

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

EFEITOS HIDRÁULICOS PELO SEQUESTRO DE CARBONO A PARTIR DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA: ABORDAGEM PEDAGÓGICA

*Greicelene J. da Silva¹; Bruno Ken Marchezepe²; Luis Miguel Castillo Rápalo²; Fabricio Alonso
Richmond Navarro²; Aline Marra Campos²; Fabrizio Silva Campos² & Eduardo Mario
Mendondo²*

Resumo

A utilização de analogias e casos teóricos são ferramentas utilizadas no ensino e aprendizagem da engenharia, com isto, o estudante amplia sua visão na ligação de vários conceitos aprendidos ao longo de sua formação. A falta de metodologias pedagógicas adequadas para fomentar habilidades nos alunos na integração dos conhecimentos, dificulta sua formação como engenheiro e sua percepção dos problemas. Desta maneira, o presente trabalho visa abordar interdisciplinarmente os processos de fixação de carbono junto com o sistema hidráulico da vegetação, buscando tornar mais interessante ao aluno o aprendizado dessas temáticas, em um contexto de mudanças climáticas. Para isto, foram feitas análises de balanço hídrico de uma bacia hidrológica, associando à assimilação de carbono para três tipos de vegetação, usando o conceito de *Big-leaf* (grande folha). O trabalho apresenta a relação dos conceitos supracitados e como estes podem ser empregados de maneira conjunta para resolver um problema de engenharia desde uma perspectiva não trivial. Conclui-se que é possível melhorar o ensino e aprendizagem da engenharia com casos em contextos reais, realizando várias suposições, com o intuito de desenvolver a sensibilidade das diferentes variáveis.

Palavras-Chave – Bomba hidráulica, Grande folha, Assimilação de carbono.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais problemáticas a nível global é a disponibilidade hídrica comprometida pelas mudanças climáticas que têm modificado componentes no ciclo hidrológico (Aerts e Botzen, 2011). Sua complexidade requer diversas perspectivas de análise, assim, novas abordagens podem melhorar a sua compreensão na sala de aula das engenharias. Neste sentido, Hendricks e Hansen (1962) apresentaram a abordagem de ensino dos mecanismos de transpiração mais ampla e amigável para os estudantes que permite explicar o fenômeno através uma abordagem interdisciplinar de engenharia hidráulica, que inclui perspectivas da meteorologia, agronomia, fisiologia, química e engenharia. Esse trabalho proporcionou uma grande contribuição para associar conceitos da hidráulica ao processo de transpiração. Tal abordagem pode ser utilizada na sala de aula, também permitindo aos estudantes apreciar uma avaliação qualitativa de alguns fundamentos e conceitos relacionados com a transpiração.

Essa metodologia de ensino torna-se ainda mais interessante dentro da temática de regulação de sequestro de carbono através do processo de transpiração vegetal dentro de cenários de mudanças

¹) Universidade Federal de Viçosa – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Av. PH Rolfs, sn – Centro. CEP 36570000. Viçosa- MG, Brasil. greicelene.silva@ufv.br.

²) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trabalhador São Carlense, 400 – Centro. CEP 13566-590 - Caixa Postal 359. São Carlos- SP, Brasil. bruno.marchezepe @usp.br.

climáticas e a procura por atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) das Nações Unidas (UN) e os protocolos do COP21 para redução dos riscos e adaptação das mudanças climáticas. O sequestro de carbono é matéria de vários estudos e programas de pagamentos por serviços ambientais (PSA), segundo Taffarello et al. (2019), assim representando grande relevância ambiental, social e econômica. O estudo de crédito de carbono da bacia pode ser interessante neste contexto, pois envolve uma remuneração por tonelada de CO₂ assimilada pela vegetação presente na bacia.

O presente trabalho utiliza a abordagem de Hendricks e Hansen (1962) associando interdisciplinarmente os processos de fixação de carbono junto com o sistema hidráulico da vegetação e o conceito de *Big-leaf* (folha grande), com o objetivo de tornar mais interessante ao aluno o aprendizado dessas temáticas, em um contexto de mudanças climáticas. O caso de estudo mostrado faz parte de uma atividade curricular intitulada *Virtual Water Problem*, da disciplina *Water Resource: Quantitative Aspect* - SHS 5890, do programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo (PPG- SHS USP).

