



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p521-526>

Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba

Vicente de P. R. da Silva¹, Monik F. de Albuquerque¹, Lincoln E. de Araújo²,
João H. B. da C. Campos³, Silvia L. A. Garcêz¹ & Rafaela S. R. Almeida⁴

¹ Unidade Acadêmica Ciências Atmosféricas/Centro de Tecnologia e Recursos Naturais/Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. E-mail: vicente@dca.ufcg.edu.br (Autor correspondente); monik-albuquerque@hotmail.com; silviagarcez@gmail.com

² Departamento de Engenharia e Meio Ambiente/Universidade Federal da Paraíba. Rio Tinto, PB. E-mail: lincolneloi@yahoo.com.br

³ Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde/Universidade Estadual da Paraíba. Araruna, PB. E-mail: jhugocampos@pesquisador.cnpq.br

⁴ Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais/Centro de Tecnologia e Recursos Naturais/Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. E-mail: rafasilver@gmail.com

Palavras-chave:

eficiência do uso de água
modelo Cropwat
evapotranspiração

RESUMO

O conceito de pegada hídrica tem tido bastante interesse atualmente haja vista que a água doce é um recurso global utilizado em todos os ramos de atividades e pode ser fundamental para ajudar a compreender como as atividades e os produtos estão relacionados com a escassez de água. O objetivo deste estudo é comparar as medições da pegada hídrica da cana-de-açúcar derivadas pelo método tradicional utilizado na sua estimativa usando o balanço hídrico completo no solo em condições de campo. O experimento de campo foi realizado na Fazenda Capim II, localizada no litoral do estado da Paraíba, Brasil, no período de outubro de 2009 a agosto de 2010 com cana-de-açúcar, cultivar RB 92 579. Os resultados evidenciaram que os valores da pegada hídrica verde e cinza diminuem à medida que há acréscimo na lâmina de irrigação. Inversamente, os valores da pegada hídrica azul aumentam sempre que há incremento na lâmina de irrigação. A pegada hídrica da cana-de-açúcar obtida com base no modelo CROPWAT, superestima os valores da pegada hídrica verde e azul e subestima os valores da pegada hídrica cinza, obtidos com base no balanço hídrico do solo.

Key words:

water use efficiency
cropwater model
evapotranspiration

Measurements and modelling of water footprint of sugarcane cultivated in Paraíba State

ABSTRACT

The water footprint concept has gained interest because the freshwater is a global resource utilized in all activities and can be fundamental in helping to understand how activities and products are related to water scarcity. The purpose of this study is to compare the sugarcane water footprint measurements derived by the traditional method used for its estimation and using the complete water balance in the soil under field conditions. The field experiment was carried out at the Capim II farm located in the coastal area of state of Paraíba, Brazil, during the period from October 2009 to August 2010 with sugarcane. The results indicated that the green and gray water footprint values decrease as there is an increase in irrigation depth. Inversely, the blue water footprint values increase as there is an increase in irrigation depth. The sugarcane water footprint based on the CROPWAT model overestimates green and blue water footprint values and underestimates the gray water footprint values obtained from the soil water balance.

INTRODUÇÃO

A produção mundial de cana-de-açúcar totaliza aproximadamente 1,5 bilhão de toneladas por ano e está localizada, predominantemente, na faixa tropical do planeta, nos países em desenvolvimento da América Latina, África e do Sudeste Asiático. A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância socioeconômica no Brasil; seus principais derivados são o açúcar (alimento) e o álcool (hidratado e anidro), imprescindíveis ao mercado mundial (Silva et al., 2013c). Outros produtos, também originados desta cultura, são a aguardente, o bagaço, que é utilizado principalmente como fonte de energia, a vinhaça, que serve de fertilizante, o plástico e o papel. Dependendo do clima, as necessidades de água da cana-de-açúcar são de 1500 a 2500 mm distribuídos de maneira uniforme durante a temporada de desenvolvimento (Silva et al., 2012).

