



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MEDIÇÕES E MODELAGEM DA PEGADA HÍDRICA DA CANA-
DE-AÇÚCAR CULTIVADA NO BRASIL**

MONIK FERNANDES DE ALBUQUERQUE

**Campina Grande – PB
Abril de 2013**

MONIK FERNANDES DE ALBUQUERQUE

**MEDIÇÕES E MODELAGEM DA PEGADA HÍDRICA DA CANA-
DE-AÇÚCAR CULTIVADA NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-
graduação em Meteorologia da Universidade
Federal de Campina Grande, em cumprimento
às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: **Agrometeorologia**

Sub-área: **Necessidades hídricas da cultura**

Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva
Prof. Dr. Lincol Eloi de Araújo

Campina Grande – PB
Abril de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A345m Albuquerque, Monik Fernandes de.
Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Brasil / Monik fernandes de Albuquerque. – Campina Grande, 2013.
40 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Lincol Eloi de Araújo".

Referências.

1. Eficiência do Uso da Água. 2. Modelo Cropwat.
3. Evapotranspiração. 4. Cana-de-açúcar. I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Araújo, Lincol Eloi de. III. Título.

CDU 551.57(043)

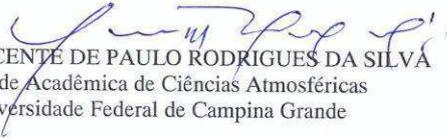


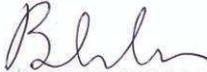
MONIK FERNANDES DE ALBUQUERQUE

MEDIÇÕES E MODELAGEM DA PEGADA HÍDRICA DA CANA-DE-AÇÚCAR
CULTIVADA NO BRASIL

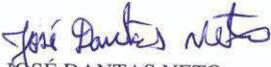
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/04/2013

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. LINCOLN ELOI DE ARAÚJO
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente
Universidade Federal da Paraíba


Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Campina Grande

*Dedico à minha querida mãe,
a luz do meu caminho.*

*“Assim são as coisas: os anos da boa
colheita são também os anos da rataria”*

Ernst Junger

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha querida mãe Maria José de Albuquerque, por me apoiar em todos os momentos e acreditar em mim, mesmo quando eu não acreditava. Você é minha fortaleza, meu espelho e minha luz.

Ao meu pai Benício Fernandes, pelo seu apoio incondicional ao longo deste processo de dissertação e de muitos outros.

A minha irmã Lhorem Albuquerque, por ter suprido minha falta nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pela disponibilidade, colaboração, conhecimentos transmitidos e capacidade de estímulo ao longo de todo o trabalho, além da indiscutível amizade e compreensão em momentos difíceis.

Manifesto aqui minha gratidão ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande e seus professores por todos os ensinamentos passados durante esses dois anos; em especial ao professor Enio, pelo apoio em momentos que mais precisei; ao professorIVALDO, pela sua paciência exemplar em ensinar; ao Prof. Dr. Pedro Vieira e ao Prof. Dr. Bernardo Silva que me fizeram ter certeza de que estou seguindo o caminho certo. Agradeço também a Divanete, por ser tão amorosa e paciente.

Não poderia deixar também de agradecer à Professora Maria do Carmo de Oliveira, minha querida professora da graduação em Meteorologia da Universidade Federal do Pará, que mesmo distante, continua sendo uma das maiores incentivadoras do meu sucesso e ao meu grande amigo de graduação José Augusto Júnior, pelo ombro amigo de sempre e pela constante preocupação com meu bem estar.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ, pela bolsa auxílio concedida, de grande ajuda para que pudesse me dedicar exclusivamente aos estudos e a elaboração da dissertação.

Agradeço também aos meus colegas de mestrado, em especial a Everson Mariano, Marcos Renato e Lúcia Helena Sousa. Sem vocês as tardes de estudos seriam mais difíceis. Não deixando de agradecer a Edvânia dos Santos e Alane Saldanha, amigas fieis que estiveram ao meu lado em momentos cruciais da elaboração desta dissertação. Agradeço por aguentarem meu mau humor, minhas

reclamações, pela incrível disponibilidade oferecida e pelas risadas nas horas mais difíceis. Vocês foram simplesmente essenciais.

Por fim, mas não menos importantes, agradeço a todos os amigos que fiz durante a temporada em Campina Grande, sem eles os meus dias seriam mais difíceis. Agradeço em especial ao meu querido amigo Thiago Santos pela amizade incondicional e apoio em todos os momentos, sentirei muita falta da companhia e das conversas diárias; à Tuana Medeiros, que se tornou minha fiel escudeira, agradeço pela companhia agradabilíssima e pela cumplicidade; à Daniel Silveira Lira, por trazer ternura aos meus dias e por provar que tudo que é bom dura o tempo suficiente para se tornar inesquecível e à Raquel Santos, por me entender e apoiar quando eu mesma não me entendia.

E a todos que de maneira geral me ajudaram na elaboração deste trabalho.

Mais uma etapa foi vencida. Porém sei que ainda é só o começo.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Balanço hídrico no solo	17
2.2. Pegada hídrica	18
2.2.1. <i>Pegada hídrica verde</i>	20
2.2.2. <i>Pegada hídrica azul</i>	20
2.2.3. <i>Pegada hídrica cinza</i>	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Descrição da área estudada	23
3.2. Tratos culturais e dados experimentais	23
3.3. Medições da evapotranspiração da cultura	24
3.4. Dados para o balanço hídrico no solo	25
3.5. Variedade de plantio	25
3.6. Tratamento	26
3.7. Cálculos dos valores da evapotranspiração <i>verde e azul</i>	26
3.8. Cálculos das necessidades hídricas das componentes <i>verde e azul</i>	26
3.9. Componentes da pegada hídrica	27
3.9.1. <i>Componentes verde e azul</i>	27
3.9.2. <i>Componente cinza</i>	27
3.10. Análise estatística	28

4. RESULTADOS E DICUSSÃO	29
5. CONCLUSÕES	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Evapotranspiração total (ET_{total} , mm) da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_0) em diferentes fases fenológicas de desenvolvimento da cultura..... 29
- Tabela 2. Evapotranspiração diária ($ET_{diário}$, mm/dia) da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_0) em diferentes fases fonológicas de desenvolvimento da cultura..... 30
- Tabela 3. Produtividade, irrigação e eficiência de uso de água (EUA) da cultura da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_0)..... 31
- Tabela 4. Componentes verde e azul das necessidades hídricas da cultura cana-de-açúcar (NCH) cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_0) e obtidas através do modelo CROPWAT..... 32
- Tabela 5. Pegada hídrica verde, azul e cinza da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com 25%, 50%, 75% e 100% de evapotranspiração de referência (ET_0) e através do modelo CROPWAT..... 35
- Tabela 6. Valores do erro absoluto (EA) e erro relativo (ER) das pegadas hídricas verde, azul e cinza da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada em 25%, 50%, 75% e 100% de evapotranspiração de referência (ET_0) 37