2. METODOLOGIA

A análise da problemática inicia-se pela realização de um balanço hídrico de uma bacia virtual de área de 20 km² e armazenamento inicial de 2.000.000 m³ para o cálculo da vazão de evapotranspiração. Depois, é calculada a quantidade de carbono sequestrado pela planta de acordo com a quantidade de radiação solar armazenada pela planta. Por último, seguindo a analogia a uma bomba hidráulica, realizou-se o cálculo da linha de energia no processo de evapotranspiração. Para avaliar a variação em um contexto de mudanças climáticas, para cada cenário calculou-se as vazões transpiradas, as linhas piezométricas e a assimilação de carbono para as temperaturas médias dos anos de 2000 (ano base), 1950 (-1°C em relação a 2000) e 2050 (+1,5°C e +2,5°C). A fim de uma comparação da assimilação de carbono e do potencial hidráulico entre tipos de vegetação, foram usados três tipos diferentes: cana-de-açúcar, eucalipto, e uma planta-tipo, com valores médios de espécies encontradas naturalmente na floresta amazônica.

2.1. Balanço Hídrico na Bacia Hipotética

A demonstração do método se baseia no balanço hídrico da bacia virtual. Esta apresenta diferentes temperaturas médias mensais ao longo do ano, que foram utilizadas no cálculo do balanço hídrico. Os diferentes cenários do balanço consideram como variáveis a quantidade de água que entra na bacia via precipitação (P) e a água que sai da mesma via evapotranspiração (ET). A evapotranspiração potencial (ETP) foi calculada pelo método de Thornthwaite (1948), e foi assumida igual à evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998, FAO, 1998), da Equação 1 ($ETP_{\text{Thornthwaite}} \approx ETP_{\text{Penman-Monteith}}$).

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

Onde, ET_c = evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹); K_c = coeficiente de evapotranspiração. Δ = declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C⁻¹); R_n = saldo diário de irradiação (W m⁻²); G = fluxo de calor no solo (W m⁻²); γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T = temperatura média do ar (°C); e_s = pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do ar (mbar); e_a = pressão parcial de vapor d'água à temperatura do ar (mbar); u_2 = velocidade do vento a 2 m (m s⁻¹).

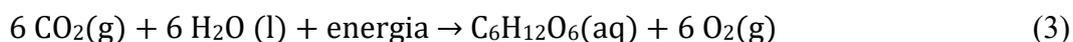
Para comparar a vazão transpirada dos tipos de vegetação estudados, adotados o K_c das plantas no mesmo estágio de desenvolvimento, corresponde a fase inicial. Encontrados na Tabela 1S

(material suplementar, seção 5). Isolando R_n da Equação 1, tem-se o fluxo transpirado por cada tipo de vegetação a partir da Equação 2, que se transforma em vazão. Essa vazão Q considera a hipótese de *Big-leaf* (grande folha, em português), que assume uma cobertura total e homogênea de vegetação, que se relaciona com H_v (calor latente de evaporação, igual a 585 calorias por grama de água) e γ_w (peso específico da água).

$$Q = \frac{R_n}{H_v \cdot \gamma_w} \quad (2)$$

2.2. Fotossíntese e Assimilação de Carbono

O sequestro de carbono e a disponibilidade hídrica para bombeamento pela planta estão intimamente ligadas às condições climáticas. A radiação líquida R_n , calculada a partir da Equação 1, pode ser assumida como a Radiação Fotossinteticamente Ativa (P.A.R.), que corresponde à parcela da radiação solar que as plantas absorvem para realizar a fotossíntese, e é próxima à luz visível aos olhos humanos. Essa energia é utilizada para a realização da fotossíntese (Equação 3).



Evidencia-se assim que a assimilação de carbono pela planta se dá pela geração de moléculas de glicose com o consumo da energia em forma de radiação solar. O cálculo de transformação da energia em quantidade de carbono assimilado é realizado através da Equação 4, com o cálculo do número de fótons (NF) utilizados no processo. Na equação, λ é o comprimento de onda da radiação absorvida pela planta, h é a constante de Planck, igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$, e c é a velocidade da luz no vácuo, igual a $3,0 \cdot 10^8$ m/s.

