



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS

RAFAELA SILVEIRA RODRIGUES ALMEIDA

**PEGADA HÍDRICA DE PLANTAS HORTÍCULAS CULTIVADAS NO  
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2019**

RAFAELA SILVEIRA RODRIGUES ALMEIDA

**PEGADA HÍDRICA DE PLANTAS HORTÍCULAS CULTIVADAS NO  
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

ORIENTADOR: MADSON TAVARES SILVA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para a obtenção do título de Doutora.

Campina Grande  
Setembro/2019

A447p

Almeida, Rafaela Silveira Rodrigues.

Pegada hídrica de plantas hortícolas cultivadas no semiárido brasileiro / Rafaela Silveira Rodrigues Almeida. – Campina Grande, 2019.

73 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva".

Referências.

1. Evapotranspiração. 2. Produtividade. 3. Modelo Cropwat. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.

CDU 556.13(043)

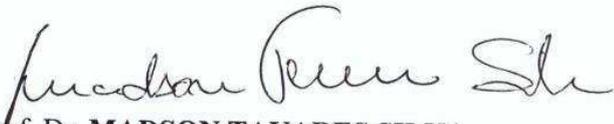
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

**RAFAELA SILVEIRA RODRIGUES ALMEIDA**

**“PEGADA HÍDRICA DE PLANTAS HORTÍCULAS CULTIVADAS NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO.”**

**APROVADO(A) EM: 04/09/2019**

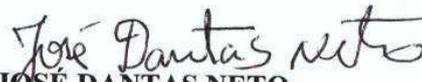
**ASSINATURA DA BANCA EXAMINADORA**



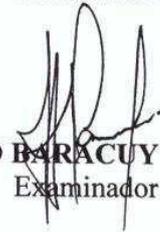
**Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA**  
Orientador principal



**Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA**  
Examinador



**Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO**  
Examinador



**Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS**  
Examinador



**Prof. Dr. ROMILDO MORANT DE HOLANDA**  
Examinador

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho de tese aos meus pais, Vicente e Tânia, pelo  
grande amor que recebo e sinto.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me guiar e demonstrar seu infinito amor e cuidado nas grandes e pequenas coisas da minha vida;

Aos meu pais, Vicente e Tânia, toda a minha gratidão pelo amor, dedicação e amizade;

A minha filha Lorena e meu esposo Robson, pelo amor que sinto por vocês ser a minha maior força propulsora;

A minha irmã Daniela, por sua amizade e presença serem uma das coisas mais importantes pra mim;

Ao meu orientador, Dr. Madson Tavares Silva, pela compreensão, ajuda e disponibilidade sempre;

A minha amiga Bárbara Daniele pela parceria e amizade que estabelecemos ao longo desse curso;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da UFCG, pelos conhecimentos transmitidos;

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo financiamento da pesquisa para a coleta de dados que foram utilizados neste trabalho;

A todos alunos mestres e doutores, orientados pelo Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA, que dispuseram seus dados de campo para elaboração deste trabalho.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                     |   |
|---------------------|---|
| PH                  | Pegada Hídrica  |
| PH <sub>verde</sub> | Pegada Hídrica Verde                                      |
| PH <sub>azul</sub>  | Pegada Hídrica Azul                                       |
| PH <sub>cinza</sub> | Pegada Hídrica Cinza                                      |
| PH <sub>total</sub> | Pegada Hídrica Total                                      |
| PCA                 | <i>Principal Component Analysis</i>                       |
| ET <sub>o</sub>     | Evapotranspiração de referência                           |
| R <sub>n</sub>      | Saldo de radiação á superfície da cultura                 |
| G                   | Densidade do fluxo de calor do solo                       |
| T                   | Temperatura do ar a 2m de altura                          |
| u <sub>2</sub>      | Velocidade do vento a 2m de altura                        |
| e <sub>s</sub>      | Pressão de vapor de saturação                             |
| e <sub>a</sub>      | Pressão parcial de vapor                                  |
| $\Delta$            | Declividade da curva de pressão de vapor de saturação     |
| $\gamma$            | Coefficiente psicométrico                                 |
| kc                  | Coefficiente da cultura                                   |
| ET <sub>c</sub>     | Evapotranspiração da cultura                              |
| NHC                 | Necessidade Hídrica da Cultura                            |
| Peef                | Precipitação efetiva                                      |
| $\alpha$            | Fração de lixiviação                                      |
| TAQ                 | Taxa de aplicação de químicos por hectares                |
| C <sub>máx</sub>    | Concentração máxima aceitável para o poluente considerado |
| C <sub>nat</sub>    | Concentração natural do corpo receptor de água            |
| Y                   | Produtividade da cultura                                  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>  | <b>11</b> |
| <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>14</b> |
| Objetivo geral.....   | 14        |
| Objetivos específicos.....                                      | 14        |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>                                 | <b>15</b> |
| 2.1. Conceito de pegada hídrica.....                            | 15        |
| 2.2. Pegada hídrica na agricultura.....                         | 16        |
| 2.3. Pegada Hídrica Verde (PH verde) .....                      | 17        |
| 2.4. Pegada Hídrica Azul (PH azul) .....                        | 18        |
| 2.5. Pegada Hídrica Cinza (PH cinza) .....                      | 19        |
| 2.6. Cultura do feijão.....                                     | 19        |
| 2.7. Cultura da cebola.....                                     | 21        |
| 2.8. Cultura do coentro.....                                    | 22        |
| 2.9. Cultura do tomate.....                                     | 23        |
| 2.10. A cultura do alface.....                                  | 24        |
| 2.10. Análise econômica de hortaliças.....                      | 25        |
| 2.12. O modelo Cropwater.....                                   | 27        |
| 2.13. Necessidade hídrica de culturas.....                      | 28        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                              | <b>32</b> |
| 3.1. Área de estudo.....  | 32        |
| 3.2. Delineamento experimental.....                             | 33        |
| 3.3. Cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )..... | 33        |
| 3.4. Cálculo da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ).....    | 34        |
| 3.5. Análise dos desempenho econômico das culturas.....         | 34        |
| 3.6. Cálculos dos componentes da pegada hídrica.....            | 35        |
| 3.6.1. Componente da pegada hídrica verde.....                  | 35        |
| 3.6.2. Componente da pegada hídrica azul .....                  | 36        |
| 3.6.3. Componente da pegada hídrica cinza.....                  | 37        |
| 3.7. Análise estatística.....                                   | 38        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                          | <b>39</b> |
| <b>5. CONCLUSÃO</b> .....                                       | <b>57</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                      | <b>58</b> |

## FIGURAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 1.  | Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro – DCA) da Universidade Federal de Campina Grande.....  | 32 |
| Figura 2.  | Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 20% da evapotranspiração de referência.....   | 39 |
| Figura 3.  | Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 40% da evapotranspiração de referência.....   | 40 |
| Figura 4.  | Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 60% da evapotranspiração de referência.....   | 41 |
| Figura 5.  | Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 80% da evapotranspiração de referência.....   | 42 |
| Figura 6.  | Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 100% da evapotranspiração de referência.....  | 43 |
| Figura 7.  | Comparação da produtividade dos frutos com a evapotranspiração do tomateiro cultivado irrigado sob os tratamentos T1 a T5.....   | 45 |
| Figura 8.  | Evolução da evapotranspiração do tomateiro cultivado irrigado em função dos tratamentos de irrigação.....  | 45 |
| Figura 9.  | Evolução da produtividade do tomateiro cultivado irrigado em função dos tratamentos de irrigação.....  | 46 |
| Figura 10. | Componentes da pegada hídrica do alface irrigado. PH verde = pegada hídrica verde; . PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza..... | 47 |
| Figura 11. | Componentes da pegada hídrica do coentro irrigado. PH verde = pegada hídrica verde; . PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza...  | 48 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 12. | Componentes da pegada hídrica do feijão irrigado. PH verde = pegada hídrica verde;. PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza... | 48 |
| Figura 13. | Componentes da pegada hídrica da cebola irrigado. PH verde = pegada hídrica verde;. PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza    | 49 |
| Figura 14. | Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura do alface.....                      | 52 |
| Figura 15. | Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura do coentro.....                     | 53 |
| Figura 16. | Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo da cultura da cebola.....                   | 53 |
| Figura 17. | Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura da feijão.....                      | 54 |
| Figura 18. | Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura do tomate.....                      | 55 |

## TABELAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1. | Dados meteorológicos climáticos médios de Campina Grande-PB no período de 1961 a 1990.....  | 33 |
| Tabela 2  | Componentes da pegada hídrica, evapotranspiração e produtividade do tomateiro cultivado irrigado sob cinco tratamentos de irrigação.....  | 44 |
| Tabela 3. | Componentes da pegada hídrica (m <sup>3</sup> /ton) de cinco culturas cultivadas no semiárido brasileiro calculadas pelo método do balanço hídrico do solo, pelo modelo CROPWAT e a média global estabelecida por Mekonnen & Hoekstra (2011)..... | 51 |
| Tabela 4. | Indicadores econômicos da cultura do coentro cultivado no semiárido brasileiro.....   | 51 |
| Tabela 5. | Sumário das principais características climáticas e agrometeorológicas das culturas analisadas no estudo.....   | 55 |

## RESUMO

A atual crise hídrica está relacionada a diversas ações antropogênicas no planeta, entre elas a utilização demasiada da água no setor agrícola. A Pegada Hídrica (PH) é um indicador da apropriação de recursos hídricos que quantifica o uso direto e indireto deste recurso, possuindo o intuito de subsidiar o estabelecimento de políticas e ações concretas para economia de água. O objetivo desta pesquisa é determinar as pegadas hídricas de culturas do tomate (*Solanum lycopersicum*), cebola (*Allium cepa*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), alface (*Lactuca sativa* L.) e o coentro (*Coriandrum sativum*). A parte experimental do estudo foi realizado na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro – DCA da Universidade Federal de Campina Grande) e foram determinadas a PH de cada cultura com base na evapotranspiração das cultura determinada pelo método do balanço hídrico do solo e pelo software Cropwat (FAO, 1989). A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foi determinada com base no método de Penman-Monteith). Os resultados deste trabalho permitem concluir que as hortaliças folhosas têm alto componente da PH cinza comparada com os componentes verde e azul da cultura. As pegadas hídricas azul e verde aumentam de acordo com o aumento da irrigação e precipitação pluvial, porém a pegada hídrica cinza varia apenas em função da produtividade. Além disso, constatou-se que a cultura do coentro apresenta viabilidade econômica quando cultivada irrigado nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro.

**Palavras chave:** evapotranspiração, produtividade, modelo Cropwat

## ABSTRACT

The current water crisis is related to several anthropogenic actions on the planet, including the excessive use of water in the agricultural sector. The Water Footprint (PH) is an indicator of the appropriation of water resources that quantifies the direct and indirect use, aiming the establishment of policies for water saving. The objective of this research is to determine the water footprints of tomato (*Solanum lycopersicum*), onion (*Allium cepa*), beans (*Phaseolus vulgaris*), lettuce (*Lactuca sativa* L.) and coriander (*Coriandrum sativum*) crops. The experiments were carried out at the Experimental Agrometeorological Station (EstAgro - DCA of the Federal University of Campina Grande) and the PH of each crop was determined based on the crop evapotranspiration determined by the soil water balance method and Cropwat software (FAO, 1989). Reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) was determined based on the Penman-Monteith method). The main results of this study allow to conclude that the leafy vegetables have a high component of gray PH compared to the green and blue components of the crops. Blue and green water footprints increase with increasing irrigation and rainfall, but the gray water footprint varies only as a function of crop yield. In addition, it was found that coriander culture is economically viable when grown under irrigation conditions in the Brazilian semiarid conditions.

**Key words:** evapotranspiration, yield, Cropwat model

## 1. INTRODUÇÃO

O Relatório Global de Riscos para 2015 e 2016 identificou a redução de água doce de boa qualidade como o risco mais importante para a sociedade nos próximos dez anos; e, ainda, estima-se que cerca de quatro bilhões de pessoas em todo o mundo já enfrentam escassez severa da água (World Economic Forum. 2016; Mekonnen e Hoekstra, 2016; Roux et al. 2017).

Como principal consumidora de recursos dulcícolas em todo o mundo, a agricultura está sendo responsabilizada pela atual crise hídrica e ficando cada vez mais espremida pelas demandas de outros sectores da sociedade (Silva et al., 2015; Seyere et al., 2017). Rodriguez et al. (2015) expressaram que o consumo global da água para produção de alimento é de aproximadamente  $7.100 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , dos quais  $5.500 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  são usados na agricultura de sequeiro e  $1.600 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  em irrigação. Adicionalmente, diversos dados encontrados em estudos mostram que nas taxas atuais de eficiência de uso água na agricultura uma quantidade adicional de  $5.700 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  de água serão necessários para atender a demanda de alimentos até 2050 (Sun et al., 2013; Novoa et al., 2016). Neste contexto, a elaboração de modelos e conceitos capazes de fornecer informações sobre a melhoria da relação entre produtividade agrícola e eficiência dos recursos hídricos são de suma importância para se alcançar a sustentabilidade ambiental (Yano et al., 2015; Northey et al., 2016).

O conceito de Pegada Hídrica (PH) proposto por Hoekstra et al. (2011) está sendo utilizado como um indicador da apropriação de recursos hídricos. A PH possui caráter multidimensional em termos de quantificar o volume de consumo direto ou indireto da água e contabilizar os volumes de poluição pelo tipo de atividade (Silva et al., 2013). A PH é subdividida em Pegada Hídrica Verde (*PH verde*), Pegada Hídrica Azul (*PH azul*) e Pegada Hídrica Cinza (*PH cinza*). A *PH verde* considera o total de água precipitada que não escoou ou não repõe a água subterrânea, mas é armazenada no solo e utilizada pelas plantas nos processos evapotranspiratórios. A *PH azul* é a água doce superficial ou subterrânea que é utilizada em cultivos irrigados. Já a *PH cinza* é a contabilização do volume de água necessário para depurar efluentes (Mekonnen et al., 2011; Trauring & Bernstein. 2018).

A PH já é uma ferramenta consolidada em áreas de cultivos no mundo todo, como por exemplo, estimativas de PH foram desenvolvidas para café e chá holandês (Chapagain & Hoekstra. 2008), para as culturas de grãos da Coreia (Yoo et al., 2012),

trigo (Mekonnen & Hoekstra, 2010; Ababaei & Etedali, 2014); milho, soja e trigo (Aldaya et al., 2010), diversas culturas irrigadas no Sudão (Ahmed & Ribbe, 2011), Espanha (Aldaya et al., 2010); Itália (Nana et al., 2014; Lamastra et al., 2014), África do Sul (Dabrowski et al., 2009) e Tailândia (Gheewala et al., 2014).

Em relação ao fracionamento dos tipos de consumo, as consideradas água verde e azul no globo variam muito no tempo e no espaço. Em países asiáticos, como Índia, Indonésia, Vietnã, Tailândia, Mianmar e Filipinas, a fração da pegada hídrica *verde* é substancialmente maior que a pegada hídrica *azul*, enquanto que nos EUA e Paquistão, a pegada hídrica *azul* é quatro vezes maior que a componente *verde* (Mekonnen & Hoekstra, 2012). No entanto, numa perspectiva global, a pegada hídrica da produção agrícola no período de 1996-2005 foi de 7404 Gm<sup>3</sup>/ano<sup>-1</sup>, sendo 78% verde, azul 12%, e 10% de cinza. O trigo apresentou a maior participação no consumo do volume total, com 1.087 Gm<sup>3</sup>ano<sup>-1</sup> (70% verde, 19% azul e cinza 11%), seguido do arroz (992 Gm<sup>3</sup>ano<sup>-1</sup>) e do milho (770 Gm<sup>3</sup>ano<sup>-1</sup>). De outra forma, a palma e o algodão foram principais culturas com o menor consumo total de água (Chapagain et al., 2008; Mekonnen & Hoekstra, 2011). Embora os estudos quantifiquem várias PHs de países europeus, asiáticos e africanos, há escassez na literatura de estimar PH de culturas comerciais nos países da América Latina (Aldaya et al., 2010).

O semiárido brasileiro apresenta escassez física e econômica da água. Nessas regiões, a exiguidade hídrica está associada a uma complexa sinergia de fatores, onde a agricultura deve ter por objeto a obtenção de rendimentos máximos por unidade de água aplicada (máxima produtividade da água), rendimento máximo por unidade de área cultivada (máxima produtividade da cultura) ou ainda, por unidade de custo (máxima produtividade econômica da cultura). Entretanto, alguns poucos estudos abordando a melhoria e a compreensão da eficiência do uso da água com a utilização da PH são encontrados na literatura, tais como o de Rocha & Studart (2014) que avaliaram a pegada hídrica de diversas culturas no estado de Pernambuco; Ribeiro (2014) contabilizou a PH de *Mangifera indica* (manga) no submédido do vale do São Francisco; Santiago et al. (2017) observou a PH de *Saccharum officinarum* (cana de açúcar) em Corouipe/AL; Bomfim (2017) quantificou a PH do *Coriandrum sativum* (coentro) Itabaiana/SE e Silva et al. (2015) que mediu e modelou a PH também de *Saccharum officinarum* (cana de açúcar), sendo ainda incipientes estes estudos com muitas outras culturas.

O conceito econômico da água segue o princípio da teoria da produção, em que cada nível de água aplicado às culturas deve corresponder a um ponto de produtividade, no qual o produtor fixa a quantidade de água a aplicar segundo um critério de racionalidade econômica (Gomez & Riesgo, 2004; Harou et al., 2009; Lewidow et al., 2014). Neste sentido, uma pesquisa mais aprofundada sobre os diversos aspectos das necessidades hídricas de culturas comumente cultivadas na área semiárida brasileira é de grande importância para permitir o estabelecimento de políticas e ações concretas para a sustentabilidade da água na agricultura destas zonas. Assim, os objetivos deste estudo são apresentados a seguir.

(a) **GERAL**

Determinar os componentes da pegada hídrica de cinco culturas cultivadas irrigadas nas condições edacliáticas do semiárido brasileiro.

(b) **ESPECÍFICOS**

- i) Avaliar os componentes azul, verde e cinza das pegadas hídricas das culturas do tomate, cebola, feijão, alface e coentro;
- ii) Comparar as pegadas hídricas das culturas estudadas determinadas com base no modelo Cropwat e experimentalmente com base na medição da evapotranspiração das culturas pelo método do balanço hídrico do solo;
- iii) Determinar a evapotranspiração de referência durante o período de estudo das culturas;
- iv) Analisar a viabilidade econômica da cultura do coentro cultivado nas condições edacliáticas do semiárido brasileiro.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### ***2.1. Conceito de pegada hídrica***

Há décadas discute-se sobre quais as formas de gestão dos recursos hídricos e ferramentas passíveis de evitar ou minimizar problemas de desabastecimento da água no mundo. Neste contexto, Arjen Hoekstra, professor da UNESCO (Organização das Nações Unidas Educação, Ciência e Cultura), introduziu em 2002 o conceito de Pegada Hídrica (PH) a partir da definição de água virtual criada por Allan em 1993 e também sendo uma analogia a Pegada Ecológica desenvolvida por Rees e Wackernagel na década de 1990. A PH foi definida como o volume de água agregado diretamente (operações) ou indiretamente (cadeia de suprimentos) para produção de um determinado bem, podendo ser calculada para um indivíduo, comunidade e qualquer grupo definido de consumidores, incluindo uma família, vila, cidade, estado ou nação (Hoekstra & Chapagain, 2006).

Uma avaliação completa de pegada hídrica consiste de quatro fases distintas: (i) definição de objetivos e escopo; (ii) contabilização da pegada hídrica; (iii) avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica e (iv) formulação de respostas à pegada hídrica. Existem dois ramos principais de estudos de pegada hídrica (PH). Uma baseia-se na tabela de insumo (água)-produto para converter o fluxo monetário em fluxos de material e energia em uma determinada economia e na utilização incorporada de recursos hídricos ao longo da cadeia de suprimento (Schendel et al., 2007; Zhao et al., 2010; Cazcarro et al., 2012). No entanto, devido à acessibilidade dos dados, é uma barreira a análise de insumo (água)-produto. Assim, usar os dados de consumo para capturar a utilização real da água com base no censo local de consumo de água é mais viável para a análise da pegada hídrica (White et al., 2015).

