Teixeira et al. (2016) consideraram como adequada uma precipitação total durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar entre 1.100 mm e 1.500 mm.

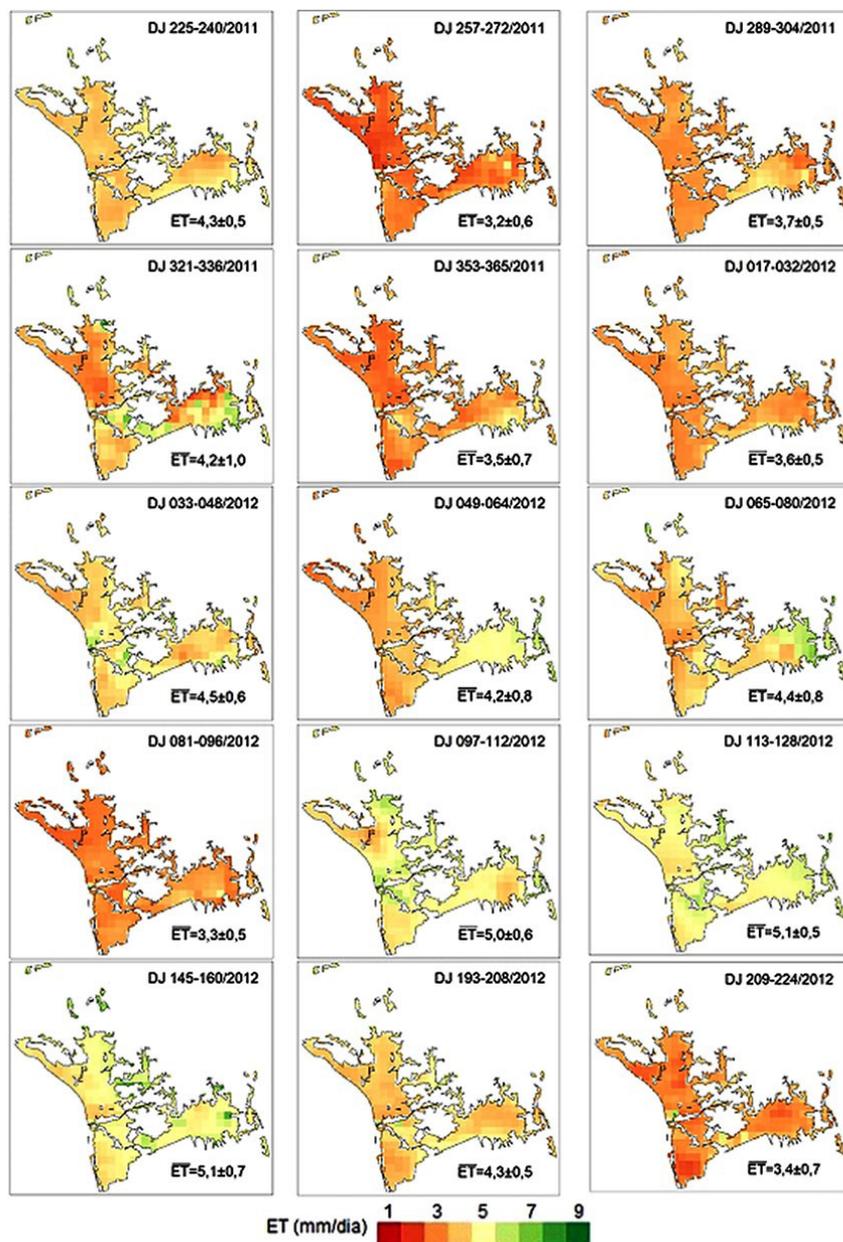
No início e no final do ciclo de cultivo, a precipitação foi reduzida, com raros eventos de chuvas esparsas, como observado em 289/2011 (195 mm) e 305/2011 (56 mm), que promoveram ligeiro acréscimo na produção de biomassa, já que a cultura ainda se encontrava no início da fase 2. Cabral et al. (2013) relataram uma redução de 13% na produção de biomassa da cana-

de-açúcar em relação à média regional no estado de São Paulo, como consequência da menor disponibilidade de água no solo, observada durante os 120 dias iniciais de crescimento da cana. Durante as fases de crescimento ativo, o déficit hídrico reduz a área foliar, afetando o número de perfilhos e de folhas por perfilho (Inman-Bamber; Smith, 2005), com consequente redução na produção de biomassa da cultura.

A ocorrência de déficit hídrico no solo durante a fase de maturação é desejável por promover o acúmulo de açúcares nos colmos (Tejera et al., 2007). O declínio da precipitação no final do ciclo de cultivo é favorável ao acréscimo da produtividade da água (WP) em cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2016).

