

## OTIMIZAÇÃO DO CRESCIMENTO INICIAL DE MUDAS DE JATOBÁ COM USO ASSOCIADO DE HIDROGEL E OSMOCOTE<sup>1</sup>

### OPTIMIZATION OF THE INITIAL GROWTH OF JATOBÁ SEEDLINGS WITH THE COMBINED USE OF HYDROGEL AND OSMOCOTE<sup>1</sup>

Iselino Nogueira Jardim<sup>2,4</sup>, Débora Camile Fonseca da Rosa<sup>3</sup>

**RESUMO** - O uso de insumos que otimizam a disponibilidade de água e nutrientes no substrato pode favorecer o crescimento inicial de espécies florestais nativas em viveiro. O presente estudo avaliou o crescimento inicial e a nutrição de mudas de *Hymenaea courbaril* L., sob dois níveis de hidrogel e dois níveis de osmocote®, aplicados de forma associada. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial  $2 \times 2 + 1$ , com dois níveis de hidrogel (3 g e 4 g por planta), dois níveis de osmocote® (4 g e 6 g por planta) e uma testemunha (sem aplicação de insumos). Foram avaliadas variáveis morfológicas e nutricionais, como altura, diâmetro do coleto, massa seca, índice de qualidade de Dickson, teores de nutrientes no substrato e acúmulo nos tecidos. O tratamento T2 (3 gramas de hidrogel + 6 gramas de fertilizante) proporcionou os melhores resultados morfológicos. Contudo, o tratamento T1 (3 gramas de hidrogel + 4 gramas de fertilizante) apresentou desempenho semelhante, utilizando menor quantidade de insumos, o que evidencia sua superioridade em termos de eficiência econômica. Por outro lado, o tratamento T4 (4 gramas de hidrogel + 6 gramas de fertilizante), apesar de apresentar maior absorção de nutrientes, não resultou em crescimento significativamente superior. Os resultados indicam que a eficiência no uso dos nutrientes é mais determinante para o desempenho das mudas do que a absorção absoluta. A aplicação conjunta de hidrogel e osmocote® mostrou-se uma estratégia eficaz e promissora para a produção de mudas de *H. courbaril* em ambientes com limitações hídricas e nutricionais, sendo o tratamento T1 (3 gramas de hidrogel + 4 gramas de fertilizante) recomendado como a alternativa mais equilibrada entre desempenho e custo-benefício.

Palavras-chave: *Hymenaea courbaril*, nutrição de planta, fertilizante de liberação controlada.

**ABSTRACT** - The use of inputs that optimize water and nutrient availability in the substrate can favor the initial growth of native forest species in nurseries. This study evaluated the initial growth and nutrition of *Hymenaea courbaril* L. seedlings under two levels of hydrogel and two levels of osmocote®, applied in combination. The experiment was conducted in a completely randomized design, in a  $2 \times 2 + 1$  factorial scheme, with two hydrogel levels (3 g and 4 g per plant), two osmocote® levels (4 g and 6 g per plant), and a control (no inputs applied). Morphological and nutritional variables were assessed, including plant height, collar diameter, dry mass, Dickson Quality Index, nutrient levels in the substrate, and nutrient accumulation in plant tissues. The treatment T2 (3 grams of hydrogel + 6 grams of fertilizer) provided the best morphological results. However, treatment T1 (3 grams of hydrogel + 4 grams of fertilizer) showed similar performance while using a lower amount of inputs, highlighting its superiority in terms of economic efficiency. On the other hand, treatment T4 (4 grams of hydrogel + 6 grams of fertilizer), despite resulting in greater nutrient absorption, did not lead to significantly higher growth. The results indicate that nutrient use efficiency is more decisive for seedling performance than absolute nutrient uptake. The combined application of hydrogel and osmocote® proved to be an effective and promising strategy for *H. courbaril* seedling production in environments with water and nutrient limitations, with treatment T1 (3 grams of hydrogel + 4 grams of fertilizer) being recommended as the most balanced option in terms of performance and cost-benefit.

Keywords: *Hymenaea courbaril*, plant nutrition, controlled-release fertilizer.

<sup>1</sup> Recebido em 12.11.2025. Aceito para publicação em 03.03.2026. Publicado em 08.03.2026.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Pará, Rua Coronel José Porfírio, s/n, 68372-040, Altamira – PA, Brasil, <https://orcid.org/0000-0001-5159-1654>.

<sup>3</sup> Universidade Federal do Pará, Rua Coronel José Porfírio, s/n, 68372-040, Altamira – PA, Brasil, <https://orcid.org/0009-0006-7330-1316>.

<sup>4</sup> Autor para correspondência: Iselino Nogueira Jardim – [jardim@ufpa.br](mailto:jardim@ufpa.br)

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de mudas florestais em quantidade e qualidade constitui etapa fundamental para o êxito de empreendimentos que envolvem espécies nativas. Nesse contexto, a crescente demanda por sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de otimizar o uso de insumos e favorecer o crescimento inicial das mudas. Entre essas tecnologias, destacam-se os polímeros superabsorventes (hidrogéis) e os fertilizantes de liberação controlada (FLC), que têm demonstrado grande potencial para melhorar o crescimento de mudas florestais. O uso combinado desses insumos pode reduzir custos operacionais, minimizar perdas por lixiviação e aumentar a resiliência das plantas após o transplante (Navroski et al. 2016, Cunha et al. 2021, Patra et al. 2022).

Os hidrogéis agrícolas atuam como reservatórios temporários de água, mantendo a umidade no substrato por mais tempo e contribuindo para a estabilidade hídrica nas raízes, especialmente em períodos de baixa frequência de irrigação (Patra et al. 2022). Estudos recentes têm demonstrado que o uso de polímeros hidroabsorventes favorece o crescimento e a sobrevivência de mudas ao aumentar a retenção de água no solo e prolongar a disponibilidade hídrica, mesmo sob condições de déficit (Navroski et al. 2016, Felipe et al. 2021). Esses efeitos tornam o hidrogel uma ferramenta promissora para a produção de mudas de espécies florestais em viveiros, com maior quantidade e qualidade.

Já os fertilizantes de liberação controlada disponibilizam nutrientes de forma gradual, em consonância com as exigências da planta ao longo do tempo, promovendo maior eficiência de absorção e menor impacto ambiental (Cunha et al. 2021). Estudos recentes têm demonstrado que esses insumos favorecem o crescimento inicial e a formação de mudas mais vigorosas, bem nutridas e adaptadas a condições adversas, sendo especialmente relevantes para espécies florestais nativas (Amorim et al. 2020, Cunha et al. 2023).

Neste cenário, a integração de insumos como polímeros superabsorventes e fertilizantes de liberação controlada transcende a simples nutrição de plantas, configurando-se como uma solução de engenharia para a otimização de sistemas de produção em viveiros. A engenharia de substratos e o manejo preciso de água e nutrientes são cruciais para desenhar sistemas produtivos que não apenas aumentem a qualidade das mudas, mas também minimizem o consumo de recursos e o

impacto ambiental, como as perdas por lixiviação. Estudos recentes demonstram que a associação entre hidrogel e FLC pode melhorar a eficiência no uso da água e dos nutrientes, reduzir a necessidade de adubação convencional e promover ganhos consistentes em crescimento e qualidade de mudas florestais (Navroski et al. 2016, Tomášková et al. 2023). Esta pesquisa aborda, portanto, o desenvolvimento de um sistema de cultivo otimizado para *H. courbaril*, aplicando princípios de engenharia no manejo de insumos para promover a sustentabilidade e a eficiência econômica na silvicultura tropical.

Apesar dos avanços no uso de tecnologias para otimizar a produção de mudas, ainda há carência de estudos que avaliem, de forma integrada, os efeitos da associação entre polímeros superabsorventes e fertilizantes de liberação controlada em espécies florestais nativas de importância ecológica e econômica. Em particular, o *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) apresenta amplo potencial de uso em programas de restauração ecológica e sistemas agroflorestais, mas as informações sobre sua resposta a práticas inovadoras de manejo de substrato ainda são limitadas. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o crescimento inicial e a nutrição de mudas de *H. courbaril*, sob dois níveis de hidrogel e dois níveis de osmocote®, aplicados de forma associada.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Coleta e armazenamento dos frutos

Os frutos de *H. courbaril* foram coletados de árvores matrizes em áreas de floresta nativa no município de Altamira, Pará. O clima da região é classificado como equatorial (Am e Aw), segundo Köppen, com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de aproximadamente 1.700 mm (Alvares et al. 2013), condições favoráveis ao desenvolvimento de espécies florestais tropicais. No Laboratório de Plantas Medicinas da Universidade Federal do Pará, as sementes foram extraídas manualmente, acondicionadas em sacos plásticos identificados e armazenadas em câmara fria a 8 °C até o início do experimento.