Como um indicador do ‘uso de água’, a PH difere das medidas clássicas de captação de água’ em três aspectos: (i) não inclui o uso da água azul quando essa água é devolvida para onde veio; (ii) não está restrita ao uso da água azul, mas inclui também a água verde e a cinza e (iii) não é restrita ao uso direto da água, mas inclui também seu uso indireto. A PH, portanto, oferece uma perspectiva mais adequada e mais ampla sobre a forma como um consumidor ou produtor se relaciona com o uso dos sistemas dulcícolas (Hoekstra et al., 2011).

A avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica em vários setores da sociedade já foi verificada na literatura, como em sistemas de produção pecuária e seus produtos em países como a Irlanda (Murphy et al., 2013), Austrália (Ridoutt et al., 2014) e China (Huang et al., 2014), produção láctea na Alemanha (Drastig et al., 2010), Argentina (Manazza e Iglesias, 2012), Nova Zelândia (Zonderland-Thomassen et al., 2014) e na Índia (Amarasinghe et al., 2010). PHs de animais e seus produtos em todo o mundo são quantificadas com base nas médias globais (Mekonnen e Hoekstra, 2012). Concomitante, existem estudos que tratam da avaliação da PH como um indicador do uso de água doce em sistemas de energia (Gerbens-Leenes et al., 2008), construção, turismo (Cazcarro et al., 2014) e agricultura. Esta última está atualmente recebendo mais atenção (Silva et al., 2013; Silva et al., 2015).

A PH pode ser reduzida adotando técnicas de produção que exijam uma menor quantidade de água doce por unidade de produto. Entretanto, umas das maneiras mais eficientes para reduzir a PH seria uma mudança nos padrões de consumo da população, optando por produtos que exijam uma menor quantidade de água. Hoekstra & Mekonnen (2011) afirmam que aproximadamente 27% da PH da humanidade está relacionada com a fabricação de produtos de origem animal e apenas 4% da pegada hídrica se relaciona com o uso da água doméstica. Mekonnen & Hoekstra (2011) mostraram que a PH de qualquer produto de origem animal é maior do que a PH de um produto agrícola, comparando-se com valor nutricional equivalente.

As dificuldades do uso da PH estão relacionadas ao encontro de todos os dados necessários para os cálculos, pois são pouco disponibilizados para o público. Para Hoekstra et al. (2011), a principal limitação é que a ferramenta tem como foco apenas analisar o uso de água doce, não abordando outros temas de alterações climáticas, a degradação do solo e aspectos sociais.

## ***2.2. Pegada hídrica na agricultura***

A pegada hídrica da produção agrícola é a relação entre a água consumida por unidade de área durante o período de crescimento de uma determinada cultura, mostrando o consumo hídrico com respectivos volumes e proporções de água verde (chuva) e/ou de água azul (águas superficiais ou subterrâneas) e ainda a pegada hídrica cinza, que é referente à poluição, definida como o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes com base nos padrões de qualidade da água no meio

ambiente (Hoekstra e Chapagain, 2006; Hoekstra et al., 2011). Esta distinção é importante, uma vez que ambas possuem características diferentes em termos de custo de oportunidade e impacto hidrológico e ambiental, assim como as diferentes políticas que cada uma delas administra e gerencia.

Existem distinções percentuais significativas nos de valores de PH para as mesmas culturas cultivadas em regiões diferentes, pois as quantidades de água no cultivo são variáveis relacionadas às características climáticas locais, solo, tipo de cultivo, rendimento e a produtividade da região. No estudo de PH da cana-de-açúcar e mandioca no norte da Tailândia. Kongboon & Sampattagul (2012) observaram que as diferenças nas quantidades de uso de água doce são determinadas por vários fatores, que incluem o clima, características da cultura e sistema de produção agrícola. Aldaya & Hoekstra (2010) analisando a PH do trigo em várias regiões na Itália determinaram que esta possa ser diminuída e apresentar rendimentos crescentes usando sistemas de irrigação mais eficientes (como a irrigação por gotejamento), reduzindo a evapotranspiração não benéfica (por exemplo, utilização de coberturas), reduzindo a perda de fertilizantes, melhorando o uso eficaz da precipitação, otimizando as datas de plantio e escolhendo variedades (subespécies) com maior rendimento (Chukalla et al., 2015). Zhuo et al., (2016) estimaram a PH verde, azul e cinza na bacia do rio Amarelo para o período de 1961–2009 e mostraram que a proporção de PH azul para verde aumentou devido à expansão de terras irrigadas nas áreas ao redor da bacia.

### ***2.3. Pegada hídrica verde (PH verde)***

A água da chuva armazenada no solo como umidade ou temporariamente mantida no topo deste ou na vegetação é denominada água verde. De acordo com o manual de Avaliação da Pegada Hídrica, este tipo de água desempenha um papel decisivo na agricultura, pois em sua maior parte é utilizada para o processo de produção das culturas deste setor, embora as plantas não possam absorvê-la completamente devido a fatores como evaporação do solo ou sua limitação na disponibilidade em determinadas época do ano (Hoekstra et al., 2010).

A pegada hídrica verde, sendo o volume de água da chuva que foi utilizado durante o processo de produção vegetal, é obtida a partir da soma de dois fatores: a água verde evaporada e a água verde incorporada. Mekonnen e Hoekstra (2011) analisaram a PH global e verificou que a água verde (evaporada e incorporada) representa cerca de

80% da utilizada na produção agrícola. Os mesmos autores relatam que no Brasil a água verde representa 92% da PH total utilizada pelo setor agrícola (Mekonnen; Hoekstra, 2011).

O consumo de água verde pela agricultura pode ser medido ou estimado utilizando fórmulas empíricas ou com um modelo apropriado para estimar a evapotranspiração com base em dados de entrada das características do solo, clima e cultura (Hoekstra et al., 2011). A medição direta da evapotranspiração é incomum e tem custo elevado. Sendo, usualmente, estimada indiretamente por modelos que utilizam dados climáticos, de propriedades do solo e características da cultura como entrada de informações, os mais comuns são: EPIC Model (Williams et al., 1989), CROPWAT (FAO, 2010) e AQUACROP (Raes et al., 2009).

#### ***2.4. Pegada hídrica azul (PH azul)***

A água azul é armazenada em áreas superficiais e subterrâneas de pântanos, lagos, rios e pode ser facilmente manejada pela infraestrutura hidráulica, e até transferida para outros territórios, em contrapartida da água verde. A pegada hídrica azul é o volume de água doce proveniente destas fontes, que no caso da agricultura é utilizado para irrigação de culturas. A PH azul é perdida nos processos evapotranspiratórios, sendo estimada como a diferença entre o evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e a precipitação efetiva. Quando a precipitação efetiva é maior do que a ET<sub>c</sub>, a PH<sub>azul</sub> é igual à zero. De acordo com Silva et al. (2015) a pegada hídrica verde diminui à medida que ocorre acréscimo na lâmina de irrigação, ou seja, quando a PH azul aumenta. Isto pode também ser confirmado em outros estudos como o de Ribeiro (2014).

O cálculo da componente azul considera a evapotranspiração da água irrigada na cultura, porém, como limitação, este método não contabiliza a evapotranspiração da água de reservatórios construídos para a irrigação da cultura ou a água evaporada dos canais que trazem água até o local da plantação. Estes dois fatores não são contabilizados, pois são processos anteriores ao crescimento da planta, tendo suas próprias pegadas hídricas. Neste sentido, a contabilização da evapotranspiração nestes dois processos pode ser significativa e deve ser incluída quando houver interesse em um estudo mais detalhado da PH azul em uma área.

## **2.5. Pegada hídrica cinza (PH cinza)**

No caso do setor agrícola, a água cinza é a quantidade de água necessária para diluir os resíduos provenientes de componentes químicos até concentrações que atendam ao padrão de qualidade vigente. A PH cinza é calculada para o poluente mais crítico, ou seja, o poluente que produz os maiores volumes de água poluída. Os poluentes oriundos dos cultivos de plantas, usualmente, são compostos por fertilizantes (nitrogênio, fósforo, dentre outros), pesticidas e inseticidas.

A percentagem de contaminante transferida do solo para uma água superficial e do solo para uma água subterrânea leva em consideração os processos de transporte do meio, tais como escoamento, erosão, lixiviação, volatilização e biodegradabilidade dos químicos. Estes processos são resultantes de propriedades químicas específicas, tais como coeficientes de partição entre ar e água, coeficientes de partição entre solo e água e taxas de degradação. Para efeitos de cálculo da PH cinza, apenas será tida em conta a fracção de químico que atinge o lençol freático por lixiviação ou uma água superficial por escoamento (Pereira, 2003). Chapagain et al. (2008) atribuem que um valor de 10% para fertilizantes nitrogenados é suficiente para realização do cálculo.

A capacidade de assimilação num corpo de água receptor depende da diferença entre a concentração máxima permitida e a concentração natural da substância. A concentração natural de agroquímicos num corpo de água receptor (cnat) é igual à concentração que ocorreria se não houvesse intervenção antropogênica nas bacias hidrográficas (Garcia et al., 2011). Um motivo pelo qual se usa no cálculo a concentração natural em vez da concentração atual é o facto da PH cinza ser um indicador da capacidade de assimilação apropriada. Caso se tomasse em consideração a concentração atual estaria a definir a capacidade de assimilação residual, o que não seria viável, uma vez que este parâmetro está em constante mudança como consequência do nível de poluição num determinado período. Além disso, um corpo de água receptor que já se encontra altamente poluído iria conter uma PH cinza muito pequena comparativamente a um outro corpo de água que não se encontre tão poluído, o que não reflete adequadamente o impacto do processo a ser avaliado (Graça, 2011).

## **2.6. Cultura do feijão**

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) é conhecido por diferentes nomes (alubia, feijão ou judia francesa, alubia de rinon, feijão verde, etc). Ele pode ser cultivado como

cultura hortícola para vagens frescas ou como cultura leguminosa para semente seca. A sua produção mundial média no período entre 2010 a 2014 foi de 23,9 milhões de toneladas. Os países Índia, Mianmar, Brasil e EUA foram responsáveis por 51% do total produzido neste período (FAO, 2015).

O feijão é cultivado em regiões tropicais e subtropicais da África, América e Ásia sob uma variedade de condições ecológicas. Ele é um dos grãos mais importante em regiões onde o estresse hídrico é a principal restrição para sua produção (Santos, 2000). Constitui um componente alimentar básico das populações rurais e urbanas das regiões Norte e Nordeste do Brasil e vem expandindo-se de forma mais intensa para as regiões Centro-Oeste e Sudeste nos últimos anos. Considerando o período de 2005 a 2009, constata-se que, na média desse período, foi cultivada uma área de 1.391.386 hectares e foram produzidas 513.619 toneladas de feijão-caupi (Embrapa, 2011).

Como leguminosa, o feijão é valorizado pelo alto teor de proteína de seus grãos, mas também pelas vitaminas e minerais presente nas folhas jovens, vagens e ervilhas. O grão seco para consumo humano é o principal produto do feijão, mas folhas, ervilhas frescas e vagens verdes são consumidas em diversas culturas. A planta é também usada para adubação (no sudeste dos EUA e Austrália) e forragem (em partes do Sahel) (Michelleto et al., 2007).

O *Phaseolus vulgaris* desenvolve-se bem em zonas com precipitações médias, porém seu cultivo não é apropriado para zonas tropicais úmidas. Chuva excessiva e clima quente provocam a queda de flores e vagens, além de aumentar a incidência de doenças. As temperaturas médias diárias ótimas oscilam entre 15 e 20°C. A temperatura média mínima diária para seu crescimento é de 10°C e a máxima de 27°C. A germinação necessita de uma temperatura no solo de 15°C ou mais, levando aproximadamente 12 dias para germinar a 18°C e cerca de 7 dias a 25°C. A duração do período total de crescimento varia com a utilização do produto, sendo de 60 a 90 dias para o feijão verde e de 90 a 120 dias para o feijão seco (Carlesso et al., 2007; Cardoso et al., 2017).

A profundidade normal de semeadura é de aproximadamente 5 a 7 cm. O espaçamento depende da variedade. Os de tipo arbustivos (eretos) normalmente têm espaçamento entre plantas e fileiras de 5 a 10x50 a 75 cm, enquanto que os do tipo enramador têm de 10 a 15x90 a 150 cm (Lebot, 2009). A cultura não tem exigências específicas quanto a solos, porém se adapta melhor aos friáveis e profundo com pH de 5,5 a 6,0. As necessidades de fertilizantes para se obter produção elevada são de 20 a 40

kg/ha de N, de 40 a 60 kg/ha de P e 50 a 120 kg/ha de K. O feijão comum é sensível á salinidade do solo. A diminuição de rendimento em relação á condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) para os valores de 1,0; 1,5; 2,3; 3,6 e 6,5 dS/m são, respectivamente, de 0, 10, 25,50 e 100% (Elzebroek & Wind, 2008).

A necessidade hídrica para se obter produção máxima com cultura do feijão de 60 a 120 dias variam entre 300 e 500 mm, dependendo do clima. Durante o período de maturação, estas necessidades dependem muito do fato que as vagens sejam colhidas verdes ou secas. O período de crescimento depende do número de colheitas, sendo que quando ocorrem de 3 a 4, o período de colheita pode demorar de 20 a 30 dias. O coeficiente de cultivo (Kc) que relaciona a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) com as necessidades hídricas máximas (ET<sub>m</sub>) nos diferentes estágios de desenvolvimento para o feijão comum verde é o seguinte: durante o estágio inicial, 0,3- 0,4 (15 a 20 dias); no estágio de desenvolvimento, 0,65-0,75; na fase intermediária 0,95-1,05 (20 30 dias); no estágio final 0,9-0,95 e, na colheita, 0,85-0,9. Para o feijão comum seco, os valores de Kc são: durante o estágio inicial 0,3-0,4 (15 a 20 dias); no estágio de desenvolvimento, 0,7-0,8; na fase intermediária, 1,05- 1,2 (35 a 45 dias); no estágio final, 0,65-0,75 (20 a 25 dias) e na colheita, 0,25-0,3 (Elzebroek & Wind, 2008; Cardoso et al., 2017).

## **2.7. Cultura da cebola**

A cebola (*Allium cepa*) pode ser originária do Oriente Próximo. A cultura pode ser produzida numa ampla faixa de climas, desde o temperado ao tropical. A sua produção mundial é em média 16 milhões de toneladas anuais (Brasil, 2015). Esta planta é rica em flavonóides, elemento com propriedades anti-inflamatórias e anti-oxidante. Possuindo também sais minerais: ferro, potássio, sódio, fósforo e cálcio e as vitaminas C e do complexo B (Martín et al., 2009).

Em condições normais, a cebola forma o bulbo na primeira temporada de crescimento e floresce na segunda. A produção do bulbo é controlada pela luminosidade do dia, onde a duração crítica varia de 11 a 16 horas, dependendo da variedade. A cultura floresce em climas temperados, sem temperaturas extremas nem chuvas excessivas. Para o período inicial de crescimento, são importantes o tempo frio e quantidades suficientes de água para o estabelecimento adequado da cultura, enquanto que na maturação, o clima quente e seco é benéfico para a obtenção de rendimento alto

de boa qualidade. A temperatura média, com nível ótimo, varia entre 15 e 20°C. A duração do período de crescimento varia com o clima, porém, em geral, são necessários de 130 a 175 dias da semeadura á colheita. Para a produção de bulbo, a planta não deve florescer, visto que a floração afeta adversamente os rendimentos. A colheita dos bulbos é feita q quando caem as partes superiores. Para a iniciação da floração são necessárias temperaturas abaixo de 14 a 16°C e umidade relativa baixa. A duração do dia, entretanto, pouco influi na floração (Oliveira et al., 2014; Lebot, 2009).

A cebola pode ser produzida em muitos tipos de solo, porém são preferíveis os de textura média. O pH ótimo está entre 6 e 7. As necessidades de fertilizantes são normalmente de 60 a 100 kg/ha de N, 25 a 45 kg/ha de P e 45 a 80 kg/ha de K. A cultura é sensível á salinidade do solo e a diminuição de rendimento em relação à condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) para valores de 1,2; 1,8; 2,8; 4,3 e 7.5 dS/m são, respectivamente, de 0,10, 25,50 e 100% (Kunz et al., 2009).

A cultura tem sistema radicular superficial, com raízes concentradas na camada superior de 0,3m de profundidade do solo. Geralmente, o 100% de absorção de água ocorre na primeira camada de solo de 0,3 a 0,5m de profundidade (D= 0,3-0,5m). Para atingir o rendimento ótimo, a cebola necessita de 350 a 550 mm de água. O coeficiente de cultivo (Kc) tem os seguintes valores para os diferentes estágios de desenvolvimento após o transplântio; no estágio inicial 0,4-0,6 (15 a 20 dias); no estágio de desenvolvimento da cultura, 0,7 -0,8 (25 a 35 dias); no estágio intermediário, 0,95-1,1 (25 a 45 dias); no estágio final, 0,85-0,9 (35 a 45 dias) e, na colheita, 0,75 a 0,85. Em condições de evapotranspiração de 5 a 6 mm/dia, a taxa de absorção de água começa a diminuir quando aproximadamente 25% da água total disponível no solo esteja esgotada (p=0,25) (Elzebroek & Wind, 2008).

## **2.8. Cultura do coentro**

O coentro (*Coriandrum sativum*) é uma hortaliça herbácea anual pertencente à família Apiaceae, nativa da bacia do Mar Mediterrâneo. Esta planta é classificada como uma hortaliça folhosa, aromática, anual, com ciclo entre 40 a 55 dias, de ciclo precoce; de raiz superficial, de coloração verde intensa, cultivada como tempero e erva aromática. A haste comercializada é de, aproximadamente, 30 cm; porém, o porte pode chegar a 90 cm de altura (Linhares et al., 2012; FAO, 2013).

Esta oleícola possui vitaminas B1, B2 e C (75 mg 100 g<sup>-1</sup>), sendo boa fonte de cálcio (188 mg 100 g<sup>-1</sup>), ferro (três mg 100 g<sup>-1</sup>) e provitamina A (Haag e Minami, 1998; Melo et al., 2009), e ainda proteínas, gordura, minerais, fibras, carboidratos, água, fósforo, caroteno, tiamina, riboflavina, sódio, potássio e ácido oxálico (Sarimeseli, 2011). Existem diversos estudos sobre coentro no Brasil relacionado à transmissão de doenças na cultura, qualidade, nutrição mineral (Oliveira et al., 2002).

Tem-se conhecimento dos benefícios de suas propriedades nos mais variados setores, tanto de sua massa vegetal, como principalmente dos frutos (sementes), desde a culinária até a composição de ácidos característicos na produção de combustíveis automotores, denotando com isso e seu alto potencial na indústria e no comércio (Tavella, 2010). Estudos recentes mostram que a utilização de extratos da folha de coentro como um agente redutor de íons resultando na biossíntese de nanopartículas de ouro, biomedicina, indústria farmacêutica e biotecnologias, com diversas vantagens de custo-benefício, bem como para a produção em larga escala comercial.,

O *Coriandrum sativum* é uma cultura que se adapta a diversas condições climáticas, entretanto, deve ser preferencialmente cultivada em regiões de clima quente, pois esta é intolerante às temperaturas baixas, que causam retardo ou cessam seu crescimento. Para germinação das sementes, a melhor faixa é de 20 °C a 30 °C, enquanto na fase de desenvolvimento vegetativo, o ideal é entre 18 °C e 25 °C (Lebot, 2009). A cultura prefere solos arenoso-argilosos, com boa drenagem, rico em matéria orgânica e suprido com as quantidades de 100 kg/ha de N, 180 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg/ha, 120 kg/ha de K<sub>2</sub>O. Há tolerância á acidez, entretanto, o pH ideal situa-se entre 6,0 ± 0,2.