## **Evapotranspiração da cultura (ET)**

A distribuição espacial das médias diárias de ET durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar é mostrada na Figura 3. Houve notória variação espacial e temporal da ET durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. Os maiores contrastes ocorreram nas imagens DJ 257 a 272/2011 ( $3,2 \pm 0,6$  mm) e DJ 113 a 160/2012 ( $\approx 5,1 \pm 0,5$  mm). Os maiores valores de ET foram observados sob elevada disponibilidade de radiação solar (alta demanda atmosférica) e precipitação (Figuras 2 e 3), que ocorreram no período de fevereiro a maio de 2012, quando a média diária de ET variou de  $4,5 \pm 0,6$  (DJ 033 a 048/2012) a  $5,1 \pm 0,5$  mm d<sup>-1</sup> (DJ 145 a 160/2012), justamente na fase de máximo desenvolvimento da cultura. As menores taxas de ET, oscilando de  $3,2 \pm 0,6$  mm d<sup>-1</sup> a  $3,7 \pm 0,5$  mm d<sup>-1</sup>, ocorreram no início (DJ 257 a 272/2011 a DJ 289 a 304/2011) e no final do ciclo de cultivo (DJ 209 a 224/2012) ( $3,4 \pm 0,7$  mm d<sup>-1</sup>). Ressalte-se a redução de ET ( $3,3 \pm 0,5$  mm) ocorrida durante a estação chuvosa (DJ 081 a 096/2012), por ocorrência de deficiência hídrica observada nesse período (Figura 3).



**Figura 3.** Distribuição espacial das médias diárias de evapotranspiração (ET) da cana-de-açúcar durante o ciclo de cultivo na Usina Comvap, União, PI.

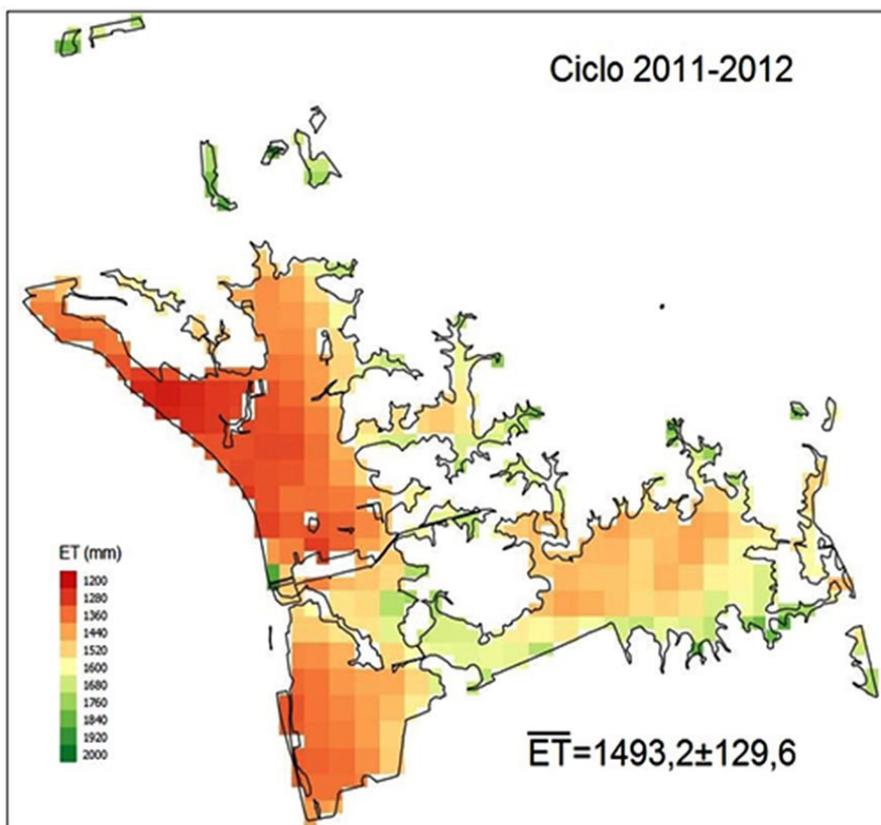
Quanto às variações espaciais da ET, os menores valores de desvios-padrão ( $\approx 0,5 \text{ mm d}^{-1}$ ) aconteceram no início da estação chuvosa (Fase 2), enquanto os mais altos valores ( $0,7 \text{ mm d}^{-1}$ ) ocorreram no final da estação chuvosa (Figuras 2 e 3). A ET média variou de  $3,2 \pm 0,6 \text{ mm d}^{-1}$  a  $5,1 \pm 0,5 \text{ mm d}^{-1}$ . A média de ET ao longo de todo o ciclo de cultivo foi de  $4,1 \pm 0,6 \text{ mm d}^{-1}$ . Em cultivo de cana-de-açúcar sob irrigação, Omary e Izuno (1995) relataram taxas de ET mínimas de  $0,7$  a  $1,5 \text{ mm d}^{-1}$  e máximas de  $4,5$  a  $4,6 \text{ mm d}^{-1}$ , com uma ET total de  $1.060 \text{ mm}$  durante o ciclo. As diferenças nas médias de ET podem ser atribuídas às diferentes variedades e condições de umidade do solo.