A pegada hídrica (PH) é um indicador de uso de água doce que não visa apenas ao uso direto de água dos consumidores ou dos produtos mas também ao uso indireto da água, através da água virtual (Zhao et al., 2009; Silva et al., 2013a). Além disto, ela pode ser considerada um abrangente indicador de apropriação de recursos hídricos, bem como uma medida tradicional e restrita de recursos hídricos (Hoekstra & Hung, 2005; Hoekstra, 2009). A pegada hídrica é composta por três tipos de uso da água, designados como pegada hídrica azul, verde e cinza (Silva et al., 2013a). A verde é o volume de águas pluviais armazenada no solo e que se evapora dos campos de cultivo; a azul é o volume de água doce extraído das massas de água, como rios e lagos, que é utilizada, mas não recuperada. Esta pegada é representada sobretudo pela evaporação da água dos campos de cultivo e a pegada hídrica cinza é o volume da água contaminada como resultado dos processos de produção (Chapagain & Hoekstra, 2008).

A maioria dos usos de água ocorre na produção agrícola destacando-se também um número significativo de volume de água consumida e poluída nos setores industriais e domésticos (Silva et al., 2013b). A pegada hídrica global da produção agrícola no período de 1996-2005 foi 7404 Gm³a⁻¹, sendo 78% verde, azul 12 e 10% cinza. O trigo tem a maior participação no volume total, que é de 1.087 Gm³a⁻¹ (70% verde, 19% azul e cinza 11%). As outras culturas com grande pegada hídrica são o arroz (992 Gm³a⁻¹) e o milho (770 Gm³a⁻¹). Por outro lado, as principais culturas com a menor contribuição de água verde para o consumo total de água são a palma (43%) e o algodão (64%) (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Na avaliação da pegada hídrica mundial do algodão para o período de 1997-2001, esses autores mostraram que o consumo mundial de algodão requer 256 Gm³ de água por ano, dos quais 42% são de água azul, 39% são de água verde e 19% de poluentes componente cinza (Chapagain et al., 2006). Já estudos realizados na Espanha por Chapagain & Orr (2009) sinalizam que a pegada hídrica para um quilo de tomate produzido é de 236 L de água. Por outro lado, estudos realizados por Chapagain & Hoekstra (2011) estimaram a pegada hídrica para a produção de arroz, que é uma das culturas com maior consumo de água do mundo e obtiveram resultados de 784 km³a⁻¹ de pegada hídrica global, com média de 1325 m³t⁻¹, que corresponde a 48% de água verde, 44% de

água azul e de 8% de cinza. Assim, observa-se que a média de cada componente da pegada hídrica depende da cultura, dos sistemas de gestão de água, da localização e do clima local.

A maioria dos usos de água ocorre na produção agrícola, destacando-se o consumo e a poluição de diversos setores industriais e domésticos (Silva et al., 2013b). Neste aspecto, o conceito de pegada hídrica tem sido usado como indicador do consumo de água de pessoas e produtos em diversas partes do mundo (Oel et al., 2009; Zhao et al., 2009; Feng et al., 2011). Entretanto, este tema ainda é, no Brasil, totalmente incipiente; desta forma e diante da expressiva importância da cana-de-açúcar no cenário econômico brasileiro e de seu elevado consumo de água, torna-se necessário um estudo mais aprofundado das necessidades hídricas da cana-de-açúcar de forma a identificar soluções de manejo que possibilitem a melhoria de produtividade. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é determinar a pegada hídrica da cultura da cana-de-açúcar e comparar as medições da pegada hídrica com aquelas estimadas com base no modelo CROPWAT.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos de campo foram realizados na Fazenda Capim II com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). A variedade de cana-de-açúcar estudada foi a RB 92579, muito difundida na região Nordeste do Brasil. A precipitação média anual na região é superior a 1500 mm, com seis meses secos; o clima é quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com seca atenuada (Silva, 2004), com precipitação de 621 mm durante o período de estudo. Os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados) do INPE, localizadas na Fazenda Capim II, no Estado da Paraíba. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso compreendendo uma parcela de sequeiro e quatro tratamentos de irrigação, com três repetições utilizando-se a evapotranspiração de referência (ET₀) no manejo de água, da seguinte forma: sistema de sequeiro e irrigações de 25, 50, 75 e 100% da ET₀. O sistema de irrigação utilizado foi o de aspersão, tipo pivô central rebocável.

A pesquisa foi desenvolvida no primeiro ciclo de produção da cana-de-açúcar (cana-planta). O plantio foi realizado em outubro de 2009 e a última coleta de dados em setembro de 2010, 330 dias após o plantio, um mês antes da colheita. O espaçamento utilizado foi de 1,00 m entre as fileiras, resultando numa densidade de 16 gemas por metro linear. No preparo da área foram utilizadas apenas uma subsolagem e uma gradagem.

