



Dinâmica temporal da pegada hídrica por cultivar de soja em polo de grãos no Oeste do Pará, Amazônia

ARTICLES doi:10.4136/ambi-agua.2051

Received: 27 Nov. 2016; Accepted: 01 Sep. 2018

**Douglas Cavalcante Costa^{1*}; Lucieta Guerreiro Martorano²;
José Reinaldo da Silva Cabral de Moraes³; Leila Sheila Silva Lisboa⁴;
Rubismar Stolf¹**

¹Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, SP, Brasil
Centro de Ciências Agrárias (CCA). E-mail: eng.douglascavalcante@gmail.com, stolfrubismar@gmail.com

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Belém, PA, Brasil

Laboratório de Agrometeorologia. E-mail: lucieta.martorano@embrapa.br

³Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Jaboticabal, SP, Brasil

Departamento de Ciências Agrárias. E-mail: reinaldojmoraes@gmail.com

⁴Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq-USP), Piracicaba, SP, Brasil

Departamento de Ciências Exatas. E-mail: leilasheila@gmail.com

*Corresponding author

RESUMO

O objetivo neste trabalho foi analisar a dinâmica temporal da pegada hídrica de oito cultivares de soja, plantadas na região do Oeste do Pará. Foram utilizados dados meteorológicos correspondentes ao período de 2009 a 2014 para calcular as taxas evapotranspiratórias da cultura. Como a Pegada Hídrica é subdividida em verde, azul e cinza e, na região os cultivos não são irrigados contabilizou-se apenas a verde e a cinza. A PH_{verde} foi estimada considerando-se o total de água consumida durante o ciclo de cada cultivar. A PH_{cinza} foi avaliada utilizando como fator contaminante em corpos hídricos o composto nitrato que está presente nos fertilizantes nitrogenados, conforme as concentrações aceitáveis pelo CONAMA 357/2005. Considerou-se dois valores para as doses de N, sendo 30 kg ha^{-1} com base na adubação descrita na literatura, bem como o N existente nas formulações (2:20:20) dos adubos vendidos na região, sendo 2 kg ha^{-1} o máximo utilizado na adubação de cobertura. Entre as oito cultivares analisadas, em termos de indicador de baixa pegada hídrica, as cultivares BRS 278 RR; BRS 325 RR e BRS 333 RR foram as mais expressivas no polo de grãos no oeste do Pará, evidenciando o uso eficiente da água disponível em todos os anos/safras analisados. A soja produzida no oeste do Pará possui baixa pegada hídrica cinza. Todavia, os valores de redução da produtividade em anos safra na região comprometem a pegada hídrica verde pela sojicultura na região, evidenciando que esse indicador deve ser analisado considerando as especificidades de cada cultivar de soja. O valor da pegada hídrica total estimada neste trabalho foi inferior aos obtidos na literatura, reforçando a importância de estimar a Pegada Hídrica (PH) como indicador de uso consuntivo de água em cultivos de grãos na Amazônia.

Palavras-chave: indicador ambiental, nitrato, uso consuntivo.



Temporal dynamics of the water footprint of soybean hub grains in Western Pará, Amazon

ABSTRACT

This study analyzed the time dynamics of the water footprint of eight soybean cultivars planted in the Western Pará, Amazon. Meteorological data between 2009 and 2014 were used to calculate the crop's evapotranspiration rates. Since the water footprint is subdivided into green, blue, and grey, and the crops are not irrigated in the region, only the green and grey footprints were used. WFgreen (water footprint green) was estimated considering the total amount of water consumed during the cycle of each cultivar. WFGrey was assessed using the nitrate present in nitrogen fertilizers as contaminating factor in water bodies according to the concentrations accepted by CONAMA 357/2005. Two N dose values were considered, i.e., 30 kg ha⁻¹ based on fertilizer values tested in the literature and the N present in the formulations (2:20:20) of the fertilizers sold in the region, while the maximum used in top dressing is 2 kg ha⁻¹. Among the eight cultivars analyzed, C1 had the smallest water footprint, which shows the efficient use of the water available in every year/harvest analyzed. The total water footprint presented in this study highlights the importance of the methodology to estimate the consumptive use of water in grain production centers. The soybean produced in western Pará has a small grey water footprint, but the cultivars must be highly productive to reduce the green water footprint of soy farming in the region. The definition of the water footprint aids in the strategic planning of the management of water resources in grain production areas in the Amazon.

Keywords: consumptive use, environmental indicator, nitrate.