Em todo o ciclo de cultivo, a ET total média foi de  $1.493,2 \pm 129,6 \text{ mm}$  (Figura 4). Os maiores valores de ET, para períodos de 16 dias, variaram de  $71,5 \pm 8,7$  a  $85,6 \pm 10,3 \text{ mm}$  e foram registrados justamente durante a estação chuvosa, de fevereiro a maio de 2012 (DJ 033 a 145/2012) (Figura 5). A ET total da cana-de-açúcar variou de  $1.236,0 \text{ mm}$  a  $1.871,0 \text{ mm}$ , devido às diferenças em termos de cultivares, idade das plantas, ciclo de cultivo (cana planta até a 6ª folha), lâmina de irrigação aplicada e tratos culturais dispensados à cultura, tais como adubação e controle de ervas daninhas.

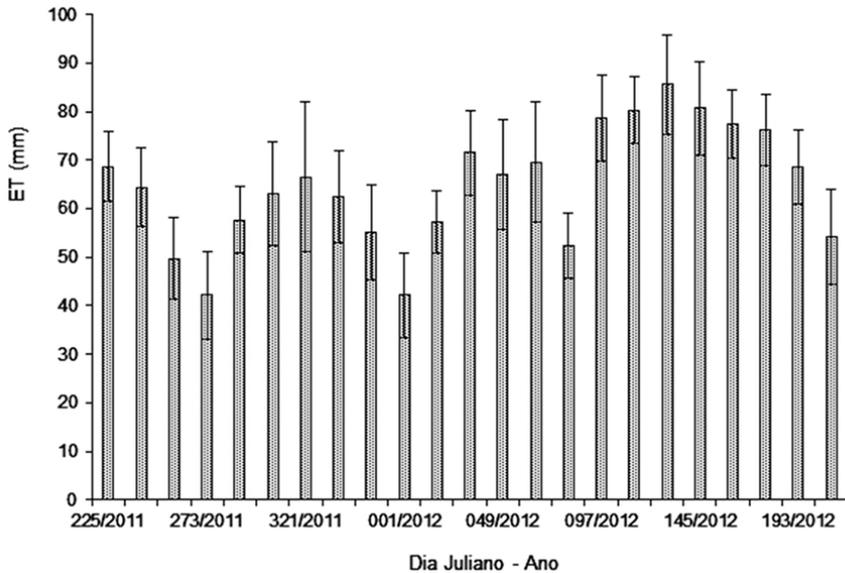
A lâmina de irrigação aplicada para garantir a germinação e a rebrota das plantas, durante a estação seca (agosto a novembro de 2011), foi de  $577 \text{ mm}$ , somada a precipitação de  $1.128 \text{ mm}$ , totalizou uma lâmina de  $1.705 \text{ mm}$  durante o ciclo de 2011 - 2012. Considerando a ET total média de  $1.493 \text{ mm}$ , houve aproveitamento de  $87,5\%$  da lâmina aplicada, indicando que a cultura recebeu suplementação hídrica adequada, com reflexos na produção de biomassa e produtividade da água. Teixeira et al. (2016) obtiveram ET total para cana-de-açúcar, ciclo de 400 dias, de  $1.180 \text{ mm}$ , inferior à obtida no presente estudo por se tratar de cultivo não irrigado.

A demanda hídrica da cana-de-açúcar, sob irrigação pivô central, variedade RB867515, ciclo de cana soca, foi avaliada por meio de balanço de energia (Bowen Ratio), na Usina Comvap, na safra 2013-2014, por

Andrade Junior et al. (2017). Observaram que a ET variou ao longo do ciclo de cultivo ( $\approx 500$  dias) de 1,96 mm a 7,47 mm, perfazendo uma média de  $5,31 \pm 1,03$  mm, muito próxima à registrada no presente estudo, realizado apenas com o uso de imagens de satélite, o que ressalta o potencial da técnica do sensoriamento remoto aplicado a estimativas de ET em larga escala.