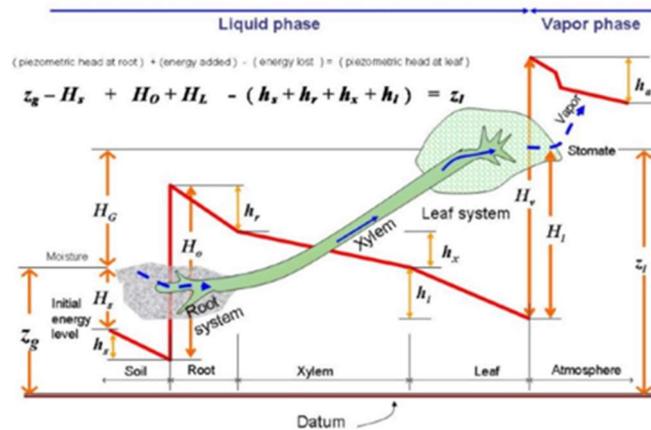
$$\text{NF} = \frac{R_n \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (4)$$

Com uma relação de $6,02 \times 10^{17}$ fótons = $1 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ = $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, calcula-se a quantidade em mols de CO_2 utilizados no processo por unidade de tempo, sabendo que a massa molar do CO_2 é 44 g. A análise também contou com a comparação entre os diferentes tipos vegetais e cálculo da eficiência de uso de água, descrito em Hatfield (2019).

2.3. Linha Piezométrica

Ao “bombear” água do solo para a atmosfera via transpiração, pode-se fazer uma analogia com uma bomba d’água, que impõe energia ao sistema e possibilita a elevação da água. A Figura 1 ilustra essa analogia da bomba d’água em uma planta. A linha de energia revela o fluxo de água desde o solo, passando pela raiz, xilema (tronco), folhas, e finalmente adquirindo energia suficiente para sua evapotranspiração. Devido à reduzida velocidade do fluxo, pode-se considerar que a linha piezométrica é equivalente à linha de energia do fluxo.

Figura 1 - Esquema de linha de energia do fluxo de água que percorre uma planta.



Fonte: Taffarello et al. (2019).

A energia potencial líquida total, H_f , que é a energia disponível para o bombeamento da água desde a raiz até a superfície das folhas, é dada como a soma das energias positivas e negativas inseridas no sistema, como mostra a Equação 5.

$$H_f \text{ (m)} = H_o + H_L - (H_s + H_G) \quad (5)$$

Em que H_o é a energia proveniente do gradiente osmótico entre a concentração de componentes do xilema e da solução do solo, dada pela Equação 6. Na equação, n é a diferença concentração molar da solução, R é a constante dos gases, e T é a temperatura absoluta. Para simplificar, consideramos que a concentração de solutos na solução do solo equivale a 0 (água limpa), além de uma concentração de $0,15 \text{ mol L}^{-1}$ de constituintes do xilema, com base nos resultados expressos em Schurr, Gollan e Schulze (1992).

$$H_o = n \cdot R \cdot T \quad (6)$$

A energia capilar potencial do solo H_L é relacionada à tensão superficial da água, obtida pela Equação 7. σ é a tensão superficial da água, adotado $0,0728 \text{ N/m}$ a 20°C , β é o ângulo do tubo de passagem de fluxo com a água (igual a 0), d é o diâmetro efetivo entre as fibras de celulose para as espécies estudadas, a magnitude desse valor foi obtida com base no trabalho de CôTé (1981).

$$H_L = \frac{4 \cdot \sigma}{\gamma_w \cdot d} \cdot \cos \beta \quad (7)$$

As energias contrárias ao bombeamento correspondem a H_s e H_G . H_s corresponde ao potencial matricial da água no solo e H_G a diferença de energia gravitacional entre a copa da vegetação e a superfície do solo. H_s foi obtido a partir da relação entre a umidade e o potencial matricial do solo (curva de retenção), considerando um solo franco-argilo-arenoso. Para isso, utilizou-se a relação de Campbell (Equação 8 e 9).

$$S = \frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^b, \psi > \psi_b \quad (8)$$

$$S = 1, \psi \leq \psi_b \quad (9)$$

Em que θ é a umidade do solo (mm), θ_s é a umidade máxima (mm), ψ_b é a pressão de borbulhamento (m) e b é um coeficiente de ajuste. ψ_b e b corresponderam a $34,598$ e $4,685$ de acordo com o adotado por Brandão et al. (2006) para um solo franco-argilo-arenoso.

As perdas de carga podem ser divididas entre as perdas de carga h_s , h_r , h_x , e h_l , referentes às energias dissipadas no solo, raiz, xilema e folhas, respectivamente. A soma de todas essas componentes é igual a h_f . As perdas de cargas das plantas estudadas foram calculadas a partir das condutâncias dos compartimentos raiz, xilema e folhas. Na Tabela 1S (material suplementar, seção 5) encontram-se as espécies consideradas no cálculo da condutância da raiz, xilema e folhas para a espécie-tipo nativa, nesse caso tomou-se a média dos valores de condutância dos compartimentos de cada espécie considerada. Na Tabela 1, encontram-se os valores de K_c e condutância adotados.