1. INTRODUÇÃO

A quantidade de água potável necessária para suprir a demanda das populações vem aumentando, tanto para consumo quanto para produzir alimento, em períodos de escassez hídrica no solo. A acelerada degradação da qualidade das águas pela agricultura tem sido atribuída, principalmente ao fator erosivo das chuvas em solos expostos e ao uso indiscriminado em cultivos irrigados. A demanda crescente por produtos agrícolas de uso alimentar e não-alimentar, bem como as crescentes mudanças nos padrões de consumo, principalmente de carne e açúcar, têm contribuído significativamente na redução da oferta de água e na intensificação da poluição em corpos hídricos (Lamastra et al., 2014).

No Brasil, a estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) foi de 17 milhões de habitantes para o início do século XX, porém projeta-se para 2020 valores da ordem de 212 milhões de habitantes, no País. As projeções do *Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat* (DESA) apontam que a população brasileira deverá atingir 238 milhões de habitantes em 2050, o que pode intensificar a disputa por melhores classes de solos, condições climáticas, água potável, alimentos e insumos agrícolas; e ainda, estimam que 2,3 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas com elevada restrição hídrica (UNESCO, 2015a; 2016). Portanto, nesse cenário, a humanidade poderá presenciar crises, sobretudo na oferta de alimentos e de água potável, intensificando-se os riscos de perda da qualidade hídrica às populações (Ercin e Hoekstra, 2014).

Na Amazônia, áreas cultivadas com grãos em Mato Grosso foram ampliando-se para áreas mais ao norte da região, consolidando-se importantes polos no Pará como, por exemplo, no oeste do Estado. Nesse polo de produção participam com a maior área cultivada os municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos. Essas áreas, anteriormente foram desflorestadas

com incentivo de programas de desenvolvimento na região, como o de integração da Amazônia às demais regiões brasileiras. No final da década de 1990, com a estruturação do terminal graneleiro, foram abertas novas frentes voltadas à exportação de grãos, o que estimulou a imigração de agricultores dispostos a investir na região. Vale ressaltar que a soja tem se destacado como cultura rentável economicamente, totalizando 41 mil hectares plantados (Pará, 2016).

Entre as variáveis climáticas, a oferta hídrica apresenta-se como fator limitante à obtenção de rendimentos máximos em safras agrícolas. A soja (*Glycine max*), de acordo com Farias et al. (2007), nos períodos de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos a evapotranspiração real diária varia entre 7 a 8 mm.dia⁻¹, ou seja, nos períodos vegetativos e reprodutivos a soja pode utilizar entre 450 a 800 mm de água nos processos evapotranspiratórios até completar o seu ciclo. A disponibilidade de água no solo é fator condicionante ao atendimento da planta à demanda hídrica da atmosfera (Martorano et al., 2009). Em períodos de escassez de água no solo os sojicultores podem adotar estratégias de reposição hídrica usando técnicas de irrigação, pois a produção de alimentos deverá suprir as necessidades da população em crescimento no globo terrestre, o que pode refletir na elevação da competitividade por água doce.

A pegada hídrica (PH) contabiliza o uso consuntivo de água e apresenta-se como uma ferramenta de gestão eficiente de recursos hídricos pelo setor produtivo, como nas atividades agropecuárias de uma região. Índices apontando valores da população na condição de extrema pobreza, acesso desigual no abastecimento de água, escassez de serviços de saneamento básico e, o baixo gerenciamento dos recursos hídricos são fatores preponderantes de ameaças à obtenção do desenvolvimento sustentável no planeta (UNESCO, 2015b). Estima-se que até 2050 haverá um aumento mundial de 55% da demanda hídrica, especialmente na África e Ásia Central. Os padrões de consumo da humanidade tendem a elevar as demandas por recursos naturais e reduzir a oferta de bens e serviços ecossistêmicos (MEA, 2003).

Para contabilizar os diferentes usos da água, utilizam-se indicadores de desempenho do uso eficiente da água, como por exemplo, a Pegada Hídrica (PH). A metodologia da Pegada Hídrica apresenta-se como um importante indicador de prestação de serviços ecossistêmicos em provisão, regulação e suporte hídrico às populações. A PH é subdividida em: azul, verde e cinza (Hoekstra et al., 2011), sendo que a Pegada Hídrica Azul (PH_{azul}) indica o uso consuntivo da água superficial ou subterrânea disponível à cultivos irrigados. A Pegada Hídrica Verde (PH_{verde}) refere-se à precipitação que não escoou ou não repõe a água subterrânea, que é armazenada no solo ou na vegetação, ou seja, é a água consumida no processo evapotranspiratório das culturas. A Pegada Hídrica Cinza (PH_{cinza}) indica o nível de poluição na cadeia de produtos ou de processo, sendo definida como a água necessária para diluir/depurar o poluente. Assim, na Amazônia, o manejo de fertilizante e defensivo agrícola pode comprometer a qualidade hídrica em áreas produtivas. O objetivo neste trabalho foi avaliar a dinâmica temporal da pegada hídrica da soja considerando cultivares e anos/safras diferentes no polo de grãos Santarém/Belterra, na Amazônia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1, destacam-se as áreas destinadas para agricultura anual (milho, feijão, soja), onde a soja é plantada desde 2006. Atualmente o polo de grãos de Santarém/Belterra é reconhecido como uma das principais rotas para o escoamento de grãos do Brasil. Nessa região predomina a tipologia climática Am₃, de acordo com a adaptação na metodologia de Köppen por Martorano et al. (1993). As chuvas anuais variam entre 2.000 a 2.300 mm, ocorrendo no mês de menor oferta pluvial valores abaixo de 60 mm. A temperatura máxima do ar varia entre