**Figura 4.** Evapotranspiração total da cana-de-açúcar durante o ciclo de cultivo 2011-2012. Usina Comvap, União, PI.



**Figura 5.** Evapotranspiração total da cana-de-açúcar, para períodos de 16 dias, durante o ciclo de cultivo 2011-2012. Usina Comvap, União, PI.

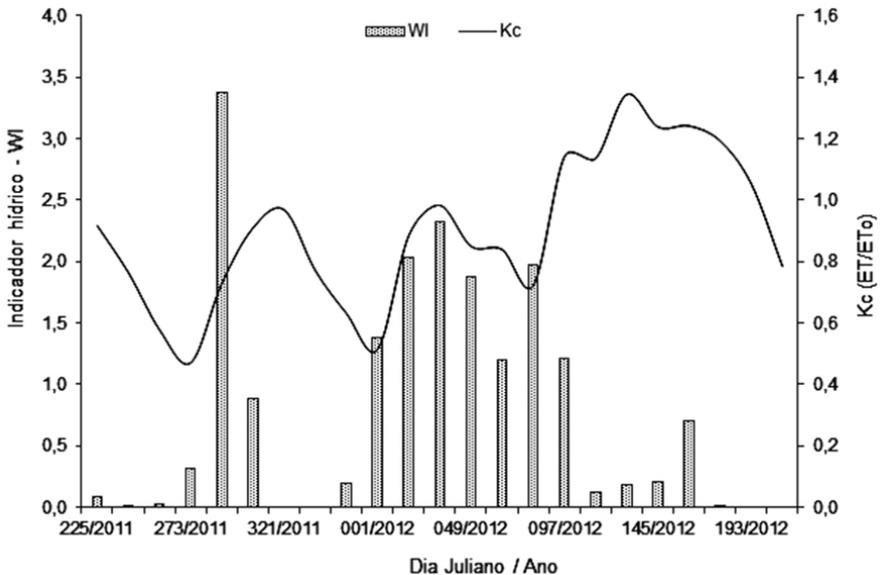
## Indicador de umidade do solo versus coeficiente de cultura

Os valores do indicador de umidade do solo (WI) e do coeficiente de cultura (Kc), ao longo do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, são apresentados na Figura 6. Observa-se concordância na variação dos valores de WI e de Kc durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. Ou seja, quando os valores de WI se apresentaram reduzidos, indicando baixa disponibilidade de água no solo, os valores de Kc seguiram a mesma tendência.

Os valores de Kc oscilaram em torno de 0,5 desde o início do ciclo (DJ 273/2011) até 1,3, na fase de máximo desenvolvimento foliar e cobertura do solo pelas folhas no final da estação chuvosa (DJ 129/2012). Na fase inicial da cultura (DJ 225 a 273/2011), os valores

de Kc foram iguais a 0,9, com redução gradual para 0,5, devido à aplicação da lâmina de irrigação para emergência das plantas e estabelecimento da cultura, as quais se concentram justamente nessa fase e se encerram com o início da estação chuvosa. A ocorrência de precipitação no período (DJ 289 a 305/2011) (Figura 2) promoveu o aumento da disponibilidade de água no solo, com consequente aumento dos valores de WI e de Kc, que chegaram a 3,4 e 0,9, respectivamente.

Os valores de WI e de Kc voltaram a ter acréscimo durante a estação chuvosa (DJ 001 a 097/2012), os quais atingiram valores máximos de 2,3 e 1,0, respectivamente. Ao final da estação chuvosa (DJ 113 a 129/2012), foram observados os valores máximos de Kc (1,1 a 1,3), justamente na fase de máximo desenvolvimento foliar e cobertura do solo pelas plantas. Com o término da estação chuvosa, os valores de WI e de Kc foram reduzidos até a colheita (Figura 6).



**Figura 6.** Indicador de umidade do solo (WI) e coeficiente de cultura (Kc) da cana-de-açúcar durante o ciclo de cultivo (agosto-2011 a julho-2012). Usina COMVAP, União, PI.

Os valores de  $K_c$  de cana-de-açúcar, quando a cultura cobre totalmente o solo e as condições de disponibilidade de água no solo são adequadas, são reportados como variando de 1,1 a 1,5 (Allen et al., 1998; Inman-Bamber; McGlinchey, 2003), predominando valores de 1,25, dependendo das condições climáticas (Eksteen et al., 2014), condição essa também verificada no presente estudo.