### 2.2 Obtenção das plântulas

As sementes foram escarificadas mecanicamente com esmeril elétrico, realizando-se ranhuras leves na região oposta ao hilo, e semeadas em tubetes com volume de 110 cm<sup>3</sup> preenchidos com substrato à base de fibra de coco

final. As plântulas foram mantidas por 40 dias em casa de vegetação sob sombreamento de 50% (obtido com tela de ráfia preta) e recebendo rega diária. Ao final desse período, 75 plântulas vigorosas e uniformes foram selecionadas.

### 2.3 Preparo do substrato e aplicação dos tratamentos

As plântulas foram transplantadas para sacos de polietileno (10 × 20 cm) contendo substrato composto por fibra de coco, ao qual foram incorporados dois níveis de hidrogel (Hydroplan-EB®) e dois níveis de fertilizante de liberação controlada (osmocote®, formulação NPK 15-09-12), aplicados de forma combinada. A composição química do fertilizante inclui: N (15%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (9%), K<sub>2</sub>O (12%), Mg (1,3%), S (5,0%), B (0,02%), Cu (0,05%), Fe (0,46%), Mn (0,06%), Mo (0,02%) e Zn (0,05%). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 2 + 1 (dois níveis de hidrogel x dois níveis de osmocote® + testemunha) com 15 repetições por tratamento, com uma planta por repetição. Os tratamentos consistiram em T0: sem hidrogel e fertilizante, T1: 3 gramas de hidrogel + 4 gramas de fertilizante, T2: 3 gramas de hidrogel + 6 gramas de fertilizante, T3: 4 gramas de hidrogel + 4 gramas de fertilizante e T4: 4 gramas de hidrogel + 6 gramas de fertilizante. Para avaliar a dinâmica da absorção de nutrientes pelas mudas ao longo do experimento, amostras do substrato de cada tratamento foram coletadas antes do transplante e, posteriormente, ao final do ciclo, com o objetivo de comparar os teores de macro e micronutrientes disponíveis. Durante todo o período experimental, a irrigação foi realizada de modo a manter o substrato próximo à capacidade de campo, correspondente a aproximadamente 60% da umidade máxima de retenção, evitando saturação hídrica e possíveis perdas de nutrientes por lixiviação, de forma a não comprometer a interpretação da dinâmica de absorção observada.

### 2.4 Avaliação morfológica das mudas

Aos 120 dias após o transplante, foram avaliadas as seguintes variáveis morfológicas: altura da planta (cm), diâmetro do caule (mm),

número de folhas, comprimento da raiz principal (cm), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), razão altura/diâmetro (RHDC) e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (Dickson et al., 1960).

### 2.5 Análise do tecido vegetal

As mudas foram separadas em folhas, caules e raízes, e secas em estufa a 65 °C até massa constante. Em seguida, foram determinadas as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Mn, Zn, Fe e B. O nitrogênio foi determinado pelo método Kjeldahl, o fósforo por colorimetria de molibdato de amônio, cátions K, Ca, Mg, Cu, Mn, Zn, Fe por espectrofotometria de absorção atômica e B (digestão seca), utilizando o equipamento ICP-OES. As análises foram realizadas no laboratório de Análise foliar do Instituto de Solos da Universidade Federal de Lavras, MG.

### 2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando identificadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o software SISVAR (Ferreira 2019).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ressalta-se que até o presente momento, não há um padrão específico de referência para teores de macro e micronutrientes para a espécie *H. courbaril*. Portanto, os dados gerados no presente estudo, são importantes como fonte primária para estudos posteriores, bem como, para recomendações de uso.

### 3.1 Análise química do substrato antes e após o experimento

A comparação entre os teores de macro e micronutrientes no substrato antes e após o cultivo das mudas de *H. courbaril* revela padrões distintos de absorção induzidos pelas diferentes combinações de hidrogel e osmocote® (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química do substrato nos tratamentos avaliados, em duas épocas de amostragem: antes do transplante e ao final do experimento.

Table 1. Chemical composition of the substrate in the evaluated treatments, at two sampling times: before transplanting and at the end of the experiment.

Tratamento	K	P	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	B	S
	---mg.dm <sup>-3</sup> ---	---	---cmolc.dm <sup>-3</sup> ---	---	---	---	-----mg.dm <sup>-3</sup> -----	---	---	---
<b>Antes do transplante</b>										
T0	881,06	12,59	2,33	0,89	1,51	1,00	46,20	37,70	0,49	216,20
T1	1.204,21	27,09	3,17	1,53	2,88	1,70	53,60	43,90	0,62	328,30
T2	1.251,83	35,39	1,70	2,39	5,69	2,60	48,30	40,00	0,51	371,30
T3	1.080,09	28,74	2,68	1,20	4,68	2,50	54,40	47,40	0,49	275,60
T4	2.360,49	82,88	2,79	1,40	8,55	5,00	106,10	88,00	0,49	397,10
<b>Final do experimento</b>										
T0	354,65	9,15	3,35	1,39	1,44	1,10	41,50	46,40	0,53	32,10
T1	478,40	17,71	3,73	1,80	2,29	1,60	33,60	45,70	0,53	70,60
T2	443,53	31,13	3,38	1,62	3,23	2,20	31,20	50,50	0,53	93,10
T3	643,09	19,62	3,36	1,82	2,16	1,60	34,60	55,00	0,46	125,90
T4	439,63	22,36	3,27	1,56	2,75	1,60	31,90	52,70	0,52	110,60

**Macronutrientes** - Os teores de potássio (K) e enxofre (S) apresentaram reduções expressivas em todos os tratamentos, evidenciando elevada absorção pelas mudas ao longo do ciclo. Destaca-se o tratamento T4, que iniciou com as maiores concentrações de K e P e terminou com valores próximos aos demais, refletindo forte consumo desses nutrientes. O fósforo (P) também diminuiu em T0 e T1, mas manteve níveis relativamente elevados em T2 e T4, o que sugere liberação gradual do fertilizante de liberação controlada. Em contraste, cálcio (Ca) e magnésio (Mg) apresentaram discreto aumento no final do experimento em todos os tratamentos, indicando menor demanda relativa ou acúmulo residual no substrato.

**Micronutrientes** - Entre os micronutrientes, o ferro (Fe) reduziu significativamente em todos os tratamentos, evidenciando elevada absorção ou possível imobilização no substrato. O manganês (Mn), por outro lado, mostrou tendência de aumento, com valores finais superiores aos iniciais em todos os tratamentos. Já zinco (Zn), cobre (Cu) e boro (B) apresentaram variações discretas, mantendo níveis próximos aos iniciais, o que demonstra maior estabilidade desses elementos. Esses resultados evidenciam que os tratamentos com hidrogel e osmocote® influenciaram não apenas a disponibilidade de macronutrientes essenciais, mas também a dinâmica de micronutrientes importantes para o desenvolvimento de mudas de *H. courbaril*.

O tratamento T4 destacou-se pela maior depleção de potássio (81,4%) e fósforo (73,0%), indicando elevada demanda nutricional compatível com o vigor vegetativo observado nesse tratamento. Reduções acentuadas também foram observadas para o enxofre, cuja maior queda foi registrada no tratamento controle (T0), com 85%, seguido de T4 (72%). Esses resultados reforçam a importância de K, P e S no crescimento inicial de mudas de *H. courbaril*, principalmente em substratos com maior disponibilidade inicial e maior retenção de umidade, condições frequentemente associadas ao uso de hidrogel em conjunto com fertilizantes de liberação controlada (Tomášková et al. 2023, Biehl et al. 2023).

Por outro lado, cálcio (Ca) e magnésio (Mg) apresentaram tendência de aumento em quase todos os tratamentos, com destaque para T2, em que o teor de Ca elevou-se em aproximadamente 98,8%. Esse comportamento pode estar associado à mineralização da matéria orgânica do substrato, que libera gradualmente esses elementos, ou ainda à baixa taxa de absorção relativa pelas mudas. Estudos sobre decomposição de litter relatam dinâmica semelhante para Ca, Mg e Mn (Yue et al. 2021), reforçando a hipótese de que a matéria orgânica presente no substrato contribui para elevar ou manter os teores de Ca e Mg ao longo do experimento.

Entre os micronutrientes, ferro (Fe), zinco (Zn) e cobre (Cu) apresentaram reduções consistentes, sobretudo nos tratamentos de maior desenvolvimento, como T2 e T4. No T4, por

exemplo, o Fe reduziu em cerca de 70%, enquanto no T2, o Cu sofreu queda próxima a 68%. Esses resultados sugerem absorção ativa e papel fisiológico relevante desses elementos no crescimento inicial, em consonância com estudos que evidenciam a importância do Fe e do Zn na regulação metabólica e nos processos de homeostase em plantas (Tripathi et al. 2018, Hanikenne e Bouché 2023). Já manganês (Mn) e boro (B) apresentaram variações mais discretas, com alguns tratamentos exibindo teores finais superiores aos iniciais, possivelmente em função da baixa mobilidade ou da liberação progressiva desses nutrientes no substrato (Dhaliwal et al. 2019, Ulthman et al. 2022).