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização do município de Capim no estado da Paraíba..... 23
- Figura 2. Contribuição em termos percentuais das diferentes componentes da pegada hídrica total da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e nos tratamento de irrigação de 25%, 50%, 75% e 100% ETo e através do modelo CROPWAT 36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A – Ascensão capilar
- C_{max} – Concentração máxima aceitável de poluentes no sistema
- C_{nat} – Concentração natural num corpo de água
- CP – Carga de poluentes que entra no sistema
- D – Drenagem profunda
- ET – Evapotranspiração
- ET_c – Evapotranspiração da cultura
- ET_o – Evapotranspiração de referência
- GEE – Gases do efeito estufa
- I – Lâmina de irrigação
- IAF – Índice de área foliar
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Atmosféricas
- K_c – Coeficiente de cultura
- NHC – Necessidades hídricas da cultura
- P – Precipitação pluviométrica
- PH – Pegada hídrica
- PE – Pegada ecológica
- P_{eff} – Precipitação efetiva
- PCD – Plataforma de coleta de dados
- USDASCS – Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.
- R – Escoamento superficial
- SIF – Laboratório de Solos Sociedade de Investigações Florestais
- TDR – Frequency Domain Reflectometry
- Y – Produtividade da cultura
- W – Armazenamento de água no solo

RESUMO

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

Palavra-chave: Eficiência do uso de água, modelo Cropwat, evapotranspiração, cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The water footprint concept has gained interest because the freshwater is a global resource to the full range of activities and can be instrumental in helping to understand how activities and products relate to water scarcity. The purpose of this study is to compare the sugarcane water footprint measurements of crop and derived crop product to the traditional method used for estimating water footprint of crops and using more complete soil water balance at the field level. The field experiment was carried out in commercial distillery Fazenda Capim II located in the coastal area of state of Paraíba Brazil, in the period from October 2009 to August 2010 with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). The results indicated that the green and gray water footprint values decrease as there is an increase in irrigation. Inversely, the blue water footprint values increase as there is an increase in irrigation. The sugarcane water footprint based on the CROPWAT model overestimates green and blue water footprint values and underestimates the gray water footprint values obtained from the soil water balance.

Keyword: Water use efficiency, Cropwater model, evapotranspiration, sugarcane.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de cana-de-açúcar totaliza aproximadamente 1,5 bilhão de toneladas por ano e está localizada predominantemente na faixa tropical do planeta, nos países em desenvolvimento da América Latina, África e do Sudeste Asiático. O Brasil, líder mundial na produção de cana-de-açúcar, na safra 2008/2009 produziu cerca de 569 milhões de toneladas. Desse total cerca de 90% foi produzido na região Centro-Sul e 10% na região Nordeste (UNICA, 2010). A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância socioeconômica no Brasil; seus principais derivados são o açúcar (alimento) e o álcool (hidratado e anidro), imprescindíveis ao mercado mundial. Outros produtos, também originados dessa cultura e que devem ser salientados, são a aguardente, o bagaço, que é utilizado principalmente como fonte de energia, a vinhaça, que serve de fertilizante, o plástico e o papel. (Souza *et al.*, 1999). A cana-de-açúcar requer umidade adequada durante todo o período vegetativo para se obter rendimentos máximos, porque seu crescimento vegetativo, incluindo o crescimento da cana, é diretamente proporcional à água transpirada. Dependendo do clima, as necessidades de água da cana-de-açúcar são de 1500 a 2500 mm distribuídos de maneira uniforme durante a temporada de desenvolvimento (Rocha, 2001). Tanto a escassez quanto o excesso d'água são prejudiciais ao desenvolvimento da cultura, nesse sentido é de extrema importância utilizar o balanço hídrico como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, por conseguinte, para definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura, está relacionada não só ao conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar) como, também, ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço.

Hoekstra (2002) introduziu um novo indicador relativo ao consumo de água, cuja principal função é contabilizar a quantidade de água utilizada nos bens e serviços que são consumidos. A pegada hídrica (PH) é dividida em três tipos: Pegada hídrica *azul*, *verde* e *cinza*. A PH *azul* é a água incorporada ao processo através da irrigação, incluindo as águas superficial e subterrânea; A PH *verde* é considerada a água da chuva, desde que não escoe. A PH *cinza* é o volume de água doce necessário para

assimilar a carga de poluentes baseada nas concentrações naturais e nos padrões existentes sobre a qualidade da água em seu estado natural.

Estudos realizados por Chapagain (2011) estimou a pegada hídrica para a produção de arroz, que é uma das culturas com maior consumo de água do mundo, obteve resultados de 784 km³/ano de pegada hídrica global, com média de 1325 m³/tonelada, que corresponde a 48% de água *verde*, 44% de água *azul* e de 8% de *cinza*. A produção da pegada hídrica verde varia muito ao longo do tempo e espaço. Na 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 mais que a componente *verde*. Já a pegada hídrica cinza, no geral, é cerca de 10% do total da pegada hídrica de uma cultura ou produto. Diante da expressiva importância da cana-de-açúcar no cenário econômico brasileiro e de seu elevado consumo de água, torna-se necessário um estudo mais aprofundado das necessidades hídricas da cana-de-açúcar de forma a identificar soluções de manejo que possibilitem a melhoria de produtividade. Neste contexto, os objetivos deste trabalho são os seguintes:

Geral: Determinar a pegada hídrica da cultura da cana-de-açúcar cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba - Brasil;

Específicos: (i) Determinar as componentes *azul*, *verde* e *cinza* da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada na região de estudo; (ii) comparar as medições da pegada hídrica com aquelas estimadas utilizando o modelo CROPWAT, (iii) determinar a evapotranspiração da cultura para cinco diferentes tratamentos de irrigação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A pegada hídrica global da produção agrícola no período de 1996-2005 foi 7404 Gm³/ano⁻¹, sendo 78% verde, azul 12%, e 10% de cinza). O trigo tem a maior participação no presente no volume de total, que é de 1.087 Gm³ano⁻¹ (70% verde, 19% azul e cinza 11%). As outras culturas com grande pegada hídrica são o arroz (992 Gm³ano⁻¹) e o milho e (770 Gm³ano⁻¹). Por outro lado, as principais culturas com a menor contribuição de água verde para o consumo total de água são a palma (43%) e algodão (64%) (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

2.1. Balanço hídrico no solo

O balanço hídrico no solo visa calcular o armazenamento de água no solo levando-se em consideração tanto o tipo de vegetação como sua fase de crescimento e desenvolvimento. Nessa situação, a planta nem sempre cobre totalmente o terreno e sua área foliar (superfície transpirante) varia com a idade (dias após o plantio ou emergência). Nessa condição, quando não há déficit hídrico, a evapotranspiração difere da potencial, sendo denominada de evapotranspiração máxima da cultura, ou, simplesmente, evapotranspiração da cultura (ET_c). Portanto, a estimativa de ET_c depende de um coeficiente de ajuste (K_c), denominado coeficiente de cultura. Este, por sua vez, é função do índice de área foliar (IAF) da cultura, que varia com o seu crescimento e desenvolvimento. Nas culturas anuais, observa-se aumento gradual nos valores do K_c até a fase do florescimento, que coincide com a época de máxima área foliar, decrescendo a partir do final da frutificação e início da maturação, em função da senescência das folhas. Alguns estudos realizados no Brasil com a cana-de-açúcar (Peres et al., 1992), mostra que o valor do K_c depende também do método de estimativa de ET_o. Para a maioria das culturas o K_c varia de 0,3 na fase de estabelecimento da cultura, até 1,2 na fase de florescimento e frutificação. Variação bem diferenciada é aquela que se observa nas culturas perenes.