A evapotranspiração da cana-de-açúcar (ET_c) foi determinada pelo método do balanço hídrico no solo, expresso por (Azevedo et al., 2006):

$$ET_c = P + I + A - D \pm \Delta W \pm R \quad (1)$$

em que:

- P - precipitação pluviométrica
- I - lâmina de irrigação
- A - ascensão capilar
- D - drenagem profunda

ΔW - variação da lâmina de água disponível no solo
 R - escoamento superficial

$$PH_{\text{azul}} = \frac{NCH_{\text{azul}}}{P} \quad (7)$$

Todos os componentes da Eq. 1 são expressos em mm d^{-1} . O escoamento superficial foi considerado nulo visto que a topografia do terreno era plana; P foi monitorado com um pluviômetro instalado na área experimental e ΔW determinado com base no perfil de umidade do solo. O volume de controle considerado para elaboração do balanço hídrico corresponde à camada de solo compreendida entre a superfície e a profundidade efetiva do sistema radicular. A partir da trincheira aberta no interior da parcela, foi determinada a profundidade média do sistema radicular da cultura, de 0,6 m. Maiores detalhes sobre a técnica do balanço hídrico podem ser obtidos em Azevedo et al. (2008).

A umidade do solo foi monitorada utilizando-se sondas FDR (Frequency Domain Reflectometry), modelo PR2/6, Delta-T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK), com três tubos de acesso instalados a 0,20 m de cada ponto de observação, nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 cm. As medições da umidade do solo foram realizadas a cada 2-3 dias, durante o ciclo da cultura.

A evapotranspiração verde foi calculada como o mínimo entre os valores da evapotranspiração total da cultura (ET_c) e a precipitação efetiva (P_{eff}), ou seja:

$$ET_{\text{verde}} = \min(ET_c, P_{\text{eff}}) \quad (2)$$

Por outro lado, a evapotranspiração azul foi calculada pelo máximo da função abaixo:

$$ET_{\text{azul}} = \max(0, ET_c - P_{\text{eff}}) \quad (3)$$

De acordo com a Eq. 3, quando a precipitação efetiva é maior que a evapotranspiração da cultura, como o cultivo em condições de sequeiro, a ET_{azul} é igual a zero.

Em condições ótimas de crescimento da cultura a necessidade hídrica da cultura (NHC) será igual à evapotranspiração total ao longo do ciclo da cultura (ET), conforme expresso pelas Eqs. 4 e 5. O fator 10 é empregado para converter milímetros de água em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

$$NCH_{\text{verde}} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{\text{verde}} \quad (4)$$

$$NCH_{\text{azul}} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{\text{azul}} \quad (5)$$

em que:

L - número de dias do ciclo da cultura

As componentes verde e azul da pegada hídrica da cultura da cana-de-açúcar foram calculadas pelas equações abaixo.

$$PH_{\text{verde}} = \frac{NCH_{\text{verde}}}{P} \quad (6)$$

em que

NCH_{verde} e NCH_{azul} - necessidades hídricas verde e azul, respectivamente, da cultura ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$)

P - produtividade da cultura (t ha^{-1})

A pegada hídrica cinza é um indicador do grau de poluição da água doce, calculada em função da carga de poluente e da produtividade da cultura (Hoekstra, 2011), de acordo com a equação seguinte:

$$PH_{\text{cinza}} = \frac{\left(\frac{CP}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \right)}{P} \quad (8)$$

em que:

CP - carga de poluentes que entra no sistema (t a^{-1})

C_{max} - concentração máxima aceitável de poluentes no sistema (t a^{-1}), considerada como 10% da taxa de fertilizante aplicado à cultura (Chapagain & Hoekstra, 2006)

C_{nat} - concentração natural em um corpo de água

P - produtividade da cultura (t ha^{-1})