Em síntese, os resultados evidenciam que a combinação de hidrogel e osmocote® não apenas aumentou a disponibilidade inicial de nutrientes, mas também favoreceu sua absorção efetiva ao longo do ciclo, com destaque para T2 e T4. Essa

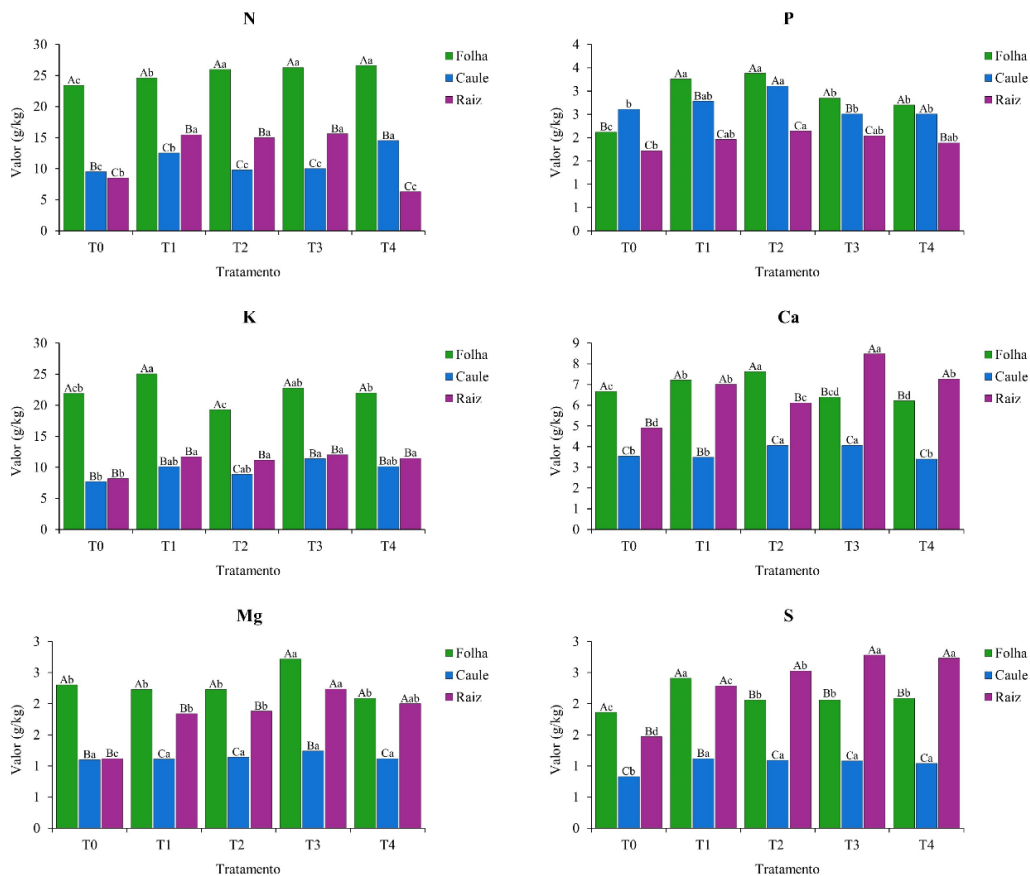
estratégia integrada demonstra alto potencial para otimizar a nutrição mineral de espécies florestais em viveiros, sobretudo em ambientes com restrição hídrica, onde a eficiência no uso da água e dos nutrientes é determinante para o sucesso da produção de mudas (Tomášková et al. 2023).

### 3.2 Análise química dos compartimentos (folha, caule e raiz) da planta

**Macronutrientes** – A Figura 1 apresenta os teores de macronutrientes encontrados na biomassa das folhas, caules e raízes de plantas jovens de *H. courbaril*, sob diferentes combinações de dosagens de hidrogel e osmocote®. A sequência dos teores dos nutrientes na biomassa aérea (caule e folha) foi: N>K>Ca>P>Mg=S, diferindo ligeiramente do padrão observado na raiz (N>K>Ca>S>P=Mg).

Figura 1. Dados de teores de macronutrientes em g.kg-1 dos órgãos de mudas de *H. courbaril*.

Figure 1. Data on macronutrient content in g.kg-1 of *H. courbaril* seedling organs



A interação órgão da planta x tratamento influenciou significativamente os teores de macronutrientes, sugerindo uma distribuição diferencial entre folhas, caules e raízes, refletindo as distintas funções fisiológicas desses compartimentos. Tais padrões reforçam a importância da compartimentalização de nutrientes para o manejo nutricional eficiente das plantas. Esse padrão de compartimentalização entre órgãos é bem documentado na literatura, por meio de estudos que mostram alocação diferencial de nutrientes como N e P entre folhas, caules e raízes (Jiang et al. 2024) e realocação de elementos como Mn e Zn entre caule e folha em condições de estresse ambiental (Liu et al. 2022).

A análise nutricional das mudas de *H. courbaril* cultivadas sob diferentes tratamentos revelou padrões específicos de acúmulo de nutrientes nos tecidos vegetais. O tratamento T3 destacou-se por promover maior acúmulo radicular da maioria dos macronutrientes essenciais (N, K, Ca, Mg e S). Em contrapartida, o tratamento T4 proporcionou os maiores teores de nitrogênio nas folhas e no caule. A concentração de fósforo (P) foi maximizada em todos os órgãos no tratamento T2, sugerindo que a maior dose de fertilizante, combinada com uma menor proporção de hidrogel, favoreceu a absorção e distribuição deste nutriente. Já o tratamento T1 apresentou os maiores teores de enxofre (S) e potássio (K) nas folhas. Esses resultados evidenciam os efeitos distintos das combinações de hidrogel e fertilizante sobre o perfil de acúmulo de nutrientes nos compartimentos da planta.

O nitrogênio (N) foi o macronutriente mais exigido pelas mudas de *H. courbaril* nos estágios iniciais de desenvolvimento. As folhas apresentaram maiores teores nos tratamentos T2, T3 e T4 (26,0–26,6 g.kg<sup>-1</sup>), com destaque para o T4, que também apresentou elevado acúmulo no caule (14,5 g.kg<sup>-1</sup>), indicando redistribuição eficiente do nutriente entre órgãos. Nas raízes, os maiores teores foram observados nos tratamentos T1, T2 e T3 (15,0–15,6 g.kg<sup>-1</sup>). Esses resultados confirmam a alta exigência e a eficiente translocação de N em mudas jovens de *H. courbaril*, em concordância com Bessa et al. (2021), que observaram padrão semelhante em sistema hidropônico. Além disso, a combinação de hidrogel e fertilizante de liberação controlada (osmocote®) favoreceu a absorção contínua do nutriente e sustentou o crescimento vegetativo, em

linha com evidências de que o hidrogel pode melhorar a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes (Tomášková et al. 2023, Biehl et al. 2023).

A faixa de teores de N entre 12 e 25 g.kg<sup>-1</sup> nas mudas é considerada adequada, conforme valores de referência clássicos para plantas (Malavolta 1997) e estudos recentes com mudas de *H. courbaril* em sistema hidropônico (Bessa et al. 2021), indicando que os tratamentos proporcionaram suprimento eficiente do nutriente. O nitrogênio é componente essencial de proteínas, aminoácidos e nucleotídeos envolvidos em diversos processos fisiológicos, como germinação, crescimento radicular, floração e produção (Singh et al. 2022). Contudo, sua aplicação deve ser equilibrada, pois o excesso pode comprometer o desenvolvimento vegetal (Taiz e Zeiger 2009), efeito também observado em experimentos recentes com diferentes doses de N em milho, onde níveis ótimos foram determinantes para maximizar o rendimento (Yue et al. 2021).

Os maiores teores de fósforo (P) nas folhas foram observados nos tratamentos T1 e T2 (~3,3 g.kg<sup>-1</sup>), sugerindo rápida absorção e eficiente translocação para os órgãos fotossintéticos. No caule, o destaque foi o tratamento T2 (3,11 g.kg<sup>-1</sup>). Os teores de P situaram-se dentro da faixa considerada adequada para espécies florestais tropicais (Malavolta 1997, Bessa et al. 2021). O fósforo desempenha funções essenciais na respiração celular, fotossíntese e síntese de proteínas, além de ser determinante para o desenvolvimento radicular (Taiz e Zeiger 2009). Estudos recentes também confirmam que fertilizantes de liberação lenta favorecem o suprimento de P e promovem o crescimento inicial de mudas florestais (Cunha et al. 2023).