O estudo do balanço de água no solo com cana-de-açúcar cultivada em larga escala no Brasil, é essencial para o manejo agrícola, visando o aumento de produtividade e à redução de riscos de poluição. Brito et al. (2009) avaliaram os

componentes da equação do balanço de hídrico em dois Latossolos cultivados com cana-de-açúcar (cana-planta), nos Municípios de Jaboticabal e Pirassununga (São Paulo). Concluíram que nos períodos de grande precipitação, a drenagem interna foi significativa, alertando para possíveis problemas no manejo em relação a uma potencial contaminação do lençol freático, e tanto a evapotranspiração real quanto à eficiência do uso da água foram da mesma ordem de grandeza, independentemente da adubação nitrogenada, e a armazenagem de água no solo foi praticamente à mesma no início e no fim do ciclo estudado. Além disso, encontrou-se que o escoamento superficial e os fluxos da água do solo são fortemente afetados pela variabilidade espacial das propriedades físicas do solo.

O conhecimento dos valores precisos do K_c é particularmente importante para a determinação das necessidades de água das culturas, tanto em termos de manejo da água de irrigação, como também no planejamento de sistemas hidroagrícolas, assumindo, atualmente, grande importância em modelagem agrometeorológica. Nesse particular, muitas pesquisas já foram realizadas visando à determinação mais precisa do consumo hídrico de diferentes culturas no Brasil. Entretanto, nenhuma delas trata do K_c da cultura da cana-de-açúcar. Assim, experimentos agrometeorológicos específicos, para a determinação do K_c dessa cultura irão propiciar maior precisão nas informações para a agricultura irrigada na região. Ressalta-se que o uso inadequado dos métodos de estimativa da ET_0 às condições climáticas, a falta de precisão na estimativa, bem como o erro devido ao uso de instrumentos de medições, em geral, conduzem ao manejo inadequado da água, afetando muitas vezes a produção agrícola.

2.2. Pegada hídrica

No início de 1990 o conceito de pegada ecológica (PE) foi introduzido como uma medida da apropriação humana das áreas biologicamente produtivas por William Rees e Mathis Wackernagel (Rees, 1992,1996; Wackernagel *et al.*, 2004, 2005). Cerca de dez anos depois, foi lançado em Delf, na Holanda um conceito similar denominado de pegada hídrica (PH) para medir a apropriação humana da água doce no globo (Hoekstra & Huang, 2002). Muito embora ambos os conceitos tenham raízes e métodos de medição diferentes, em alguns aspectos os dois conceitos têm em comum o fato de traduzem o uso de recursos naturais pela humanidade (Hoekstra, 2009). A PE expressa o uso de espaço (hectares), enquanto a PH mede o uso total de

recursos de água doce (em metros cúbicos por ano). Por outro lado, a pegada de carbono é uma medida dos impactos causados pelas atividades humanas sobre o meio ambiente, e em particular das mudanças climáticas. Ela mede a quantidade total de emissões de gases que provocam o efeito estufa (GEE) que são diretamente e indiretamente causadas por algum tipo de atividade (de indivíduos, populações, governos, empresas, organizações, processos, setores da indústria, dentre outros) ou ao longo do ciclo de vida do produto (Hertwich & Peters, 2009). Na busca por um planeta mais sustentável e à semelhança do que ocorre com a pegada ecológica e a pegada de carbono, nos últimos anos têm sido apresentadas sugestões para redução da pegada hídrica, incluindo o compromisso de neutralidade em relação ao uso de água (água neutra). Essas medidas são importantes no manejo dos recursos hídricos haja vista que a água doce é escassa e representa apenas 2,5% do volume total do planeta (Gleick, 2000).

Em 2002, foi introduzido pelo professor A. Y. Hoekstra um novo indicador relativo ao consumo de água cuja principal função é contabilizar a quantidade de água utilizada nos bens e serviços que são consumidos pelos habitantes de um país. A pegada hídrica é um indicador de uso de água doce que não visa apenas para o uso de água direto do consumidos ou do produto, mas também no uso indireto da água. Pode ser considerada como um abrangente indicador de apropriação de recursos hídricos, ao lado da medida tradicional e restrita de recursos de água. (Hoekstra et al., 2011). A pegada hídrica é composta por três tipos de uso da água, designados como pegada hídrica *azul*, *verde* e *cinza*. A pegada hídrica *verde* é o volume de águas pluviais armazenada no solo e que se evapora dos campos de cultivo. A pegada hídrica *azul* é o volume de água doce extraído das massas de água, como rios e lagos, que é utilizada, mas não recuperado. Esta pegada é representada principalmente pela evaporação da água de escoamento dos campos de cultivo. A pegada hídrica cinza é o volume da água contaminada como resultado dos processos de produção. Calcula-se através do volume de água requerido para diluir os contaminantes de forma a atingir níveis aceitáveis de qualidade da água.

Na avaliação da pegada hídrica mundial do algodão, para o período de 1997-2001, mostraram que o consumo mundial de algodão requer 256 Gm³ de água por ano, dos quais cerca de 42% é de água *azul*, 39% é de água *verde* e 19% de poluentes, componente *cinza* (Chapagain et al, 2006). Já estudos realizados na Espanha por D.

Chico et al. (2010) mostram que a pegada hídrica para um quilo de tomate produzido é de cerca de 236 litros de água. Variando entre 216 para 301 litros por quilograma. Sendo de 3% de água *verde*, 36% de água *azul* e 58% de água *cinza*. Assim, observa-se que a media de cada componente da pegada hídrica, depende da cultura, sistemas de gestão de água, localização e clima local.

2.2.1. Pegada hídrica verde

A pegada hídrica *verde* é um indicador do uso humano deste tipo de água e está diretamente dependente da precipitação, evaporação potencial e dos requisitos da cultura. Esta água refere-se à precipitação que chega à superfície terrestre e é armazenada no solo ou que permanece temporariamente à superfície ou na vegetação, ou seja, que não sofre escoamento superficial ou infiltração. Eventualmente, esta fração da precipitação evapora ou é utilizada pelas plantas, tornando-se produtiva. A componente *verde* da pegada hídrica é o volume de água da chuva consumida durante o processo de produção. Isto é particularmente relevante para os produtos provenientes da agricultura e silvicultura, referindo-se ao total de precipitação evapotranspirada pelas culturas e campos de cultivo, além da água da chuva incorporada nos produtos. Expressa em volume de água por unidade de tempo, obtém-se pelo somatório da água verde evaporada mais a água verde incorporada.

A distinção entre a pegada hídrica *azul* e *verde* é importante, pois os impactos hidrológicos, ambientais e sociais, bem como os custos de oportunidade do uso das águas superficiais e subterrâneas para a produção, diferem distintamente dos impactos e dos custos de utilização da água da chuva (Hoekstra e Chapagain, 2008). O consumo de água *verde* pela agricultura pode ser medido ou estimado utilizando um conjunto de fórmulas empíricas ou com um modelo apropriado para estimar a evapotranspiração com base em dados de entrada das características do solo, clima e cultura.

2.2.2. Pegada hídrica azul

A pegada hídrica *azul* é um indicador do consumo de água doce superficial ou subterrânea que está diretamente dependente das variáveis hidrológicas que regulam o ciclo hidrológico (precipitação, escoamento superficial, infiltração, evaporação, entre outras). A evaporação é geralmente a componente mais significativa, sendo que em

alguns casos é considerado o único consumo. A pegada hídrica *azul* mede a quantidade de água disponível consumida num determinado período (ou seja, água que não retornou imediatamente à mesma bacia hidrográfica). Desta forma, esta componente fornece informação relativa à quantidade de água *azul* disponível consumida por seres humanos ou na produção de um bem. A restante parte não consumida pelos seres humanos destina-se à manutenção dos ecossistemas que dependem dos fluxos de água subterrânea e superficial. A pegada hídrica *azul* é calculada tendo em conta a soma de três fatores, que são a água *azul* evaporada, mais a água *azul* incorporada e a perda no fluxo de retorno. Ao avaliar a pegada hídrica *azul* de um processo, podem-se distinguir as diferentes fontes de água. A divisão mais importante é entre água superficial, água subterrânea renovável e água subterrânea fóssil. Porém, na prática, esta distinção não é feita com frequência dada à insuficiência de dados disponíveis (Hoekstra et al., 2011). O maior utilizador deste tipo de água é, sem dúvida, a agricultura.