Caso as concentrações naturais não sejam conhecidas com precisão mas que se supõe que sejam baixas, admite-se que a concentração natural da massa de água receptora é nula ($C_{\text{nat}} = 0$). A evapotranspiração da cultura para o cálculo dos componentes da pegada hídrica da cana-de-açúcar foi obtida também com base no software CROPWAT 8.0. Este software foi desenvolvido por uma divisão da FAO que calcula a quantidade de água necessária para a irrigação. Os procedimentos para o cálculo da evapotranspiração de referência são baseados na metodologia apresentada por Allen et al. (1998). A precipitação efetiva foi de 621 mm, determinada utilizando-se o método do Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA SCS), por ser considerado o método mais utilizado e preciso.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da evapotranspiração diária da cana-de-açúcar estão apresentados na Tabela 1. As fases fenológicas das plantas é um dos fatores que atuam na evapotranspiração da cultura. Nota-se, portanto, que a fase inicial (I) apresenta

Tabela 1. Evapotranspiração diária ($ET_{\text{diário}}$, mm d^{-1}) da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25, 50, 75 e 100% da evapotranspiração de referência (ET_0) em diferentes fases fenológicas de desenvolvimento da cultura

Fases fenológicas	Sequeiro	ET ₀			
		25%	50%	75%	100%
I	0,67	0,68	1,1	1,28	1,39
II	3,65	3,76	3,9	3,84	4,34
III	3,76	4,38	4,9	5,81	6,28
IV	3,12	3,56	4,5	4,51	4,54
Média	2,80	3,1	3,6	3,86	4,14

os menores valores de evapotranspiração da cultura; já na fase fenológica de desenvolvimento médio da cultura (III) a evapotranspiração total e a diária atingem seu ponto máximo cuja razão disto é o fato de que, nesta fase, a cultura atingiu o máximo de desenvolvimento foliar e, portanto, maior área evapotranspiratória.

Na fase fenológica inicial, devido a cultura ainda se encontrar pouco desenvolvida e o solo descoberto, os valores da ET variaram em cultivo de sequeiro entre 0,67 e 1,39 mm d⁻¹ (100% ETo), porém com o crescimento da cultura, o consumo de água aumentou rapidamente até atingir seu volume máximo na fase fenológica de crescimento médio da cultura (III), com valores variando entre 3,76 e 6,28 mm d⁻¹, respectivamente, nos tratamentos de sequeiro e de 100% ETo; em seguida, no estágio final, a ETc da cultura decresceu de forma acentuada atingindo valores de 2,8; 3,1; 3,6 e 3,86, respectivamente, nos tratamentos de sequeiro, 25, 50, 75 e 100% ETo.

A Tabela 2 exhibe as componentes verde e azul das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar cultivada em tratamento de sequeiro, bem como nos tratamentos de 25, 50, 75 e 100% ETo. Esta tabela também apresenta as necessidades hídricas da cultura (NCH) verde e azul da cana-de-açúcar obtidas através do modelo CROPWAT. Ambas as componentes da PH apresentam crescimento nos seus valores à medida que ocorre aumento na lâmina de irrigação. Constatase, ainda, que a componente verde não apresenta grande variabilidade dentre os tratamentos de irrigação.

O aumento da componente verde no tratamento de 25% da ETo em relação ao tratamento de 100% ETo é de apenas 6%. Entretanto, a diferença dos valores da componente azul do tratamento de 25% ETo em relação ao tratamento irrigação de 100% ETo, é de 65%. Por outro lado, os dados da NCH verde da evapotranspiração com base no modelo CROPWAT superestimam os valores no tratamento de 100% ETo em até 46%. Portanto, à medida que há aumento na lâmina de irrigação ocorre o aumento da NCH verde haja vista que referida componente depende diretamente da precipitação efetiva. Por sua vez, observa-se que as NCH azuis apresentam crescimento significativo em função do aumento da lâmina de irrigação, em virtude dessa componente estar diretamente relacionada ao consumo de água através do processo de irrigação.

No tratamento de 25% ETo a NCH azul apresentou valor de 6647,7 m³ ha⁻¹ e no tratamento 100% ETo foi de 10973,6 m³ ha⁻¹, evidenciando, assim, aumento das necessidades hídricas da cultura em função do aumento de irrigação. Portanto, a componente azul da NCH é a que mais contribui com o

Tabela 2. Componentes verde e azul das necessidades hídricas da cultura cana-de-açúcar (NCH) cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25, 50, 75 e 100% da evapotranspiração de referência (ETo) obtidas através do modelo CROPWAT