Embora os teores foliares tenham variado, o tratamento T1 apresentou o maior acúmulo de potássio (K) nas folhas (25,07 g.kg<sup>-1</sup>), seguido por T3. Nas raízes, os teores foram expressivos (11,7–12,0 g.kg<sup>-1</sup>) nos tratamentos com hidrogel e fertilizante. A faixa de suficiência para K em tecidos vegetais é ampla e pode variar conforme a espécie e as condições ambientais, geralmente situando-se entre 15 e 50 g.kg<sup>-1</sup> em folhas (Malavolta et al. 1997). O potássio é essencial na regulação osmótica, ativação enzimática e síntese de proteínas (Wang et al. 2013, Zörb et al. 2014, Cavalcante et al. 2018). Além disso, sua presença adequada é indispensável à otimização da

atividade fotossintética e o aumento da produtividade vegetal (Shah et al. 2024).

O cálcio (Ca) acumulou-se principalmente nas raízes, com destaque para o tratamento T3 (8,48 g.kg<sup>-1</sup>). Nas folhas, o maior valor foi registrado no T2 (7,63 g.kg<sup>-1</sup>). Considerando que o cálcio é praticamente imobilizado no floema e se movimenta preferencialmente via xilema, essas concentrações sugerem que sua absorção foi favorecida em condições de maior disponibilidade hídrica, potencialmente intensificadas pelo uso de hidrogel (Hocking et al. 2016, Wdowiak et al. 2024). As concentrações observadas estão compatíveis com os valores relatados para plantas em geral, embora haja grande variabilidade entre espécies e tecidos (Tang et al. 2017).

O teor de magnésio (Mg) foi significativamente maior nas raízes do tratamento T3 (2,24 g.kg<sup>-1</sup>), com pouca variação entre os tratamentos nas folhas. Esse padrão sugere eficiente absorção, mas redistribuição restrita entre os órgãos, em consonância com estudos que descrevem a mobilidade limitada do Mg em determinadas espécies, condições ambientais e estádios de desenvolvimento da planta (Chen et al., 2018). Os valores observados enquadram-se nos intervalos críticos de Mg foliar reportados para diversas culturas, geralmente entre 1,5 e 3,5 g.kg<sup>-1</sup>, considerados adequados ao crescimento vegetal (Marschner 2012, Chen et al. 2018). O magnésio é crucial na síntese de clorofila, no transporte e uso de fotoassimilados, na ativação enzimática e na síntese de proteínas, reforçando seu papel central no metabolismo e na manutenção do crescimento das mudas (Ishfaq et al. 2022).

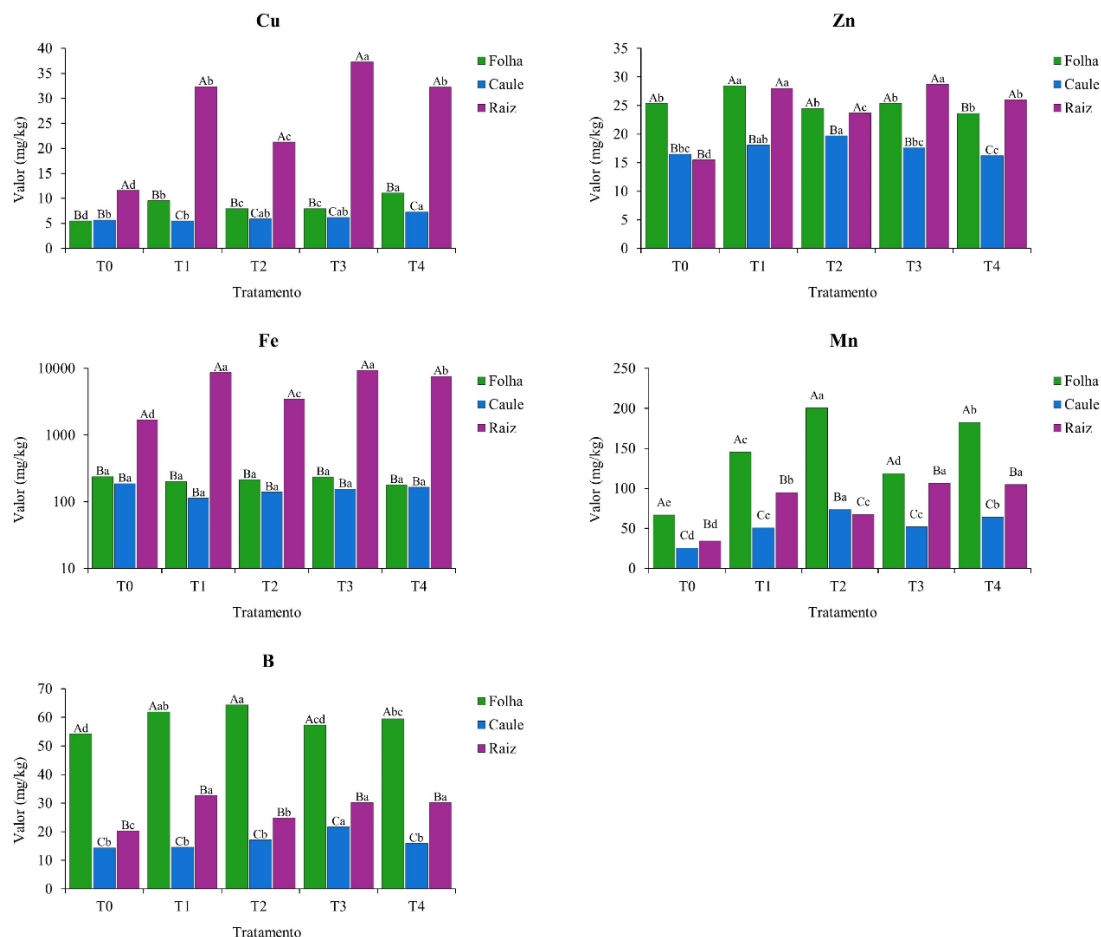
Os teores de enxofre (S) foram mais elevados nas raízes nos tratamentos T3 e T4 (~2,78 g.kg<sup>-1</sup>), possivelmente em função da maior retenção e solubilidade proporcionadas pelo hidrogel. O acúmulo foliar foi relativamente estável (~2,0 g.kg<sup>-1</sup>), dentro da faixa de suficiência de 2 a 5 g.kg<sup>-1</sup> em base seca, considerada adequada para diversas espécies (Marschner 2012, Kopriva et al. 2019). Segundo Bessa et al. (2021), a alta concentração de S nas raízes pode estar relacionada à demanda por aminoácidos sulfurados, como cisteína e metionina, fundamentais ao desenvolvimento da espécie. O enxofre é o quarto macronutriente mais abundante nos tecidos vegetais (0,3% a 7,6%) e participa da

estrutura de proteínas e atividade enzimática, além de estar envolvido na assimilação e sinalização celular (Kopriva et al. 2019, Zenda et al. 2021).

**Micronutrientes** – A Figura 2 apresenta os teores de micronutrientes encontrados na biomassa das folhas, caule e raiz de *H. courbaril*. De modo geral, os teores de micronutrientes acumulados na biomassa da parte aérea (folha e caule) e raiz estão dispostos na seguinte sequência: Fe>Mn>B>Zn>Cu. Esses resultados diferem daqueles reportados por Bessa et al. (2021), que relataram a seguinte ordem de acúmulo de micronutrientes: Mn>B>Zn>Cu>Fe, aos 180 dias após o transplântio de *H. courbaril*.

O cobre (Cu) acumulou-se principalmente nas raízes, com destaque para o tratamento T3 (37,28 mg.kg<sup>-1</sup>). Na folha, o maior valor foi observado no tratamento T4 (11,08 mg.kg<sup>-1</sup>), enquanto no caule houve menor variabilidade entre os tratamentos, com discreto aumento de T2 (5,89 mg.kg<sup>-1</sup>) a T4 (7,31 mg.kg<sup>-1</sup>). Essa distribuição reforça a baixa mobilidade do Cu no floema, favorecendo seu acúmulo radicular (Tripathi et al. 2018, Dhaliwal et al. 2019). A concentração de Cu em plantas geralmente é considerada adequada entre 5 e 30 mg.kg<sup>-1</sup>, mas deve ser rigorosamente controlada em razão do seu elevado potencial redox e risco de toxicidade (Kumar et al. 2021). No entanto, em *H. courbaril*, Marques et al. (2018) observaram que concentrações de até 200 mg.kg<sup>-1</sup> podem promover efeitos positivos sobre crescimento, morfologia radicular e trocas gasosas, sugerindo relativa tolerância da espécie ao acúmulo desse micronutriente.