Tabela 1 - Valores de K_c e condutância adotados para a espécie-tipo, a cana-de-açúcar e o eucalipto.

	K_c (adimensional)	Valores de condutância adotados ($m^3 MPa^{-1} s^{-1}$)		
		Raiz	Xilema	Folha
Espécie-tipo	0,69	2,70 E-03	2,60 E-04	4,40 E-07
Cana-de-açúcar	0,71 ¹	5,50 E-08 ³	3,30 E-08 ⁵	8,00 E-08 ⁷
Eucalipto	0,70 ²	3,30 E-06 ⁴	6,50 E-03 ⁶	2,07 E-05 ⁶

Magnitude dos valores obtida com base em: 1- da Silva et al. (2012); 2- Alves et al. (2020); 3- Saliendra e Meinzer (1992); 4- Mokotedi (2013); 5- Ranjith e Meinzer 1997; 6- Zhu et al. (2015); 7- Neufeld et al. (1992).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cálculos de balanço hídrico, assimilação de carbono, e dos elementos da linha piezométrica foram realizados para a bacia genérica em escala mensal durante um ano. Apesar dos dados serem arbitrários, podem ser úteis dentro de uma análise comparativa entre meses diferentes, além de oferecer uma base para futuros projetos.

3.1. Balanço Hídrico de Bacia

Os dados calculados encontram-se na seção 5 do material suplementar. Como a análise independe do tipo de planta, é possível escrever os resultados entre os 4 cenários de mudanças de temperatura. No geral, o aumento da temperatura reduz a pressão de vapor de saturação, que por sua vez afeta a umidade relativa, o que provoca redução do montante precipitado. Além disso, com a elevação da temperatura, também ocorre o aumento das taxas de evapotranspiração potencial. Esse fator altera significativamente a evapotranspiração real, ETR, resultante.

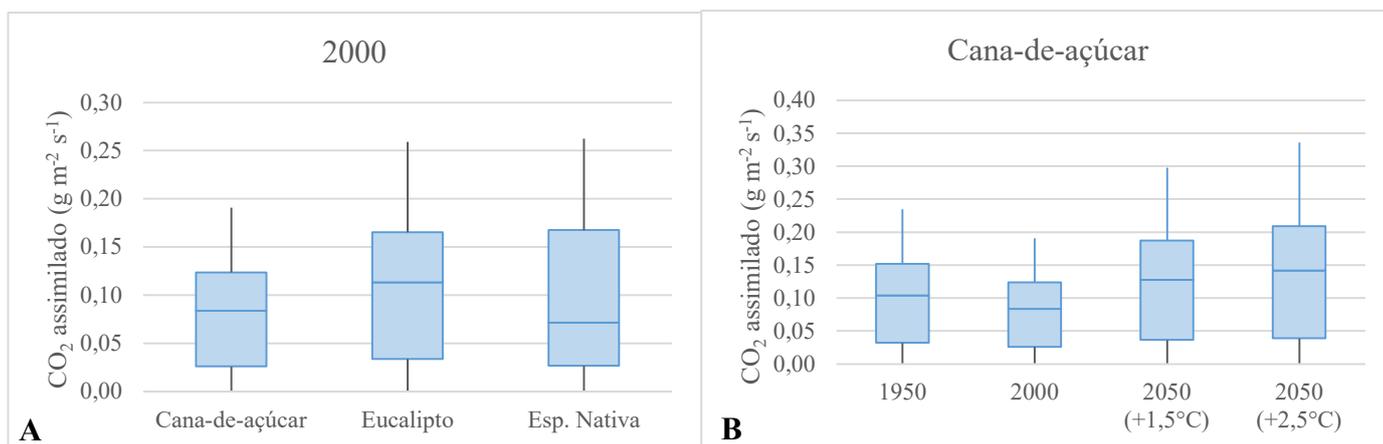
Como já definido, a partir da ETR calculada a partir do método de Thornthwaite, foi possível o cálculo da radiação líquida R_n e a vazão de transpiração Q com o método de Penman-Monteith. As tabelas com os resultados para os diferentes cenários, para cada uma das espécies de planta analisadas, encontram-se na seção 5 no material suplementar.

As magnitudes da R_n e da Q mantêm sua relação com as variações da temperatura ao longo do ano. Para os meses mais quentes, a fotossíntese atinge as maiores taxas de vazão evaporada por causa da maior radiação líquida que atinge o sistema. Além disso, todas as espécies tendem a aumentar as magnitudes desses processos com o aumento da temperatura nos cenários avaliados, sendo maior para a planta nativa amazônica, seguido do eucalipto e finalmente a cana-de-açúcar.