## **2.9. Cultura do tomate**

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) é a segunda cultura hortícola mais importante após a batata. Atualmente, a produção mundial é ultrapassa os 100 milhões de toneladas de fruto fresco procedentes de mais de 4 milhões de hectares (FAO, 2013). Esta fruta é a principal fonte dietética do antioxidante licopeno, que tem sido associado a muitos benefícios para a saúde, incluindo redução do risco de doenças cardíacas e câncer. Também é uma grande fonte de vitamina C, potássio, folato e vitamina K (Reis, 2009).

O *Lycopersicon esculentum* é uma cultura de crescimento rápido com ciclo fenológico de 90 a 150 dias. É uma planta neutra quando á duração do dia. A

temperatura média diária ótima para seu crescimento é de 18 a 25°C, com temperaturas noturnas entre 10 a 20°C. Entretanto, grandes diferenças entre as temperaturas diurnas e noturnas afetam adversamente seu rendimento. Temperaturas superiores a 25°C quando acompanhadas de umidade relativa elevada e ventos fortes, resultam em rendimento reduzido. Temperaturas noturnas superiores a 20°C, acompanhadas de umidade relativa elevada e pouca luz solar levam ao crescimento vegetativo excessivo e a má produção de frutos. A umidade relativa elevada conduz á incidência maior de pragas e doenças e podridão do fruto. Portanto, os climas secos são preferíveis para a produção do tomate (Sampaio, 1998; Fontes, 2002).

Esta cultura pode ser produzida numa ampla variedade de solos, porém os leves, francos, bem drenados e com pH de 5 a 7 são os preferíveis. As necessidades de fertilizantes para variedades altamente produtivas variam de 100 a 150 kg/ha de N, 65 a 110 Kg/ha de P e 160 a 240 kg/ha de K. Em relação à salinidade do solo, a cultura é moderadamente sensível. A diminuição de rendimento para valores de CEes de 2,5; 3,5; 5,0; 7,6 e 12,5 dS/m são, respectivamente, de 0, 10, 25,50 e 100%. O período mais sensível á salinização é o da germinação e do desenvolvimento inicial da planta. Portanto, a lixiviação necessária dos sais é realizada mediante irrigação pré-plantio, ou aplicação excessiva de água durante a irrigação inicial (Carvalho et al., 2005).

As necessidades hídricas totais (ETc), após o transplântio, para a cultura de tomate produzida no campo, com 90 a 120 dias, são de 400 a 600 mm, dependendo do clima. As necessidades hídricas em relação á evapotranspiração de referência (ETo) em mm/período, dadas pelo coeficiente de cultivo (Kc) para os diferentes estágios de desenvolvimento da cultura, são os seguintes: durante o estágio inicial, 0,4-0,5 (10 a 15 dias); durante o estágio de desenvolvimento, 0,7-0,8 (20 a 30 dias); no estágio intermediário, 1,0005-1,25 (30 a 40 dias); no estágio final, 0,8-0,9 (30 a 40 dias) e, na colheita, 0,6-0,65 (Elzebroek & Wind, 2008). Os rendimentos maiores do tomate de mesa são obtidos com irrigações leves e frequentes. Onde se pratica a colheita mecanizada, são mais apropriadas às irrigações pesadas e não frequentes, sendo que a última irrigação deve ser aplicada muito antes da colheita.

## **2.10. A cultura do alface**

A cultura do alface (*Lactuca sativa* L.) é uma hortaliça de folhas comestíveis. As folhas podem ser lisas ou crespas, com ou sem formação de cabeça. Também existem

alfaces com folhas roxas ou folhas bem recortadas. É uma importante fonte de sais minerais, principalmente de cálcio e de vitaminas, especialmente a vitamina A. A alface deve ser colhida antes do início do pendramento (emissão do pendão floral), momento em que as folhas começam a apresentar um sabor amargo característico. O plantio em local definitivo é feito por mudas semeadas em bandejas ou copinhos. Essa cultura ser cultivada durante o ano todo, em todas as regiões do Brasil, a depender da cultivar escolhida, já que existem variedades adaptadas a climas mais quentes e outras para plantio em regiões de clima ameno. As alfaces roxa e verde são consumidas predominantemente em saladas frescas. A alface americana é mais crocante e, além de seu uso em saladas, é indicada para o preparo de sanduíches por ser mais resistente ao calor. Podem ser limpas e embaladas em agroindústria, sendo vendidas já prontas para consumo (Embrapa 2010).

## **2.10. Análise econômica de hortaliças**

Na produção agrícola o objetivo do produtor é a busca pela maximização dos resultados de seu empreendimento. Assim, as decisões mais comuns tomadas, ainda que de forma intuitiva, buscam definir o que, quanto e de que forma irá produzir, a fim de selecionar o produto mais rentável e a alocação de insumos (fatores de produção) de forma eficiente que lhe propiciem melhores retornos econômicos. A decisão sobre o empreendimento a ser adotado, os produtores agrícolas consideram três aspectos: a) os aspectos climáticos e geológicos que permitem o desenvolvimento de determinada cultura; b) o preço de venda e a potencialidade de comercialização à época da colheita; e c) a alocação eficiente dos recursos produtivos para produzir o menor custo (Silva. 2008).

A produção de hortaliças é caracterizada pelo alto investimento por hectare explorado, são espécies de ciclo curto, com uso intensivo do solo, exigem tratamentos culturais bem particulares, alocam excessiva mão-de-obra e apresenta alto risco. Enfim, é uma atividade que requer grande capacidade técnica e administrativa do produtor. Diante de tantas exigências, é importante para o oleicultor conhecer os custos de produções das culturas (Filgueira. 2003).

A utilização de custos de produção na administração de empresas agrícolas tem uma grande importância no sentido de analisar o desempenho da organização e tornar uma ferramenta de auxílio para as tomadas de decisão. Os custos precisam ser

corretamente definidos e precisamente atribuídos, garantindo uma maior eficiência econômica, que é simplesmente o processo que permite produzir uma mesma quantidade de produto com menor custo de produção e a eficiência técnica (ou tecnológica) que é a produção de uma mesma quantidade de produto utilizando menor quantidade física de fatores de produção (Cecílio-Filho et al., 2002).

A estrutura de custo de produção do sistema para atividades agrícolas é constituída pelos seguintes componentes: i) Despesas com operações: são custos com as operações agrícolas. Isto é, a quantidade dos fatores de produção utilizados por hectare, multiplicada por seus respectivos preços. (ii) Despesas com operações realizadas por empreita, efetuada por hectare ou por unidade de produto. (iii) Despesas com material consumido: quantidade de cada material consumido por hectare multiplicado pelo preço de aquisição. (iv) Custo Operacional Efetivo (COE): constitui a somatória dos resultados de despesas por hectare obtido em A, B e C e que é o dispêndio efetivo realizado pelo produtor para produzir determinada quantidade de produto. (v) Outros custos operacionais: tem a finalidade de alocar na atividade produtiva, em análise, parte das despesas gerais da empresa agrícola, a fim de se avaliar com maior precisão os custos e retornos dessa atividade. (vi) Custo Operacional total (COT) é a somatória do COE(D) e dos outros custos operacionais. (vii) Outros custos fixos: constituem outros custos imputados à atividade, visando à remuneração do capital fixo, no caso a terra, instalações e maquinaria, podendo incluir também o capital investido na formação de uma cultura perene. (viii) Custo total de produção (CTP): é a somatória do custo operacional total por hectares (F) e de outros custos fixos (G) (Rezende et al., 2005; Filgueira. 2002).

Alguns autores salientam a diminuição do custo de vários itens correlacionados à produção de hortaliças como insumos e operações para a cultura consorciada quando comparada com sua monocultura. Silva et al., (2008) averiguaram, pela análise econômica, que as culturas consorciadas tiveram seus custos de produção reduzidos, quando comparados às suas monoculturas.

Os objetivos dos sistemas de custos hortícolas ainda serve na orientação dos órgãos públicos e privados na fixação de medidas, como garantia de preços mínimos, incentivo à produção de determinado produto em escala desejada, estabelecimento de limites de créditos, etc.

## 2.12. O modelo CROPWAT

O modelo Cropwat 8.0 é um programa computacional desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) para o cálculo das necessidades hídricas das culturas e necessidades de irrigação através de dados climáticos (elementos meteorológicos) e parâmetros de solos e cultura. Além disso, o programa permite o planejamento e programação da irrigação para diferentes critérios/enfoques do manejo da irrigação. Os procedimentos de cálculo utilizados pelo Cropwat 8.0 baseiam-se nas recomendações desta Organização, previstos nas publicações nº 56 (Irrigation and Drainage Series of FAO) "Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements" (Allen et al., 1998) e nº 33 (Irrigation and Drainage Series of FAO) "Yield response to water" (Doorenbos & Kassam, 1979).

Dentre os principais recursos e funcionalidade do Cropwat 8.0 pode-se citar: (i) Entrada de dados em escala de tempo mensal, decenal e diária (dados meteorológicos) e cálculo da ETo (evapotranspiração de referência); (ii) Possibilidade de estimar dados meteorológicos na ausência de valores medidos, em alguns casos; (iii) Estimativas, em escala de tempo decenal e diária, das necessidades hídricas das culturas e necessidades de irrigação com base em algoritmos atualizados (modelos), incluindo a possibilidade de ajuste dos valores dos coeficientes culturais ( $k_c$ ,  $k_y$ ); (iv) Planejamento, programação e calendário do manejo da irrigação de acordo com os critérios/enfoques adotados nas simulações; (v) Saída de dados em formato de tabelas com o balanço hídrico da cultura em escala de tempo diária. O Cropwat apresenta um Menu Principal com as seguintes opções de cálculo: a) Cálculo de ET pelo método de Penman; b) Requerimento da cultura; c) Calendário de Irrigação; e d) Suprimento de água. Cálculo da Evapotranspiração Potencial com a Equação de Penman Modificada Para o cálculo de ETo pela equação de Penman modificada, os seguintes dados são necessários: a) Informação básica sobre a estação climática, seu nome, altitude e latitude; b) Dados climáticos mensais sobre temperatura, umidade relativa, brilho solar diário e velocidade do vento.

A segunda opção de menu principal de Cropwat permite calcular as necessidades de água da cultura. De acordo com a FAO (1989), esse elemento forma a parte central do Cropwat e é subdividido em três partes distintas: a) entrada e processamento dos

dados de evaporação e precipitação; b) entrada de dados da cultura e data de plantio; e c) cálculo e "output" dos requerimentos de água da cultura. Para o cálculo dos requerimentos da cultura são necessários dados mensais de ETo e de precipitação. A entrada de dados da cultura necessária para o cálculo dos requerimentos de água é feita com as seguintes informações: Comprimento, em dias, dos estádios de desenvolvimento; Coeficiente da cultura ( $K_c$ ) para as fases inicial, intermediária e na colheita. O cálculo do calendário de irrigação é realizado através dos dados adicionais: Profundidade das raízes (O); Nível de depleção (P) - representa o nível crítico de umidade do solo no qual o estresse hídrico afeta a evapotranspiração e a produtividade da cultura; Coeficiente de resposta ao rendimento devido ao estresse hídrico.

A parte do programa que calcula o calendário de irrigação somente pode ser usada após a utilização do programa que calcula os requerimentos de água da cultura. O cálculo do calendário de irrigação é baseado no balanço hídrico, onde, numa base diária, o fluxo de água de entrada e saída (evaporação, chuva, irrigação) na zona das raízes do perfil do solo é monitorado. A realização dos cálculos são necessários a inserção de dados de evapotranspiração, precipitação, cultura e solo. Tais dados são: Requerimento de água da cultura, definido como as necessidades diárias da cultura; Os dados necessários ao cálculo do calendário de irrigação são a profundidade das raízes e o nível de depleção da umidade do solo e os parâmetros do solo para o calendário de irrigação: conteúdo total da água disponível (TAM); o conteúdo inicial de umidade do solo (% TAM), indicativo do grau de secura do solo no início da estação de crescimento; Profundidade Máxima de Raíz. Quando os dados locais não estão disponíveis, estes podem ser obtidos por mais de 5.000 estações em todo o mundo, a partir de ClimWat, a base de dados climáticos associados. O modelo Cropwat é o mais utilizado nos estudos pesquisados de Pegada Hídrica, que incluem Pina (2010), Muller (2012), Mekonnen e Hoekstra (2010), Salmoral et al. (2010), Velázquez (2007), dentre outros.

### **2.13. Necessidade hídrica de culturas**

O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) é um parâmetro relacionado aos fatores ambientais e fisiológicos das plantas, devendo ser determinado para as condições locais nas quais será utilizado (Medeiros et al., 2004). Os valores do  $K_c$  recomendados por Doorenbos e Kassam (1994) variam de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura utilizada, uma vez que no ambiente atmosférico a dinâmica de fluxo de água é uma função

conjunta dos fatores climáticos da região. O cálculo dos valores de  $K_c$ , de acordo com Stone e Silveira, 1995) ocorre por meio da relação entre a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), avaliada experimentalmente, e a  $ET_o$ , obtida pelo emprego de modelos de estimativa. Por outro lado, de acordo com Gomes et al., 2006) existe poucas informações sobre as necessidades hídricas de culturas que possam subsidiar o manejo das irrigações.

Sendo a irrigação uma técnica indispensável para a implantação de uma agricultura racional e para o aumento da produtividade das culturas em regiões de clima árido e semiárido, há necessidade de serem quantificados, dentre outros, os efeitos dos fatores climáticos sobre o consumo de água das culturas e os níveis de umidade dos solos capazes de promover o aumento da produtividade. O estudo da evapotranspiração e da estimativa dos coeficientes de cultivo são importante para o correto controle de irrigação. A necessidade de informações sobre esses parâmetros apresenta-se como ponto de estrangulamento da produção, sendo a irrigação, na maioria das vezes, realizada com base no senso prático dos irrigantes, que utilizam práticas de manejo inadequadas. Portanto, é fundamental o estudo da evapotranspiração de culturas e do coeficiente de cultivo para que se tenha um planejamento das irrigações a fim de que seja de uso racional e para uma melhor otimização dos recursos hídricos.

A evapotranspiração de culturas se tornou uma informação indispensável para o manejo de irrigação. A grande maioria dos usuários da agricultura irrigada no Brasil não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água na irrigação (Sousa et al., 2010). Como o monitoramento automático ainda é muito primário, o conhecimento do consumo hídrico de uma cultura ( $ET_c$ ) durante seu ciclo de desenvolvimento é fundamental para o dimensionamento e o manejo de projetos de irrigação, de modo a aumentar a produtividade e otimizar a utilização dos equipamentos de irrigação, da energia elétrica e dos recursos hídricos (Sousa et al., 2010; Santos et al., 2013). O conhecimento do consumo de água nos diversos estádios ou etapas de desenvolvimento das plantas permite irrigação mais racional, de acordo com a exigência da cultura.

Para a irrigação dar bons resultados, ela deve ser bem quantificada, pois aplicação de lâminas de água insuficientes repõem água somente nas camadas superficiais do solo, não umedecendo toda a zona das raízes. Por outro lado, irrigações excessivas proporcionam perda de água e nutrientes, além de favorecer o aparecimento de microrganismos patogênicos, podendo prejudicar as raízes por falta de arejamento

em casos de solos com drenagem deficiente (Fernandes e Turco, 2018). Para se determinar o consumo hídrico das culturas é necessária a estimativa da evapotranspiração, que nada mais é que a transferência da água das superfícies cultivadas para a atmosfera e é controlada pela disponibilidade de energia e pelo suprimento hídrico do solo (Penman, 1948). O consumo de água pelas culturas é denominado de evapotranspiração da cultura (ETc), que é a ocorrência simultânea de dois processos importantes no cultivo das plantas, a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas. Na ausência de equipamentos de medidas diretas de evapotranspiração da cultura, os pesquisadores, muitas vezes, lançam mão de estimativas baseadas na ETo e no coeficiente de cultura (Kc) (Oliveira, 2011). Uma maneira muito utilizada de obter a evapotranspiração de referência (ETo) é por meio de métodos de estimativa de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO e considerado como padrão, enquanto outros são bastante criticados e, muitas vezes, desprezados (Silva, 2011).

A quantidade total de água necessária para a irrigação do tomateiro, que depende das condições climáticas, do sistema de irrigação e da cultivar, dentre outros fatores, varia entre 300 a 650 mm (Marouelli et al., 2012). Por outro lado, segundo Battilani et al. (2012), o cultivo do tomateiro consome entre 400-800 mm de água na emergência/transplante até colheita, dependendo do clima, tipo de planta, solo, irrigação e manejo da cultura. Ainda de acordo com os autores, os tomateiros podem tolerar a seca em alguns graus. Portanto, os níveis de umidade do solo podem chegar a 50 por cento do total de água disponível (TAD) sem perdas de rendimento após concluído o desenvolvimento do dossel. É importante manter os níveis de umidade do solo adequados no início do ciclo de vida, no transplante, jus ocasião da emissão da primeira flor até o ajuste completo da fruta. Ainda de acordo com os autores pode-se encerrar a irrigação algumas semanas antes da colheita, dependendo do armazenamento de água do solo e da expectativa de chuvas. Durante o período de pico de crescimento, as médias de uso de água chegam ao máximo de 4-7 mm/dia em um clima subúmido, podendo chegar a 8-9 mm/dia em áreas mais áridas.

Em regiões de alta umidade e ótima disponibilidade dos recursos hídricos, o sistema por sulcos pode ser o mais utilizado para o tomateiro. Embora exija a sistematização do solo para sua implantação, este tipo de irrigação reduz a possibilidade de ocorrência de doenças fúngicas quando comparado com o sistema de aspersão (Dusi et al., 1993). Esses autores ainda argumentam que com irrigações menos frequentes no

estágio de crescimento das plantas suas raízes se desenvolvem melhor. Já durante a fase de floração, frutificação e maturação, irrigações leves e frequentes favorecem o desenvolvimento do fruto e aumentam-lhe o teor de suco. O tomateiro é exigente quanto a regularidade de irrigação, sendo o excesso de umidade altamente prejudicial. A irrigação por gotejamento é o método mais utilizado (praticamente exclusivo), propiciando maior eficiência de aplicação, facilitando o manejo integrado de pragas, além de otimizar a aplicação de fertilizantes através da fertirrigação (Marouelli et al., 2001). A irrigação deve ser suficiente para manter úmida a camada de solo explorada pelo sistema radicular do tomateiro que, de modo geral, atinge até 40 cm de profundidade (Dusi et al., 1993). A necessidade hídrica da cultura do tomateiro, como a maioria das culturas, pode ser determinada a partir da estimativa ou medição da evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultivo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

Os dados deste estudo foram obtidos na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro - DCA) (com latitude sul de 7° 12' 52,85" e longitude oeste 35° 54' 26,78") da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, localizada na Microrregião Campina Grande e na Mesorregião Agreste Paraibano do Estado da Paraíba (CPRM, 2005) (CPRM, 2005) (Figura 1).



Figura 1. Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro – DCA) da Universidade Federal de Campina Grande

O município de Campina Grande pela classificação climática de Köppen possui clima considerado tropical, com temperatura média do mês mais frio superior aos 18 °C e precipitação média anual superior a 700 mm (Tabela 1). O relevo varia de 337 m a 665 m acima do nível médio do mar, onde devido à localização numa região alta, é beneficiada por temperaturas menores e de uma ótima ventilação, que proporciona um clima ameno e agradável (Medeiros et al., 2011). Ainda de acordo com o autor, Campina Grande se situa na fronteira entre microrregiões de clima e vegetação diferentes. Ao nordeste, a paisagem é verde e arborizada, típica do brejo presente nas partes mais altas do planalto. Ao sudeste, encontra-se uma paisagem típica do agreste,

com árvores e pastagens. As regiões oeste e sul do município predominam clima e vegetação do Cariri, com vastas áreas de vegetação rasteira tipo caatinga e clima seco.