Além do padrão de distribuição observado, o cobre exerce funções vitais no metabolismo vegetal por atuar como cofator em diversas enzimas essenciais, como amino oxidase, a citocromo c oxidase e a plastocianina, que participam da respiração mitocondrial, da resposta ao estresse oxidativo e do transporte de elétrons na fotossíntese. Também está envolvido na biossíntese de pigmentos, na lignificação da parede celular e na regulação de processos relacionados ao metabolismo de carboidratos, lipídios e nitrogênio, bem como na sinalização hormonal (Li et al. 2019, Bhagat et al. 2021). Essa multiplicidade de funções reforça a importância do Cu para o crescimento e o desenvolvimento das mudas de *H. courbaril*.

Figura 2. Dados de teores de micronutrientes em  $\text{mg.kg}^{-1}$  dos órgãos de mudas de *H. courbaril*.Figure 2. Data on micronutrient content in  $\text{mg.kg}^{-1}$  of *H. courbaril* seedling organs.

O zinco (Zn) apresentou variações significativas entre órgãos e tratamentos, com maior acúmulo foliar em T1 ( $28,44 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), enquanto T1 e T2 destacaram-se no caule e T1 e T3 na raiz. Os teores observados situaram-se em níveis adequados para o crescimento, abaixo da faixa considerada fitotóxica para a maioria das espécies ( $100\text{-}400 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), e próximos aos valores de suficiência geralmente reportados para plantas (Dhaliwal et al. 2019). A absorção ativa desse micronutriente reflete seu papel essencial no metabolismo vegetal, atuando como cofator enzimático e regulador da expressão gênica, além de participar da síntese de proteínas, do metabolismo de carboidratos e lipídios e da manutenção da integridade da membrana celular. O Zn também contribui para a fotossíntese, a defesa antioxidante e o desenvolvimento reprodutivo, interagindo de forma estreita com o ferro (Fe) em rotas de transporte e sinalização (Rai et al. 2021, Hanikenne e Bouché 2023). Esses

resultados indicam que o suprimento de Zn foi satisfatório nas condições avaliadas, favorecendo o crescimento inicial das mudas de *H. courbaril*.

O zinco (Zn) apresentou variações significativas entre órgãos e tratamentos, com maior acúmulo foliar em T1 ( $28,44 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), enquanto T1 e T2 se destacaram no caule e T1 e T3 na raiz. Os teores observados situaram-se em níveis adequados para o crescimento, próximos às concentrações críticas de  $23,45$  a  $30,00 \text{ mg.kg}^{-1}$  reportadas como favoráveis à produtividade e qualidade vegetal (Fatria et al. 2024), e bem abaixo da faixa considerada fitotóxica em tecidos foliares, geralmente acima de  $100 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Oliveira et al. 2025). A absorção ativa desse micronutriente reflete seu papel essencial no metabolismo vegetal, atuando como cofator enzimático, regulador da expressão gênica e estabilizador da membrana celular. Além disso, o Zn participa da fotossíntese, da defesa antioxidante e do desenvolvimento reprodutivo, interagindo de forma estreita com

ferro (Fe), cobre (Cu) e manganês (Mn) em rotas de transporte e sinalização, fundamentais à homeostase de micronutrientes (Rai et al. 2021, Hanikenne e Bouché 2023). Esses resultados indicam que o suprimento de Zn foi satisfatório nas condições avaliadas, favorecendo o crescimento inicial das mudas de *H. courbaril*.

Não se observou diferença estatística significativa nos teores de ferro (Fe) na parte aérea (folhas e caules) das mudas de *H. courbaril*. Os teores situaram-se dentro da faixa de suficiência nutricional de 25 a 200 mg.kg<sup>-1</sup> em tecidos foliares, conforme valores clássicos de referência (Malavolta 1997). Por outro lado, os maiores acúmulos foram registrados nas raízes, principalmente nos tratamentos T1 e T3, com 8868,2 e 9357,5 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Esse padrão indica que parte expressiva do Fe absorvido foi imobilizada nos tecidos radiculares, fenômeno já descrito em estudos de homeostase e compartimentalização do elemento em diferentes espécies (Tripathi et al. 2018, Rai et al. 2021, Hanikenne e Bouché 2023). Apesar dos elevados valores radiculares, não foram observados efeitos adversos sobre o crescimento, sugerindo que *H. courbaril* apresenta tolerância a níveis altos de Fe acumulados nas raízes, como também reportado por Bessa et al. (2021) em condições hidropônicas.

O ferro (Fe) é um micronutriente redox-ativo essencial, participando de processos fundamentais como fotossíntese, respiração mitocondrial, assimilação de nitrogênio, biossíntese de hormônios (etileno, giberelinas, ácido jasmônico), resposta antioxidante e defesa contra patógenos. A maior parte do Fe celular encontra-se nos cloroplastos, onde desempenha papel crucial na fotossíntese, além de integrar complexos mitocondriais envolvidos na produção de energia (Tripathi et al. 2018, Rai et al. 2021). Estudos recentes também destacam a interação do Fe com outros micronutrientes, especialmente Zn, Cu e Mn, em rotas de transporte e regulação da homeostase, reforçando sua importância para a manutenção do metabolismo e do crescimento vegetal (Hanikenne e Bouché 2023). A multiplicidade dessas funções reforça o papel central do Fe na manutenção do metabolismo e no crescimento saudável das mudas.

O tratamento T2 foi o mais influente no acúmulo de manganês (Mn) nas folhas e no caule de *H. courbaril*, com teores de 200,48 e 73,58 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. De forma semelhante, observou-se interação significativa para o Mn nas raízes nos tratamentos T3 e T4, com 106,44 e 104,76 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Esses valores situaram-se dentro da faixa considerada adequada para o crescimento vegetal,

comumente reportada entre 100 e 600 mg.kg<sup>-1</sup> em tecidos foliares, segundo revisões recentes sobre micronutrientes (Dhaliwal et al. 2019, Ulthman et al. 2022). Além disso, Bessa et al. (2021) destacaram que o Mn está entre os micronutrientes mais abundantes em mudas de *H. courbaril* cultivadas em sistema hidropônico, reforçando sua importância fisiológica para a espécie.

O manganês é um micronutriente essencial ao metabolismo vegetal, participando da fotossíntese, da respiração e da ativação de diversas enzimas. Ele integra o complexo de evolução de oxigênio do fotossistema II, sendo indispensável para a fotólise da água e a liberação de elétrons durante a fotossíntese. Além disso, o Mn atua como cofator em enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase, contribuindo para a proteção celular contra espécies reativas de oxigênio. Também participa do metabolismo de carboidratos, lipídios e compostos fenólicos, regulando processos de crescimento e defesa (Dhaliwal et al. 2019, Ulthman et al. 2022).

A interação órgão da planta x tratamento foi significativa para o teor de B nas folhas, com destaque para os tratamentos T1 e T2, que apresentaram 62,0 e 64,4 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. No caule, o T4 promoveu maior acúmulo, enquanto nas raízes os tratamentos T1, T3 e T4 contribuíram para os maiores teores nas mudas de *H. courbaril*.

Os valores observados situaram-se dentro da faixa considerada adequada para o desenvolvimento vegetal, usualmente entre 10 e 50 mg.kg<sup>-1</sup> em tecidos foliares de espécies florestais (SBCS-SQFS 2004). Abordagens recentes, entretanto, indicam que a faixa crítica de suficiência pode ser mais estreita, variando entre 25,4 e 40,3 mg.kg<sup>-1</sup> em tecidos foliares (Veazie et al. 2024). O boro desempenha papel central no crescimento, na produtividade e na qualidade das culturas, sendo requerido em níveis médios por espécies dicotiledôneas como *H. courbaril*, mas podendo causar efeitos tóxicos em concentrações elevadas (Kohli et al. 2023). Assim, os resultados sugerem que os teores de B encontrados foram satisfatórios e compatíveis com o crescimento saudável da espécie.

O boro está diretamente envolvido na formação e no funcionamento da parede celular, atuando na lignificação, na reticulação de polissacarídeos e na manutenção da integridade das biomembranas. Também participa do transporte de açúcares, do metabolismo de carboidratos e do ácido indolacético, além de contribuir para processos de divisão celular e diferenciação tecidual. Essas funções reforçam o papel indispensável do B para o crescimento e a qualidade fisiológica das mudas (Ulthman et al. 2022, Kohli et al. 2023).

### 3.3 Parâmetros morfológicos

A análise dos dados apresentados na Tabela 2 demonstra que os tratamentos T1, T2, T3 e T4, que consistem em combinações de hidrogel e osmocote®, proporcionaram melhores condições para o crescimento e desenvolvimento inicial de

mudas de *H. courbaril*, em comparação ao tratamento controle (T0), sem adubação e sem hidrogel. Dentre esses, o tratamento T2 destacou-se na maioria das variáveis avaliadas, indicando maior eficácia na promoção do crescimento e qualidade das mudas.

Tabela 1. Valores médios de taxas de crescimento de variáveis morfológicas em plantas de *H. courbaril* durante seu estágio inicial de desenvolvimento.