30,5 a 32°C e as mínimas entre 21,0 a 22,5°C. O período mais chuvoso ocorre de dezembro a maio com cerca de 80% dos totais pluviais e, entre junho a novembro são contabilizados o restante do volume precipitado na região (Varela-Ortega et al., 2013).

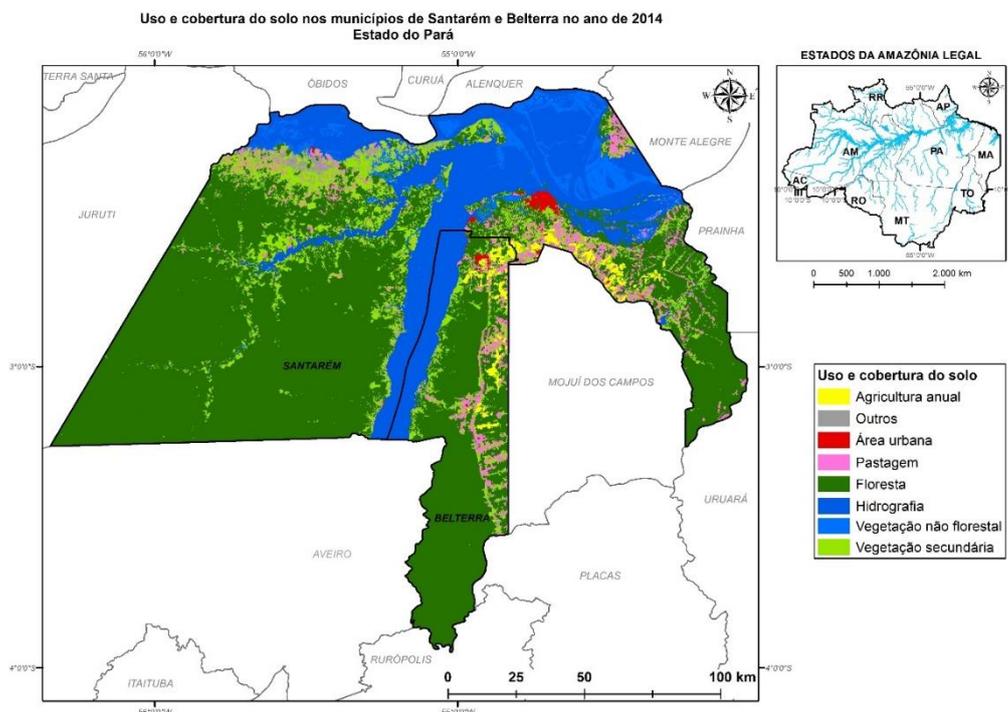


Figura 1. Mapa de localização do polo de grãos Santarém/Belterra no oeste do Pará, Amazônia.

Para calcular a pegada hídrica total das oito cultivares testadas na região, fez-se as estimativas das pegadas hídricas verde e cinza a partir dos valores em rendimento dessas cultivares, mas os valores de estimativas de taxas evapotranspiratórias foram contabilizados considerando a duração do ciclo e condições térmico-hídricas em cada ano/safra, no período de 2009 a 2014, conforme descrito a seguir.

Como na região de estudo os cultivos não são irrigados, a PH_{azul} foi desconsiderada na contabilização da pegada hídrica total.