Tabela 1. Dados meteorológicos climáticos médios de Campina Grande-PB no período de 1961 a 1990

| <b>Dados Meteorológicos</b>   | <b>Média</b> |
|---|--------------|
| Pressão Atmosférica (hPa)   | 950,2        |
| Temperatura do ar (°C)  | 23,3         |
| Temperatura Máxima do ar (°C)   | 27,5         |
| Temperatura Mínima do ar (°C)   | 19,2         |
| ** Precipitação Total (mm)  | 764,3        |
| Evaporação acumulada do ar (mm)   | 1417,4       |
| Umidade Relativa do ar (%)  | 82,7         |
| Isolação Total (h)  | 2324         |
| Nebulosidade (0 - 10)   | 6,8          |
| Radiação Solar Global Média (cal. cm <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> ) | 433,3        |

### 3.2. Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em blocos casualizados, com cinco culturas, o tomate (*Solanum lycopersicum*), a cebola (*Allium cepa*), o feijão (*Phaseolus vulgaris*), coentro (*Coriandrum sativum*) e alface (*Lactuca sativa*), cinco lâminas de irrigação (20, 40, 60, 80 e 100% da Eto e com duas repetições e 3-4 aplicações semanais de água até as senescências das culturas.

### 3.3. Cálculo da evapotranspiração de referencia

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi obtida pelo método Penman-Monteith é definida pela seguinte função:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (1)$$

em que:

ET<sub>o</sub> – evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);

R<sub>n</sub>- saldo de radiação á superfície da cultura (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

T- temperatura do ar a 2m de altura (°C);

u<sub>2</sub>- velocidade do vento a 2m de altura (m s<sup>-1</sup>);

$e_s$  - pressão de vapor de saturação (kPa);

$e_a$  - pressão parcial de vapor (kPa);

$\Delta$  - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>), e

$\gamma$  - coeficiente psicométrico (kPa °C<sup>-1</sup>).

### **3.4. Cálculo da Evapotranspiração da cultura**

Os componentes da equação do balanço hídrico para um volume de solo controle do perfil até a profundidade da zona de raiz foram estimados a partir da seguinte equação:

$$ET_c = P + I + C_p + D_p - R_o \pm \Delta W \quad (2)$$

em que P é a precipitação (mm); I é a irrigação (mm);  $C_p$  é a ascensão capilar (mm);  $D_p$  é a percolação de água na zona de raiz, também conhecida como drenagem profunda (mm);  $R_o$  é o escoamento superficial (mm) e W é a variação no conteúdo de água do solo (mm).

O escoamento superficial (R) e o fluxo a ascensão capilar para a zona de raiz ( $C_p$ ) serão considerados nulos, haja vista que eles são muito pequenos e assim desprezíveis, quando comparados com a  $ET_c$ . Além disso, a drenagem profunda ( $D_p$ ), pela mesma razão, será também considerada nula. Assim, a Eq. (2) é reduzida para:

$$ET_c = P + I \pm \Delta W \quad (3)$$

Quando os lisímetros não são instalados para o monitoramento da  $ET_c$ , a quantificação de água campo mencionada acima, é comumente usada para medir o consumo de água total real ou evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), como explicam Farahani et al. (2009) e Abedinpour et al. (2012).

### **3.5. Análise do desempenho econômico da cultura do coentro**

Com base nos dados de produtividade obtidos experimentalmente, os custos de produção e calculado os parâmetros econômicos como a receita bruta, margem bruta e a conexão benefício e custo. O detalhamento dos custos foi baseado no conceito de custo operacional (COE). Segundo Martin et al. (1998) serão todos os gastos monetários desempenhados com as culturas em questão. A indicação da eficiência econômica foi executada com a obtenção da associação benefício/custo (RBC) de acordo com a Eq. (4).

$$RBC = \frac{RB}{CP} \quad (4)$$

em que:

RB = Renda bruta da cultura do coentro (R\$ m<sup>-2</sup>)

CP= Custo de produção (R\$ m<sup>-2</sup>)

A renda bruta foi obtida através da equação (5).

$$RB = PP.PD \quad (5)$$

em que:

PP = Preço da unidade da cultura (R\$ cultura m<sup>-1</sup>)

PD = Produção obtida no canteiro (m<sup>2</sup>)

A renda líquida da cultura será obtida através da diferença entre a renda bruta e o custo de produção. Equação (6)

$$RL = RB - CP \quad (6)$$

em que:

RB = Renda bruta obtida no canteiro (R\$ m<sup>-2</sup>)

CP= Custo de produção (R\$ m<sup>-2</sup>)

O custo de produção (CP) condiz a todos os empenhos de produção e será estabelecida a partir da equação (7)

$$CP = C_{\text{operações}} + C_{\text{material consumido}} \quad (7)$$

em que:

C<sub>operações</sub> = representa a mão de obra utilizada na produção

C<sub>material consumido</sub> = representa as sementes, fertilizantes e pesticidas

### ***3.6. Cálculos dos componentes da pegada hídrica***

As pegadas hídricas das culturas em estudo foram calculadas individualmente seguindo as seguintes equações:

#### ***3.6.1. Componente da pegada hídrica verde***

A pegada hídrica verde do processo de crescimento de uma cultura foi calculada dividindo-se o consumo de água verde da cultura (C<sub>verde</sub>, m<sup>3</sup>/ha) pela sua produtividade (Y, t/ha):

$$PH_{verde} = \frac{NCH_{verde}}{P} \quad (8)$$

em que  $PH_{verde}$  foi calculada pelo acúmulo de evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) diária durante o período de crescimento completo, pelo método do balanço hídrico do solo e pelo software CROWATER. A  $ET_c$  foi estimada com base em intervalos de dias ao longo de todo o período de crescimento utilizando a precipitação efetiva ( $P_{eff}$ ). A evapotranspiração de Água verde ( $ET_{verde}$ ) foi calculada como o mínimo entre os valores da evapotranspiração total da cultura ( $ET_c$ ) e a precipitação efetiva ( $P_{eff}$ ), isto é:

$$ET_{verde} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (9)$$

A evapotranspiração total de água verde será obtida através da soma de todas as  $ET_{verde}$  ao longo de todo o período de crescimento. Conforme demonstra a Eq. (6), foi calculada a evapotranspiração de cultura verde aplicando o fator 10 que visa converter a profundidade da água em milímetros em volume de água por superfície terrestre, em  $m^3 \cdot ha^{-1}$ . O somatório é feito ao longo do período, desde o dia do plantio ( $d=1$ ) até o dia da colheita.

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

em que:

$NCH_{verde}$  = Necessidade hídrica de água verde ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ );

$ET_{verde}$  = Evapotranspiração de água verde ( $mm \cdot dia^{-1}$ );

$D_{pc}$  = duração do período de crescimento (dias);

$\alpha$  = fator de conversão;

$d$  = dia do plantio

### 3.6.2. Componente da pegada hídrica azul

A pegada hídrica azul da cultura foi calculada dividindo-se a necessidade hídrica azul da cultura ( $m^3 \cdot t^{-1}$ ) pela sua produtividade ( $t \cdot ha^{-1}$ ), conforme a equação abaixo:

$$PH_{azul} = \frac{NCH_{azul}}{P} \quad (11)$$

em que:  $NCH_{azul}$  foi calculada pela evapotranspiração total ao longo do ciclo da cultura. A produtividade foi obtida através do produto entre a massa fresca da parte aérea de cada planta e a população de plantas ( $Kg \cdot ha^{-1}$ ). A  $ET_c$  foi estimada com base em intervalos de

dias ao longo de todo o período de crescimento utilizando a precipitação efetiva ( $P_{eff}$ ). A evapotranspiração de água azul ( $ET_{azul}$ ) foi calculada a partir do máximo da equação abaixo:

$$ET_{azul} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (12)$$

De acordo com a Eq (12), quando a precipitação efetiva é maior que a evapotranspiração da cultura, a  $ET_{azul}$  é igual à zero. A evapotranspiração total de água azul foi obtida através da soma de todas as  $ET_{azul}$  ao longo de todo o período de crescimento. Conforme demonstra a Eq. (13), foi calculado o consumo azul em que a evapotranspiração de cultura azul aplicando o fator 10.

$$NCH_{azul} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{azul} \quad (13)$$

em que:

$NHC_{azul}$  = Necessidade hídrica de água azul ( $m^3 ha^{-1}$ );

$ET_{azul}$  = Evapotranspiração de água azul ( $mm dia^{-1}$ );

$D_{pc}$  = duração do período de crescimento (dias);

$\alpha$  = fator de conversão;

$d$  = dia do plantio

A  $NHC_{azul}$  representa o total de água irrigada evaporada da área. Dessa forma, a pegada hídrica azul do cultivo de uma cultura refere-se à evapotranspiração da água irrigada apenas na área da cultura.

### 3.6.3. Componente da pegada hídrica cinza

A pegada hídrica cinza do crescimento de uma cultura ( $PH_{cinza}$ ) foi calculada como a taxa de aplicação de químicos por hectare (TAQ por  $kg ha^{-1}$ ) vezes a fração de escoamento, lixiviação ( $\alpha$ ) dividindo pela concentração máxima aceitável ( $C_{max}$ ), menos a concentração natural ( $C_{nat}$ ) para o poluente considerado e, em seguida, dividido pela produtividade da cultura ( $Y$ , t/ha), conforme a Eq. (14):

$$PH_{cinza} = \frac{(\alpha + TAQ) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (14)$$

em que:

$PH_{cinza}$  = Pegada hídrica cinza ( $m^3 t^{-1}$ );

$\alpha$  = Fração de lixiviação ( $mm dia^{-1}$ );

TAQ = Taxa de aplicação de químicos por hectares ( $kg ha^{-1}$ );

$C_{máx}$  = Concentração máxima aceitável para o poluente considerado ( $kg m^{-3}$ );

$C_{nat}$  = Concentração natural do corpo receptor de água ( $kg m^{-3}$ );

Y = Produtividade da cultura ( $t ha^{-1}$ ).

#### 4.6.4. Pegada hídrica total do processo

O cálculo da pegada hídrica total do processo de crescimento de cada cultura foi obtido com base na soma dos componentes verde, azul e cinza, conforme demonstra a Eq. (15).

$$PH_{total} = PH_{verde} + PH_{azul} + PH_{cinza} \quad (15)$$

em que:

$PH_{total}$  = Pegada hídrica total de um processo de crescimento de cultura ( $m^3 t^{-1}$ )

$PH_{verde}$  = Pegada hídrica verde ( $m^3 t^{-1}$ );

$PH_{azul}$  = Pegada hídrica azul ( $m^3 t^{-1}$ );

$PH_{cinza}$  = Pegada hídrica cinza ( $m^3 t^{-1}$ )

### 3.8. Análise estatística

Os valores de cada componente da PH obtidos com base no balanço hídrico no solo (dados observados) foram comparados com aqueles obtidos com base no modelo Cropwat. O desempenho do modelo foi avaliado usando análise de regressão linear e o teste t-Student para verificar a significância estatística dos coeficientes de correlação.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 exibe os componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 20% da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). A PH foi determinada para três partes da planta: frutos, parte aérea e a soma dos dois, ou seja, frutos + parte aérea. Constata-se que as componentes verde e azul de todas as partes da planta são praticamente iguais; enquanto a componente cinza tem uma contribuição bem maior no cálculo da PH total. Os valores da PH total dos frutos, parte aérea e frutos + parte aérea foram, respectivamente, 1132, 1188 e 578 m<sup>3</sup>/ton. O fruto do tomateiro, com a irrigação de apenas 20% da ET<sub>o</sub>, produz uma evapotranspiração de 1,3 mm/dia e uma produtividade de 2,7 ton/ha. Portanto, nessas condições, para produzir uma kg de tomate são necessários 1.132 litros de água.

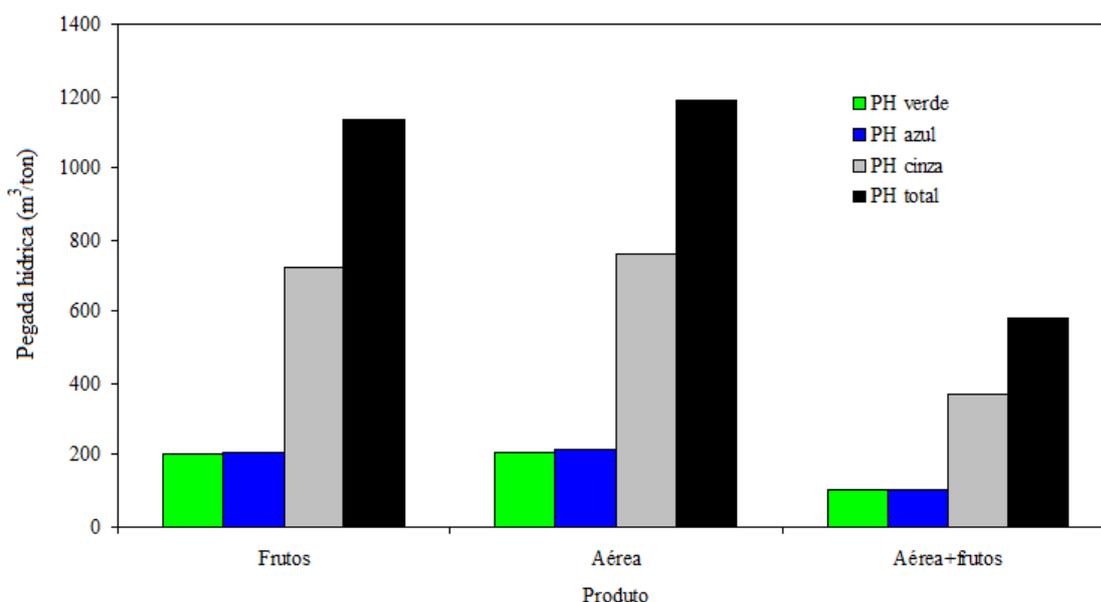


Figura 2. Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 20% da evapotranspiração de referência

Neste tratamento de 20% da ET<sub>o</sub>, a PH total do fruto e da parte aérea são praticamente iguais, enquanto da parte aérea mais fruto é praticamente a metade. Isso é justificada pelo fato de que para produzir a parte aérea mais fruto é necessária a mesma quantidade de água que se utiliza para apenas o fruto. A Figura 3 exibe os componentes da PH do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 40% da evapotranspiração de referência. Como mencionado anteriormente, a PH foi determinada para três partes da

planta: frutos, parte aérea e a soma dos dois, ou seja, frutos mais parte aérea. No caso da PH do tomateiro submetido ao tratamento de 40% da ETo, as componentes verde, azul e cinza de todas as partes da planta são diferentes e crescentes na sequência de verde para cinza.

Os valores da PH total dos frutos, parte aérea e frutos + parte aérea foram, respectivamente, 1057, 1423 e 609 m<sup>3</sup>/ton. O tomateiro, com a irrigação de 40% da ETo, produz uma evapotranspiração de 2 mm/dia e produtividades de 3,5; 2,6 e 6,1 ton/ha para fruto, parte aérea e frutos + parte aérea, respectivamente. Com o tratamento de 40% ETo, o tomateiro produz um kg de fruto de tomate com 1.57 litros de água. Neste tratamento de 40% da ETo, a PH total do fruto e da parte aérea são praticamente diferentes, enquanto da parte aérea mais fruto é menos da metade da parte do frutos + parte aérea. Para este fato, vale a mesma justificativa anterior em que para produzir a parte aérea mais fruto é necessária a mesma quantidade de água que se utiliza para apenas o fruto.

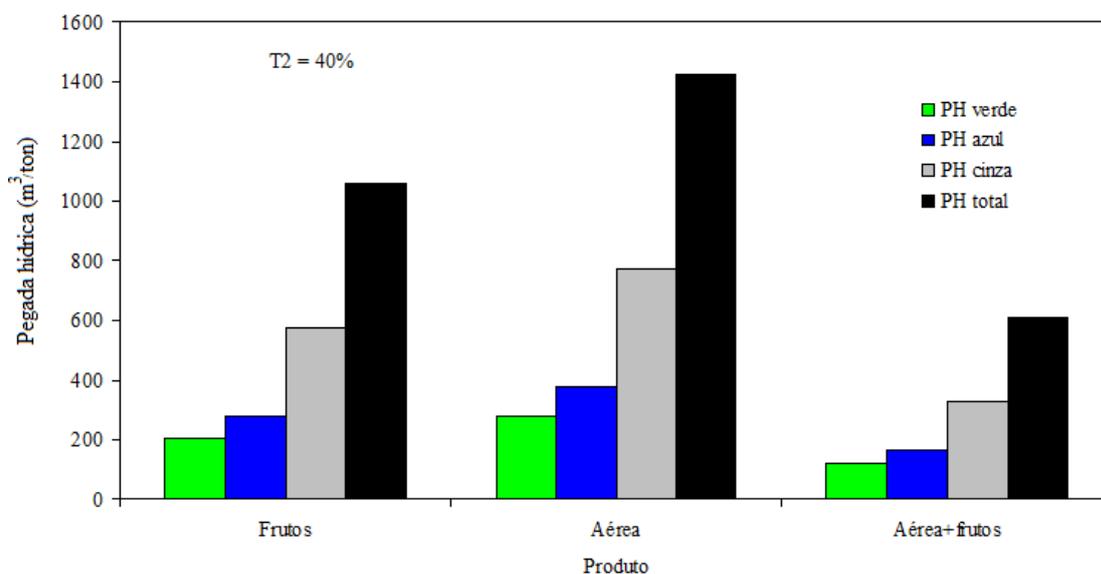


Figura 3. Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 40% da evapotranspiração de referência

A Figura 4 exibe os componentes da PH do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 60% da evapotranspiração de referência. A PH foi também determinada para três partes da planta: frutos, parte aérea e a soma dos dois, ou seja, frutos mais parte aérea. No caso da PH do tomateiro submetido ao tratamento de 60% da ETo, as

componentes verde, azul e cinza de todas as partes da planta são também diferentes e crescentes de verde para cinza. Os valores da PH total dos frutos, parte aérea e frutos + parte aérea foram, respectivamente, 970, 1505 e 598 m<sup>3</sup>/ton. O tomateiro, com a irrigação de 60% da ETo, produz uma evapotranspiração de 2,8 mm/dia e produtividades de 4,5; 2,9 e 7,3 ton/ha para fruto, parte aérea e frutos + parte aérea, respectivamente. Assim, com o tratamento de 60% ETo, para produzir uma kg de fruto de tomate são necessários 970 litros de água. Neste tratamento de 60% da ETo, a PH total do fruto é inferior a parte aérea da planta. Tal como nos casos anteriores, para produzir a parte aérea da planta é necessária a mesma quantidade de água que se utiliza para apenas o fruto da cultura.

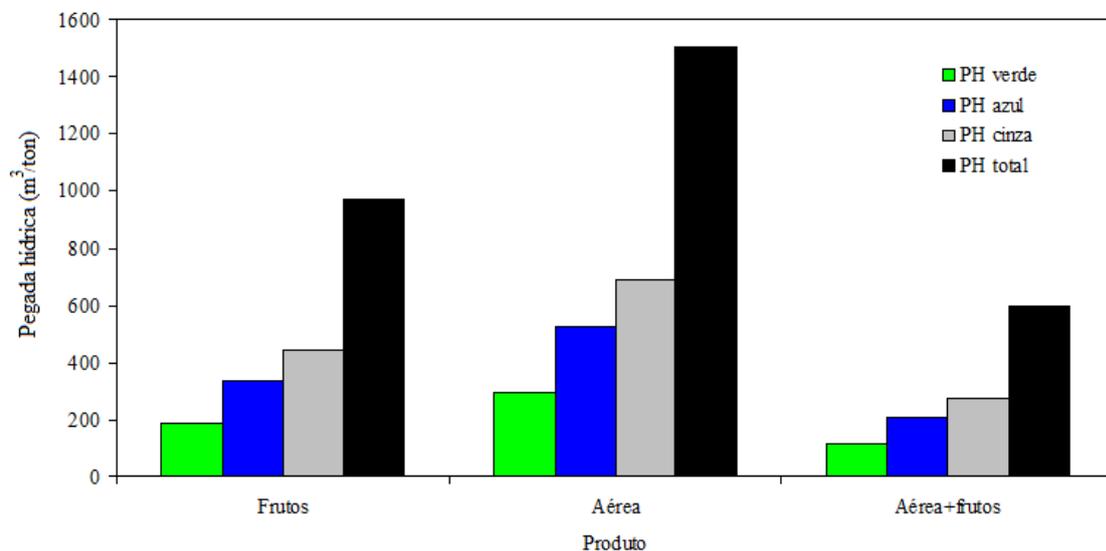


Figura 4. Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 60% da evapotranspiração de referência

Os componentes da PH do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 80% da evapotranspiração de referência são exibidos na Figura 5. No caso da PH do tomateiro submetido ao tratamento de 80% da ETo, as componentes verde, azul e cinza de todas as partes da planta são diferentes e crescentes de verde para cinza, tal como os tratamentos anteriores. Os valores da PH total dos frutos, parte aérea e frutos + parte aérea foram, respectivamente, 1149, 1365 e 616 m<sup>3</sup>/ton. Desta forma, o tomateiro irrigado com 80% da ETo, produz uma evapotranspiração de 3.6 mm/dia e produtividades de 4,4; 23,7 e 8,2 ton/ha para fruto, parte aérea e frutos + parte aérea, respectivamente. Assim, com o tratamento de 80% ETo, o tomateiro produz um kg de

fruto de tomate com 1149 litros de água. Neste tratamento, a PH total do fruto é também inferior a parte aérea da planta e a PH da soma das duas é inferior a dos frutos e também da parte aérea. Similarmente, para produzir a parte aérea da planta é necessária uma quantidade de água maior do que se utiliza para apenas o fruto.