Table 2. Average values of growth rates of morphological variables in *H. courbaril* plants during their initial stage of development.

Tratamento	H	DC	RHDC	NF	CR	MSPA	MSR	MST	IQD
T0	57,86 b	6,03 a	9,63 b	13,54 b	31,65 a	5,44 b	2,2 b	7,7 b	0,64 b
T1	70,94 a	6,51 a	10,93 a	22,40 a	28,93 a	8,95 a	2,9 ab	11,9 a	0,9 ab
T2	71,86 a	6,73 a	10,74 ab	23,57 a	32,29 a	9,88 a	3,4 a	13,2 a	1,0 a
T3	67,1 ab	6,58 a	10,22 ab	24,67 a	28,60 a	8,51 a	2,6 ab	11,1 a	0,8 ab
T4	67,0 ab	6,41 a	10,47 ab	23,29 a	27,86 a	8,86 a	2,7 ab	11,5 a	0,8 ab
CV (%)	13,41	11,13	10,87	24,06	26,12	25,55	34,84	25,06	28,72
Média	67,15	6,46	10,41	21,66	29,81	8,38	2,76	11,14	0,83

H: altura da parte aérea da muda; DC: diâmetro do coleto; (RHDC): razão entre altura da parte aérea e diâmetro do coleto; NF: número de folhas; CR: comprimento da raiz principal; MSPA: massa seca da parte aérea; MSR: massa seca da raiz; MST: massa seca total e IQD: Índice de Qualidade de Dickson. CV (%): coeficiente de variação. Médias com a mesma letra na coluna, são iguais pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

H: seedling shoot height; SD: stem diameter; (RHSD): ratio between shoot height and stem diameter; NL: number of leaves; RL: main root length; SDM: shoot dry mass; RDM: root dry mass; TDM: total dry mass and DQI: Dickson Quality Index. CV (%): coefficient of variation. Means with the same letter in the column are equal by Tukey's test ( $p \geq 0.05$ ).

A altura da parte aérea (H) foi significativamente superior nos tratamentos T1 (70,94 cm) e T2 (71,86 cm) em relação ao T0 (57,86 cm), demonstrando que a presença de hidrogel e osmocote® favoreceu o desenvolvimento vegetativo. Esses resultados sugerem que o fornecimento balanceado de água, promovido pelo hidrogel, aliado à liberação contínua de nutrientes pelo fertilizante, favoreceu o crescimento em altura das mudas de *H. courbaril*.

Esse resultado está em consonância com estudos prévios que demonstraram o aumento da altura de mudas de *Aspidosperma parvifolium* submetidas a diferentes doses de hidrogel e osmocote®, em condições de viveiro (Menegatti et al. 2017). Esses autores indicaram a combinação de 3 g de hidrogel associada a 7,5 g de osmocote® como adequada para a produção de mudas de guatambu. De forma semelhante, Mews et al. (2015) observaram que a dose de 3 g de hidrogel e 4 g de fertilizante promoveu o crescimento máximo em altura de mudas de *Handroanthus ochraceus*. Mais recentemente, Cruz et al. (2018) também relataram efeitos positivos do fertilizante

de liberação lenta na altura de mudas de *Dalbergia nigra*, reforçando que a associação entre hidrogel e fertilizante pode favorecer o crescimento em altura de espécies florestais nativas, embora a magnitude da resposta varie entre espécies e condições de cultivo.

Para o diâmetro do colo (DC), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, indicando que, independentemente da combinação de hidrogel e fertilizante, o crescimento desse parâmetro morfológico não foi afetado de forma diferenciada. Resultados semelhantes foram relatados por Cruz et al. (2018), que observaram maiores incrementos no DC de mudas de *Dalbergia nigra* em resposta ao fertilizante de liberação controlada, enquanto o hidrogel não influenciou significativamente essa variável. Em contrapartida, Menegatti et al. (2017) verificaram incremento expressivo no DC de mudas de *Aspidosperma parvifolium* submetidas à aplicação conjunta de hidrogel e fertilizante de liberação controlada. De forma semelhante, Mews et al. (2015) reportaram que a associação de 3 g de hidrogel e 4 g de adubo promoveu maiores valores

de diâmetro em mudas de *Handroanthus ochraceus*. Essas divergências indicam que a resposta do diâmetro do colo pode ser fortemente influenciada pela espécie, pelas condições ambientais e pela interação entre os insumos aplicados.

Para a variável relação altura/diâmetro do colo (RHDC), observou-se que os maiores valores ocorreram nos tratamentos T1 (10,93) e T2 (10,74), ambos estatisticamente superiores ao tratamento T0 (9,63). Relações elevadas podem estar associadas a maior susceptibilidade ao acamamento em condições de campo, mas sua interpretação deve ser feita em conjunto com os valores absolutos de altura e diâmetro, além do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), que integra esses atributos em uma métrica mais abrangente de qualidade de mudas (Cruz et al. 2018, Grossnickle e MacDonald 2018).

O número de folhas (NF) foi significativamente superior em todos os tratamentos com hidrogel e osmocote®, em comparação ao controle, com incrementos de 65% a 82%. Esses resultados evidenciam que a disponibilidade hídrica associada à liberação gradual de nutrientes favorece a emissão foliar em mudas de *H. courbaril*. Faller et al. (2020) observaram que a adição isolada de hidrogel ao substrato não resultou em aumento do NF, enquanto Amorim et al. (2020) relataram que o uso de osmocote® promoveu melhorias em variáveis morfológicas, incluindo o número de folhas. Embora a área foliar não tenha sido medida neste estudo, é plausível supor que o maior NF obtido nos tratamentos com hidrogel e osmocote® tenha refletido em incremento da área fotossintética, resultado consistente com estudos que destacam esse parâmetro como determinante para o vigor inicial das mudas (Menegatti et al. 2017, Cunha et al. 2023).

O aumento do número de folhas representa um dos principais fatores determinantes para a capacidade fotossintética das plantas, pois amplia a área de interceptação luminosa e, conseqüentemente, a produção de fotoassimilados destinados ao crescimento e à formação de reservas (Grossnickle e MacDonald 2018). Além disso, maior NF contribui para a eficiência nas trocas gasosas e na transpiração, processos diretamente ligados ao balanço hídrico e à regulação estomática. Estudos recentes destacam que o incremento de área foliar e do número de folhas está fortemente associado ao acúmulo de biomassa e à rusticidade de mudas florestais, sendo, portanto, um parâmetro chave para avaliar a

qualidade e o potencial de sobrevivência pós-plantio (Cunha et al. 2023).

O acúmulo de biomassa também foi favorecido, com destaque para a massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca total (MST), cujos maiores valores foram observados em todos os tratamentos combinados de hidrogel e fertilizante osmocote®. O tratamento T2, em especial, apresentou as maiores médias para MSPA (9,88 g), MSR (3,36 g) e MST (13,23 g), sendo estatisticamente superior ao controle em todas essas variáveis. Resultados semelhantes foram relatados em estudos individuais com esses insumos: Amorim et al. (2020) observaram ganhos significativos em biomassa com o uso de osmocote®, enquanto Faller et al. (2020) destacaram efeitos positivos do hidrogel associado à poda radicular em *H. courbaril*. Esses achados, em conjunto, reforçam o potencial do uso integrado de hidrogel e fertilizante de liberação controlada, conforme evidenciado neste estudo. Além disso, Cunha et al. (2023) observaram incremento significativo de MSPA e MST em espécies de *Eucalyptus* sob adubação de liberação lenta, confirmando o efeito positivo desses insumos sobre o crescimento inicial. A variável MSR, em particular, é considerada um dos principais indicadores do potencial de sobrevivência e crescimento em campo, uma vez que sistemas radiculares mais desenvolvidos favorecem a adaptação sob condições adversas (Grossnickle e MacDonald 2018).

A alocação de biomassa entre parte aérea e raízes constitui um dos principais determinantes da rusticidade e do desempenho em campo das mudas florestais. Plantas com maior massa seca da raiz (MSR) tendem a apresentar maior resiliência hídrica e maior eficiência na absorção de nutrientes, favorecendo a sobrevivência em condições de estresse (Grossnickle e MacDonald, 2018). Por outro lado, incrementos na massa seca da parte aérea (MSPA) ampliam a área fotossintética e a capacidade de produção de fotoassimilados, essenciais para sustentar o crescimento inicial (Cunha et al. 2023). Assim, a biomassa total (MST), resultante do equilíbrio entre MSPA e MSR, é considerada um dos indicadores mais robustos de qualidade de mudas, pois reflete tanto a capacidade de crescimento vegetativo quanto a rusticidade necessária para o estabelecimento em campo (Amorim et al. 2020, Faller et al. 2020).