2.1. Pegada hídrica verde (PH_{verde})

Para o cálculo de evapotranspiração da cultura no polo de grãos de Santarém/Belterra foi utilizado o modelo CROPWAT 8.0 que foi desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2010). Nessa ferramenta foram inseridos os dados mensais, correspondentes ao período de 2009 a 2014. Assim, inseriram-se os valores de precipitação pluvial (mm), temperatura máxima e mínima (°C), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento ($m\ s^{-1}$), oriundos de estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e posto pluvial da Agência Nacional de Águas (ANA). Os valores de coeficiente da cultura (K_c) adotados foram 0,4, 1,15 e 0,5, correspondentes a fase inicial, média e final, respectivamente (Allen et al., 1998). Identifica-se na Amazônia a predominância de Latossolo Amarelo, o que determinou os valores de entrada gerais do solo no software. A PH_{verde} foi estimada baseando-se nos dados de clima, de precipitação e no período de semeadura de cada cultivar apontados na Tabela 1. Utilizou-se a metodologia de Hoekstra et al. (2011), Equação 1.

$$PH_{\text{verde}} = \frac{C_{\text{verde}}}{R} \quad (1)$$

Em que, PH_{verde} é a Pegada Hídrica Verde da cultura ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$), C_{verde} o consumo de água verde ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$); e R é o rendimento da cultura (t ha^{-1}).

O componente da C_{verde} foi estimado com base na evapotranspiração diária acumulada (ET , mm dia^{-1}) durante o ciclo completo de desenvolvimento da cultura, conforme Equação 2.

$$C_{\text{verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{\text{pdc}} ET_{\text{verde}} \quad (2)$$

Em que, ET_{verde} é a evapotranspiração da cultura, considerando apenas a oferta pluvial, conforme os pressupostos de Hoekstra et al. (2011) como água verde. O fator 10 refere-se a conversão da unidade de ET_{verde} em milímetros para volumes de água por superfície terrestre, em $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$. O somatório considera desde o dia de semeadura ($d=1$) até a colheita e pdc , corresponde a duração do período de desenvolvimento da cultivar, adotada neste artigo como o número de dias conforme as especificações de cada cultivar.

2.2. Dados das cultivares de soja

Na Tabela 1 apresentam-se as cultivares utilizadas, contabilizando-se o número de dias da emergência até a floração e, o número de dias até o final do ciclo, bem como o rendimento de grãos (t ha^{-1}) de cada cultivar. Ressalta-se que essas oito cultivares (C_1 a C_8) foram materiais testados na região por Borges et al. (2012), ordenados conforme o rendimento de grãos. Ressalta-se que em cada ano/safra as estimativas da pegada hídrica foram realizadas considerando-se os rendimentos obtidos por Borges et al. (2012), variando-se as condições meteorológicas mensais ocorridas no período entre 2009 a 2014. Totalizou-se a precipitação pluvial (mm) até a floração e da emergência ao final de cada ciclo dessas cultivares, no polo de grãos Santarém/Belterra.

Tabela 1. Cultivares, dias até a floração, número de dias para completar o ciclo, rendimento de soja (*Glycine max*), volume médio (2009 a 2014) de água precipitada (PRP) até a floração e a PRP até o final do ciclo para Santarém e Belterra, Pará.

| Cultivares e rendimento (t ha^{-1}) indicado no "parêntese" | Floração (dias) | Ciclo (dias) | SANTARÉM | | BELTERRA | |
|---|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | | | PRP (mm) Floração | PRP (mm) Ciclo | PRP (mm) Floração | PRP (mm) Ciclo |
| C_1 BRS 278RR (2,7) | 46 | 107 | 355,7 | 1205,7 | 345,1 | 796,8 |
| C_2 BRS 325RR (2,5) | 42 | 103 | 337,8 | 1204,1 | 271,3 | 782,1 |
| C_3 BRS 333RR (2,8) | 42 | 105 | 337,8 | 1204,1 | 271,3 | 788,3 |
| C_4 P98Y70 (2,7) | 45 | 103 | 345,4 | 1204,1 | 309,4 | 782,1 |
| C_5 BRS 279RR (2,4) | 42 | 96 | 337,8 | 1162,1 | 271,3 | 681,2 |
| C_6 BRS 8990RR (2,3) | 42 | 103 | 337,8 | 1204,1 | 271,3 | 782,1 |
| C_7 BRS 271RR (2,1) | 42 | 105 | 337,8 | 1204,1 | 271,3 | 788,3 |
| C_8 M8766RR (1,9) | 40 | 96 | 322,9 | 1162,1 | 265,6 | 681,2 |

2.3. Pegada hídrica cinza (PH_{cinza})

A estimativa da PH_{cinza} foi realizada com base em doses de fertilizante nitrogenado empregado no processo de adubação de culturas, considerado como fonte difusa de poluição dos corpos hídricos. Utilizou-se a metodologia de Hoekstra et al. (2011), Equação 3.

$$PH_{\text{cinza}} = \frac{(\alpha \times \text{TAQ}) / (C_{\text{máx}} - C_{\text{nat}})}{R} \quad (3)$$

Em que, PH_{cinza} é a pegada hídrica cinza ($m^3 t^{-1}$), α é a fração de lixiviação do fertilizante, TAQ é a taxa de aplicação por hectare de nitrogênio em campo ($kg ha^{-1}$), $c_{m\acute{a}x}$ é a concentração máxima aceitável e a c_{nat} é a concentração natural do poluente (nitrato) no corpo hídrico e R, o rendimento da cultivar.