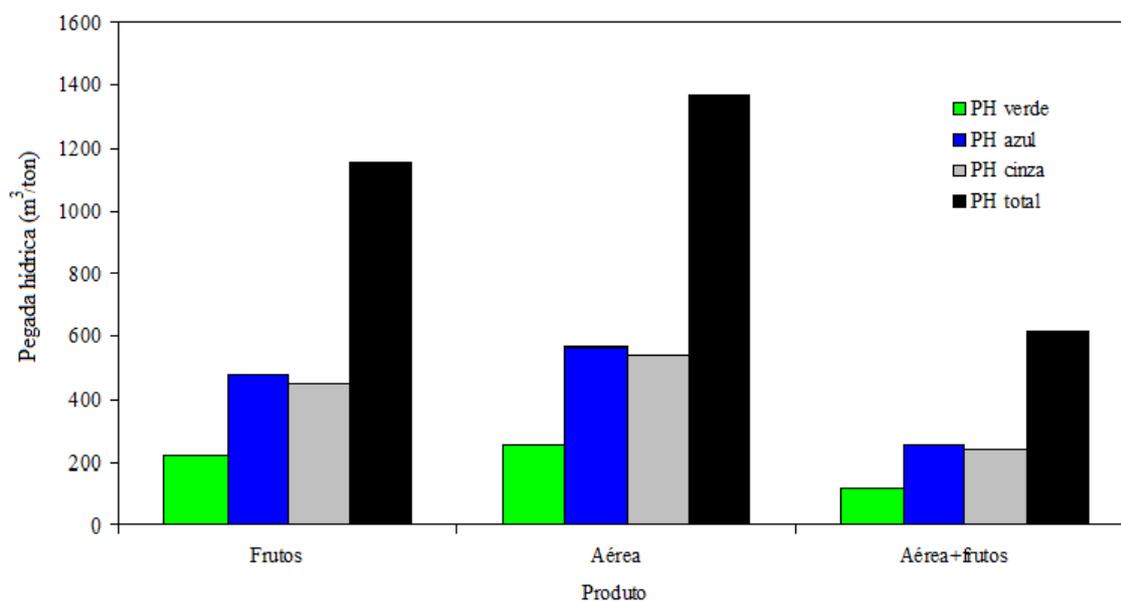


Figura 5. Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 80% da evapotranspiração de referência

Os componentes da PH do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 100% da evapotranspiração de referência são exibidos na Figura 6. No caso da PH do tomateiro submetido ao tratamento de 100% da ETo, as componentes verde, azul e cinza de todas as partes da planta são diferentes e crescentes de verde para cinza. Os valores da PH total dos frutos, parte aérea e frutos + parte aérea foram, respectivamente, 1172, 1497 e 649 m<sup>3</sup>/ton. Desta forma, o tomateiro irrigado com 100% da ETo, produz uma evapotranspiração de 3,9 mm/dia e produtividades de 4,6; 3,6 e 8,3 ton/ha para frutos, parte aérea e frutos + parte aérea, respectivamente. Assim, com o tratamento de 100% ETo, para o tomateiro produzir uma kg de fruto são necessários 1172 litros de água, praticamente a mesma quantidade de água para o tratamento de 80% da ETo. Neste tratamento, a PH total do fruto é também inferior a parte aérea da planta e a PH da soma das duas é inferior a PH dos frutos e também da parte aérea.

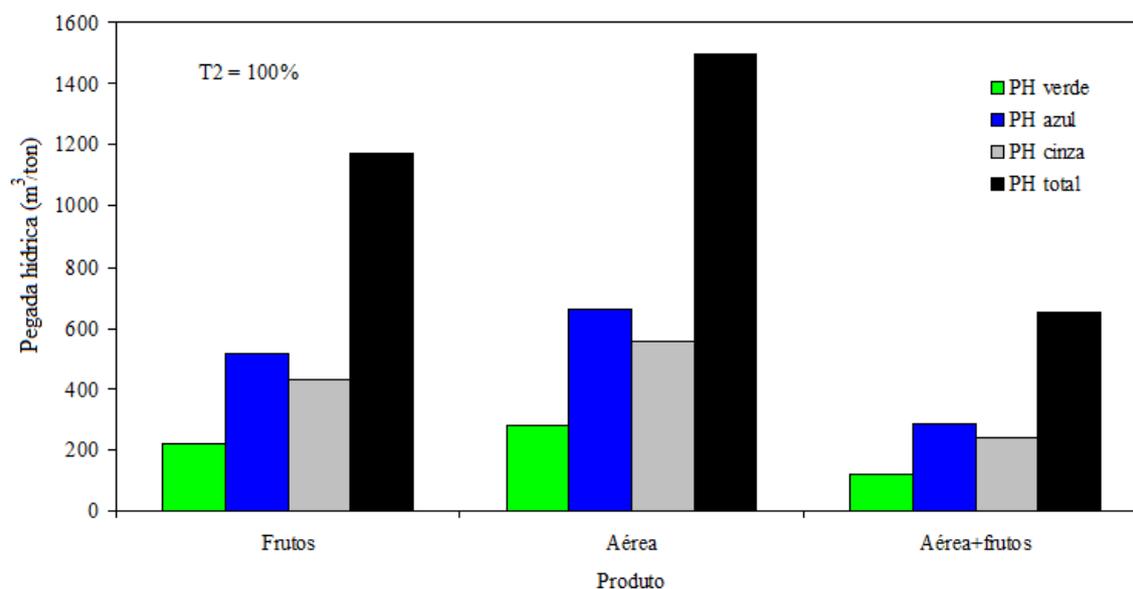


Figura 6. Componentes da pegada hídrica (PH) do tomateiro cultivado irrigado sob o tratamento de 100% da evapotranspiração de referência

Os componentes da pegada hídrica, evapotranspiração e produtividade do tomateiro cultivado irrigado sob cinco tratamentos de irrigação no semiárido brasileiro são exibidos na Tabela 2. Constata-se que a PH da parte aérea + fruto é inferior a de frutos e também da parte aérea+ frutos em todos os tratamentos de irrigação. Isso ocorre pelo fato que é utilizada a mesma quantidade de água nas três situações. A evapotranspiração e produtividade do tomateiro aumentam de acordo com o aumento da lâmina de água aplicada à cultura. Entretanto, a pegada hídrica não segue esta linearidade, haja vista que a PH do fruto do tomate é maior nos tratamentos com 20%ETo e 100%ETo.

A PH cinza é maior nos tratamentos de 20% ETo, 40% ETo e a 60% ETo, enquanto nos tratamentos de 80% ETo e 100% ETo a PH azul é maior de que todos as componentes. Entretanto, apesar disso, a PH cinza ainda continua sendo muito alta e predominante no cálculo da PH total. Este resultado sugere que o tomateiro absorve bastante defensivos agrícolas durante todo o seu ciclo de desenvolvimento, desde a brotação até a colheita. Em todos os tratamentos de irrigação, a PH verde tem a menor contribuição da PH total, chegando a ser aproximadamente 1/3 da PH cinza. Este resultado sugere que irrigação tem uma contribuição mais importante do que a precipitação pluvial em face da capacidade de controle de entrada de água no sistema.

Tabela 2. Componentes da pegada hídrica, evapotranspiração e produtividade do tomateiro cultivado irrigado sob cinco tratamentos de irrigação

| Tipo         | Prod | PH verde | PH azul | PH cinza | PH total |
|--------------|------|----------|---------|----------|----------|
| T1= 20% ETo  |      |          |         |          |          |
| Frutos       | 2,7  | 200,2    | 207,4   | 724,6    | 1132,2   |
| Aérea        | 2,6  | 210,1    | 217,6   | 760,5    | 1188,2   |
| Aérea+frutos | 5,4  | 102,3    | 106,0   | 370,4    | 578,7    |
| T2= 40% ETo  |      |          |         |          |          |
| Frutos       | 3,5  | 206,6    | 279,7   | 571,4    | 1057,8   |
| Aérea        | 2,6  | 278,2    | 376,5   | 769,2    | 1423,9   |
| Aérea+frutos | 6,1  | 118,6    | 160,5   | 327,9    | 606,9    |
| T3= 60% ETo  |      |          |         |          |          |
| Frutos       | 4,5  | 188,3    | 337,7   | 444,4    | 970,4    |
| Aérea        | 2,9  | 292,2    | 524,0   | 689,7    | 1505,8   |
| Aérea+frutos | 7,3  | 116,1    | 208,2   | 274,0    | 598,2    |
| T4= 80% ETo  |      |          |         |          |          |
| Frutos       | 4,4  | 218,6    | 475,9   | 454,5    | 1149,1   |
| Aérea        | 3,7  | 260,0    | 565,9   | 540,5    | 1366,5   |
| Aérea+frutos | 8,2  | 117,3    | 255,4   | 243,9    | 616,6    |
| T5= 100% ETo |      |          |         |          |          |
| Frutos       | 4,6  | 219,8    | 517,4   | 434,8    | 1172,0   |
| Aérea        | 3,6  | 280,8    | 661,1   | 555,6    | 1497,5   |
| Aérea+frutos | 8,3  | 121,8    | 286,8   | 241,0    | 649,5    |

A comparação da produtividade dos frutos com a evapotranspiração do tomateiro cultivado irrigado sob todos os tratamentos de irrigação utilizado no estudo é exibida na Figura 7. O aumento da produtividade da cultura com a evapotranspiração é evidente, cuja comparação resulta no coeficiente de determinação 0,86 que é estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student. Freitas (2018) observou que a lâmina recomendada para obtenção de maior produtividade do tomateiro é de 100%ETo, ressaltando que, a lâmina de 80% mostrou resultados próximos desta recomendada, demonstrando que a irrigação do tomateiro variedade “Shanty” pode ser programada tanto com uso de 100% como de 80% da necessidade hídrica da cultura para o Agreste da Paraíba. Observou ainda, que os valores do Kc obtidos para o tomateiro foram 0,40; 0,75; 1,11; 0,93 e 0,70 para os estágios inicial, desenvolvimento, intermediário, final e colheita, respectivamente.

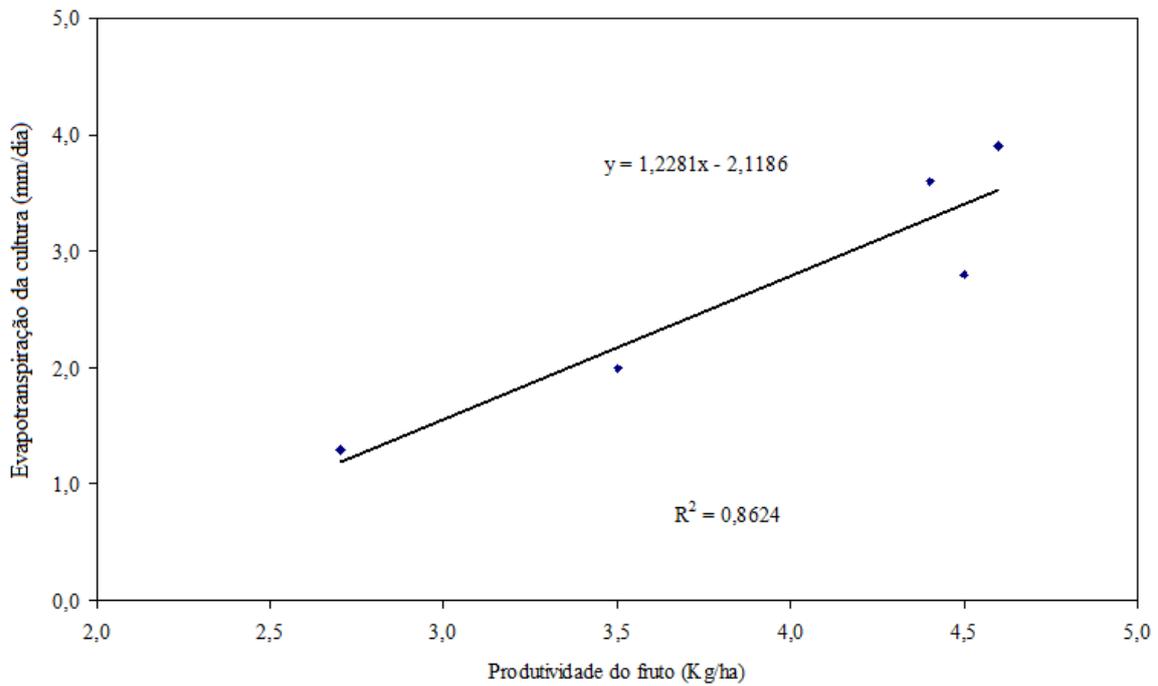


Figura 7. Comparação da produtividade dos frutos com a evapotranspiração do tomateiro cultivado irrigado sob os tratamentos T1 a T5

A Figura 8 exibe a evolução da evapotranspiração do tomateiro cultivado irrigado em função dos tratamentos de irrigação. Constata-se o aumento a evapotranspiração com o aumento da evapotranspiração

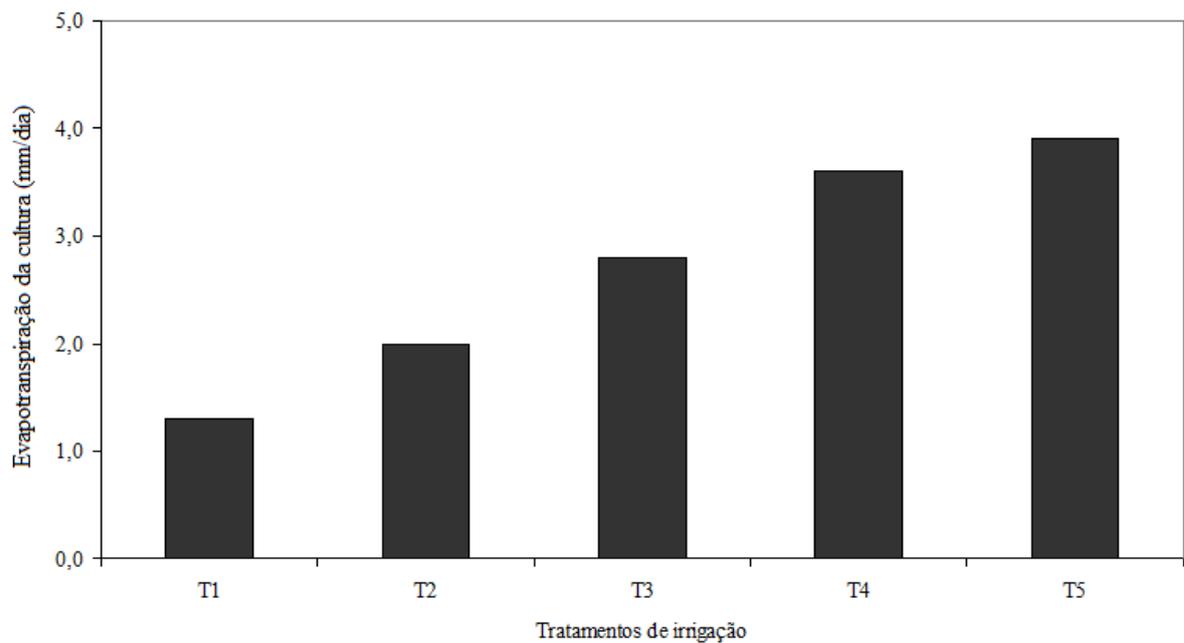


Figura 8. Evolução da evapotranspiração do tomateiro cultivado irrigado em função dos tratamentos de irrigação

A evolução da produtividade do tomateiro cultivado irrigado em função dos tratamentos de irrigação é exibida na Figura 9. Constata-se que de fato a produtividade não cresce com o tratamento de irrigação em todos os casos, haja vista que o tratamento de 80%ETo apresenta uma produtividade maior do que com a lâmina de 100% ETo.

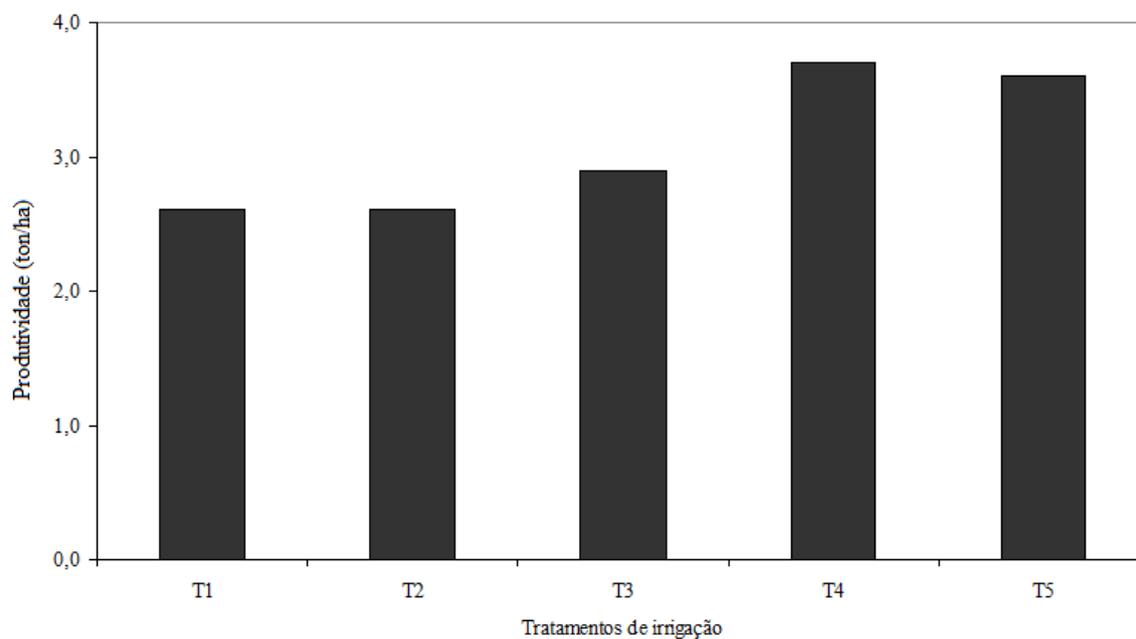


Figura 9. Evolução da produtividade do tomateiro cultivado irrigado em função dos tratamentos de irrigação

Os componentes da pegada hídrica da cultura do alface irrigado no semiárido brasileiro são exibidos na Figura 10. A PH total do alface irrigado no semiárido brasileiro é baixa, de apenas 251 m<sup>3</sup>/ton. Os componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica dessa cultura são de 25, 86 e 140 m<sup>3</sup>/ton, respectivamente. A PH cinza do alface é bastante alta e representa 56% da PH total da cultura. Por outro lado, os componentes verde e azul do alface representam, respectivamente, 10% e 34% da PH total da cultura.