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD), que integra as principais variáveis morfológicas em uma única métrica de qualidade, foi

significativamente maior no tratamento T2 (0,98) em comparação ao controle (0,64), evidenciando a superioridade deste tratamento para a produção de mudas vigorosas e bem formadas. Estudos recentes em *H. courbaril* confirmam a relevância do IQD como parâmetro de seleção: Amorim et al. (2020) relataram incrementos significativos com o uso de osmocote®, enquanto Faller et al. (2020) destacaram ganhos consistentes em resposta à aplicação de hidrogel. De forma mais ampla, Grossnickle e MacDonald (2018) reforçam que índices integradores como o IQD refletem melhor a rusticidade e o potencial de sobrevivência em campo do que variáveis isoladas, tornando-se fundamentais para a avaliação da qualidade de mudas florestais.

O IQD é amplamente reconhecido como um dos parâmetros mais robustos para avaliação da qualidade de mudas, pois considera simultaneamente altura, diâmetro do colo e biomassa da parte aérea e radicular, refletindo o equilíbrio morfológico e fisiológico das plantas. Valores mais elevados de IQD indicam maior capacidade de suportar estresses após o transplântio, uma vez que integram atributos relacionados à resistência mecânica, eficiência fotossintética e capacidade de absorção de água e nutrientes (Grossnickle e MacDonald 2018). Além disso, estudos recentes demonstram que tanto fertilizantes de liberação controlada quanto hidrogel podem contribuir para o aumento do IQD em espécies florestais nativas, ao promoverem melhor disponibilidade de nutrientes e água no substrato (Amorim et al. 2020, Faller et al. 2020). Dessa forma, o IQD sintetiza a interação dos fatores de manejo aplicados, servindo como indicador confiável do potencial de sobrevivência e crescimento inicial em campo.

Portanto, com base nos parâmetros morfológicos analisados, conclui-se que as mudas de *H. courbaril* apresentaram crescimento superior nos tratamentos que aliaram hidrogel e fertilizante de liberação lenta, especialmente no tratamento T2. Esses resultados corroboram os achados de Konzen et al. (2017), que evidenciaram o efeito positivo da associação entre hidrogel, substrato e fertilizante de liberação lenta no crescimento e qualidade de mudas de *Mimosa scabrella*, e de Monteiro-Neto et al. (2020), que destacaram o papel dessa combinação no incremento do desenvolvimento inicial do camu-camu (*Myrciaria dubia*) em condições de cultivo controladas.

Embora o tratamento T2 tenha apresentado os maiores valores absolutos nas variáveis morfológicas, o tratamento T1 também promoveu

crescimento significativamente superior ao controle, com desempenho estatisticamente equivalente ao T2 em altura, número de folhas, massa seca total e índice de qualidade de Dickson. Considerando que o T1 emprega menor quantidade de fertilizante, representa uma alternativa mais econômica e sustentável para a produção de mudas em larga escala. Assim, em termos de custo-benefício, o T1 se mostra uma opção viável e estratégica para aplicações práticas em viveiros comerciais e projetos de reflorestamento.

### 3.4 Eficiência de uso de nutrientes e implicações práticas

A análise integrada dos dados de absorção de nutrientes no substrato e de desempenho morfológico das mudas de *H. courbaril* permite diferenciar claramente entre a absorção absoluta de nutrientes e a eficiência no seu uso pelas plantas. O tratamento T4 destacou-se pela maior depleção dos teores de potássio (redução de 81,4%) e fósforo (redução de 73%) no substrato, evidenciando elevada absorção nutricional. Contudo, esse elevado consumo não resultou em superioridade estatisticamente significativa nas variáveis morfológicas quando comparado aos tratamentos T2 e T1. Esse comportamento está em consonância com os resultados de Tomášková et al. (2023), que observaram que a maior disponibilidade e absorção de nutrientes no substrato nem sempre resultam em incrementos proporcionais no crescimento das mudas, reforçando a importância do equilíbrio entre retenção hídrica e liberação gradual de nutrientes.

O tratamento T2 apresentou os melhores índices morfológicos, incluindo altura, massa seca total e índice de qualidade de Dickson (IQD). Esses resultados sugerem maior eficiência fisiológica na conversão dos nutrientes absorvidos em crescimento vegetativo, o que pode ser explicado pela alocação e redistribuição mais eficiente dos nutrientes entre os órgãos da planta (Liu et al. 2022, Jiang et al. 2024). A combinação equilibrada entre retenção hídrica e disponibilidade nutricional proporcionada pelo hidrogel e pelo fertilizante em dosagens adequadas reforça esse desempenho.

A superioridade do tratamento T1 em termos de eficiência econômica (desempenho similar ao T2 com menos insumos) possui implicações diretas para a engenharia de produção em larga escala. Do ponto de vista da engenharia ambiental, a adoção de T1 representa uma redução significativa na carga de fertilizantes aplicada por planta. Esse

aspecto é particularmente relevante considerando o potencial de lixiviação de nitratos e fosfatos para corpos d'água em sistemas de produção intensivos, um dos principais desafios ambientais associados ao uso de fertilizantes (Veazie et al. 2024).

Portanto, os resultados demonstram que maior absorção de nutrientes (como observado no T4) nem sempre se traduz em maior crescimento ou qualidade morfológica. A eficiência de uso dos nutrientes e o equilíbrio entre disponibilidade hídrica e nutricional são fatores determinantes para otimizar o desempenho das mudas (Jiang et al. 2024). Nesse sentido, o T2 apresenta a melhor eficiência fisiológica, enquanto o T1 se destaca pela eficiência econômica, sendo ambos recomendáveis para diferentes contextos de produção em viveiros florestais.

Esses achados têm implicações diretas para o projeto e o manejo de viveiros florestais modernos. A utilização de hidrogel pode permitir o aumento no intervalo entre irrigações, facilitando a automação e reduzindo custos operacionais. Além disso, a combinação equilibrada do tratamento T1 pode ser integrada em sistemas de fertirrigação automatizados, garantindo fornecimento constante e otimizado de água e nutrientes, o que representa um avanço na engenharia de sistemas de cultivo protegido (Grossnickle e MacDonald 2018).

#### 4 CONCLUSÕES

A aplicação associada de hidrogel e fertilizante de liberação controlada (Osmocote®) influenciou significativamente o crescimento e a nutrição de mudas de *H. courbaril*. Os tratamentos T1 e T2 se destacaram quanto aos parâmetros morfológicos e nutricionais, sendo o T2 superior em desempenho absoluto, enquanto o T1 apresentou melhor eficiência na relação custo-benefício.

Dessa forma, recomenda-se a adoção do tratamento T1 em programas de produção de mudas de *H. courbaril*, especialmente em condições com restrições hídricas e nutricionais, por combinar desempenho satisfatório com menor consumo de insumos.

#### 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Iselino Nogueira Jardim e Débora Camille Fonseca da Rosa contribuíram na conceitualização, análise formal, investigação, escrita do manuscrito do artigo original além da revisão.

#### 6 CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores declaram que não há conflitos de interesse relacionados à publicação do manuscrito.

#### REFERÊNCIAS

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. 2013. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6): 711-728.

Amorin RS, Faller BV, Oliveira IA, Jardim IN. 2020. Root pruning and Osmocote® provides better jatoba seedlings. *Científica* 48(1): 49-55.

Bhagat M, Anand R, Sharma P, Rajput P, Sharma N, Singh K. 2021. Multifunctional Copper Nanoparticles: Synthesis and Applications. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 10: 063011.

Bessa LA, Oliveira MNR, Vitorino LC, Silva FG. 2021. Evaluation of Requirements and Efficiency Parameters in the Use, Absorption, and Translocation of Nutrients in the Production of *Hymenaea courbaril* L. Seedlings, a Fruit Tree of Neotropical Importance. *Journal of Agricultural Studies* 9(2): 1-31.

Biehl J, Sandén H, Rewald B. 2023. Contrasting effects of two hydrogels on biomass allocation, needle loss, and root growth of *Picea abies* seedlings under drought. *Forest Ecology and Management* 538:120970.

Cavalcante ACP, Cavalcante LF, Cavalcante AG, Bertino AMP, Ferreira NM. 2018. Physiology of *Paluma guava* plants fertilized with potassium and calcium. *Idesia* 36: 71-80.

Chen ZC, Peng WT, Li J, Liao H. 2018. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Seminars in Cell Developmental Biology* 74: 142-152.

Cruz IA, Macena LHS, Ataíde GM, Silva AG, Castro RVO. 2018. Produção de mudas de *Dalbergia nigra* com uso combinado de hidrogel e fertilizantes de liberação lenta. *Agrarian Academy* 5(10): 161-169.

Cunha FL, Nieri EM, Dias MG, Melo LA, Venturin N. 2023. Uso de adubos de liberação lenta no crescimento inicial de clones de eucalipto. *Ciência Florestal* 33(2): 1-14.