Neste trabalho atribuiu-se o valor de 10% para a fração de lixiviação de fertilizante nitrogenado, recomendado por Hoekstra et al. (2011). O valor limite aceitável do nitrato foi considerado de acordo com a legislação CONAMA 357/2005 que categoriza como classe 3 para águas doces e estabelece como quantidade máxima permitida de $10 mg L^{-1}$. Atribuiu-se o valor 0 (zero) para a concentração natural de nitrato em corpos hídricos (Wu et al., 2016). Considerou-se nas estimativas de PH_{cinza} a adubação de nitrogênio (N) conforme as recomendações de Petter et al. (2012) que preconiza $30 kg ha^{-1}$. Também foram estimados os valores de PH_{cinza} para o N existente nas formulações (2:20:20) dos adubos comercializados na região, sendo $2 kg ha^{-1}$ o máximo utilizado na adubação de cobertura.

Fez-se a análise de variância considerando-se o delineamento em blocos casualizados, onde se testou cada cultivar. Assim, no teste de significância (ANOVA) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) avaliando-se a diferença entre a pegada hídrica total de cada cultivar, sendo que o menor valor de pegada hídrica (a) representa o melhor desempenho pela cultivar comparadas duas a duas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que a semeadura das cultivares foram realizadas em 1º de janeiro de cada ano safra analisado, é possível observar na Figura 2 que nos meses de janeiro e fevereiro, quando as cultivares estariam entre as fases de crescimento vegetativo e início da floração, que os eventos pluviais em Santarém foram melhor distribuídos ao comparar com Belterra, conforme descritos na análise dos box-plots. Todavia, apesar da maior simetria entre os eventos pluviais em Santarém, identificou-se maiores discrepâncias (*outliers*) quanto ao volume precipitado diariamente nesse período em relação a Belterra. No final de fevereiro, em Santarém, foram registradas cotas pluviais médias que atingiram cerca de 150 mm. No período correspondente à plena floração, formação de legumes, enchimento e maturação de grãos, percebe-se que as chuvas em Belterra mantiveram assimetrias positivas, ou seja, os valores pluviais ficaram acima da normal climatológica, indicando manutenção da oferta hídrica até o final do ciclo dessas cultivares. Em se tratando de radiação solar na área de estudo verifica-se que as maiores variações ocorreram ao final do ciclo das cultivares, atingindo a máxima energia incidente aos cultivos de soja na ordem de $16 MJ m^{-2} dia^{-1}$, registrada no 1º decêndio de abril. Ao final do ciclo dessas cultivares analisadas, a radiação solar estava com valores em torno de $14 MJ m^{-2} dia^{-1}$. Durante o ciclo das cultivares, nota-se que em Santarém o volume de água precipitado é superior, entre 60% a 65%, em relação a Belterra. Até o início da floração, as chuvas em Santarém apresentaram valores entre 80% a 97% a mais do que em Belterra. Observou-se que entre os fatores biofísicos a oferta pluvial é a variável que mais influência na PH_{verde} , pois a radiação solar praticamente ficou oscilando entre 14 e $16 MJ m^{-2} dia^{-1}$, ao considerar os ciclos das cultivares analisadas. Devido ao ciclo mais precoce das cultivares C₅ e C₈ é possível observar que no período entre o primeiro decêndio de janeiro até o primeiro decêndio de abril essas cultivares passaram por menores variações em termos de radiação solar incidente, ao comparar com as demais cultivares analisadas.