A evapotranspiração média do alface na área de estudo foi de 3,7 mm/dia e o total de chuva durante o ciclo de cultivo foi de 120 mm, enquanto o total irrigado nesse mesmo período foi de 142 mm. Medeiros et al. (2012) avaliaram o efeito da salinidade do solo e do manejo da fertirrigação sob a produtividade e eficiência de uso da água do tomateiro, cultivado em solo franco argiloso e em casa de vegetação. Uma das conclusões dos autores foi que as maiores a produtividades e eficiências do uso foram obtidos para o manejo de fertirrigação alternativo sob condições de baixa salinidade do solo.

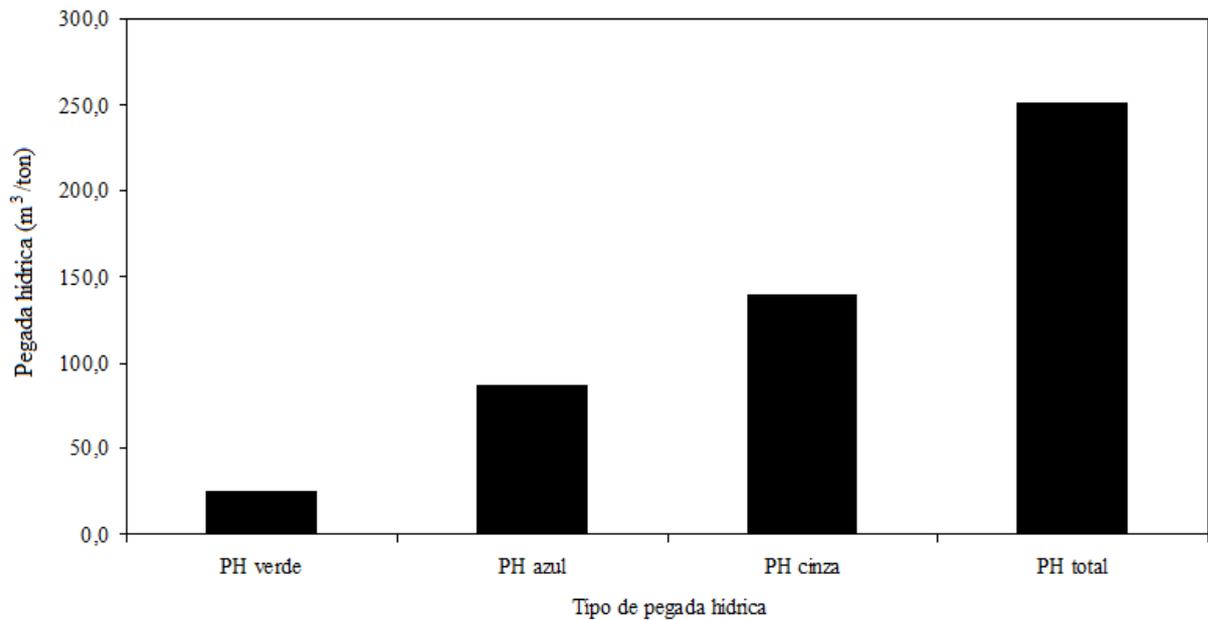


Figura 10. Componentes da pegada hídrica do alface irrigado. PH verde = pegada hídrica verde; . PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza

Os componentes da pegada hídrica da cultura do coentro irrigado no semiárido brasileiro são exibidos na Figura 11. Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, a produtividade média foi de 0,25 ton/ha e a evapotranspiração da cultura média foi de 5,22 mm/dia. Os componentes da PH verde, azul e cinza foram de 232, 5.000, 8.207 m<sup>3</sup>/ton, respectivamente. Desta forma, na produção de 1 kg de coentro são gastos 8.207 litros de água. Este alto valor da PH da cultura está associado a baixa produtividade da cultura. A pegada hídrica cinza do coentro também é a mais alta de todas as culturas estudadas, enquanto o componente verde, que está associada à precipitação, representa apenas 2,8% da PH total. Por outro lado, os componentes azul e cinza da PH do coentro representam, respectivamente, 36% e 60% da PH total. Reis et al. (2013) determinaram ao longo do ciclo da cultura do tomateiro, a relação entre o índice de área foliar e a produtividade e, ao final do ciclo, os componentes de produção do tomateiro, em ambiente protegido. Uma das conclusões foi que é possível determinar, em ambiente protegido, o índice de área foliar da cultura do tomateiro considerando-se os dias após o transplantio.

A Figura 12 exhibe os componentes da pegada hídrica do feijão irrigado na área de estudo. A menor componente é a verde e maior é azul. A PH total do feijão irrigado no semiárido brasileiro é também bastante alta. São necessários 5.507 litros de água para produzir quilo de feijão.

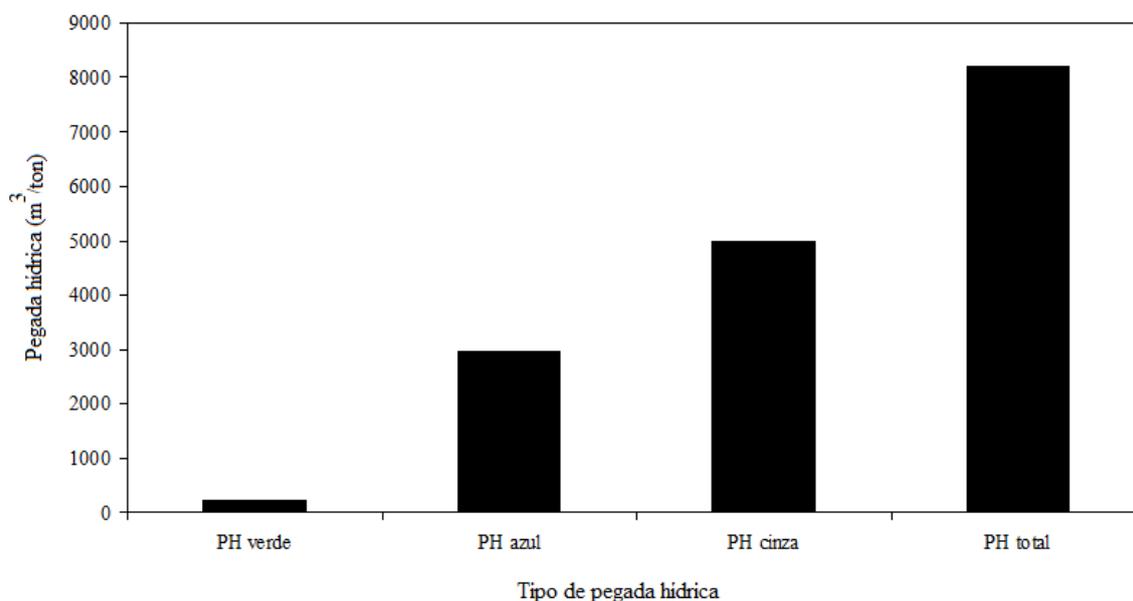


Figura 11. Componentes da pegada hídrica do coentro irrigado. PH verde = pegada hídrica verde; . PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza

Os componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica dessa cultura são de 46; 3.393 e 1.666 m<sup>3</sup>/ton, respectivamente. Portanto, a PH verde do feijão representa menos de 1% da PH total.

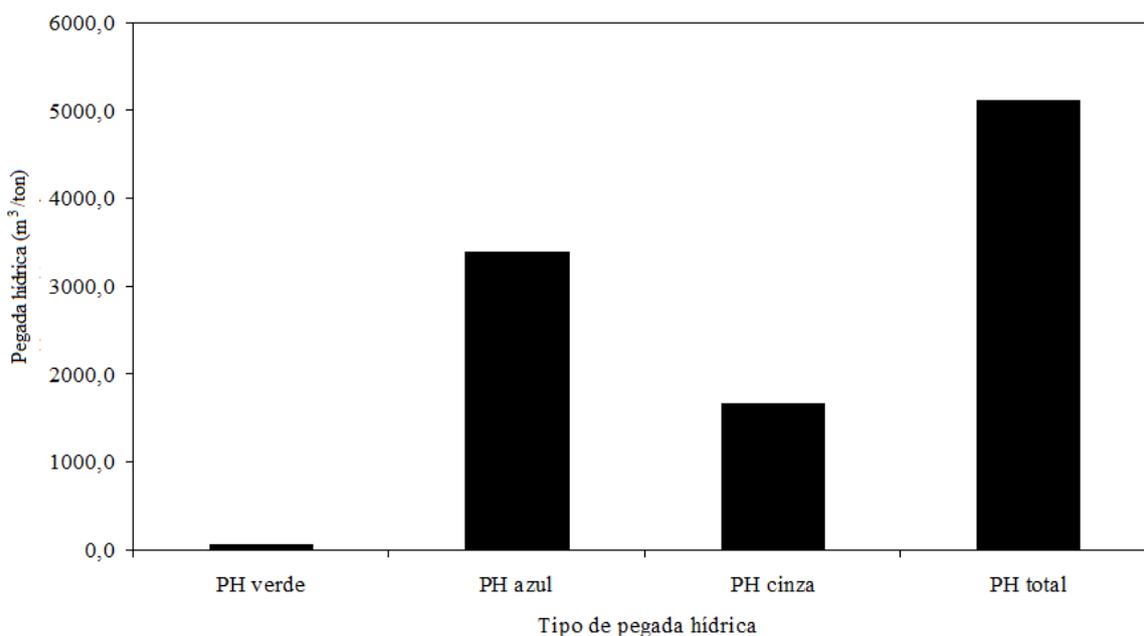


Figura 12. Componentes da pegada hídrica do feijão irrigado. PH verde = pegada hídrica verde; . PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza

Os componentes azul e cinza do feijão representam, respectivamente, 66% e 33% da PH total da cultura. O alto valor da PH total do feijão está associado à baixa produtividade da cultura que foi de 1,2 ton/ha. A evapotranspiração média do feijão na área de estudo foi de 6,2 mm/dia e o total de chuva durante o ciclo de cultivo foi de apenas 5,6 mm. O baixo valor da PH verde está associado à pluviometria na região durante o cultivo do feijão.

A Figura 13 exhibe o componentes da pegada hídrica da cebola irrigada no semiárido brasileiro. A PH total da cebola é bastante baixa, quando comparada com as outras culturas em análise. De acordo com os dados são necessários apenas 131 litros de água para produzir um kg de cebola. Os componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica dessa cultura são de 14; 71 e 46 m<sup>3</sup>/ton, respectivamente. Portanto, a PH verde da cebola é muito baixa, representando em torno de 10% da PH total. A produtividade da cebola foi de 43 ton/ha e a evapotranspiração média foi de 3,8 mm/dia, enquanto o total de chuva durante o ciclo de cultivo foi 92 mm.

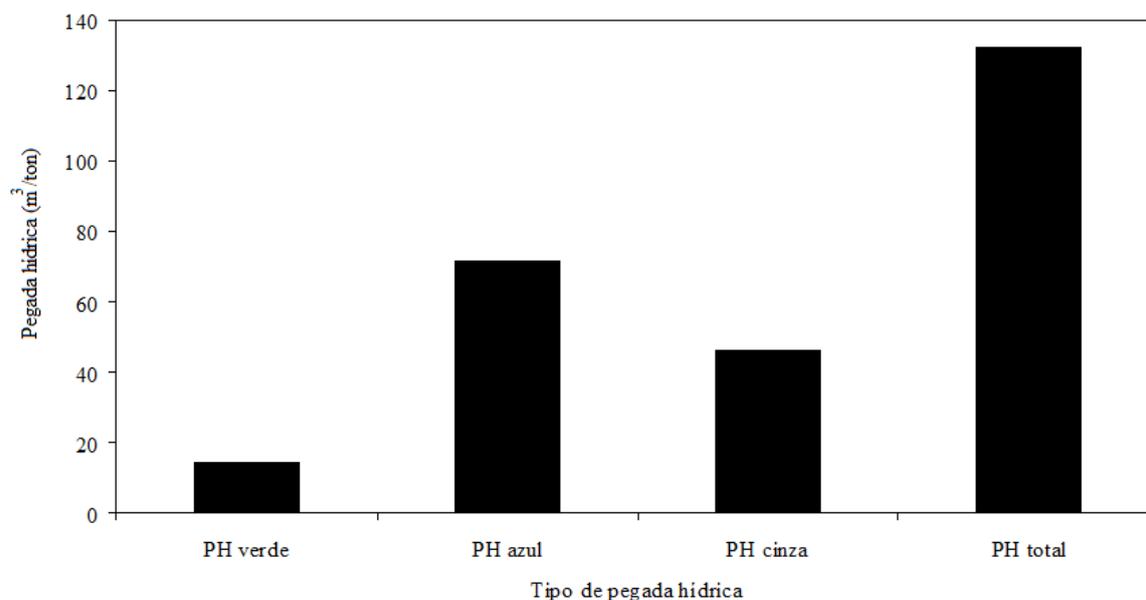


Figura 13. Componentes da pegada hídrica da cebola irrigado. PH verde = pegada hídrica verde;. PH azul = pegada hídrica azul e PH cinza = pegada hídrica cinza e PH total = PH verde + PH azul + PH cinza

Os componentes da pegada hídrica das cinco culturas cultivadas irrigadas no semiárido brasileiro calculadas pelo método do balanço hídrico do solo e pelo modelo CROPWAT são exibidos na Tabela 3. A pegada hídrica total dessas culturas é também comparada com a pegada hídrica média global, conforme Mekonnen & Hoekstra

(2011). Constatou-se que a PH calculada pelo modelo CROPWAT subestima os valores da PH pelo método do balanço hídrico do solo no caso de todas as culturas. A PH cinza é a maior componente nas culturas do feijão, coentro e alface, enquanto a PH verde é a menor componente em todas as culturas. Apenas no caso da cultura do feijão, os valores da PH total pelos métodos do CROPWAT e BH apresentam diferença estatisticamente significativa pelo método t-Student a nível de 5% de probabilidade. Por outro lado, a PH total e as componentes verde azul e cinza das outras culturas não apresentam diferença estatisticamente significativa entre valores da ETc obtidos pelo método do BH ou pelo modelo CROPWAT.

Os valores obtidos para a pegada hídrica total das culturas analisadas são similares àquelas da pegada hídrica média global obtidas por Mekonnen & Hoekstra (2011), exceto no caso da cultura do tomate, cuja diferença produz um erro de 67%. Por outro lado, no caso da cultura de feijão a diferença entre as PHs deste estudo e da média global produz um erro em torno de apenas 1%. No caso das culturas do coentro e alface os erros também são desprezíveis. Os valores da PH do coentro obtidos no presente estudo e a média global obtidas por Mekonnen & Hoekstra foram, respectivamente, de 8.280 e 8.207 m<sup>3</sup>/ton. Por outro lado, os valores da PH do alface obtidos no presente estudo e a média global obtidas por Mekonnen & Hoekstra foram, respectivamente, de 237 e 267 m<sup>3</sup>/ton. Ainda de acordo com esta tabela, a pegada hídrica verde diminui à medida em que ocorre acréscimo na lâmina de irrigação, enquanto que a pegada hídrica azul não segue um padrão definido. Em estudo realizado para 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 e o modelo CROPWAR, Silva et al. (2015) observaram que 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. A pegada hídrica cinza apresenta a menor contribuição da pegada hídrica total e seus valores decrescem em função do aumento da irrigação. Em estudo para determinar a pegada hídrica e análise econômica da cultura de alface cultivada sob irrigação no município de Itabaiana, SE, Santos (2017) concluiu que a pegada hídrica verde diminui à medida que ocorre acréscimo na lâmina de irrigação, enquanto que a pegada hídrica azul aumenta em função do aumento na lâmina de irrigação e que a pegada hídrica da alface obtida com base no modelo subestima os valores da PH obtida com o balanço hídrico do solo. Neste estudo, o autor observou

ainda que a necessidade hídrica azul é a que mais contribui com o valor total da necessidade hídrica da cultura no período verão-outono

Tabela 3. Componentes da pegada hídrica (m<sup>3</sup>/ton) de cinco culturas cultivadas no semiárido brasileiro calculadas pelo método do balanço hídrico do solo, pelo modelo CROPWAT e a média global estabelecida por Mekonnen & Hoekstra (2011)

| Tipo    | PH verde | PH azul | PH cinza | PH Total<br>(Média global)* | PH total |
|---------|----------|---------|----------|-----------------------------|----------|
|         |          | Tomate  |          |                             |          |
| BH      | 122      | 287     | 241      | 214                         | 650      |
| CROPWAT | 86       | 252     | 241      |                             | 579      |
|         |          | Feijão  |          |                             |          |
| BH      | 47       | 3394    | 1667     | 5053                        | 5107     |
| CROPWAT | 47       | 1825    | 1667     |                             | 3538     |
|         |          | Cebola  |          |                             |          |
| BH      | 14       | 72      | 46       | 272                         | 132      |
| CROPWAT | 12       | 58      | 46       |                             | 116      |
|         |          | Coentro |          |                             |          |
| BH      | 232      | 2975    | 5000     | 8280                        | 8207     |
| CROPWAT | 134      | 2100    | 5000     |                             | 5600     |
|         |          | Alface  |          |                             |          |
| BH      | 32       | 95      | 140      | 237                         | 267      |
| CROPWAT | 25       | 86      | 140      |                             | 252      |

\*Pegada hídrica média global (Mekonnen & Hoekstra, 2011)

Os indicadores econômicos da cultura do coentro cultivado semiárido brasileiro são apresentados na Tabela 4. Foi considerando que o valor médio anual de comercialização do molho de coentro foi de R\$ 0,75 e a produtividade média foi de 11.250 molhos/m<sup>2</sup>, enquanto a receita líquida da produção foi de R\$ 8.437,50. Em cultivo de coentro cultivado solteiro e com consórcio com cebolinha, Zárata et al. 2005) observaram que uma renda bruta de R\$ 8.448,28 em coentro de cultivo solteiro e de R\$ 8.348,86 com coentro com consórcio com cebolinha.

Tabela 4. Indicadores econômicos da cultura do coentro cultivado no semiárido brasileiro

| Receita bruta | Custo de produção | Receita líquida | Relação Custo/benefício |
|---------------|-------------------|-----------------|-------------------------|
| 8437,5        | 2210,72           | 6226,78         | 3,82                    |

A Figura 14 exibe o comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), precipitação pluvial e irrigação durante o período de cultivo da cultura do alface no semiárido brasileiro. O período de cultivo foi de 9 de janeiro de 2014 a 20 de fevereiro de 2014. A ET<sub>o</sub> média nesse período foi de 4,6 mm, a precipitação foi de 73,4 mm e o total irrigado foi 206 mm. O máximo de chuva no período foi de 16,4 mm, em 6 de fevereiro de 2014, e a máxima taxa de irrigação foi de 9,1 mm no dia 24 de janeiro de 2014.

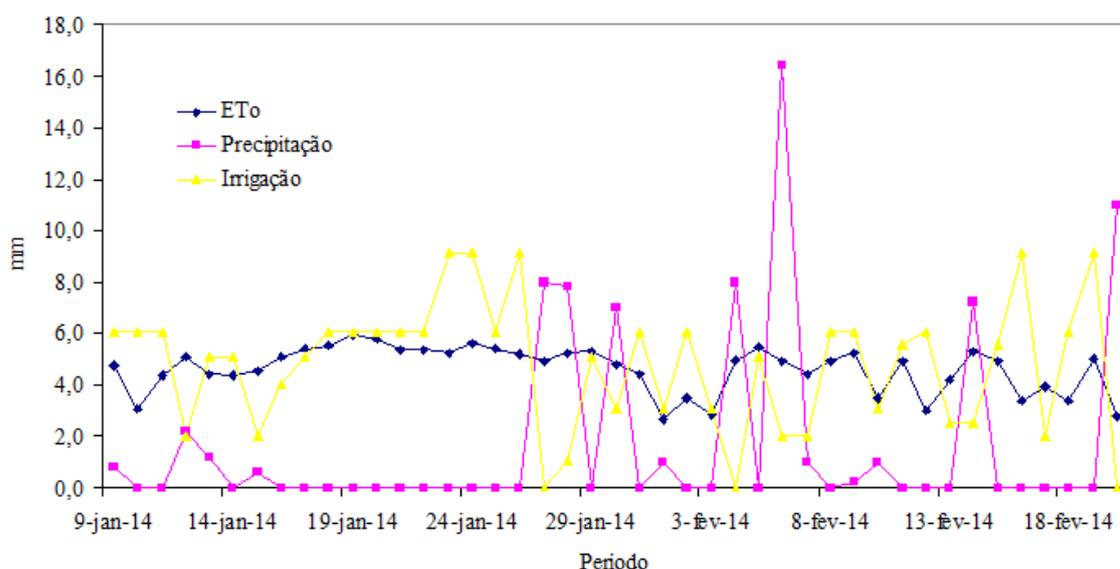


Figura 14. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura do alface

O comportamento temporal da evapotranspiração de referência, precipitação pluvial e irrigação durante o período de cultivo da cultura do coentro é exibido na Figura 15. O período de cultivo foi de 30 de novembro de 2013 a 8 de janeiro de 2014. A ET<sub>o</sub> média nesse período foi de 5,0 mm. a precipitação foi de 22 mm e o total irrigado foi 247 mm. O alto valor da irrigação está associado ao fato que precipitação pluvial durante o período foi quase nula durante o período, exceto no dia 19 de dezembro de 2013 com a chuva de 13 mm.