3.2. Fotossíntese e Assimilação de Carbono

A consideração da R_n igual à P.A.R., possibilita o cálculo de fótons absorvidos pela planta, e por consequência, o CO_2 assimilado pela mesma durante a fotossíntese. Os boxplots da Figura 2 ilustram os resultados do cálculo dos diferentes cenários de mudanças na temperatura média mensal, para 3 tipos de plantas diferentes em 12 valores mensais.

Figura 2 - Boxplots para comparação da assimilação de acordo com o tipo de planta (A), e com a temperatura média mensal ao longo dos anos (B).



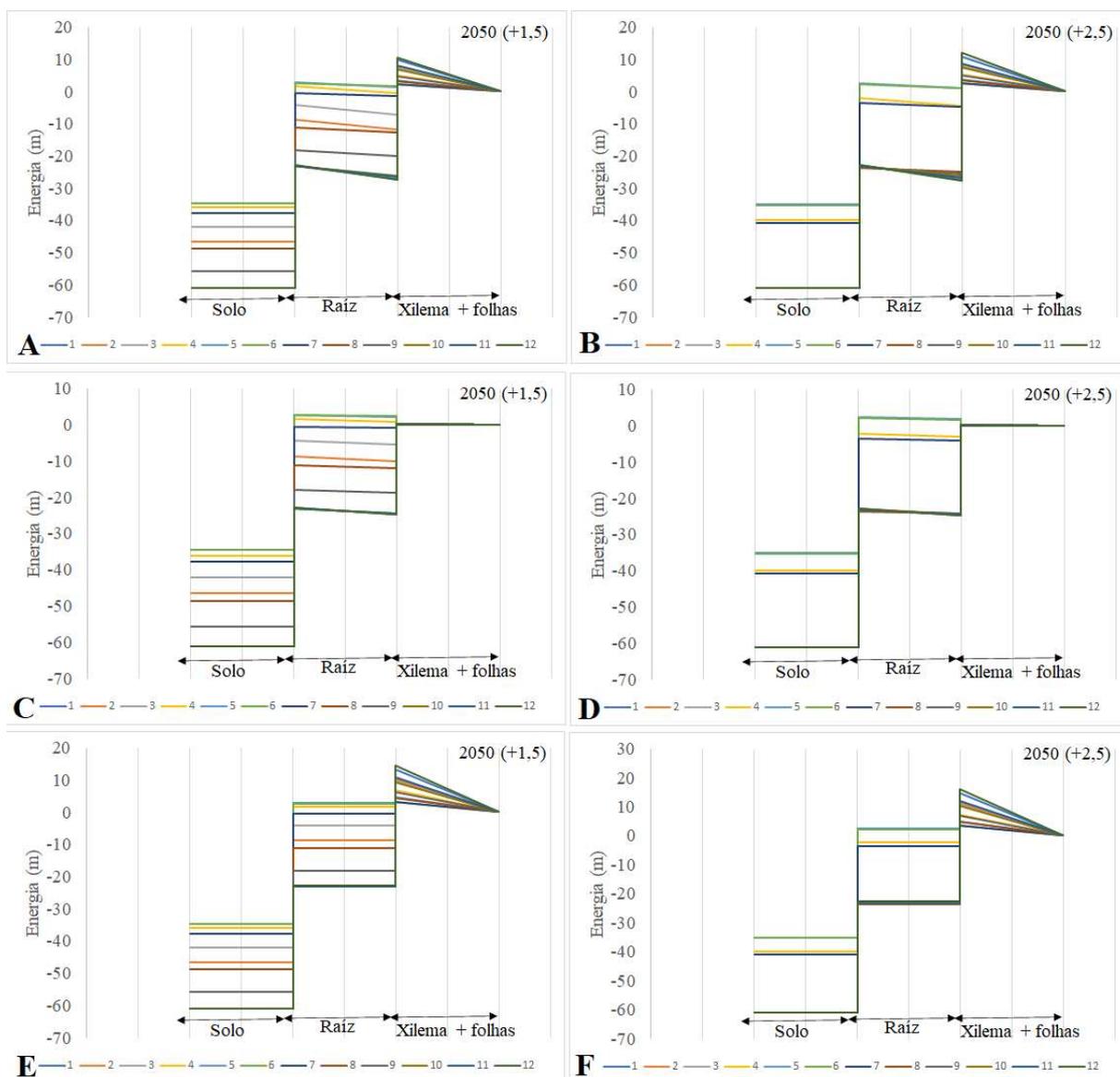
O comportamento da assimilação de gás carbônico da atmosfera segue a mesma feição entre os cenários e para os diferentes tipos de planta. Os cenários ao longo dos anos, que diferem entre si pelas temperaturas médias mensais, demonstram que quanto maior a temperatura, maior a assimilação por parte das plantas, e maior a variação intra-anual. É importante ressaltar que essa assimilação de carbono é estimada, visto que o cálculo depende das características climáticas, da cobertura vegetal, entre outros fatores.