2.2.3. Pegada hídrica cinza

A pegada hídrica cinza é um indicador do grau de poluição da água doce. É definida como o volume de água doce que é necessário para assimilar a carga de poluentes com base nos atuais padrões de qualidade ambiental da água. A componente *cinza* da pegada hídrica é calculada dividindo a carga poluente (CP, expressa em massa por tempo) pela diferença entre o padrão de qualidade da água desse poluente (C_{max} expresso em massa por volume) e a sua concentração natural na massa de água receptora (C_{nat} , expressa em massa por volume) (Hoekstra et al., 2011). A concentração natural num corpo receptor é a concentração na massa de água que ocorreria se não houvesse perturbações humanas na captação. Para as substâncias de origem humana, que em condições naturais não estariam presentes na água, e quando as concentrações naturais não são conhecidas com precisão, mas estima-se que sejam baixas, admite-se que a concentração natural na massa de água receptora é nula ($C_{nat} = 0$). A razão porque se utiliza a concentração natural como referência e não a concentração real deve-se ao fato de a pegada hídrica *cinza* ser um indicador da capacidade de assimilação apropriada. A capacidade de assimilação de um corpo receptor depende da diferença entre o máximo admissível e a concentração natural de uma substância.

A principal função da componente *cinza* é determinar o volume de água necessário para assimilar produtos químicos. De realçar que para a mesma substância, o padrão de qualidade ambiental da água pode variar de acordo com a massa de água em questão tal como a concentração natural pode variar tendo em conta a localização. Assim, uma carga poluente pode resultar numa determinada pegada hídrica cinzenta num certo local e num outro local uma outra pegada hídrica *cinza*, com maior ou menor impacto, determinada pela diferença entre a concentração máxima permitida e a concentração natural do local em causa (Hoekstra et al., 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área estudada

Os experimentos de campo foram realizados na Fazenda Capim II com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). A variedade de cana-de-açúcar estudada foi a RB 92579, muito difundida na região Nordeste do Brasil. A destilaria pertence ao grupo UNIAGRO, que fica situada no município de Capim, PB. O município de Capim está situado geograficamente na latitude 6°56', longitude 35°07'.

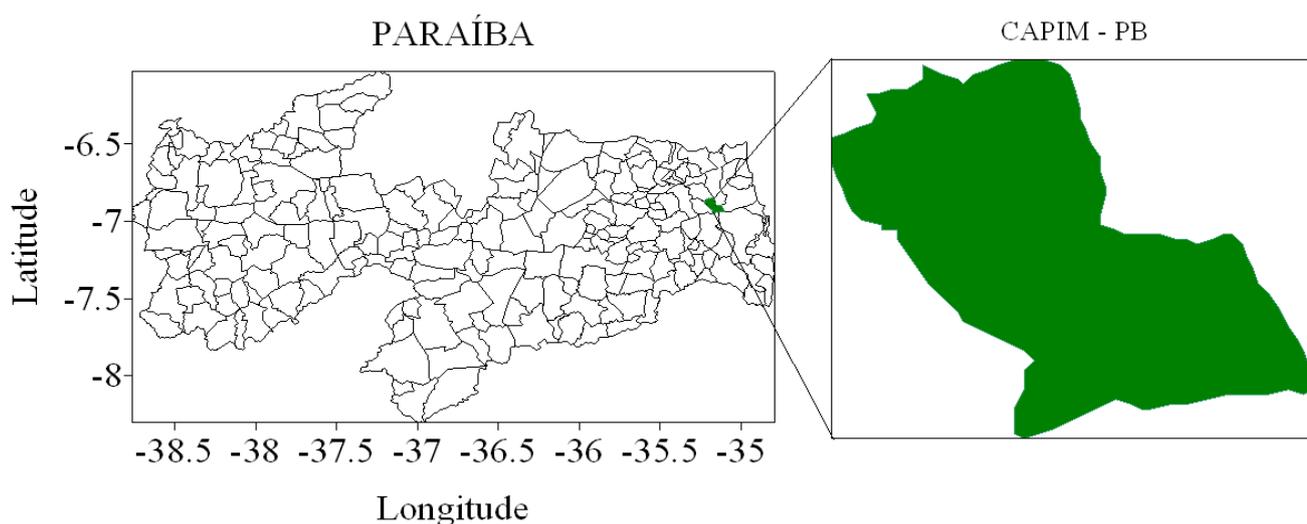


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Capim, no Estado da Paraíba.

A fazenda Capim II possui uma área irrigada de aproximadamente 600 hectares com dois pivôs centrais rebocáveis alimentados por uma extensão de 9 km de canal, abastecidos por um manancial com capacidade de 5.000.000 m³ de água, que se desloca em seis bases de 50 ha, dentro de uma região propícia ao cultivo desta cultura, com altitude de 103 m e temperatura média de 28°C. A precipitação média anual na região é superior a 1500 mm, com seis meses secos; o clima é quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com seca atenuada (Silva, 2004). Com precipitação de 621 mm durante o período de estudo.

3.2. Tratos culturais e dados experimentais

Durante os períodos experimentais foram mantidos todos os procedimentos de tratamentos culturais adotados pela empresa agroindustrial, tais como o controle de pragas e doenças, capinas e adubação via água de irrigação. Os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados) do INPE, localizadas na Fazenda Capim II, no estado da Paraíba.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, compreendendo uma parcela de sequeiro e quatro tratamentos de irrigação, com três repetições, utilizando a evapotranspiração de referência (ET_o) no manejo de água, da seguinte forma: sistema de sequeiro e irrigações de 25%, 50%, 75% e 100% da ET_o. O sistema de irrigação utilizado foi o de aspersão, tipo pivô central rebocável.

3.3. Medições da evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cana-de-açúcar (ET_c) foi determinada pelo método do balanço hídrico no solo, expresso por (Libardi, 1995):

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

em que P é a precipitação pluviométrica; I a lâmina de irrigação; A a ascensão capilar; D a drenagem profunda; ΔW a variação da lâmina de água disponível no solo e R o escoamento superficial. Todos os componentes da Eq. (1) são expressos em mm d⁻¹. O escoamento superficial foi considerado nulo, visto que a topografia do terreno é plana, P foi monitorada com um pluviômetro instalado na área experimental e ΔW determinado com base no perfil de umidade do solo. O volume de controle considerado para elaboração do balanço hídrico corresponde à camada de solo compreendida entre a superfície e a profundidade efetiva do sistema radicular. A partir da trincheira aberta no interior da parcela, foi determinada a profundidade média do sistema radicular da cultura que foi de 0,6 metros.

O armazenamento de água no solo (W), em mm, durante um dado intervalo de tempo foi calculado usando-se a seguinte equação

$$W_t = \int_0^L \theta(z) dz = \bar{\theta} L \quad (2)$$

em que $\bar{\theta}$ é a umidade do solo média até a profundidade considerada (cm³cm⁻³) e L a espessura da camada de solo (cm). Durante o intervalo de tempo considerado, a variação do armazenamento de água no solo (ΔW), expressa em cm, foi obtida como

$$\Delta W = W_t - W_{t-1} \quad (3)$$

em que ΔW_t e ΔW_{t-1} representam os armazenamentos de água no perfil do solo nos instantes t e $t-1$, respectivamente.