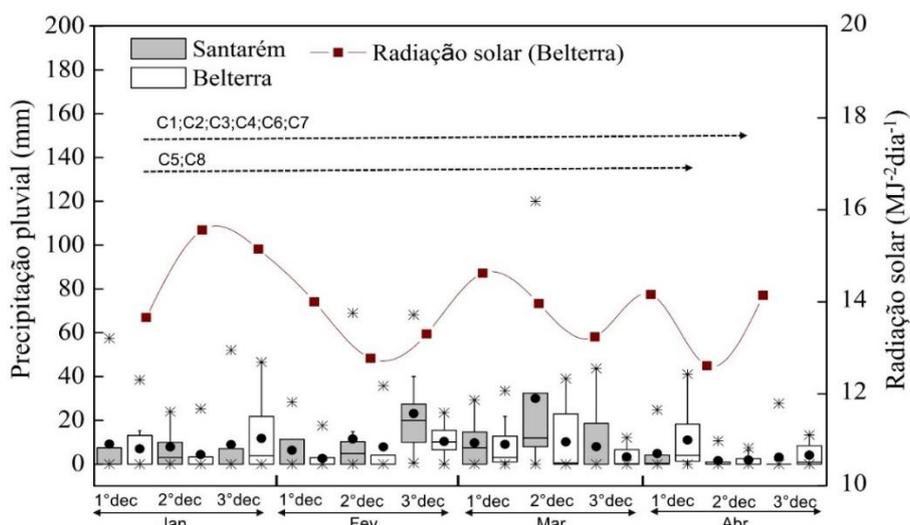


Figura 2. Variabilidade decendial média da precipitação pluvial e radiação solar, no período de 2009 a 2014 em Santarém e Belterra, Amazônia.

Na Tabela 2 observa-se que nos anos/safras analisados, a cultivar C₈ foi a que apresentou a maior PH_{verde} em relação às demais, tendo o maior valor no ano safra 2009/2010 com 1.591 m³ ha⁻¹. Essa cultivar completa o ciclo em 96 dias com rendimento médio de 1,9 t ha⁻¹, indicando que houve baixa eficiência no uso da água da região. A cultivar C₁ que completou seu ciclo com 107 dias, teve o menor valor de pegada hídrica verde (885 m³ ha⁻¹), no ano safra 2011/2012, pois expressou rendimento de 2,7 t ha⁻¹, porém estatisticamente teve semelhante desempenho das cultivares C₂ e C₃ no uso eficiente de água, conforme Figura 3 (A).

Tabela 2. Pegada hídrica verde das cultivares de soja (*Glycine max*) em safras agrícolas 2009/2010 a 2013/2014, no polo de grãos Santarém/Belterra.

| Cultivares de soja | Pegada Hídrica Verde (m ³ t ⁻¹) | | | | |
|-----------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 2009/2010 | 2010/2011 | 2011/2012 | 2012/2013 | 2013/2014 |
| C ₁ (BRS 278RR) | 1103 | 986 | 885 | 1011 | 1007 |
| C ₂ (BRS 325RR) | 1094 | 974 | 872 | 998 | 988 |
| C ₃ (BRS 333RR) | 1135 | 1012 | 908 | 1038 | 1031 |
| C ₄ (P98Y70) | 1153 | 1027 | 920 | 1052 | 1042 |
| C ₅ (BRS 279RR) | 1215 | 1074 | 957 | 1098 | 1075 |
| C ₆ (BRS 8990RR) | 1338 | 1191 | 1067 | 1220 | 1208 |
| C ₇ (BRS 271RR) | 1501 | 1338 | 1201 | 1372 | 1363 |
| C ₈ (M8766RR) | 1591 | 1407 | 1253 | 1439 | 1408 |

Os resultados também evidenciam que a dinâmica temporal da PH_{total} por cultivar durante os anos/safra 2009/2010 a 2013/2014 aumentaram gradativamente, principalmente ao contabilizar-se a pegada de cultivares como: C₆, C₇ e C₈, possivelmente atribuídas à redução dos estoques de água no solo no período de maior necessidade hídrica que é a floração, o que compromete a produtividade da soja (Martorano et al., 2009). A cultivar C₈ apresentou a maior PH_{total} que contabilizou 7.906 m³ t⁻¹, indicando sua baixa eficiência na conversão de uso da oferta hídrica da atmosfera para produzir grãos nesses anos/safras avaliados. Por outro lado, no ano/safra 2011/2012 essa mesma cultivar reduziu sua PH_{total} para 1.415 m³ t⁻¹, explicado pela sua baixa eficiência em expressar rendimento de grãos. Vale destacar que a pegada hídrica contabiliza os processos evapotranspiratórios decorrente das interações no sistema solo-planta-atmosfera em cada ano/safra.