Quanto aos resultados próximos de assimilação para cada tipo de planta (Figura 2A), os mesmos não apresentaram diferenças significativas. Isso decorre dos valores de K_c adotados que são próximos para as fases iniciais de crescimento das espécies adotadas. Os valores de eficiência de uso da água em termo de assimilação de carbono foram próximos para as vegetações em estudo, em torno de 32%, ou seja, de toda a água que a planta recebe, 32% de fato se converte em assimilação de CO_2 . Porém, deve considerar-se que os tipos escolhidos possuem ciclos de vida diferentes, visto que a capacidade de assimilação de carbono depende de fatores como tempo de maturação e ciclo de cultivo.

3.3. Linha Piezométrica

As linhas piezométricas da cana-de-açúcar, eucalipto e espécie-tipo nativa para 2050 com aumento de 1,5°C e 2,5°C estão apresentadas na Figura 3. Para cada tipo de vegetação, foi calculada a vazão total evapotranspirada de toda a bacia de 20 km². Para a cana-de-açúcar considerou-se uma densidade de 50 plantas por metro quadrado. Para o eucalipto e para a espécie-tipo nativa, considerou-se 2 plantas por metro quadrado. Dessa forma, a vazão transpirada total foi dividida entre o número total de indivíduos na bacia, encontrando assim a vazão transpirada por indivíduo. As linhas foram feitas com base no comportamento hidráulico de uma única unidade de planta. Considerou-se que cada unidade de cana-de-açúcar, eucalipto e espécie-tipo nativa possuíram 2 m, 60 m e 60 m de altura, respectivamente.

Figura 3 - Linhas de energia mensais da cana-de-açúcar (A e B), eucalipto (C e D) e espécie-tipo nativa (E e F) para 2050 com aumento de 1,5°C e 2,5°C.



O referencial de energia, onde a mesma se iguala a 0 na Figura 3, se inicia na superfície do solo. Para facilitar o entendimento pelo aluno das forças atuantes no processo de bombeamento de água, o escoamento pode ser dividido em etapas. As etapas iniciais acontecem no solo, sendo a primeira etapa correspondente à representação das forças que impedem a passagem de água do solo para a raiz devido ao potencial matricial do solo. A linha piezométrica inicia-se com valores negativos de energia a partir do referencial da superfície do solo. O valor negativo representa a primeira resistência que o bombeamento encontra, que constitui na força matricial da água do solo (H_G), considerada igual para todas as situações da Figura 3, da ordem de -40 a -60 m. Entretanto, a planta consegue vencer essa força devido aos outros potenciais positivos, dando início ao escoamento.

Como parte do fluxo, ocorre a perda de carga do solo até as raízes da planta. A perda de carga produz uma inclinação negativa no trajeto do solo a raiz, reduzindo a energia disponível para o escoamento. Entretanto, devido ao valor ínfimo de em média 7 E-8 m, 2 E-6 m e 2 E-6 m por indivíduo para cana-de-açúcar, eucalipto e espécie-tipo nativa, respectivamente, essa inclinação é imperceptível. Na raiz, a linha piezométrica ascende devido ao ganho de energia decorrente da diferença de concentração entre a solução contida nas raízes e o solo (H_0). Entretanto, depois dessa

subida há uma queda de energia devido a perda de carga relacionada ao fluxo na raiz. Quanto maior a perda de carga na raiz, maior a inclinação negativa desse segmento, por isso, pela análise da Figura 3A e 3B, nota-se que a perda de carga na raiz da cana-de-açúcar é maior (média de 2,6 m) que no eucalipto (Figuras 3C e 3D- média de 1,1 m) e na espécie-tipo nativa (Figuras 3E e 3F- média de 0,01 m). Percebe-se que a declividade da linha piezométrica é quase imperceptível para a espécie-nativa.