Como o lençol freático na área de estudo é superior a 1 m de profundidade, o termo ascensão capilar foi considerado nulo e, também, como não foram instalados tensiômetros para monitorar a tensão de água no solo, a percolação foi obtida com base na equação (Allen et al., 1998):

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - Dr_{i-1} \quad (4)$$

em que P_i é a precipitação, RO_i escoamento superficial (considerado nulo, haja vista que a topografia do terreno era plana), I_i a irrigação do dia i e Dr_{i-1} é a depleção da zona radicular no fim dia anterior, $i-1$ (mm). A depleção inicial foi derivada a partir da quantidade de água no solo por (Allen *et al.*, 1998).

$$Dr_{i-1} = 1000(\theta_{CC} - \theta_{i-1})Z_r \quad (5)$$

Em que θ_{CC} é a umidade do solo à capacidade de campo em (m^3/m^3), θ_{i-1} é igual à umidade de solo médio na zona radicular em (m^3/m^3), Z_r a profundidade radicular (m).

3.4. Dados para o balanço hídrico no solo

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

As análises das características físicas e químicas do solo da área experimental foram realizadas com base em amostras indeformadas, coletadas a partir da trincheira aberta no interior da parcela experimental nas camadas de solo: 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; 0,80-1,00 m, com três repetições. As amostras foram utilizadas para determinação da densidade global, textura e a curva de retenção de água no solo. A condutividade hidráulica do solo da área experimental foi determinada com base em amostras coletadas na camada de solo com a maior concentração de raízes. As análises de solo foram realizadas no Laboratório de Solos Sociedade de Investigações Florestais (SIF), vinculado à Universidade Federal de Viçosa, no Estado de Minas Gerais.

3.5. Variedade de plantio da cana-de-açúcar

A pesquisa foi desenvolvida com a variedade de cana-de-açúcar RB 92579, no primeiro ciclo de produção (cana-planta). O plantio foi realizado em outubro de 2009 e a última coleta de dados em setembro de 2010, 330 dias após o plantio, um mês antes da colheita. O espaçamento utilizado foi de 1,00m entre as fileiras, prevendo resultando numa densidade de 16 gemas por metro linear. No preparo da área foram utilizadas apenas uma subsolagem e uma gradagem.

3.6. Adubação

A adubação nitrogenada foi fixada em 600 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (22% de N), equivalente a aproximadamente 130 kg ha⁻¹ de nitrogênio, considerando-se resultados de análises de solo previamente realizadas.

3.7. Determinação da evapotranspiração *verde* e *azul*

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

$$ET_{verde} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (6)$$

por outro lado, a evapotranspiração *azul* foi calculado pelo máximo da função abaixo:

$$ET_{azul} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (7)$$

De acordo com a equação 7, quando a precipitação efetiva é maior que a evapotranspiração da cultura, como o cultivo em condições de sequeiro, a ET_{azul} é igual a zero.

3.8. Determinação das necessidades hídricas das componentes *verde* e *azul*

Em condições ótimas de crescimento da cultura a necessidade hídrica da cultura (NHC) será igual a evapotranspiração total ao longo do seu ciclo da cultura (ET), conforme expresso pela Eq. (8) e (9). O fator 10 é empregado para converter milímetros de água em m³/ha.

$$NCH_{verde} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{verde} \quad (8)$$

$$NCH_{\text{azul}} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{\text{azul}} \quad (9)$$

3.9. Componentes da pegada hídrica

3.9.1. Componentes verde e azul

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

$$PH_{\text{verde}} = \frac{NCH_{\text{verde}}}{P} \quad (10)$$

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

em que NCH_{verde} e NCH_{azul} são, respectivamente, as necessidades hídricas *verde* e *azul* da cultura (m^3/ton) e P é a produtividade da cultura (ton).

3.9.2. Componente cinza

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

$$PH_{\text{cinza}} = \left(\frac{CP}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \right) / P \quad (12)$$

em que CP é a carga de poluentes que entra no sistema (ton/ano), C_{max} é a concentração máxima aceitável de poluentes no sistema (ton/ano), considerada como 10% da taxa de fertilizante aplicado à cultura (Hoekstra & Chapagain, 2008); C_{nat} é a concentração natural num corpo de água. Entretanto, caso as concentrações naturais não sejam conhecidas com precisão, mas estima-se que sejam baixas, admite-se que a concentração natural da massa de água receptora é nula ($C_{\text{nat}} = 0$) e P corresponde à produtividade da cultura (ton/ha).

A evapotranspiração da cultura para o cálculo das componentes da pegada hídrica da cana-de-açúcar foi obtidas também com base no software CROPWAT 8.0 (Allen et al., 1998). A precipitação efetiva foi de 621 mm, determinada utilizando o método do Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA SCS), por ser considerado o método mais utilizado e preciso.

3.10. Análise estatística

Os dados da pegada hídrica da cana-de-açúcar obtidos com base no balanço hídrico no solo (dados observados) foram comparados com aqueles obtidos com base no modelo CROPWAT. Inicialmente, foi determinado o erro absoluto (EA) que é definido como o módulo da diferença entre o valor medido (X) e o valor estimado (X'), expresso nas unidades da própria grandeza.

$$EA = |X - X'| \quad (13)$$

Por outro lado, o erro relativo (ER) foi obtido pelo pela expressão abaixo, expresso em percentagem.

$$ER = \left| \frac{X - X'}{X'} \right| \cdot 100 \quad (14)$$

em que X é o valor da pegada hídrica obtida através do modelo CROPWAT e X' é o valor da pegada hídrica obtido para cada tratamento de irrigação utilizando-se o balanço hídrico do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da evapotranspiração total e diária para os diferentes estágios de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, calculados com base no método do balanço hídrico no solo, encontram-se na Tabela 1 e 2, respectivamente. As fases fenológicas das plantas é um dos fatores que atuam na evapotranspiração da cultura. Nota-se que a fase inicial (I) é a que apresenta os menores valores de evapotranspiração da cultura; já na fase fenológica de desenvolvimento médio da cultura (III) a evapotranspiração total e diária atingem o seu ponto máximo. A razão disso é que nessa fase a cultura atingiu o máximo de desenvolvimento foliar e, portanto, maior área evapotranspiratória.

Tabela 1. Evapotranspiração total (ET_{total} , mm) da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_o) em diferentes fases fenológicas de desenvolvimento da cultura

Fases fenológicas	Sequeiro	25% ET_o	50% ET_o	75% ET_o	100% ET_o
I	20,1	20,4	33,4	38,3	41,8
II	182,6	184,4	195,1	191,8	216,8
III	676,3	789,1	891,7	1045,8	1130,4
IV	187,3	213,7	270,5	270,9	272,4
Total	1066,2	1207,5	1390,6	1546,9	1661,6

Os tratamentos de sequeiro e de 100% ET_o foram os que apresentaram os maiores valores de ET, principalmente na fase fenológica III (estádio médio) devido, essencialmente, ao desenvolvimento foliar da cultura. Os valores da ET total nos tratamentos de sequeiro, 25, 50 e 75%, representaram 64, 73, 83 e 93% da ET no tratamento 100% ET_o .