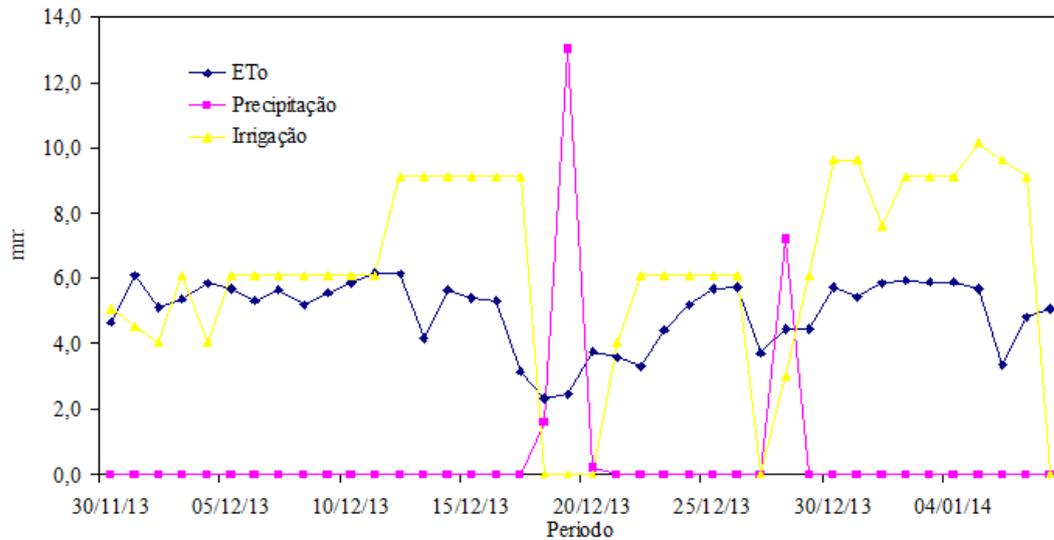


Figura 15. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ETo), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura do coentro

A Figura 16 exibe o comportamento temporal da evapotranspiração de referência, precipitação pluvial e irrigação durante o período de cultivo da cultura da cebola cultivada no semiárido brasileiro. O período de cultivo foi de 27 de abril de 2018 a 30 de julho de 2018.

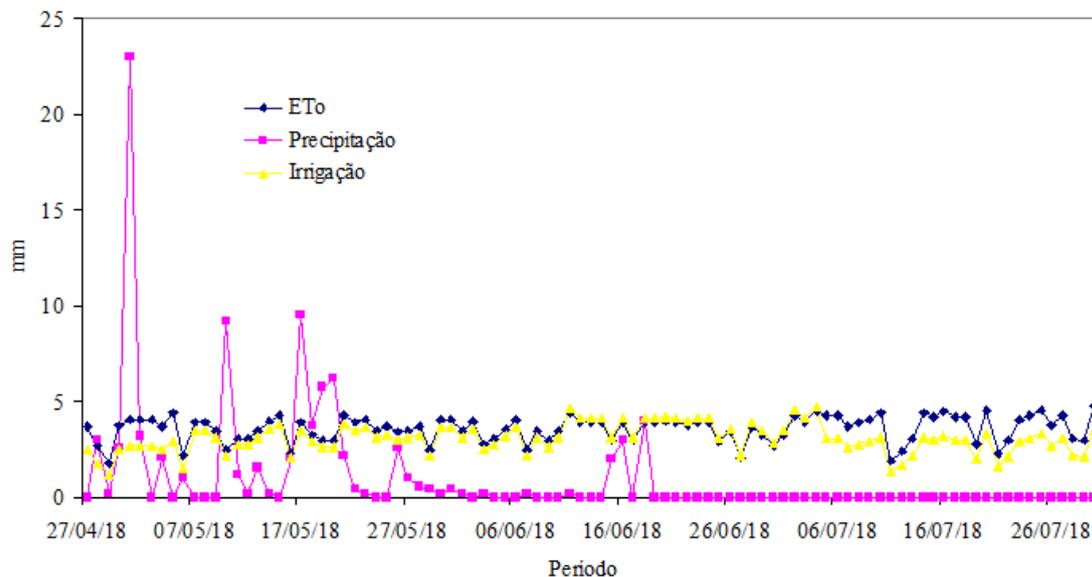


Figura 16. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ETo), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo da cultura da cebola

Nesse período a ETo média foi de apenas 3,6 mm, o total precipitado foi de 92,7mm e o total irrigado foi 294 mm. Entre os dias 12 a 30 de junho não houve chuva por isso o total irrigado foi máximo nesse período.

A Figura 17 exibe o comportamento temporal da evapotranspiração de referência, precipitação pluvial e irrigação durante o período de cultivo do feijão cultivado no semiárido brasileiro. O período de cultivo foi de 9 de abril de 2018 a 26 de junho de 2018. Nesse período, a ETo média foi de 3,7 mm, o total precipitado foi alto, de 213 mm, e o total irrigado foi 321 mm.

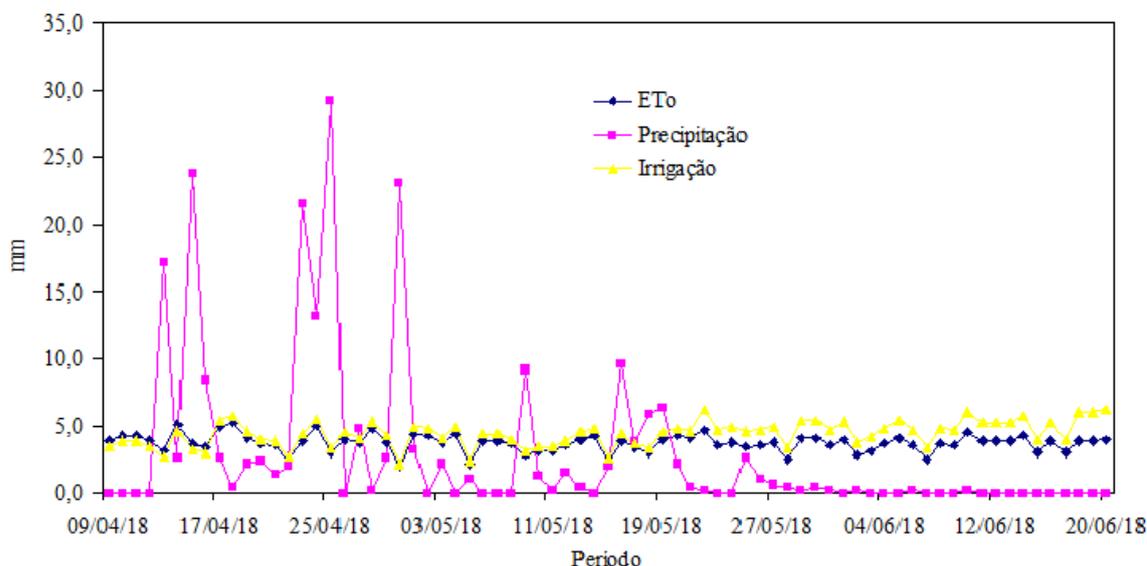


Figura 17. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ETo), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura da feijão

O comportamento temporal da evapotranspiração de referência, precipitação pluvial e irrigação durante o período de cultivo da cultura do tomate é exibido na Figura 18. O período de cultivo foi de 9 de 24 de março de 2017 a 17 de junho de 2017. Nesse período, a ETo média foi de 4,2 mm, o total precipitado foi de 200 mm e o total irrigado foi 309 mm.

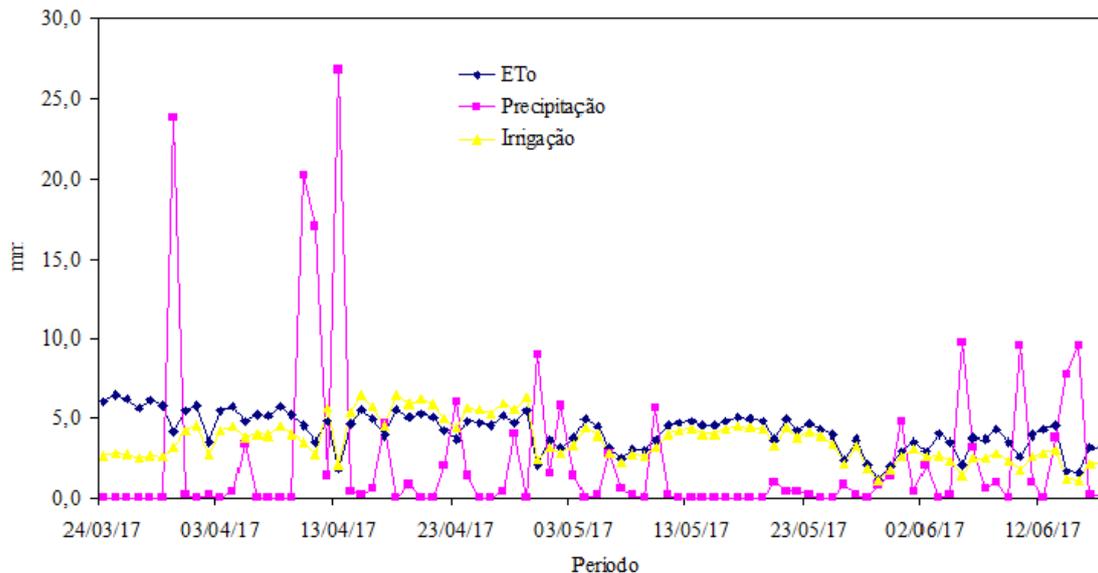


Figura 18. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência (ETo), precipitação pluvial (mm) e irrigação (mm) durante o período de cultivo cultura do tomate

O sumário das principais características climáticas e agrometeorológicas das culturas do alface, coentro, cebola, feijão e tomate cultivadas irrigadas no semiárido brasileiro é exibido na Tabela 5. Apesar de ciclo curto, a cultura do coentro tem o maior consumo hídrico e também a maior pegada hídrica de todas as culturas analisadas, de 8.207 m<sup>3</sup>/ton. A cultura com a segunda maior pegada hídrica é o feijão, com 5.507 m<sup>3</sup>/ton, que está associada a alta componente azul da PH dessa cultura que foi a maior lâmina de irrigação, de 321 mm, e também a componente verde da PH que está relacionada com a mais alta taxa de precipitação, que foi de 213 mm.

Tabela 5. Sumário das principais características climáticas e agrometeorológicas das culturas analisadas no estudo

| Cultura | ETc | Kc   | ETo | Prec  | PH total | Irrig |
|---------|-----|------|-----|-------|----------|-------|
| Alface  | 3,3 | 0,78 | 6,0 | 73,4  | 650      | 205,7 |
| Coentro | 5,4 | 0,90 | 4,8 | 22,0  | 8.207    | 247,8 |
| Cebola  | 3,6 | 0,82 | 3,6 | 92,7  | 132      | 294,5 |
| Feijão  | 3,8 | 1,10 | 3,7 | 213,0 | 5.107    | 321,3 |
| Tomate  | 3,9 | 1,06 | 4,2 | 200,6 | 267      | 309,1 |

ET = evapotranspiração da cultura (mm/dia); Kc = coeficiente de cultivo (adimensional); Prec. = precipitação pluvial (mm); PH total = pegada hídrica total (m<sup>3</sup>/ton); Irrig. = irrigação (mm)

As culturas com os maiores coeficientes de cultivo são o feijão e o tomate, com valores de 1,10 e 1,06, respectivamente. Já a maior taxa de evapotranspiração foi da cultura do alface e a menor foi do feijão. Silva et al. (2016) analisando o consumo hídrico da cultura do feijão caupi, cultivar Potiguar, observaram que o consumo hídrico da cultura na fase de desenvolvimento vegetativo foi 159 mm, enquanto que para todo o ciclo o consumo foi 400,1 mm. Além disso, que a evapotranspiração média foi de 5,07 mm/dia e o coeficiente de cultivo foi de 0,92. Por outro lado, Silva et al. (2018), em estudo para avaliar o efeito da data de plantio sobre a evapotranspiração da cultura (ETc), o coeficiente de cultura (Kc) do coentro, também cultivado irrigado em Itabaiana, SE, constataram que os valores médios de ETc e o Kc do coentro foram 139,8 mm e 0,87, respectivamente. A demanda hídrica da cultura foi maior durante o verão e menor no inverno; e no entanto, a sua produtividade é maior no outono e menor no inverno. Também em experimento com plantas hortícolas, Silva et al. (2018), em estudo com a cultura do alface, constataram que essa cultura apresentou evapotranspiração média de 3,5 mm/dia e coeficiente de cultivo médio de 0,82. Ainda em estudos com hortícolas, Freitas (2017) encontrou coeficiente de cultivo médio para a cultura do tomate de 0,78; enquanto Tavares (2016) encontrou valores do coeficiente de cultivo do alface e coentro de 0,82 e 0,86, respectivamente.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo realizado com cinco culturas hortícolas na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como parte do projeto PRONEX (Programa de Apoio aos Núcleos de Excelência), financiado pela Fapesq/CNPq, é possível extrair as seguintes conclusões:

1. As hortaliças folhosas, como coentro e alface, têm alto componente da PH cinza comparada com os componentes verde e azul da cultura;
2. O modelo CROPWAT pode ser utilizado com razoável precisão para o cálculo da pegada hídrica de culturas;
3. A pegada hídrica calculada pelo modelo CROPWAT subestima os valores da pegada hídrica pelo método do balanço hídrico do solo nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro.
4. Os valores da pegada hídrica média global de culturas apresentadas por Mekonnen & Hoekstra (2011) não apresentam precisão satisfatória em todas as culturas analisadas neste estudo;
5. A cultura do coentro apresenta viabilidade econômica quando cultivada irrigado no semiárido brasileiro.
6. As culturas de feijão e coentro têm alta sensibilidade a defensivos agrícolas, pesticidas, praguicidas durante todo o ciclo de desenvolvimento, desde a brotação até a colheita em face dos altos valores de suas PHs cinza.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABABAEI, B.; ETEDALI, H.R. **Estimation of water footprint components of Iran's wheat production: comparison of global and national scale estimates.** Environ. Process, v. 1, p. 193-205, 2014.

AHMED, S.M.; RIBBE, L. **Analysis of water footprints of rained and irrigated crops in Sudan.** J. Nat. Resour, v. 3, p. 20-28, 2011.

ALDAYA, M.M.; HOEKSTRA, A. Y. **The water needed for Italians to eat pasta and pizza.** Agricultural Systems, v.103, p. 351–360, 2010.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements.** Irrigation and Drainage, Roma, 1998, 300p.

AMARASINGHE, U.; SMAKHTIN, V.; SHARMA, B.; ERIYAGAMA, N. **Water Footprints of Milk Production: a Case Study in the Moga District of Punjab, India. Project Report Submitted to Nestle Ltd. Under the Project? Measuring the Water Footprints of Milk Production: Contributions to Livelihood Benefits and Sustainable Water Use in the Moga District in Punjab, India.** International Water Management Institute (IWMI), v.1, p.42, 2011.

BASTOS, E.A.; FERREIRA, V.M.; SILVA, C.R; ANDRADE, A.S.J. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no vale do Gurguéia, Piauí.** Irriga, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 182-190, 2008.

BATTILANI, A.; PRIETO, M. H.; ARGERICH, C.; CAMPILLO, C.; CANTORE, V. **HERBACEOUS CROPS-TOMATO. IN: STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES. Crop yield response to water.** Irrigation and Drainage Paper, Roma, n. 66, p. 192-199, 2012.

BOMFIM, J. M. S. **Pegada hídrica e desempenho econômico da cultura do coentro (*Coriandrum sativum* L.) no agreste Sergipano.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. – 2. ed. – Brasília: Ministério da Saúde, 484 p, 2015.**

CABRAL JÚNIOR, J. B.; ALMEIDA, H. A. D.; SILVA, C. M. **Análise Comparativa da Temperatura do ar em Campina Grande, PB, obtida pelo método da extremas e pelo padrão.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.6, n.4, p.888-902, 2013.

CARDOSO, J. M. BASTOS E.A.; ANDRADE, A.S.; SOBRINHO, C.A. **Feijão-cupi: o produtor pergunta, a Embrapa responde - Brasília: Embrapa, 244 p, 2017.**

CARVALHO, L.A.; TESSARIOLI NETO, J. **Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento e número de ramos por planta.** Horticultura Brasileira, v.23, p.986-989, 2005.

CAZCARRO, I.; DUARTE, R.; SA´INCHEZ-CHO´ILIZ, J. **Water flows in the Spanisheconomy: agri-food sectors, trade and households diets in an input-outputframework.** Environ. Sci. Technol, v. 46, p. 6530–6538, 2012.

CECÍLIO FILHO, A. B.; MAY, A. **Produtividade das culturas de alface e rabanete em função da época de estabelecimento do consórcio, em relação a seus monocultivos.** Horticulture Brasilia, v. 20, n. 3, p. 501-504, 2002.

CHAMUNDEESWARI, V.V.; DHARMENDRA, S.; KULDIP, S. **An Analysis of Texture Measures in PCA-Based Unsupervised Classification of SAR Images.** Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 6, n. 2, p.214-218, 2009.

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.

CHUKALLA, A.D.; KROL, M.S.; HOEKSTRA, A.Y. **Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching**. Hydrol. Earth Syst. Sci, v.19, p. 4877–4891, 2015.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de Campina Grande, estado da Paraíba**. (Orgs.) Mascarenhas, J de C.; Beltrão, B. A.; Souza Junior, L. C. de Moraes, F de; Mendes, V. A.; Miranda, J. L. F. de. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. Disponível em:

<[http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15949/Rel\\_Campina\\_Grande.pdf?sequence=1](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15949/Rel_Campina_Grande.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 05/08/2018

DABROWSKI, J.M.; MURRAY, K.; ASHTON, P.J.; LEANER, J.J. **Agriculture impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions**. Ecol. Econ, v.68, p. 1074-1082, 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB. 306p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33. 1994.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Irrigation and Drainage, Roma, FAO, 1977, 198p.

DRASTIG, K.; PROCHNOW, A.; KRAATZ, S.; KLAUSS, H.; PLOCHL, M. **Water footprint analysis for the assessment of milk production in Brandenburg –Germany**. Adv. GeoSci, v. 27, p. 65–70, 2010.

DUSI, A. N.; LOPES, C. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; MOREIRA, H. M.; MIRANDA, J. E. C. de; CHARCHAR, J. M.; SILVA, J. L. de O. ; MAGALHAES, J. R.; CASTELO BRANCO, M.; REIS, N. V. B.; MAKISHIMA, N.; FONTES, R. R.; PEREIRA, W. ; HORINO, Y. **A Cultura do tomateiro (para mesa)**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças – CNPH, 92 p, 1993.

ELZEBROEK, T.G.; WIND, K. **Guide to Cultivated Plants**, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Catálogo brasileiro de hortaliças**, Brasília, 2010.