Posteriormente, no compartimento do xilema e folhas, a linha piezométrica sofre nova ascensão devido ao balanço entre ganho de energia decorrente das forças de capilaridade (H_L) e a perda de energia decorrente do potencial gravitacional (H_G). Esse balanço apresenta um valor positivo para a cana-de-açúcar e a espécie-tipo nativa, porém negativo para o eucalipto. Por isso, para o eucalipto há um decrescimento da linha de energia no início desse compartimento. A inclinação dessa etapa representa a perda de carga no xilema e folhas das plantas. Nota-se que, diferentemente de cana-de-açúcar e espécie nativa, a perda de carga nestes compartimentos para eucalipto é tão ínfima que a inclinação da linha piezométrica é próxima de zero. Por fim, o potencial energético termina com um saldo positivo igual a lâmina transpirada para o intervalo de tempo analisado.

A partir da análise da diferença de comportamento das linhas piezométricas em 2050 com aumento de 1,5°C (Figura 3A, 3C e 3E) em relação a um aumento de 2,5°C (Figura 3B, 3D e 3F), o estudante é convidado a notar visualmente como o aumento da temperatura pode produzir uma maior variação do potencial energético para bombeamento ao longo dos meses do ano. Essa variação decorre da alteração da água no solo que se torna mais intensa em 2050 (+2,5 °C) que em 2050 (+1,5°C), percebida visualmente pela maior concentração em um mesmo local das linhas piezométricas. Dessa forma, em 2050 (+2,5 °C), durante os meses chuvosos (de outubro a março), apesar da maior precipitação, as taxas de evapotranspiração aumentam devido ao aumento da temperatura o que causa uma redução crítica do total armazenado no solo, provocando assim maior potencial matricial (H_s), que se reduz acentuadamente durante os outros meses do ano.

4. CONCLUSÕES

O aproveitamento da interdisciplinaridade na sala de aula traz novas oportunidades para o processo de aprendizado dos alunos nas engenharias, abrangendo e integrando novos conceitos para a resolução de problemáticas através de novas perspectivas. A demanda de competências não triviais ao estudante torna-se uma ferramenta útil ante a complexidade das mudanças climáticas, por tanto, a abordagem do sequestro de carbono e associação de uma planta como uma bomba d'água oferece vantagens, pois leva à busca de informações sobre os mais diversos assuntos, tais como o mecanismo da fotossíntese, a radiação, fisiologia vegetal, entre outros. Cabe lembrar que o despertar interesse e curiosidade dos alunos das engenharias com suposições baseadas em contextos reais é um caminho para melhorar o ensino e aprendizado das engenharias.

A criação de novas narrativas usando o mesmo *Virtual Water Problem* pode levar aos futuros alunos de pós-graduação a desenvolver habilidades necessárias para que suas pesquisas auxiliem indiretamente no alcance dos ODS da UN e dos protocolos da COP21 para redução dos riscos e adaptação das mudanças climáticas. Por isso, recomenda-se para futuras linhas de pesquisa replicar o presente caso, usando outras espécies, com ciclo de vida similares, para reconhecer vegetações mais eficientes na fixação de carbono. Para os tipos de vegetação escolhida, não foi considerado o regime de chuvas presentes nem futuros, nem diversos tipo de solo. Dessa maneira, poderia ser recriado a mesma narrativa para diversos tipos de solos ou para diversos tipos de regime de chuva, considerando a variadas situações que acontecem no Brasil e a desproporcionalidade na distribuição do recurso hídrico. Todas estas variáveis podem ser consideradas na hora de estruturar programas de pagamentos por serviços ambientais, remunerando a tonelada de CO₂ assimilada pela vegetação presente na bacia e a eficiência desta no uso da água.

5. MATERIAL SUPLEMENTAR

Foi criado um repositório com informações adicionais sobre este estudo, bem como, detalhes no processo metodológico, tabelas e figuras para complementar as informações. Além disso, foram acrescentadas discussões quando necessário. A informação está disponível em: <http://dx.doi.org/10.17632/6bmzv5wjk3.3>.

6. DECLARAÇÃO DOS AUTORES

BKM, GJS e LMCR: conceitualização, pesquisa, metodologia, cálculos, edição, escrita e análise. AMC, FARN e FSC: pesquisa, edição, escrita, análise e supervisão. EMM: conceitualização, supervisão.

7. CONFLITO DE INTERESSES

Declaramos não haver conflito de interesses associado a este manuscrito.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento - PPGSHS - (USP-EESC) - pelo apoio científico. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de doutorado e mestrado, respectivamente.