Os valores da evapotranspiração diária da cana-de-açúcar estão apresentados na Tabela 2. Tal como no caso anterior, observa-se que os menores valores de evapotranspiração ocorreram na fase fonológica inicial, devido a cultura ainda se encontrar pouco desenvolvida e o solo descoberto, cujos valores variaram entre 0,67

mm/dia (sistema de sequeiro) e 1,39 mm/dia (100% ETo). Porém, com o crescimento da cultura, o consumo de água aumentou rapidamente até atingir seu volume máximo na fase fenologia de crescimento médio da cultura (III), com valores variando entre 3,76 e 6,28 mm/dia, respectivamente, nos tratamentos de sequeiro e 100% ETo; em seguida, no estágio final, a ETc da cultura decresceu de forma acentuada, atingindo valores de 2,8; 3,1; 3,6 e 3,86, respectivamente, nos tratamentos de sequeiro, 25%, 50%, 75% e 100%ETo.

Tabela 2. Evapotranspiração diária ($ET_{diária}$, mm/dia) da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_o) em diferentes fases fonológicas de desenvolvimento da cultura

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

Os dados de produtividade, irrigação e EUA (eficiência do uso da água) estão apresentados na Tabela 3. Nota-se que a produtividade é diretamente proporcional à irrigação, ou seja, à medida que a disponibilidade hídrica aumenta, a cultura apresenta melhor potencial de produção. Por outro lado, em relação à eficiência do uso da água (EUA), observa-se comportamento contrário, ou seja, à medida que há aumento da irrigação, ocorre aumento da produtividade e, portanto, decréscimo nos valores da EUA.

A partir da análise dos dados da produtividade da cultura da cana-de-açúcar em relação à eficiência ao uso da água, observa-se a menor produtividade da cultura no tratamento de sequeiro, com 62,6 t/ha⁻¹. Assim à medida que se adiciona água à cultura, observa-se o crescimento da EUA que alcança seu maior valor no tratamento de 25% ETo de 0,206395 t/ha/mm., onde a produtividade é de 95,4 t/ha⁻¹, o menor valor da produtividade da cultura. A partir do incremento das lâminas de irrigação, a

EUA apresenta decréscimo nos valores até alcançar seu menor valor de 0,08000228 t/ha/mm no tratamento com 100% de ETo, com a maior produtividade cana-de-açúcar dentre os tratamentos utilizados de 112,3 t/ha⁻¹. Verifica-se, por outro lado, que a cultura irrigada apresentou produtividade de até 79,4% maior do que aquele obtido no tratamento de sequeiro.

Tabela 3. Produtividade, irrigação e eficiência de uso de água (EUA) da cultura da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ETo)

Tratamento	Produtividade (t/ha⁻¹)	Irrigação (mm)	EUA (t/ha/mm)
Sequeiro	62,6	-	-
25%	95,4	462,22	0,206395223
50%	100,61	724,76	0,138818367
75%	110,28	1022,52	0,107851191
100%	112,3	1403,71	0,08000228

A Tabela 4 exibe as componentes verde e azul das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar cultivada em tratamento de sequeiro, bem como nos tratamentos de 25%, 50%, 75% e 100% da ETo. Essa tabela também apresenta as necessidades hídricas da cultura (NCH) verde e azul da cana-de-açúcar, obtidas através do modelo CROPWATER. Ambas componentes apresentam crescimento nos seus valores à medida que ocorre aumento na lâmina de irrigação. Constata-se, ainda, que a componente verde não apresenta grande variabilidade entre os tratamentos de irrigação.

O aumento da componente verde no tratamento de 25% da ETo em relação ao tratamento de 100%ETo é de apenas 6%. Entretanto, a diferença dos valores da componente azul tratamento de 25% da ETo em relação ao tratamento irrigação de 100% ETo é de 65%. Por outro lado, os dados da NCH verde da evapotranspiração com base no modelo CROPWAT superestima os valores no tratamento de 100% ETo em até 46%. Portanto, à medida que há aumento na lâmina de irrigação ocorre o aumento da NCH verde, haja vista que essa componente depende diretamente da

precipitação efetiva. Por outro lado, observa-se que as NCH azul apresentam crescimento significativo em função do aumento da lamina de irrigação, em virtude dessa componente estar diretamente relacionada ao consumo de água através do processo de irrigação.

No tratamento de 25% ETo a NCH azul apresentou valor de 6647,7 m³/ha e no tratamento 100%ETo a NCH foi de 10973,6 m³/ha, evidenciando, assim, ocorre aumento da necessidade hídrica da cultura em função do aumento de irrigação, justamente ao contrário dos resultados obtidos para EUA. Portanto, a componente azul da NCH é a que mais contribui com o valor total da necessidade hídrica da cultura. Neste contexto, estudos realizados por Gerbens-Leenes (2009) para diferentes países do mundo mostrou que a NCH da cana-de-açúcar variou entre 1233 e 2082 mm dependendo do período de crescimento da cultura. Os resultados deste estudo também indicaram que os países como México e o Brasil apresentaram NCH favoráveis ao crescimento do rendimento da cultura, com valores acima da média, enquanto a China apresenta valores de NCH abaixo da média.

Tabela 4. Componentes verde e azul das necessidades hídricas da cultura cana-de-açúcar (NCH) cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com base em 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração de referência (ETo) e obtidas através do modelo CROPWAT

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

Em relação aos valores obtidos através do modelo CROPWAT, constatou-se que o valor de NCH verde é de 8214 m³/ha e NCH azul é de 7378 m³/ha, totalizando 15592 m³/ha. Portanto, existe uma inversão em relação de comportamento dos valores de NCH obtidos através do modelo, pois nesse caso a componente verde é a que mais

contribuiu para NCH total da cana-de-açúcar, ao contrário do resultado obtido com os valores observados.

Após a obtenção dos valores das NCH verde e azul da cana-de-açúcar foi possível calcular a pegada hídrica da cultura, conforme apresentada na Tabela 5. Essa tabela exibe os valores das componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada em sistemas de sequeiro, bem como irrigada nos tratamentos de 25%, 50%, 75% e 100% da ETo e ainda obtidas através do modelo CROPWAT. A partir dos cálculos, nota-se que os valores da pegada hídrica verde e cinza diminuem à medida que há acréscimo na irrigação, sendo os maiores valores no cultivo em sistema de sequeiro e os menores valores para o tratamento de irrigação de 100% ETo. Por outro lado, os valores da pegada hídrica azul aumentam à medida que há incremento na irrigação. Isso resultado se encontra em concordância com o conceito de pegada hídrica azul, haja vista que ela representa a água de irrigação utilizada no processo de desenvolvimento da cultura. No tratamento de sequeiro, observou-se que a pegada hídrica verde foi de aproximadamente 80% do valor total que corresponde a 103,52 m³/ha, representando, junto com a pegada hídrica cinza, a maior contribuição na pegada hídrica total nos cinco tratamentos utilizados no estudo. Já o menor valor da pegada hídrica verde foi observado no tratamento de irrigação de 100%ETo, com 50,24 m³/ha, que corresponde a 31% do valor total da pegada hídrica da cana-de-açúcar nesse tratamento que é de 159,53 m³/ha. Os valores da pegada hídrica verde nos tratamentos de irrigação de 25%, 50% e 75% da ETo foram, respectivamente, 56,89, 55,72 e 51,14 m³/ha.