Observou-se efeito significativo em nível de 5% de probabilidade em relação a PH_{total} com

maiores valores para as cultivares C₈, C₇, C₆, respectivamente. Ressalta-se que as menores pegadas hídricas foram contabilizadas nas cultivares C₁, C₂ e C₃ (Figura 3A). Portanto, em termos de indicador de baixa pegada hídrica as cultivares BRS 278 RR; BRS 325 RR e BRS 333 RR foram as mais expressivas no polo de grãos no oeste do Pará

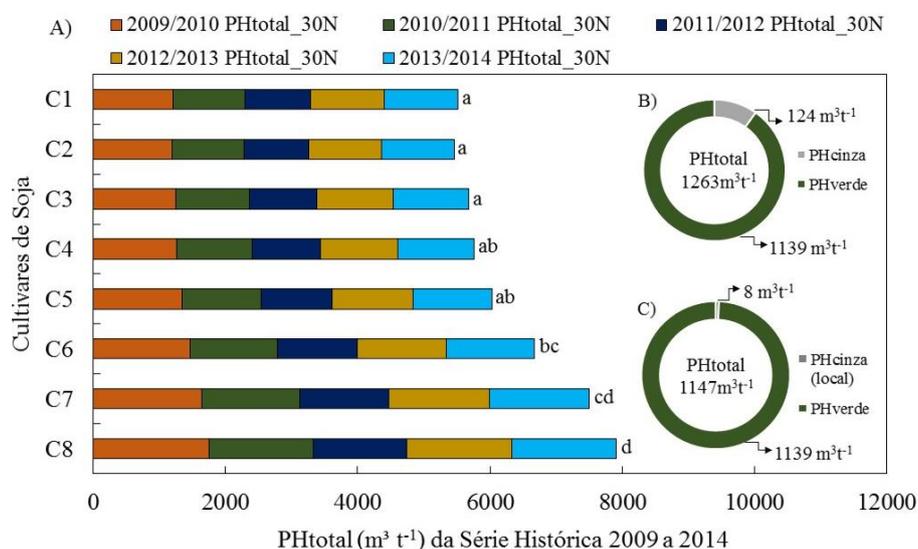


Figura 3. Pegada Hídrica total por cultivares de soja estimada no período de 2009 a 2014 considerando 30 kg ha⁻¹ de adubo nitrogenado (A). Pegada hídrica média considerando 30 kg ha⁻¹ (B). Pegada hídrica média considerando adubação local de no máximo 2 kg ha⁻¹ (C).

A cultivar C₁ obteve PH_{total} (5.520 m³ t⁻¹) inferior às demais cultivares, atingindo-se no ano/safra 2011/2012 o valor de 991 m³ t⁻¹. Ao comparar com os rendimentos encontrados por Borges et al. (2012) de 2,7 t ha⁻¹ com 107 dias de ciclo médio, as estimativas de PH_{total} indicam que essa cultivar apresenta alta eficiência no uso de águas pluviais na região.

Ao comparar a PH_{total} média obtida no polo de grãos Santarém/Belterra com os resultados da literatura, observou-se que os valores obtidos neste trabalho foram inferiores aos valores de outras áreas produtivas no globo terrestre. Comparando com polos de grãos no Brasil, como por exemplo no Paraná, no município de Maringá (Bleninger e Kotsuka, 2015) a pegada hídrica da soja foi de 2.210 m³ t⁻¹, valor cerca de 43% superior aos valores obtidos no polo Santarém/Belterra. Vale destacar, mesmo que os cultivos de soja tenham sido irrigados em Maringá, os valores elevados de PH_{cinza} (420 m³ t⁻¹), contribuíram para evidenciar que houve redução na eficiência do uso de água nos cultivos de soja. Na China, a PH_{total} da soja foi de 1.816 m³ t⁻¹ (Huang et al., 2012), diferente dos valores encontrados por Costa et al. (2016), também no Pará, mas no polo de grãos Paragominas, com valores da ordem de 1.327 m³ t⁻¹, os quais foram inferiores aos valores médios globais para a soja (2.144 m³ t⁻¹), apresentados por Mekonnen e Hoekstra (2010).

Vale ressaltar que em Santarém/Belterra os valores médios de pegada hídrica foram cerca de 30% inferiores aos resultados na China, 5% menores que as estimativas de Costa et al. (2016) para a soja em Paragominas e, 41% abaixo dos valores de pegada hídrica média global.

Assim, em relação aos valores disponíveis na literatura em outras regiões produtoras de grãos, as estimativas para o polo Santarém/Belterra apresentam a menor PH_{cinza}, devido as baixas taxas de adubação nitrogenada na região, onde 2 kg ha⁻¹ indica que esses são os valores máximos quanto ao uso de N na adubação de cobertura pelos sojicultores da região. A PH_{cinza} mais elevada contabilizou em média 8 m³ t⁻¹ para a soja, pois essa adubação é considerada desnecessária, pois considera-se o uso de inoculantes no processo de semeadura. Por outro lado,

existem sistemas de produção de soja que demandam alta tecnologia, inclusive com uso elevado de N, os quais podem atingir 300 kg ha⁻¹ (Lamond e Wesley, 2001). Também, estudos apontam que a adubação com N pode ser adotada em casos de baixa eficiência na fixação biológica da planta e reduzida fertilidade do solo (Petter et al., 2012).