9. REFERÊNCIAS

- AERTS, J. C. J. H., & BOTZEN, W. J. W. (2011). "Climate Change Impacts on pricing Long-Term Flood Insurance: A Comprehensive Study for the Netherlands". *Global Environmental Change*, 21(3), 1045-1060. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.005>
- ALVES, M.E.B., MANTOVANI, E.C., NEVES, J.C.L., SEDIYAMA, G.C., LOURENÇO, H.M., (2020). "Simulação da produtividade do eucalipto sob diferentes condições de disponibilidade hídrica na região Centro-Leste de Minas Gerais". *Agrometeoros* 26, 327–336. <https://doi.org/10.31062/agrom.v26i2.26416>
- ALLEN R.G.; PEREIRA L.S.; RAES D. et al. (1998) "Crop Evaporation". Rome: FAO. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56) 297p
- BRANDÃO, V. S., CECÍLIO, R. A., PRUSKI, F. F, SILVA, D. D. (2006). *Infiltração da água no solo*. Editora UFV, Viçosa-MG.
- CÔTÉ, W. A (1981). *Ultrastructure—Critical domain for wood behavior*. *Wood science and Technology* 15(1), 1-29.
- COHEN-TANNOUJJI, CLAUDE; DIU, B.; LALOË, F. (1977) [1973]. "Quantum Mechanics". 1. Traduzido por Hemley, S.R.; Ostrowsky, N.; Ostrowsky, D. 2ª ed. Nova York: Wiley.
- DA SILVA, T.G.F., DE MOURA, M.S.B., ZOLNIER, S., SOARES, J.M., VIEIRA, V.J. D. S., G. F. JÚNIOR, W., (2012). "Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro". *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.* 16, 64–71. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100009>
- DAS, B.M. *Principles of Geotechnical Engineering*. Thomson Press, 6th Edition, New York-NY.
- HATFIELD Jerry L., D. C. (2019) "Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate". *Journal Frontiers in Plant Science*. Vol. 10. DOI 10.3389/fpls.2019.00103
- HENDRICKS, D.W.; HANSEN, V.E. (1962). "Mechanics of Evapo-Transpiration". *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. Vol. 88, Issue 2 (June 1962)

- MOKOTEDI, M.E.O., (2013). “*Water relations of Eucalyptus nitens × Eucalyptus grandis: Is there interclonal variation in response to experimentally imposed water stress?*” South. For. 75, 213–220. <https://doi.org/10.2989/20702620.2013.858212>
- NEUFELD, H.S., GRANTZ, D.A., MEINZER, F.C., GOLDSTEIN, G., CRISOSTO, G.M., CRISOSTO, C., (1992).” *Genotypic Variability in Vulnerability of Leaf Xylem to Cavitation in Water-Stressed and Well-Irrigated Sugarcane*”. Plant Physiol. 100, 1020–1028.
- RANJITH, S.A., MEINZER, F.C., (1997). “*Physiological correlates of variation in nitrogen-use efficiency in two contrasting sugarcane cultivars*”. Crop Sci. 37, 818–825. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700030021x>
- SALIENDRA, N.Z., MEINZER, F.C., (1992). “*Genotypic, developmental and drought-induced differences in root hydraulic conductance of contrasting sugarcane cultivars*”. J. Exp. Bot. 43, 1209–1217. <https://doi.org/10.1093/jxb/43.9.1209>
- SATOLO, V. P. X. et al. (2019). “Um panorama histórico-conceitual da pesquisa interdisciplinar: uma análise a partir da pós-graduação da área interdisciplinar”. Educ. rev., Belo Horizonte , v. 35, e185294.
- SCHURR, U., GOLLAN, T., SCHULZE, E. D, (1992). “*Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of Helianthus annuus. II. Stomatal sensitivity to abscisic acid imported from the xylem sap*”. Plant. Cell Environ. 15, 561–567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01489.x>
- TAFFARELLO D.; ARIAS D.A.G.; BRESSIANI D.A. et al. (2019) “Linkage between water and forests in South American watersheds under restoration”. InTechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.82526
- THORNTHWAITE, C.W. (1948) “Na approach toward a rational classification of climate”. Geographical Review. v.38. p 55-94.
- ZOLFAGHAR, S., VILLALOBOS-VEGA, R., ZEPPEL, M., EAMUS, D., (2015). “*The hydraulic architecture of Eucalyptus trees growing across a gradient of depth-to-groundwater*”. Funct. Plant Biol. 42, 888–898. <https://doi.org/10.1071/FP14324>
- ZHU, L.W., ZHAO, P., WANG, Q., NI, G.Y., NIU, J.F., ZHAO, X.H., ZHANG, Z.Z., ZHAO, P.Q., GAO, J.G., HUANG, Y.Q., GU, D.X., ZHANG, Z.F., (2015). “*Stomatal and hydraulic conductance and water use in a eucalypt plantation in Guangxi, southern China*”. Agric. For. Meteorol. 202, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.003>