Tratamento %	NCH verde	NCH azul (m ³ ha ⁻¹)	NCH total
Sequeiro	5180,4	-	5180,4
25	5427,3	6647,7	12075,0
50	5606,3	8299,7	13906,0
75	5639,8	10566,8	16206,6
100	5641,9	10973,6	16615,6
Modelo Cropwat	8214,0	7378,0	15592,0

valor total da necessidade hídrica da cultura. Neste contexto, estudos realizados por Gerbens-Leenes & Hoekstra (2012) para diferentes países do mundo evidenciaram que a NCH da cana-de-açúcar variou entre 1233 e 2082 mm dependendo do período de crescimento da cultura. Os resultados deste estudo também indicaram que os países como México e o Brasil apresentaram NCH favoráveis ao crescimento do rendimento da cultura, com valores acima da média, enquanto a China apresenta valores de NCH, abaixo da média. Em relação aos valores de ETo e P_{efp} obtidos através do modelo CROPWAT, constatou-se que o valor de NCH verde é de 8214 m³ ha⁻¹ e NCH azul é de 7378 m³ ha⁻¹, totalizando 15592 m³ ha⁻¹. Portanto, existe uma inversão de comportamento dos valores de NCH obtidos através do modelo pois, neste caso, a componente verde é a que mais contribui para NCH total da cana-de-açúcar, ao contrário do resultado obtido com os valores observados.

Após a obtenção dos valores das NCH verde e azul da cana-de-açúcar foi possível calcular a pegada hídrica da cultura, conforme apresentado na Tabela 3. Os valores da pegada hídrica verde e cinza diminuem à medida que há acréscimo na irrigação, sendo os maiores valores no cultivo em sistema de sequeiro e os menores valores no tratamento de irrigação de 100% ETo. Por outro lado, os valores da pegada hídrica azul aumentam à medida que ocorre incremento na irrigação. Este resultado se encontra em concordância com o conceito de pegada hídrica azul haja vista que esta componente representa a água de irrigação utilizada no processo de desenvolvimento da cultura. No tratamento de sequeiro observou-se que a pegada hídrica verde foi de aproximadamente 80% do valor total que corresponde a 103,52 m³ ha⁻¹, representando, junto com a pegada hídrica cinza, a maior contribuição na pegada hídrica total nos cinco tratamentos utilizados no estudo; já o menor valor da pegada hídrica verde foi observado no tratamento de irrigação de 100% ETo, com 50,24 m³ ha⁻¹, que corresponde a 31% do valor total da pegada hídrica da cana-de-açúcar que, neste tratamento, é de 159,53 m³ ha⁻¹.

Com relação à pegada hídrica azul, nota-se que o tratamento de sequeiro apresentou valor igual a zero, em face dela corresponder à água adicionada ao sistema através da irrigação; já o tratamento com 25% ETo foi o que apresentou o segundo menor valor da pegada hídrica azul, representando 47% da pegada hídrica total neste tratamento. Por outro lado, o maior valor da pegada hídrica azul foi obtida no tratamento de 100% ETo, com valor 97,71 m³ ha⁻¹ que correspondente a 61% da pegada hídrica total (159,53 m³ ha⁻¹). Em resumo, a pegada hídrica azul é a que apresenta a maior contribuição para

Tabela 3. Pegada hídrica (PH) verde, azul e cinza da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com 25, 50, 75 e 100% de evapotranspiração de referência (ETo) e através do modelo CROPWAT

Tratamento %	PH verde	PH azul	PH cinza	PH total
Sequeiro	82,75	0	20,77	103,52
25	56,89	69,68	13,62	140,19
50	55,72	82,49	12,92	151,14
75	51,14	95,82	11,79	158,75
100	50,24	97,71	11,57	159,53
Modelo CROPWAT	119,56	107,39	9,00	235,96

a formação da pegada hídrica total, seguida das pegadas hídrica verde e cinza. A pegada hídrica azul representa o volume real de água utilizada pela cultura, trazendo consequências diretas sobre a disponibilidade hídrica do sistema; enquanto a pegada hídrica cinza é um indicador de poluição, que indica apenas a gravidade da poluição no sistema, não mostrando o volume da água poluída (Silva et al., 2013a). Em geral, a pegada hídrica cinza contribui apenas com uma pequena porcentagem na pegada hídrica total em que os valores encontrados apresentam decréscimos de acordo com o incremento na irrigação, ou seja, quanto menor for a irrigação maior será o valor encontrado para a pegada hídrica cinza.