Com relação à pegada hídrica azul, nota-se que o tratamento de sequeiro apresentou valor igual à zero, em face dela corresponder à água adicionada ao sistema através da irrigação. Já o tratamento com 25% da ETo foi o que apresentou o segundo menor valor da pegada hídrica azul, representando 47% da pegada hídrica total nesse tratamento. Por outro lado, o maior valor da pegada hídrica azul foi obtida no tratamento de 100% ETo, com valor 97,71 m³/ha que correspondente a 61% da pegada hídrica total (159,53 m³/ha). Em resumo, a pegada hídrica azul é a que apresenta a maior contribuição para a formação da pegada hídrica total, seguida pelas pegadas hídricas verde e cinza. A pegada hídrica azul representa o volume real de água utilizada pela cultura, trazendo consequências diretas sobre a disponibilidade hídrica do sistema; enquanto a pegada hídrica cinza é apenas um indicador de poluição, que

indica apenas a gravidade da poluição no sistema, não mostrando o volume da água poluída. Em geral, a pegada hídrica cinza contribui apenas com uma pequena porcentagem na pegada hídrica total e que os valores encontrados apresentam decréscimos de acordo com o incremento na irrigação, ou seja, quanto menor for a irrigação, maior será o valor encontrado para a pegada hídrica cinza. O maior valor de pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar é no cultivo em sistema de sequeiro, com o valor de 20,77 m³/ha, cerca de 20% da água utilizada no processo total, que é de 103,52 m³/ha. Já o menor valor da PH cinza encontra-se no tratamento de irrigação de 100% ETo, com valor de 11,57 m³/ha, que corresponde a 7,2% da água utilizada no processo. Os valores da pegada hídrica cinza nos tratamentos de 25%, 50% e 75% ET_o são, respectivamente, 13,34, 8,5 e 7,42% dos valores da pegada hídrica total de cada tratamento. Assim, conclui-se que para a variedade de cana-de-açúcar RB 92579, quanto maior for o valor da irrigação, menor será o valor da carga de poluentes envolvida no sistema. Os estudos de Rattikarm & Sate (2012) para diferentes províncias do norte da Tailândia mostraram que a média da PH da cana-de-açúcar é de 202 m³/ton. A PH da cana-de-açúcar é mais elevada na província de Lampang (252 m³/ton) e apresentou menor intensidade em Kamphaeng Phet (167 m³/ton), evidenciando, assim, que a PH varia consideravelmente em função da localização da região.

Analisando os resultados da PH da cana-de-açúcar obtidos com o modelo CROPWAT, observa-se que esse modelo superestima os valores observados das PHs verde e azul; enquanto que ele subestima os valores da pegada hídrica cinza nos cinco tratamentos. A pegada hídrica total pelo modelo CROPWAT foi de 235,96 m³/ha e, portanto, 47,9% superior ao maior valor obtido através do balanço hídrico do solo, que foi de 159,53 m³/ha no tratamento de 100% ETo. Ao contrário dos valores calculados, a pegada hídrica verde modelada é a componente que mais contribui na composição da PH total, que corresponde a cerca de 50% no valor total da pegada hídrica da cultura. Já a pegada hídrica cinza modelada apresenta valor inferior em comparação aos cinco tratamentos de sequeiro e de irrigação, apenas com 9 m³/ha, que corresponde a 4% da pegada hídrica total. A pegada hídrica azul está diretamente ligada à produtividade, pois quanto maior for seu valor maior será a produtividade da cultura. Já a pegada hídrica verde e cinza são inversamente proporcionais aos valores

de produtividade, assim, quanto maior a produtividade menor será a carga de poluentes inserida no solo.

Tabela 5. Pegada hídrica verde, azul e cinza da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada com 25%, 50%, 75% e 100% de evapotranspiração de referência (ET₀) e através do modelo CROPWAT

Tratamento	PH verde (m³/ha)	PH azul (m³/ha)	PH cinza (m³/ha)	PH total (m³/ha)
Sequeiro	82,75	0	20,77	103,52
25%	56,89	69,68	13,62	140,19
50%	55,72	82,49	12,92	151,14
75%	51,14	95,82	11,79	158,75
100%	50,24	97,71	11,57	159,53
Modelo CROPWAT	119,56	107,39	9	235,96

A Figura 2 exhibe a contribuição em termos percentuais das diferentes componentes da pegada hídrica total da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e nos tratamento de irrigação de 25%, 50%, 75% e 100% ETo. Tal como mencionado anteriormente, a pegada hídrica azul em sistema de sequeiro é nula (Figura 2a), enquanto as componentes verde e cinza representaram, respectivamente, 80 e 20% da PH total da cultura nesse tratamento. Por outro lado, no tratamento de irrigação de 25% ETo as componentes cinza, verde e azul da pegada hídrica da cultura representaram, respectivamente, 10, 40 e 50% da PH total, enquanto que no tratamento de 50% as componentes cinza, verde e azul foram, respectivamente, 8, 37 e 50% da PH total. Por outro lado, nos tratamento de irrigação de 75% e 100% ETo as componentes da PH foram praticamente iguais. Mekonnen e Hoekstra (2011) estimaram que a média da pegada hídrica global da cana-de-açúcar para o período de 1996 a 2005, foi de 210 m³/ton, variando entre 120 e 410 m³/ton. A partição das componenets foram de 139 m³/t verde (66%), 57 m³/ton azul (27%) e 13 m³/ton cinza (6%). Nota-se que os valores da componente verde da PH obtidos neste estudo foram muito elevados quando comparados com os resultados do presente estudo, porém as componentes azul e cinza foram inferiores.