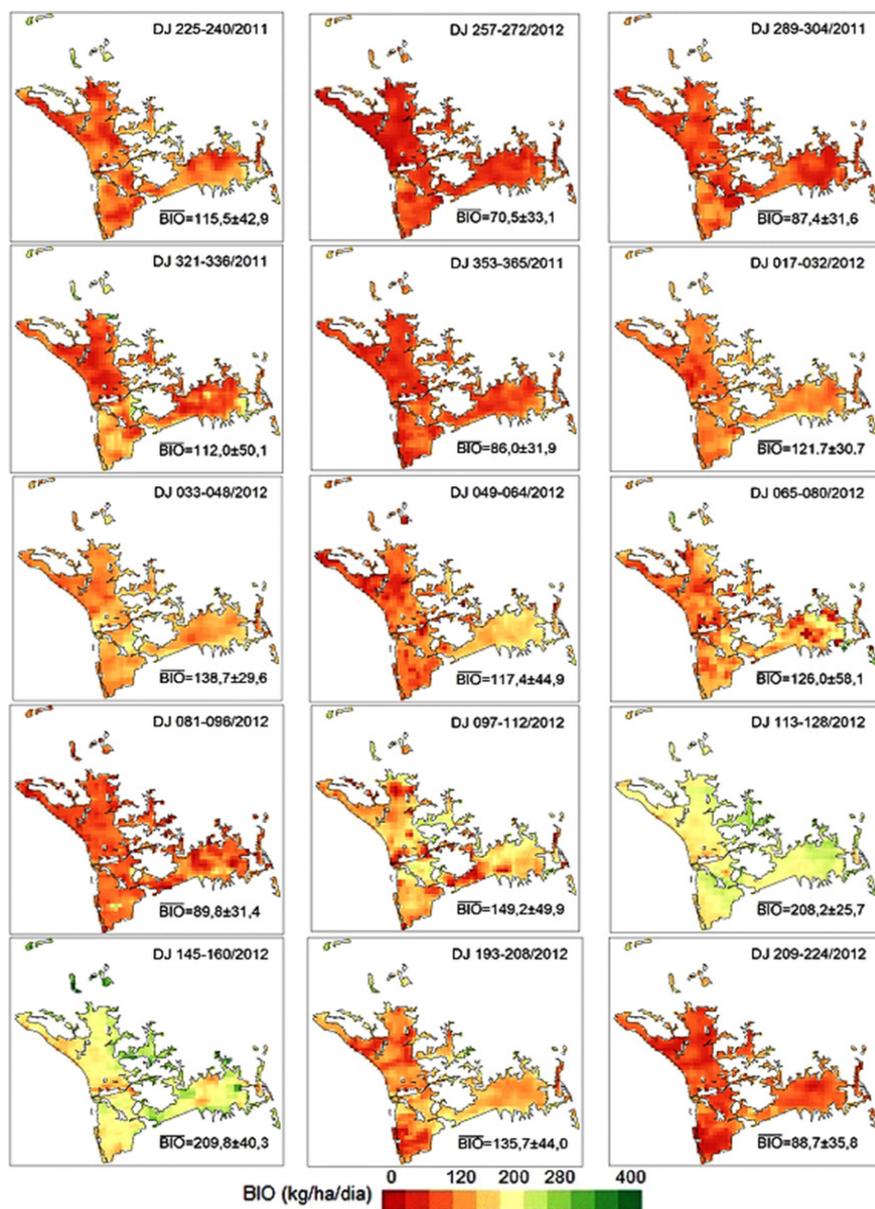
Teixeira et al. (2016), usando imagens MODIS e o algoritmo SAFER, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, obtiveram valores máximos de  $K_c$  da ordem de 1,2 na fase de máximo desenvolvimento. O  $K_c$  médio durante o ciclo foi de 0,8, alcançado com valores de requerimento de água atendido pela precipitação da ordem de 90% da ET da cultura ( $WI = 0,9$ ). Como alternativa para elevar a produtividade da água na cultura, os autores recomendam a adoção da prática da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, com métodos mais eficientes tais como o gotejamento.

## **Produção de biomassa**

A distribuição espacial das médias diárias de biomassa da cana-de-açúcar (BIO), para as imagens MODIS de 16 dias, é apresentada na Figura 7. Como há uma relação estreita entre ET e BIO, os períodos com BIO mais elevada são os mesmos com ET elevados (Teixeira et al., 2013b).

Os valores mais baixos de BIO ocorreram durante as fases 1 e 2 da cultura (DJ 225 a 365/2011) e no final da fase 4 (DJ 209 a 224/2012), quando variaram de  $70,5 \pm 33,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  a  $88,7 \pm 35,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Por outro lado, os maiores valores de BIO foram obtidos justamente no final da estação chuvosa (DJ 113 a 160/2012), que oscilaram em torno de  $208,2 \pm 25,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  a  $209,8 \pm 40,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .

A ocorrência de precipitação proporciona níveis adequados de disponibilidade de água no solo, o que favorece a produção de biomassa da cana-de-açúcar, exceto no final da fase 4, quando a redução da precipitação promove deficiência hídrica no solo, desejável para promover a acumulação de açúcares nos colmos (Teixeira et al., 2016).



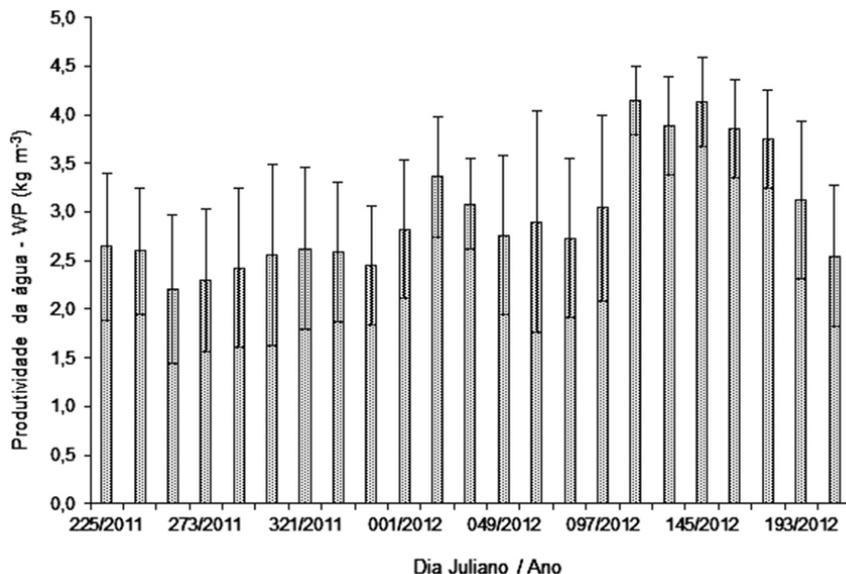
**Figura 7.** Distribuição espacial das médias diárias de biomassa (BIO) da cana-de-açúcar, durante o ciclo de cultivo, na Usina Comvap, União, PI.

Ressalta-se que, mesmo durante a estação chuvosa, a redução da precipitação ocorrida no período DJ 081 a 096/2012 (Figura 2), que promoveu a diminuição do indicador de disponibilidade de água (Figura 6) e da ET da cultura (Figuras 4 e 5), foi responsável pela redução na produção de biomassa ( $89,8 \pm 31,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) (Figura 7). Redução na produção de biomassa em cana-de-açúcar decorrente da redução dos valores de WI e ET também foi constatada por Teixeira et al. (2016).

Os valores de biomassa produzidos pela cana-de-açúcar relatados no presente estudo ( $70,5 \pm 33,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  a  $209,8 \pm 40,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) foram bem próximos aos obtidos por Teixeira et al. (2016) ( $50 \pm 15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  a  $211 \pm 56 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ), devido às similaridades em termos de ET ocorridas em função da disponibilidade de água no solo. Na África do Sul, Donaldson et al. (2008) relataram variações na produção de biomassa de cana-de-açúcar de  $90 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  a  $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , devido ao potencial produtivo diferenciado das cultivares avaliadas. O efeito da disponibilidade de água no solo sobre a produção de biomassa varia também com as datas de plantio e colheita (Andrade et al., 2014).

## Produtividade da água

Os valores médios e respectivos desvios-padrão de produtividade da água (WP) na cana-de-açúcar, durante o ciclo de cultivo de agosto-2011 a julho-2012 na Usina Comvap, União, PI, são apresentados na Figura 8. Os valores de WP de cana-de-açúcar variaram de  $2,21 \pm 0,77 \text{ kg m}^{-3}$  a  $2,64 \pm 0,77 \text{ kg m}^{-3}$  na fase 1 e no início da fase 2 (DJ 225 a 321/2011). Durante o final da fase 2 até a metade da fase 3, observou-se acréscimo na WP para  $3,36 \pm 0,62 \text{ kg m}^{-3}$  (DJ 017/2012). Na metade final da fase 3, registraram-se as maiores médias de WP ( $4,15 \pm 0,36 \text{ kg m}^{-3}$ ). Durante a fase 4, os valores médios de WP voltaram a sofrer ligeira redução para  $2,55 \pm 0,73 \text{ kg m}^{-3}$ . A WP média durante todo o ciclo de cultivo foi de  $2,98 \pm 0,70 \text{ kg m}^{-3}$  (Figura 8).