O maior valor de pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar é no cultivo em sistema de sequeiro, com o valor de $20,77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, cerca de 20% da água utilizada no processo total, que é de $103,52 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Já o menor valor da pegada hídrica (PH) cinza se encontra no tratamento de irrigação de 100% ETo, com valor de $11,57 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, que corresponde a 7,2% da água utilizada no processo. Os valores da pegada hídrica cinza nos tratamentos de 25, 50 e 75% ETo são, respectivamente, 13,34, 8,5 e $7,42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ dos valores da pegada hídrica total de cada tratamento; conclui-se, portanto, que para a variedade de cana-de-açúcar RB 92579, quanto maior for o valor da irrigação, menor será o valor da carga de poluentes envolvida no sistema. Os estudos de Kongboon & Sampattagul (2012) para diferentes províncias do norte da Tailândia mostraram que a média do PH da cana-de-açúcar é de $202 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Esses autores observaram ainda que a PH da cana-de-açúcar é mais elevada na província de Lampang ($252 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) e apresentou menor intensidade em Kamphaeng Phet ($167 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$), evidenciando que a PH varia consideravelmente em função da localização da região.

Os valores da PH da cana-de-açúcar obtidos com o modelo CROPWAT superestimam os valores observados das PHs verde e azul e subestimam os valores da pegada hídrica cinza nos cinco tratamentos. A pegada hídrica total pelo modelo CROPWAT foi de $235,96 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e, portanto, 47,9% superior à do maior valor obtido através do balanço hídrico do solo, que foi de $159,53 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no tratamento de 100% ETo. Ao contrário dos valores calculados, a pegada hídrica verde modelada é a componente que mais contribui na composição da PH total, que corresponde a cerca de 50% no valor total da pegada hídrica da cultura enquanto a pegada hídrica cinza modelada apresenta valor inferior em comparação aos cinco tratamentos de sequeiro e de irrigação, apenas com $9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, que corresponde a 4% da pegada hídrica total.

A Figura 1 exibe a contribuição, em termos percentuais, das diferentes componentes da pegada hídrica total da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e nos tratamentos de irrigação de 25, 50, 75 e 100% ETo. Tal como mencionado anteriormente, a pegada hídrica azul em sistema de sequeiro é nula (Figura 1A), enquanto as componentes verde e cinza representaram, respectivamente, 80 e 20% da PH total da cultura neste tratamento.

No tratamento de irrigação de 25% ETo as componentes cinza, verde e azul da pegada hídrica da cultura representaram, respectivamente, 10, 40 e 50% da PH total, enquanto que no tratamento de 50% as componentes cinza, verde e azul foram, respectivamente, 8, 37 e 55% da PH total. Por outro lado, nos tratamentos de irrigação de 75 e 100% ETo as componentes

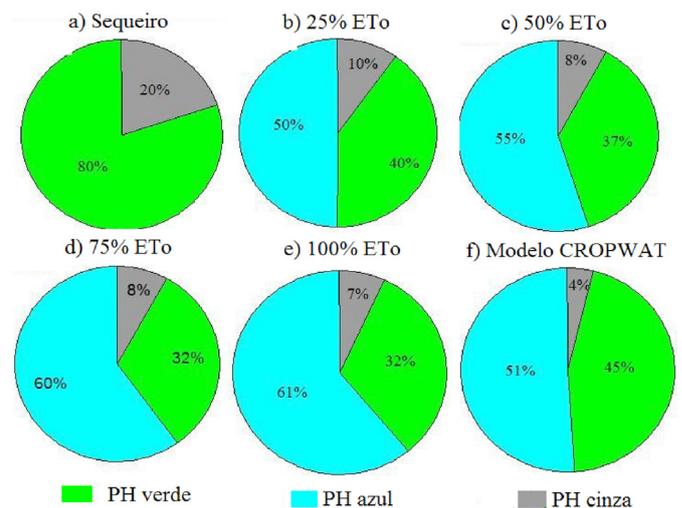


Figura 1. Contribuição percentual das componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica total da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e nos tratamentos de irrigação de 25, 50, 75 e 100% ETo