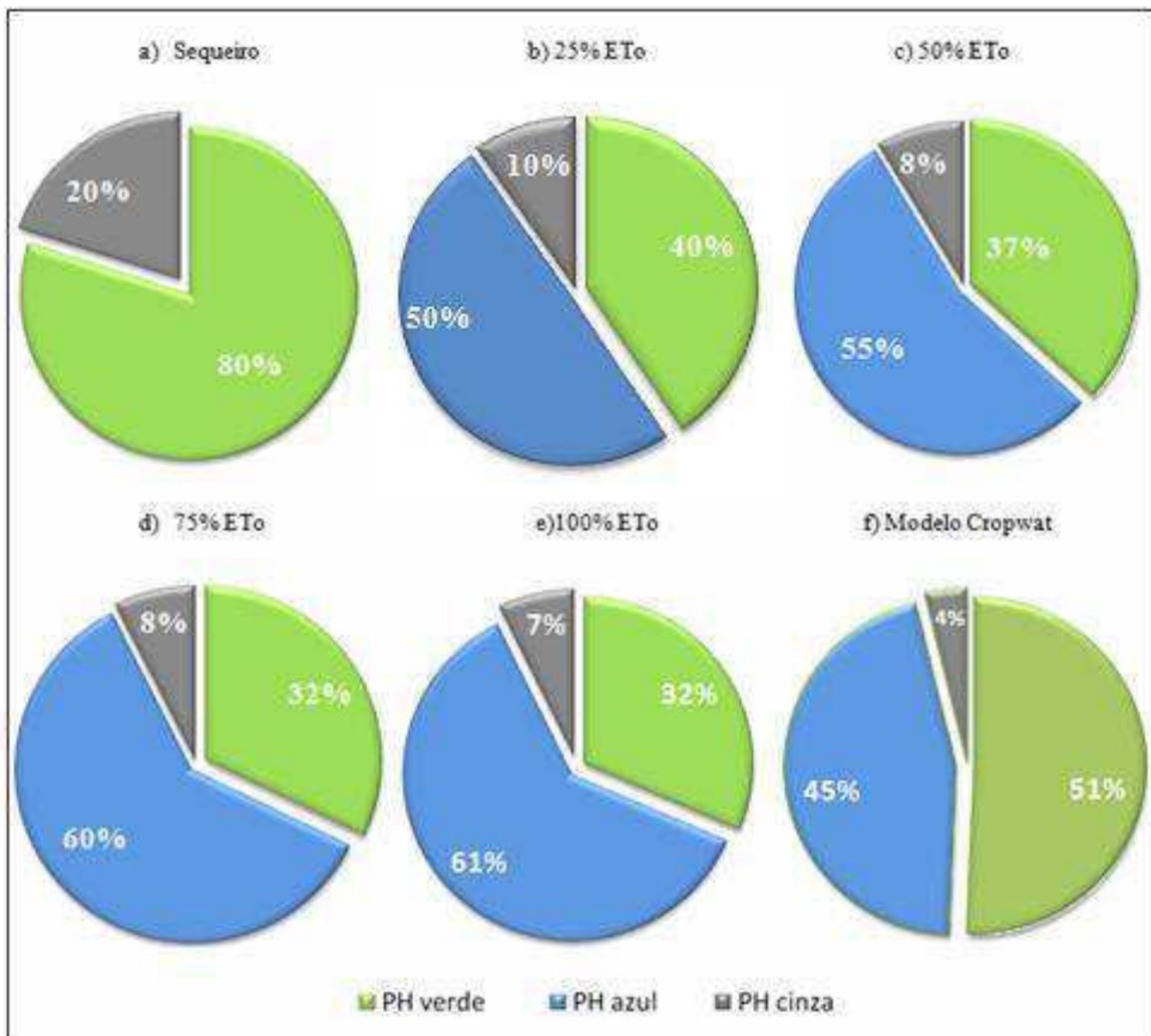


Figura 2. Contribuição em termos percentuais das diferentes componentes da pegada hídrica total da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e nos tratamentos de irrigação de 25%, 50%, 75% e 100% ETo e através do modelo CROPWAT

Na Tabela 6 constam os resultados da análise de erros para cada componente da pegada hídrica da cana-de-açúcar, nos cinco diferentes tratamentos utilizados no estudo. A componente verde apresentou aumento no erro absoluto e relativo à medida que ocorre aumento na lâmina de irrigação. Inversamente, as componentes azul e cinza da PH apresentaram redução do erro à medida que há aumento do volume de água utilizado na irrigação.

O erro absoluto apresentou variação entre tratamentos de 36,81 a 69,32 m³/ha na pegada hídrica verde da cana-de-açúcar. Os menores erros absolutos foram observados na PH cinza da cultura, seguidos pelos erros da PH azul, que variaram

entre tratamentos de zero a 25%ET_o. Por outro lado, os erros para o cultivo em sistema de sequeiro apresentou taxa de erro de 45% e os maiores erros foram no tratamento de 100% ET_o, com erro de 137%. Assim, as pegadas hídricas azul e cinza apresentaram diminuição do erro absoluto em função do aumento na lamina de irrigação aplicada à cultura, com variação entre 37,11 a 9,68 m³/ha na PH azul e de 11,77 a 2,57 m³/ha na PH cinza. Os erros relativos de todos as componentes da PH da cana-de-açúcar são substancialmente elevados, particularmente no caso da PH verde que atinge 137% no tratamento de 100%ET_o.

Tabela 6. Valores do erro absoluto (EA) e erro relativo (ER) das pegadas hídricas verde, azul e cinza da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro e irrigada em 25%, 50%, 75% e 100% de evapotranspiração de referência (ET_o)

Tratamento	Erro Absoluto			Erro Relativo		
	PH verde (m ³ /ha)	PH azul (m ³ /ha)	PH cinza (m ³ /ha)	PH verde	PH azul	PH cinza
Sequeiro	36,81	0	11,77	45%	0	56%
25%	62,67	37,11	4,62	110%	54%	33%
50%	63,84	24,9	3,92	114%	30%	30%
75%	68,42	11,57	2,79	133%	12%	23%
100%	69,32	9,68	2,57	137%	10%	22%

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho sobre a pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada nos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba permitem concluir o seguinte:

1. A pegada hídrica azul está diretamente relacionada ao aumento da produtividade da cana-de-açúcar; já os valores das pegadas hídricas verde e cinza são inversamente proporcionais aos valores de produtividade;

2. As pegadas hídricas verde e cinza diminuem à medida que ocorre acréscimo de água à cultura, sendo os maiores valores no cultivo em sistema de sequeiro e os menores valores no tratamento 100% ETo;

3. A pegada hídrica cinza apresenta a menor contribuição da pegada hídrica total e seus valores decrescem em função do aumento da irrigação;

4. 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;

5. Os erros relativos de todas as componentes modeladas da PH da cana-de-açúcar são substancialmente elevados quando comparados com os componentes medido pelo balanço hídrico do solo.

6. A pegada hídrica total da cana-de-açúcar estimada por Mekonnen & Hoekstra (2011) superestima em 103% os valores encontrados neste estudo para a cultura cultivada em sistema de sequeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S., Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, p. 300, 1998.
- Brito, A.S., Libardi, P.L. & Ghiberto, P.J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. Bras. Ci. Solo. v. 33, p.295-303, 2009.
- Cardoso, H.E.A.; Mantovani, E.C.; Costa, L.C. As águas da agricultura. Agroanalysis. Instituto Brasileiro de Economia/Centro de Estudos Agrícolas. Rio de Janeiro. 1998. p.27-28.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G., Gautam, R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, v. 60, p.186-203, 2006.
- Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize. 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.
- Gleick PH, The changing water paradigm: a look at twenty-first century water resources development. *Water International*, v. 25, p. 127-138, 2000.
- Hertwich EG & Peters GP, Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis. *Environmental Science and Technology*, v. 43, p. 6414-6420, 2009.
- Hoekstra AY & Huang PQ, Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series. *Institute for Water Education*. Holanda: UNESCO-IHE, p. 66, 2002.
- Hoekstra A.Y, Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, v. 68, p. 1963-1974, 2009.
- Hoekstra, A.Y, Chapagain, A.K. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, v.70, p 749-758, 2011.

- Libardi, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: ESALQ – Departamento de Física e Meteorologia, p. 497, 1995.
- Oliveira, E.P. de, Sobrinho, J.B. S., Negreiros, J.C. de; Amazonas, L., Almeida, M.B.A. de, Silveira, P.S., Andrade, R.A. de, Piffer, T.R. de O., Teixeira, W.S. Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar safra 2007/2008, segundo levantamento, agosto/2007 - Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, p.12, 2007.
- Peres, J.G., Scárdua, R., Villa Nova, N.A. Coeficiente de cultura (Kc) para cana-de-açúcar: ciclo de cana - soca. *Álcool & Açúcar*, V. 62, p.34-42, 1992.
- Rocha, F.C.S. Avaliação da eficiência técnica e análise financeira de um plantio comercial de cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum* L., microirrigado por gotejamento subsuperficial. Fortaleza: UFC. 2001. Dissertação de Mestrado.
- Rees, W.E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, v. 4, p. 121-130. 1992.
- Rees, W. E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, v. 17, p.195-215. 1996.
- Silva, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v.58, n.4, p.575-596, 2004.
- Silva, V. P. R.; Silva, R. A.; Cavalcanti, E. P.; Braga, C. C.; Singh, V. P.; Pereira, E. R. R. Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy*, v.84, n.1, p.1852-1862, 2010.
- Wackernagel, M *et al.*, Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961–1999: comparing the conventional approach to an actual land area approach. *Land Use Policy*, v. 21, p. 261-269, 2004.
- Wackernagel M *et al.*, National footprint and biocapacity accounts 2005: *The underlying calculation method*, *Global Footprint Network*, Oakland, CA, 2005.