**Figura 8.** Valores médios e desvios-padrão de produtividade da água (WP) na cana-de-açúcar durante o ciclo de cultivo de agosto-2011 a julho-2012 na Usina Comvap, União, PI.

As médias de WP obtidas neste estudo foram inferiores às alcançadas por Teixeira et al. (2016), as quais variaram de 2,5 kg m<sup>-3</sup>, durante a fase 1, a 5,4 kg m<sup>-3</sup>, durante a fase 3, com média de 4,4 kg m<sup>-3</sup> durante todo o ciclo. Essa tendência é reflexo da variabilidade da ET e BIO nas duas regiões de produção. Como houve certa similaridade entre as duas regiões na produção de biomassa, a variação da WP da cana-de-açúcar deveu-se ao comportamento diferenciado da ET. Em São Paulo, em condições de sequeiro, a ET total durante o ciclo de cultivo de 400 dias foi 1.180 mm (Teixeira et al., 2016), enquanto na Usina Comvap, em cultivo irrigado, a ET total em um ciclo de 365 dias foi 1.493 mm. Ou seja, para a produção da mesma quantidade de biomassa, utilizou-se mais água na Usina Comvap. Chooyok et al. (2013), em estudos conduzidos na Tailândia, obtiveram valores de WP em cana-de-açúcar, oscilando de 5,8 a 6,5 kg m<sup>-3</sup>. Esses autores relatam que a WP na cana-de-açúcar é bastante variável e depende do clima, do solo e da data de plantio.

Por outro lado, as maiores médias de WP foram iguais a  $4,15 \pm 0,36 \text{ kg m}^{-3}$ , bem próximas das obtidas por Cabral et al. (2013) ( $4,2 \text{ kg m}^{-3}$ ), em dois ciclos de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Chooyok et al. (2013) consideram como aceitáveis valores médios de WP em cana-de-açúcar em torno de  $4,8 \text{ kg m}^{-3}$  durante todo o ciclo de cultivo. A concordância entre esses resultados indica que o uso de imagens MODIS possibilita estimativas adequadas de ET e de BIO em cana-de-açúcar, mesmo sem o uso da banda térmica, e em escala menor de áreas de cultivo de cana-de-açúcar, como na Usina Comvap, União, PI.

Contudo, é possível incrementos maiores na produtividade da água em cana-de-açúcar desde que sejam adotados métodos de irrigação mais eficientes na aplicação de água, tais como o gotejamento subsuperficial, notadamente para suprir a exigência hídrica da cultura nas fases iniciais 1 e 2 de desenvolvimento da cultura (antes do estabelecimento da estação chuvosa). Nessas fases, a aplicação de água deverá promover incrementos consideráveis na produção de biomassa, já que há elevada oferta de radiação solar (Figura 2), especialmente sendo a cana-de-açúcar uma planta do grupo de metabolismo fotossintético C4, que apresenta elevada taxa de conversão de energia solar em biomassa (Inman-Bamber; Smith, 2005).

## Conclusões

A utilização dos produtos MODIS MOD13Q1 e MOD16A2 permite estimativas adequadas da evapotranspiração, produção de biomassa e produtividade da água na cana-de-açúcar, em área comercial, nas condições edafoclimáticas da microrregião de Teresina, PI.

## Referências

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE CANA-DE-AÇUCAR: Safra 2016/2017: Quarto levantamento, v. 3, n. 4, p. 1-77, abr. 2017. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 28 set. 2018

ADAK, T.; KUMAR, G.; CHAKRAVARTY, N. V. K.; KATIYAR, R. K.; DESHMUKH, P. S.; JOSHI, H. C. Biomass and biomass water use efficiency in oilseed crop (*Brassica juncea* L.) under semi-arid microenvironments. **Biomass and Bioenergy**, v. 51, p. 154-162, Apr. 2013.

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

ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; MENEZES, S. J. M. da C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o SEBAL e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 433-442, 2014.

ANDRADE JUNIOR, A. S. de; NOLETO, D. H.; BASTOS, E. A.; MOURA, M. S. B. de; ANJOS, J. C. R. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, p. 217-226, ago. 2017.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. **Boletim agrometeorológico de 2015 para o município de Teresina, Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2016. 38 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 239).

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R. da; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P. C.; BATISTA, E. R. Fluxes of CO<sub>2</sub> above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182-183, p. 54-66, Dec. 2013.