da PH foram praticamente iguais. Mekonnen & Hoekstra (2011) estimaram que a média da pegada hídrica global da cana-de-açúcar para o período de 1996 a 2005, é de $210 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, variando entre 120 e $410 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. A partição das componentes da PH foi de $139 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ verde (66%), $57 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ azul (27%) e $13 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ cinza (6%). Nota-se que os valores da componente verde da PH obtidos neste estudo foram muito elevados quando comparados com os resultados do presente estudo porém as componentes azul e cinza foram inferiores. Os resultados deste estudo permitem afirmar que a pegada hídrica total da cana-de-açúcar estimada por Mekonnen & Hoekstra (2011) superestima em 103% os valores encontrados neste estudo para a cultura cultivada em sistema de sequeiro nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba.

CONCLUSÕES

1. A pegada hídrica verde diminui à medida em que ocorre acréscimo na lâmina de irrigação, enquanto que a pegada hídrica azul aumenta em função do aumento na lâmina de irrigação.
2. A pegada hídrica cinza apresenta a menor contribuição da pegada hídrica total e seus valores decrescem em função do aumento da irrigação.
3. A pegada hídrica da cana-de-açúcar obtida com base no modelo CROPWAT superestima os valores da pegada hídrica verde e azul e subestima os valores da pegada hídrica cinza obtidos com base no balanço hídrico do solo.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper 56.
- Azevedo, P. V.; Soares, J. M.; Silva, V. de P. R. da; Nascimento, T.; Silva, B. B. da. Evapotranspiration of superior grapevines under intermittent irrigation. *Agricultural Water Management*, v.95, p.301-308, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2007.10.011>

- Azevedo, P. V.; Sousa, I. F.; Silva, B. B. da; Silva, V. de P. R. da. Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v.84, p.259-264, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.001>
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water International*, v.33, p.19-32, 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/02508060801927812>
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, v.70, p.749-758, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012>
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y.; Savenije, H. H. G.; Gautam, R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, v.60, p.186-203, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
- Chapagain, A. K.; Orr, S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. *Journal of Environmental Management*, v.90, p.1219-1228, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.06.006>
- Feng, K.; Siu, Y. L.; Guan, D.; Hubacek, K. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography*, v.32, p.691-701, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.004>
- Gerbens-Leenes, W.; Hoekstra, A. Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol. *Environment International*, v.40, p.202-211, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.006>
- Hoekstra, A. Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, v.68, p.1963-1974, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.021>
- Hoekstra, A. Y. How sustainable is Europe's water footprint? *Water and Wastewater International*, v.26, p.24-26, 2011.
- Hoekstra, A. Y.; Hung, P. Q. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, v.15, p.45-56, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004>
- Kongboon, R.; Sampattagul, S. Water Footprint of Bioethanol Production from Sugarcane in Thailand. *Journal of Environment and Earth Science*, v.2, p.61-65, 2012.
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, v.15, p.1577-1600, 2011. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Oel, P. R. van; Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. The external water footprint of the Netherlands: geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, v.69, p.82-92, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.014>
- Silva, V. de P. R. da. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v.58, p.575-596, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002>
- Silva, V. de P. R. da; Aleixo, D. O.; Dantas Neto, J.; Maracajá, K. F. B.; Araújo, L. E. Uma medida de sustentabilidade ambiental: pegada hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.100-105, 2013a. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100014>
- Silva, V. de P. R. da; Borges, C. J. R.; Farias, C. H. Singh, V. P.; Albuquerque, W. G.; Silva, B. B. Water requirements and single and dual crop coefficients of sugarcane grown in a tropical region, Brazil. *Agricultural Sciences*, v.3, p.274-286, 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2012.32032>
- Silva, V. de P. R. da; Maracajá, K. F. B.; Araújo, L. E. ; Dantas Neto, J.; Aleixo, D. O. ; Campos, J. H. B. C. Pegada hídrica de indivíduos com diferentes hábitos alimentares. *Revista Ambiente & Água*, v.8, p.250-262, 2013b.
- Silva, V. de P. R. da; Silva, B. B.; Albuquerque, W. G.; Borges, C. J. R.; Sousa, I. F.; Dantas Neto, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management*, v.128, p.102-109, 2013c. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.007>
- Zhao, X.; Chen, B.; Yang, Z. F. National water footprint in an input-output framework-A case study of China 2002. *Ecological Modeling*, v.220, p.245-253, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.016>