- Cunha FL, Nieri EM, Santos JA, Almeida RS, Melo LA, Venturin N. 2021. Uso dos adubos de liberação lenta no setor florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira* 41: e201902063.
- Dhaliwal SS, Naresh RK, Mandal A, Singh R, Dhaliwal MK. 2019. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators* 1–2: 100007.
- Dickson A, Leaf A, Hosner JF. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forest Chronicle, West Mattawa* 36: 10-13.
- Faller BV, Amorin RS, Oliveira IA, Jardim IN. 2020. Effect of root pruning and hydrogel on growth of jatoba seedlings. *Nativa* 8(4): 476-483.
- Felippe D, Navroski MC, Sampietro JA, Mota C, Pereira MO, Albuquerque JÁ, Andrade RS, Moraes C. 2021. Hydrogel and irrigation frequencies in survival, growth and gas exchanges in *Eucalyptus urograndis*. *Ciência Florestal* 31(4): 1569-1590.
- Ferreira DF. 2019. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics* 37(3): 529-535.
- Grossnickle SC, Macdonald JE. 2018. Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. *Forest* 9: 283.
- Hanikenne M, Bouché F. 2023. Iron and zinc homeostasis in plants: a matter of trade-offs. *Journal of Experimental Botany* 74(18): 5426-5430.
- Hocking B, Tyerman SD, Burton RA, Gilliam M. 2016. Fruit Calcium: Transport and Physiology. *Frontiers Plant Science* 7:569.
- Ishfaq M, Wang Y, Yan M, Wang Z, Wu L, Li C, Li X. 2022. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Frontiers in Plants Science* 13: 802274.
- Jiang D, Gong H, Niklas KJ, Wang Z. 2024. Allocation of nitrogen and phosphorus in the leaves, stems, and roots of *Artemisia*: a case study in phylogenetic control. *Frontiers in Plant Science* 15: 1445831.
- Kohli SK, Kaur H, Khanna K, Handa N, Bhardwaj R, Rinklebe J, Ahmad P. 2023. Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. *Plant Growth Regulation* 100: 267-282.
- Konzen ER, Navroski MC, Friederichs G, Ferrari LH, Pereira MO, Felipe D. 2017. O uso de hidrogel combinado com substrato e fertilizante adequados melhoram a qualidade e crescimento de mudas de *Mimosa scabrella* Benth. *CERNE* 23(4): 473-482.
- Kopriva S, Malagoli M, Takahashi H. 2019. Sulfur nutrition: impacts on plant development, metabolism, and stress responses. *Journal of Experimental Botany* 70(16): 4069-4073.
- Kumar V, Pandita S, Sidhu GPS, Sharma A, Khanna K, Kaur P, Bali AS, Setia R. 2021. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: a comprehensive review. *Chemosphere* 262: 127810.
- Li Q, Chen HH, Qi YP, Ye X, Yang LT, Huang ZR, Chen LS. 2019. Excess copper effects on growth, uptake of water and nutrients, carbohydrates, and PSII photochemistry revealed by OJIP transients in Citrus seedlings. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 30188-30205.
- Liu J, Lu S, Liu C, Hou D. 2022. Nutrient reallocation between stem and leaf drives grazed grassland degradation in inner Mongolia, China. *BMC Plant Biology* 22(505).
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira A. 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Piracicaba (SP): Potafos.
- Marques DM, Silva AB, Mantovani JR, Pereira DS, Souza TC. 2018. Growth and physiological responses of tree species (*Hymenaea courbaril* L., *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. and *Myroxylon peruiferum* L. F.) exposed to different copper concentrations in the soil. *Revista Árvore* 42(2): e420202.
- Marschner P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. New York (US): Elsevier. 651p.

- Martias, Fatria D, Siregar AF, Praptana RH, Kasno A, Yufdy MP, Riska, Indriyani NLP, Affandi, Budiyaniti T, Hadiati S, Mansyah E, Muas Y, Jumjunidang, Istianto M, Mulyono D, Cempaka IG, Dewi T, Supriyo A, Nuryanto B. 2024. Critical Concentration of Zinc for Increasing Production and Quality of Mangosteen Fruit in West Sumatera, Indonesia. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 93(11): 2767-2786.
- Menegatti RD, Navroski MC, Guollo K, Fior CS, Souza AG, Possenti JC. 2017. Formação de mudas de guatambu em substrato com hidrogel e fertilizante de liberação controlada. *Revista ESPACIOS* 38(22): 35.
- Mews CL, Sousa JRL, Azevedo GTOS, Souza AM. 2015. Efeito do Hidrogel e Ureia na Produção de Mudas de *Handroanthus ochraceus* (Cham.) Mattos. *Floresta e Ambiente* 22(1): 107-116.
- Monteiro-Neto JLL, Araújo WF, Chagas EA, Siqueira RHS, Chagas PC, Silva ES. 2020. Slow-release fertilizer and hydrogel on the initial growth of camu-camu under different water conditions in a Savannah soil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 15(3): e8139.
- Navroski MC, Araújo MM, Cunha FS, Berghetti ALP, Pereira MO. 2016. Redução da adubação e melhoria das características do substrato com o uso do hidrogel na produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Ciência Florestal* 26(4): 1155-1165.
- Oliveira FN, Morsch L, Moura-Bueno JM, Tassinari A, Trentin E, Marques ACR, Andreolli T, Dias BG, Tabaldi LA, Brunetto G. 2025. Critical Levels of Copper, Zinc, and Manganese Toxicity in Soil and Tissues of Plants That Cohabit Vineyards in the Pampa Biome. *Horticulturae* 11(7).
- Patra SK, Poddar R, Brestic M, Acharjee PU, Bhattacharya P, Sengupta S, Pal P, Bam N, Biswas B, Barek V, Ondrisik P, Skalicky M, Hossain A. 2022. Prospects of Hydrogels in Agriculture for Enhancing Crop and Water Productivity under Water Deficit Condition. *International Journal of Polymer Science* 2022 (2): 1-15.
- Rai S, Singh PK, Mankotia S, Swain J, Satbhai SB. 2021. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress* 1: 100008.
- Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SB-CS-CQFS. 2004. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre (RS): Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. 394p.
- Shah IH, Jinhui W, LI X, Hameed MK, Manzoor MA, Li P, Zhang Y, Niu Q, Chang L. 2024. Exploring the role of nitrogen and potassium in photosynthesis implications for sugar: Accumulation and translocation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 327: 112832.
- Singh A, Hidangmayum A, Tiwari P, Kumar V, Singh BN, Dwivedi P. 2022. How the soil nitrogen nutrient promotes plant growth – a critical assessment. In: Singh HB, Vaishnav A (ed). *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering*. Amsterdã: Elsevier, p 99–118.
- Taiz L, Zeiger E. 2009. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed. 819p.
- Tang R-J, Luan S. 2017. Regulation of calcium and magnesium homeostasis in plants: from transporters to signaling network. *Current Opinion in Plant Biology* 39: 97-105.
- Tomášková I, Resnerová K, Trombik J, Bláha J, Pastierovič F, Macků J. 2023. Potential of hydrogel treatment in forest regeneration: a global review of benefits and limitations. *Frontiers in Forests and Global Change* 6: 1251041.
- Tripathi DK, Singh S, Gaur S, Singh S, Yadav V, Liu S, Singh VP, Sharma S, Srivastava P, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK, Sahi S. 2018. Acquisition and Homeostasis of Iron in Higher Plants and Their Probable Role in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Environmental Science* 5: 86.
- Uthman QO, Kadyampakeni DM, Nkedi-Kizza P, Kwakye S, Barlas NT. 2022. Boron, Manganese, and Zinc Sorption and Leaf Uptake on Citrus Cultivated on a Sandy Soil. *Plants* 11: 638.
- Veazie P, Chen H, Hicks K, Holley J, Eylands N, Mattson N, Boldt J, Brewer D, Lopez R, Whipker BE. 2024. A Data-driven Approach for Generating Leaf Tissue Nutrient Interpretation Ranges for Greenhouse Lettuce. *HortScience* 9(3): 267-277.

Yue K, Ni X, Fornara DA, Peng Y, Liao S, Tan S, Wang D, Wu F, Yang Y. 2021. Dynamics of Calcium, Magnesium, and Manganese During Litter Decomposition in Alpine Forest Aquatic and Terrestrial Ecosystems. *Ecosystems* 24: 516-529.

Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences* 14: 7370-7390.

Wdowiak A, Podgórska A, Szal B. 2024. Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. *Acta Physiologiae Plantarum* 46: 108.

Zenda T, Liu S, Dong A, Duan H. 2021. Revisiting Sulphur—The Once Neglected Nutrient: It's Roles in Plant Growth, Metabolism, Stress Tolerance and Crop Production. *Agriculture* 11: 626.

Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* 171(9): 656-669.