CHOOYOK, P.; PUMIJUMNOG, N.; USSAWARUJIKULCHAI, A. The water footprint assessment of ethanol production from molasses in Kanchanaburi and Supanburi province of Thailand. **APCBEE Procedia**, v. 5, p. 283-287, 2013.

CLAVERIE, M.; DEMAREZ, V.; DUCHEMIN, B.; HAGOLLE, O.; DUCROT, D.; MARAIS-SICRE, C.; DEJOUX, J. F.; HUC, M.; KERAVEC, P.; BEZIAT, P.; FIEUZAL, R.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using spatial and temporal resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 884-857, Sep. 2012.

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, n. 3, p. 285-304, Feb. 2007.

DONALDSON, R. A.; REDSHAW, K. A.; RHODES, R.; VAN ANTWERPEN, R. Season effects on productivity of some commercial South African sugarcane cultivars. I: Biomass and radiation use efficiency. **Proceedings of the South African Sugar Technologists**, v. 81, p. 517-527, 2008.

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

FRIEDL, M. A.; MCLVER, D. K.; HODGES, J. C. F.; ZHANG, X. Y.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A.; GAO, F.; SCHAAF, C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 287-302, Nov. 2002.

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, n. 2, p. 125-138, Aug. 2003.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, June 2005.

MIRANDA, R. de Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. de; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Reliability of MODIS evapotranspiration products for heterogeneous dry forest: a study case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, v. 2017, Article ID 9314801, 14 p., Jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/9314801>>. Acesso em: 20 out. 2018.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, n. 3, p. 747-766, Dec. 1972.

MU, Q.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, Dec. 2007.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, Aug. 2011.

MYNENI, R. B.; KEELING, C. D.; TUCKER, C. J.; ASRAR, G.; NEMANI, R. R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. **Nature**, v. 386, n. 6626, p. 698-702, Apr. 1997.

OMARY, M.; IZUNO, F. T. Evaluation of sugarcane evapotranspiration from water table data in the everglades agricultural area. **Agricultural Water Management**, v. 27, n. 3-4, p. 309-319, July 1995.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guibá: Agropecuária, 2002. 487 p.

QGIS user guide 2.18. Chicago: Open Source Geospatial Foundation, 2018. Disponível em: <[http://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user\\_manual/](http://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, Apr. 2010.

SALOMON, J. G.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; GAO, F.; JIN, Y. Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using combined observations from the aqua and terra platforms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 1555-1565, June 2006.

SILVA, A. L. C. de; COSTA, W. A. J. M. de. Growth and radiation use efficiency of sugarcane under irrigated and rain-fed conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**, v. 14, n. 3, p. 247-254, Sep. 2012.

SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. de S.; GOMES JUNIOR, W. F. Demanda hídrica e eficiência do uso da água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, p. 1257-1265, 2011.

TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3-4, p. 477-490, Mar. 2009.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 1-2, p. 110-127, Nov. 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G. P. (Ed.). **Remote sensing of energy fluxes and soil moisture content**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013a. p. 165-188.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. de C.; BOLFE, E. L.; SILVA, G. B. S. da. Water balance indicators from MODIS images and agrometeorological data in Minas Gerais state, Brazil. In: SPIE REMOTE SENSING, 17., 2015, Toulouse. **Remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology**: proceedings. Bellingham: SPIE, 2015. v. 9637, 96370O. doi: 10.1117/12.2194491. Disponível em: <<https://doi-org.ez103.periodicos.capes.gov.br/10.1117/12.2194491>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v. 6, p. 84-95, 2016. doi: 10.14355/ijrsa.2016.06.009.

TEIXEIRA, A. H. de C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F. Large-scale water productivity assessments with MODIS images in a changing semi-arid environment: a Brazilian case study. **Remote Sensing**, v. 5, n. 11, p. 5783–5804, 2013b.

TEIXEIRA, A. H. de C.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L.; CRUZ, C. R. Coupling MODIS images and agrometeorological data for agricultural water productivity analyses in the Mato Grosso State, Brazil. In: SPIE REMOTE SENSING, 16., 2014, Amsterdam. **Remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology**: proceedings. Bellingham: SPIE, 2014. v. 9239, 92390W. doi: 10.1117/12.2065967. Disponível em: <<https://doi-org.ez103.periodicos.capes.gov.br/10.1117/12.2065967>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

TEJERA, N. A.; RODES, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v. 102, n. 1, p. 64-72, Apr. 2007.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in climatology, v. 8, n. 1).

VALIENTE, J. A.; NUNEZ, M.; LOPEZ-BAEZA, E.; MORENO, J. F. Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat-visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 6, p. 1147-1166, 1995.



---

*Meio-Norte*

Ministério da  
**Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

CGPE 14724