4. CONCLUSÕES

- A dinâmica temporal da pegada hídrica do polo de grãos Santarém/Belterra aponta que as cultivares com alto potencial produtivo são eficientes em uso da oferta pluvial na região, reduzindo assim a pegada hídrica da soja na região;
- O baixo teor de nitrogênio utilizado na adubação da soja no oeste do Pará reduz a Pegada Hídrica Cinza em relação a outras áreas cultivadas no Brasil e no Mundo sendo um forte indicador de eficiência no uso consuntivo de água pela sojicultura na região;
- A manutenção das taxas evapotranspiratórias que refletem em rendimento de grãos nos anos/safras avaliados reforçam o potencial de uso da Pegada Hídrica Verde como indicador de eficiência hídrica pela soja produzida no oeste do Estado do Pará, na Amazônia.

5. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO irrigation and Drainage Paper, 56).
- BLENINGER, T.; KOTSUKA, L. K. Conceitos de água virtual e pegada hídrica: estudo de caso da soja e óleo de soja no Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, v. 36 p. 15-24, 2015. <http://dx.doi.org/10.5894/rh36n1-2>
- BORGES, M. S.; EL-HUSNY, J. C.; CARVALHO, E. A. Comportamento de cultivares e linhagens de soja transgênica em Belterra, Pará. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA, 16., 2012, Belém, PA. **Anais...** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2012.
- COSTA, D. C.; MARTORANO, L. G.; MARQUES, M. C.; EL-HUSNY, J. C.; NACIF, A. Pegada hídrica como indicador de sustentabilidade em polo de grãos na Amazônia. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, p. 920-929, 2016. http://dx.doi.org/10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2016_079
- ERCIN, A. E.; HOEKSTRA A. Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. **Environment International**, v. 64, p. 71-82, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **CROPWAT 8.0 Model**. Rome, 2010. Disponível em: www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html/ Acesso em: 20 set. 2017.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da Soja**. Londrina: Embrapa soja, 2007. 9p. (Comunicado técnico, 75).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Síntese de indicadores sociais**: uma análise das condições de vida da população brasileira. 2016. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 12 de março 2018.
- HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual**. London: Earthscan; 2011.

- HUANG, J.; ZHANG, H.; TONG, W.; CHEN, F. The impact of local crops consumption on the water resources in Beijing. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, n. 1, p. 45–50, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.014>
- LAMASTRA, L.; SUCIO, N. A.; NOVELLI, E.; TREVISAN, M. A new approach to assessing the water footprint of wine: An Italian case study. **Science of the Total Environment**, v. 84, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.063>
- LAMOND, R. E.; WESLEY, T. L. In Season Fertilization for High Yield Soybean Production. **Better Crops With Plant Food**, v. 85, n. 2, p. 6-7, 2001.
- MARTORANO, L. G.; NECHET, D.; PEREIRA, L. C. Tipologia climática do Estado do Pará: adaptação do método de Köppen. **Boletim de Geografia Teórica**, v. 23, p. 45-46, 1993.
- MARTORANO, L. G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; FARIA, R. T. de; MIELNICZUK, J.; COMIRAN, F. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 397-405, 2009.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 7, p. 1259–1276, 2010. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-14-1259-2010>
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, DC: Island Press, 2003. 245 p.
- PARÁ. Secretaria de Estado da Agricultura - SAGRI. **Website**. 2016. Disponível em: <http://www.sedap.pa.gov.br>. Acesso em: 10 out. 2017.
- PETTER, F. A.; PACHECO, L. P.; ALCÂNTARA NETO, F.; SANTOS, G. G. Respostas de cultivares de soja à adubação nitrogenada tardia em solos de cerrado. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 67–72, 2012.
- UNESCO (UNITED NATIONS). Educational, scientific and cultural organization: **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos**. WWAP. 2016. 12p.
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION - UNESCO. Department of Economic and Social Affairs/Population Division. **World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables**. Working Paper No. ESA/P/WP.241. Paris, 2015a. 66p.
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION - UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos**. Água para um mundo sustentável- Sumário Executivo. WWDR. Paris, 2015b. 08 p.
- VARELA-ORTEGA, C.; KOK, K.; BLANCO-GUTIÉRREZ, I.; HELFGOTT, A.; TOLEDO, M.; CLAVIJO, F. et al. **A handbook for the participatory process in ROBIN: Development of methods for local stakeholder meetings**. Grenoble: Robin Consortium, 2013. 154 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26558.69447>
- WU, B.; ZENG, W.; CHEN, H.; ZHAO, Y. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3138–3151, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.009>