FAO. **Base de dados Faostat**. 2015. Disponível em: [www.faostat.com](http://www.faostat.com). Acesso em 18/07/2018.

FAO. **Manual CROPWAT**. 1989. Rome. Disponível em: [www.faostat.com](http://www.faostat.com). Acesso em 18/07/2018.

FERNANDES, E. J; TURCO, J. E.P. **Evapotranspiração de referência para manejo da irrigação em cultura de soja**. Irriga, v. 8, n. 2, p. 132-141, 2018.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, 2003. 412 p.

FONTES, P.C.R.; SILVA D.J.H. **Produção de tomate de mesa**. Viçosa: Editora Aprenda fácil, 2002,197p..

FREITAS, J.C. **Calibração do modelo Aquacrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

GARCIA, A. J.; MUNSHI, A.; GREENWAY, G.M. **Biological responses to contaminants in the Humber Estuary: Disentangling complex relationships**. Marine Environmental Research, v. 71, p. 295-303, 2011.

GERBENS-LEENES, P.; HOEKSTRA, A.; VAN DER MEER, T. **The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply**. Ecol. Econ, v. 68, n. 4, p. 1052–1060, 2009.

GHEEWALA, S.H.; SILALERTRUKSA, T.; NILSALAB, P.; MUNGKUNG, R.; PERRET, S.R.; CHAIYAWANNAKARN, N. **Water footprint and impact of water consumption for food, feed, fuel crops production in Thailand**. *Water*, v. 6, p. 1698-1718, 2014.

GOMES, A.R.M.G.; DAVILA, J.H.T.; GONDIM, R.S.; BEZERRA, C.B.; BEZERRA, F.M. **L Estimativa da evapotranspiração e coeficiente de cultivo da *Heliconia psittacorum* L x *H. spathocircinata* (Arist) cultivada em ambiente protegido**. *Revista Ciência Agronômica* v.37, n.1, p.13-18, 2006.

GÓMEZ, J.A.L.; RIESGO, L. **Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms**. *Agricultura Econômica*, v.31, n.1, p. 47-66, 2004.

HAAG, H. P.; MINAMI, K. **Nutrição mineral em hortaliças**. Campinas: Fundação Cargill, p. 28-29, 1998.

HAROU, J; VELAZQUEZ, P.; ROSENBERG. D.E.; AZUAR, J.M.; LUND, D.J.; HOWITT, D.R. **Hydro-Economic Models: Concepts, Design, Applications, and Future Prospects**. *Journal of Hydrology*, v. 375, n. 3-4, p. 627-643, 2009.

HOEKSTRA, A.Y; A. K. CHAPAGAIN. **Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern**. *Water Resour Manage*, v.1, p.1-16, 2006.

HOEKSTRA, A.Y.; ALDAYA, M.M., C.A.K.; MEKONNEN, M.M. **the Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard**. Routledge, 2011, 202p.

HUANG, J.; XU, C.; RIDOUTT, B.; LIU, J.; ZHANG, H.; CHEN, F.; LI, Y. **Water availability footprint of milk and milk products from large scale dairy production systems in Northeast China**. *J Clean Prod*, v. 79, p. 91–94, 2014.

IKUDAYISI, A.; ADEYEMO, J. **Effects of Different Meteorological Variables on Reference Evapotranspiration Modeling: Application of Principal Component Analysis**. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, v. 10, n. 6, p.6664-6668, 2016.

KHATTREE, R.; NAIK, D.N. **Multivariate data reduction and discrimination with SAS software.** SAS Institute Inc, 558 p, 2000.

KONGBOON, R.; SAMPATTAGUL, S. **The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand.** Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 40, p.451-460, 2012.

KUNZ, V.L.; SIRTOLI, L.F.; FURLA, L.; POLETTI, L.; PRIMO, M.A; RODRIGUES, J.D. **Produtividade de cebola sob diferentes fontes e modos de aplicação de adubos nitrogenados em cobertura.** Revista Biodiversidade, v.8, n.1, 2009.

LAMASTRA, L.; SUCIU, N.A.; NOVELLI, E.; TREVISAN, M. **A new approach to assessing the water footprint of wine: an Italian case study.** Sci. Total Environ, v. 490, p. 748- 756 2014.

LEBOT, V. **Soils, plant growth and crop production - Tropical Root and Tuber Crops,** 837p, 2009.

LEVIDOW,L.; ZACCARIA,D.; MAIA,R.; VIVAS,E.; TODOROVIC,M.; SCARDIGNO, A. **Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices.** Agricultural Water Management, v. 146, p. 84-94, 2014.

LINHARES, P.C.F.; PEREIRA, M.F.S.; DIAS, M.A.V.; HOLANDA, A.K.B.; MOREIRA, J.C. **Rendimento de coentro (*Coriandrum sativum* L.) em sistema de adubação verde com a planta jitrana (*Merremia aegyptia* L.).** Rev. Bras. Pl. Med, v.14, p.143-148, 2012.

MANAZZA, J.F.; IGLESIAS, D.H. **Water footprint in milk agro-food chain in the sub humid and semi-arid central region of Argentina. In: Proceedings of the International Association of Agricultural Economists (IAAE) Triennial Conference.** Foz do Iguaçu, Brasil, 18–24 August 2012.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; SILVA, W. L. C. **Irrigação do tomateiro para processamento.** Brasília-DF: Embrapa Hortaliças, 2012. 24 p. Circular Técnica, 102.

MARTIN, A.R.; BURKET, C.A.V. **Revisão: Galacto-oligosacarídeos (GOS) e seus efeitos prebióticos e bifidogênicos.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 12, n. 3, p. 230- 240 2009.

MEDEIROS, P. R. F.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F. **Eficiência do uso de água e de fertilizantes no manejo de fertirrigação no cultivo do tomateiro sob condições de salinidade do solo.** Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v. 7, n. 2, p. 344-351, 2012.

MEDEIROS, R. F.; CAVALCANTE, L. F.; MESQUITA, F. O; RODRIGUES, R. M.; SOUSA, G. G.; DINIZ, A. A. **Crescimento inicial do tomateiro-cereja sob irrigação com águas salinas em solo com biofertilizantes bovino.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 5, p. 505 – 511 2011.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. **Four billion people facing severe water scarcity.** Sci. Ad, v.2, p. 1-6, 2016.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.J. **The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products.** Hydrol. Earth Syst. Sci, v. 15, p. 1577–1600, 2011.

MEKONNEN, M.M., HOEKSTRA, A.Y. **A global assessment of the water footprint of farm animal products.** Ecosystems, v. 15, p. 401–415, 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.

MELO R. A.; MENEZES, D.; RESENDE, L. V.; WANDERLEY JÚNIOR, L. J. G.; SANTOS, V. F.; MESQUITA, J. C. P.; MAGALHÃES, A. G. **Variabilidade genética em progênies de meios-irmãos de coentro.** Horticultura Brasileira, v.27, n.3, p.325-329, 2009.

MICHELETTO, S.; RODRIGUEZ-URIBE, L.; HERNANDEZ, R.; RICHINS, R D.; CURRY, J.; O'CONNELL, M. A. **Comparative transcript profiling in roots of**

**Pharsalus acutifolius and P. vulgaris under water deficit stress.** Plant Science, v.173, p. 510–520, 2007.

MULLER, G.T. **Emprego da Pegada Hídrica e da Análise de Ciclo de Vida para a Avaliação do Uso da Água na Cadeia Produtiva do Biodiesel de Soja.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MURPHY, E.; UPTON, J.; HUMPHRIES, J.; FRENCH, P.; HOLDEN, N.; CURRAN, T. **Water footprint methodologies of Irish milk production.** Eng. Res. Ver, v.18, p. 115–119, 2013.

NANA, E.; CORBARI, C.; BOCCHIOLA, D. **A model for crop yield and water footprint assessment: study of maize in the Povalley.** Agric. System, v. 127, p. 139-149, 2014.

NOVOA, V.; OCTAVIO, R. ARUM, J.L. ULLOA, C.; URRUTIA, R.; RUDOLPH, A **Variabilidad de La huella hídrica Del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile.** Tecnol. Cienc. Água, v.7, n. 2, 2016.

OLIVEIRA, A. P.; MELO P. C. T.; WANDERLEY JÚNIOR, L. J. G.; ALVES, A. U; MOURA, M. F.; OLIVEIRA, A. N. P. **Desempenho de genótipos de coentro em Areia.** Horticultura Brasileira, v.25, n. 2, p.252-255, 2007.

OLIVEIRA, S.M.S. **Determinação da acurácia de instrumentos de medidas para obter a evapotranspiração de referência com erros fixados.** Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2011.

OLIVEIRA, V. R.; MAUROELLI, W.A.; MADEIRA, N. R. **Influência de fatores climáticos na produção da cebola.** Nosso olho, v. 19, p. 40-45, 2014.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass.** Proc. R. Soc. Lond. A, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948

PEREIRA, T. **A utilização de pesticidas e o seu impacto sobre os recursos hídricos.** AGRO\_24, 2003.

PINA, L.A.B. **Pegada de água associada à produção do vinho Verde branco.** Pós-Graduação em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010. .

RAES, D. P.; STEDUTO, T.C. FERERES, E. **Aqua Crop—Th e FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description.** Agron. J, v. 101, p. 438–447, 2009.

REGAZZI, A.J. **Análise multivariada, notas de aula INF 766,** Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, v.2, 2000.

REZENDE, B. L. A.; CECÍLIO FILHO, A. B.; CATELAN, F.; MARTINS, M. I. E. G. **Análise econômica de cultivos consorciados de alface americana x rabanete: um estudo de caso.** Horticultura Brasileira, v. 23, n. 3, p. 853-858, 2005.

REIS, L. S.; AZEVEDO, C. A. V.; ALBUQUERQUE, A. W; JUNIOR, J. F. S. **Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condições de ambiente protegido.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 386-391,2013.

REIS, L. S.; SOUZA, J. L.; AZEVEDO, C. A. V. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do tomate caqui cultivado em ambiente protegido.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.3, p.289–296, 2009.

RIBEIRO, C.S. **Pegada hídrica e água virtual: estudo de caso da manga no submédio do Vale do São Francisco, Brasil.** Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

RIDOUTT, B.G.; PAGE, G.; OPIE, K.; HUANG, J.; BELLOTTI, W. **Carbon, water and land use footprints of beef cattle production systems in southern Australia.** J. Clean. Prod, v.73, p. 24–30, 2014.

ROCHA, S.R.; STUDART, T.M.C. **A pegada hídrica das exportações agrícolas de Pernambuco.** Revista de Geografia (UFPE), v. 31, n. 3, p. 190-210, 2014.

RODRIGUEZ, C.I.; GALARRETA, V.A.T.; KRUSE, A.E.E. **Analysis of water footprint of potato production in the Pampean region of Argentina.** Journal of Cleaner Production, v. 90, p 91-96, 2015.

ROUX, B.A.; VAN DER LAAN, M.; TEUNIS, V.A.B.; KEITH, L.; BRISTOWA, C.; ANNANDALE, J.G. **Establishing and testing a catchment water footprint framework to inform sustainable irrigation water use for an aquifer under stress.** Science of the Total Environment, v. 6, p. 599–600, 2017.

RUHOFF, A.L.; COLLISCHONN, W; UVO, C.B.; ROCHA, H.R.; CABRAL, O.M.R. **Análise Multivariada do Processo de Evapotranspiração em Áreas de Cerrado e Cana-de-Açúcar.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.14, n.4, p.137-146, 2009.

SALMORAL G.; ALDAYA, M. M.; CHICO, D.; GARRIDO, A.; LLAMAS, M.R. **The wáter footprint of olive oil in Spain.** En Papeles de Agua Virtual, n. 7, 70 p, 2010.

SAMPAIO, R.A.; FONTES, P.C. **Qualidade de frutos de tomateiro fertirrigado com potássio em solo de coberto com polietileno preto.** Horticultura Brasileira, Brasília, v.16, n.2, p.136- 139 1998.

SANTIAGO, A.D.; CHICO, D.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; GARRIDO, A.; CARNAÚBA, P.J.P. **Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil.** Agrometeoros, v.25, n.1, p.209-216, 2017.

SANTOS, C. A. F.; ARAÚJO, F.P.; MENEZES, E. A. **Comportamento produtivo de caupi em regimes irrigado e de sequeiro em Petrolina e Juazeiro.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, n.11, p.2229-2234, 2000.

SANTOS, K. S. **Pegada hídrica e análise econômica da cultura de alface cultivada sob irrigação no município de Itabaiana – SE.** Dissertação apresentada ao Programa

de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SANTOS, W. O.; NUNES, R. L. C.; GALVÃO, D. C.; PEREIRA, V. C.; MANIÇOSA, R. M.; LIMA, J. G. A.; VIANA, P. C. **Evapotranspiração da cultura do milho verde, análise estatística.** Revista ACSA - Agropecuária Científica no Semiárido, v. 9, n. 1, p. 75 - 81, 2013.

SARIMESELI, A. **Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves.** Energy Conversion and Management, v.52, p.1449-1453, 2011.

SCHENDEL, E.K.; MACDONALD, J.R.; SCHREIER, H.; LAVKULICH, L.M. **Virtual water: a framework for comparative regional resource assessment.** J. Environ. Assess. Pol. Manga, v. 9, p. 341–355, 2007.

SEKYERE, E. O.; JORDAANB, H.C. **Evaluation of water footprint and economic water productivities of dairy products of South Africa.** Ecological Indicators, v. 83, p 32–40, 2017.

SILVA, G.S.; REZENDE, R.L.A.; CECÍLIO, A.B.; BARROS, A.P.; ESPAGNOLI, M.I. MARTINS, G.; PORTO, D.R.Q. **Viabilidade econômica do cultivo da alface crespa em monocultura e em consórcio com pepino.** Ciênc. Agrotec, v. 32, n. 5, p. 1516-1523, 2008.

SILVA, V.J.; CARVALHO, H.P.; SILVA, C.R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R.E.F. **Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG.** Bioscience Journal, v. 27, n. 1, 2011.

SILVA, V.P.R.; ALBUQUERQUE, M.F.; ARAÚJO, L.E.; CAMPOS, J.H.B.; GARCÊZ, S.L.A.; ALMEIDA, R.S.R. **Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.19, n.6, p.521–526, 2015.

SILVA, V.P.R.; ALEIXO, D.O.; DANTAS, J.N.; MARACAJÁ, K.F.B.; ARAÚJO, L. **Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada hídrica.** Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, p.100-105, 2013.

SILVA, V.P.R.; ALBUQUERQUE, M.F.; ARAÚJO, L.; GARCÊS, L.A.S.; ALMEIDA, R.S.R. **Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, p.521-526, 2015.

SILVA, V.P.R.; SILVA, B.B.; BEZERRA, J.R.C.; ALMEIDA, R.S.R. **Consumo hídrico e viabilidade econômica da cultura do feijão cupi cultivada em clima semiárido.** Irriga, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 662-672, 2016.

SILVA, V.P.R.; SOUSA, I.F.; TAVARES, A.L.; SILVA, T.G.F.; SILVA, B.B.; HOLANDA, R.M.; BRITO J.I.B.; BRAGA, C.C.; SOUZA, E.P.; SILVA, M.T. **Evapotranspiration, crop coefficient and water use efficiency of coriander grown in tropical environment.** Hortic. Bras Vitoria da Conquista, v.36, n.4, p. 446-452, 2018.

SILVA, V.P.R.; SOUSA, I.F.; TAVARES, A.L.; SILVA, T.G.F.; SILVA, B.B.; HOLANDA, R.M.; BRITO, J.I.B.; BRAGA, C.C.; SOUZA, E.P.; SILVA, M.T. **Evapotranspiration, water use efficiency and crop coefficient of three lettuce varieties grown in a tropical region.** Revista de Ciências Agrárias, Lisboa, v. 41, n. 3, p. 221-230, 2018.

SOUSA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G.; NETTO, A. O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. **Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.14, n.6, p.633–644, 2010.

STEPHEN, A.; NORTHEY, A. B.; GAVIN, M.M.A.; SAARIVUORI, E.; WESSMAN-JÄÄSKELÄINEN, H.; NAWSHAD, H. **Water footprinting and mining: Where**

**are the limitations and opportunities?** *Jornal of Calender Producción*, v. 135, p. 1098-1116, 2016.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. *Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação*. Embrapa- CNPAF, Santo Antônio de Goiás. 49 p, 1995.

SUN, S.; WU, P.; WANG, Y.; ZHAO, X.; LIU, J.; ZHANG, X. **The Impacts of Interannual Climate Variability and Agricultural inputs on Water Footprint of Crop Production in an Irrigation District of China**. *Science of the Total Environment*, v. 444, p. 498-507, 2013.

SUYKENS, J.A.K.; VAN GESTEL, T.; VANDEWALLE, J; MOOR, B. **A Support Vector Machine Formulation to PCA Analysis and Its Kernel Version**. *Transacionas no Neural Networks*, v. 14, n 2, 2003.

TAVARES, A. L. **Fenometria, produtividade e necessidades hídricas das culturas da alface e do coentro em clima tropical**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

TAVELLA, L. B.; GALVÃO, R. O; FERREIRA, R. L. F.; ARAÚJO NETO, S. E; NEGREIROS, J. R. S. **Cultivo orgânico de coentro em plantio direto utilizando cobertura viva e morta adubado com composto**. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 4, p. 614-618, 2010.

TRAURING, E.S.; BERNSTEIN, N. **Virtual water flows and water-footprint of agricultural crop production, import and export: A case study for Israel**. *Science of the Total Environment*, v. 622–623, p. 1438–1447, 2018.

VELÁZQUEZ, E. **Water trade in Andalusia. Virtual water: An alternative way to manage water use**. *Ecological economics*, v.1, p. 201–208, 2007.

WILLIAMS, J.R.; C.A. JONES.; DYKE, P.T. **EPIC—Erosion/productivity impact calculator. 1. Th e EPIC model**. USDA-ARS, Temple, TX, 1989, 127p.

WHITE, D.J.; FENG, K.S.; SUN, L.X.; HUBACEK, K. **A hydro-economic MRIOanalysis of the Haihe River Basin's water footprint and water stress.** *Ecol. Modell*, v. 318, n. 24, p.157–167, 2015.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Risks Report 2016**; 11th Edition, Geneva, Switzerland. Endereço da web. [http://www3.weforum.org/docs/GRR/WEF\\_GRR16.pdf](http://www3.weforum.org/docs/GRR/WEF_GRR16.pdf). Acesso em: 12/06/2018.

XIAO, S.; LU, Z.; XU, L. **Multivariate sensitivity analysis based on the direction of eigen space through principal component analysis.** *Reliability Engineering & System Safety*, v. 165, p. 1-10, 2017.

YANO, S.; HANASAKI, N.; ITSUBO, N.; OKI, T. **Water scarcity footprints byconsidering the differences in water sources.** *Sustainability*, v. 7, p. 9753- 9772, 2015.

YOO, S.H.; KIM, T.; IM, J.B.; CHOI, J.Y. **Estimation of the international virtual water flow of grain crop products in Korea.** *Paddy Water Environ*, v.10, p. 83-93, 2012.

ZÁRATE, N.A.H.; VIEIRA, M.C.; HELMICH, M.; ONO, F.B.; SOUZA, C.M. **Produção e renda bruta de cebolinha e de coentro em cultivo solteiro e consorciado.** *Ciências Agrárias*, v.10, n.2, p. 149-154, 2005.

ZHAO, X.; YANG, H.; YANG, Z.F.; CHEN, B.; QIN, Y. **Applying the input-outputmethod to account for water footprint and virtual water trade in the HaiheRiver Basin in China.** *Environ. Sci. Techno*, v. 44, p. 9150–9156, 2010.

ZHUO, L.; MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y.; WADA, Y. **Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009).** *Adv. Water Resour*, v.87 p. 29–41, 2016.

ZONDERLAND-THOMASSEN, M.A.; LIEFFERING, M.; LEDGAR, S.F. **Water footprint of beef cattle and sheep produced in New Zealand: water scarcity and eutrophication impacts.** *J. Clean. Prod*, v. 73, p. 253–262,2014.

