

Artigos

Redução do volume de irrigação de plantio de eucalipto e seus impactos operacionais

Reduction of irrigation volume for eucalyptus plantations and its operational impacts

Camila Macedo Teixeira^I 

Carla Américo^I 

Lausanne Soraya de Almeida^{II} 

Kenia Michele de Quadros^{III} 

José Mauro Santana da Silva^I 

^IUniversidade Federal de São Carlos , Sorocaba, SP, Brasil

^{II}Universidade Federal de Viçosa , Viçosa, MG, Brasil

^{III}Universidade Federal de Rondônia , Rondônia, RO, Brasil

RESUMO

O mercado florestal tem se expandido globalmente, cada vez mais nos últimos anos e, com este crescimento, surgiram também os desafios de aumento de produtividade e competitividade entre as empresas para formação florestal. Diante deste cenário, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de redução no volume de água de irrigação das atividades de silvicultura de eucalipto. O estudo analisou as operações de plantio irrigado e plantio convencional (plantio desvinculado da irrigação) e foi dividido em cinco principais tratamentos: T0 (sem irrigação), T1 (uma irrigação de 250 mL/planta), T2 (uma irrigação de 4 L/planta), T3 (duas irrigações, sendo a primeira de 250 mL/planta e segunda de 4L/planta) e T4 (duas irrigações de 4 L/planta). Os experimentos foram conduzidos nos municípios de Itirapina, Itatinga e São José dos Campos, na região de São Paulo e os clones utilizados para o plantio não apresentam nenhum tipo de resistência ao déficit hídrico. Os resultados evidenciaram o rendimento operacional dos diferentes tratamentos e foi verificada diferença significativa entre T1 e T3, como também entre T2 e T4, ou seja, existe potencial de ganho de rendimento operacional a partir da redução do volume de água durante o plantio para 250 mL/planta na primeira irrigação, mantendo a necessidade de uma segunda irrigação para não haver impacto de mortalidade no plantio. Com isso, foram verificadas oportunidades de redução de volume de água de irrigação, com ganhos significativos em rendimento e redução de estrutura operacional.

Palavras-chave: Produtividade; Silvicultura; Eficiência hídrica; Hidrogel; Rendimento operacional

ABSTRACT

The forestry market has expanded throughout the world significantly in recent years. Because of this growth, the challenges of increasing productivity and competitiveness among companies for forestry. Therefore, this project aims to assess the potential for reducing the volume of irrigation water from eucalyptus forestry activities. The study analyzed the operations of irrigated planting and conventional planting (planting and irrigation independent) and was divided into five main treatments: T0 (no irrigation), T1 (an irrigation of 250 mL/plant), T2 (an irrigation of 4 L/ plant), T3 (two irrigations, the first being 250 mL/plant and second 4 L/plant) and T4 (two irrigations of 4 L/plant). The experiments were executed in Itirapina, Itatinga and São José dos Campos, state of São Paulo and genetical material does not present any resistance to water deficit. Significant difference was verified between T1 and T3 and T2 and T4, that is, there is potential for gain in operational yield from the reduction in the volume of water during planting to 250 mL/plant in first irrigation, maintaining the need for a second irrigation so as not to have a mortality impact on the planting. Therefore, opportunities to reduce the volume of irrigation water were verified, with significant gains in yield and reduction in the operational structure.

Keywords: Productivity; Silviculture; Water efficiency; Hydrogel; Operational efficiency

1 INTRODUÇÃO

Ao final de 2021, o Brasil encerrou o ano com 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo grande parte representada pelo eucalipto (75,8%) em detrimento de outras espécies, como pinus (19,4%) (IBÁ, 2022). Sua distribuição ao longo do país está mais concentrada na região Sudeste (54,2%), seguida por Nordeste (16,4%), Centro-Oeste (12,2%), Sul (11,8%) e região Norte (5,5%), embora já seja de conhecimento de mercado as expansões previstas e em andamento de indústrias de celulose e, conseqüentemente, aumento de base florestal na região Centro-Oeste (ABRAF, 2013; Baratelli *et al.*, 2021).

O uso e expansão acelerado do cultivo de eucalipto se dá pela sua versatilidade de uso e rápido crescimento, o que viabiliza sua utilização para celulose, madeira serrada, energia, entre outros (Amorim *et al.*, 2021). A partir de todas as suas características morfológicas de rápido crescimento e produção de madeira, o eucalipto é a cultura florestal mais representativa atualmente no Brasil quando se trata de floresta plantada. Em comparação com culturas agrícolas, suas exigências trato-culturais são bem mais brandas e sua dependência de água também é baixa, sendo uma espécie tolerante a períodos críticos de disponibilidade hídrica (Costa *et al.*, 2019).

Diante de sua amplitude comercial, o cultivo de florestas de eucalipto apresenta seus desafios operacionais, visando ganhos em qualidade, produtividade e rendimento, a fim de se tornar uma cultura atrativa para as economias de mercado.

Em regiões como o estado de São Paulo, aplicam-se em média duas irrigações semimecanizadas para garantia da sobrevivência do plantio de eucalipto. O formato de irrigação operacional é também denominado sistema semimecanizado, que consiste em uma carreta com tanque de água tracionada por um trator agrícola. Neste tanque, são acopladas mangueiras ligadas às matracas de plantio, no caso do plantio irrigado e/ou matracas de irrigação no caso da atividade convencional (plantio desvinculado à atividade de irrigação). Esta operação normalmente é realizada por cinco até sete colaboradores, de acordo com a estrutura de mangueiras disposta no tanque (Guerra, 2019).

Conforme já verificado por Bernardino *et al.* (2019), a taxa de sobrevivência das mudas de eucalipto é diretamente proporcional à disponibilidade de água em seus primeiros meses de vida, atingindo mais de 85% de sobrevivência quando comparado com mudas de eucalipto que não foram expostas à quantidade de água adequada, por volta de 65% de sobrevivência apenas.

É clara a importância da irrigação das mudas de espécies florestais durante o plantio, principalmente em seus primeiros dias, já que nesta fase as mudas ainda possuem sistema radicular pouco desenvolvido e alto metabolismo, influenciando diretamente em seu desenvolvimento e sobrevivência. Além disso, também é uma das operações de maior custo de implantação florestal de eucalipto, deixando os plantios comerciais mais caros em períodos de seca, quando a necessidade de irrigação é maior (Buzetto *et al.*, 2002).

Diante desse cenário, empresas tem buscado alternativas para viabilizar economicamente o plantio do eucalipto em períodos mais secos do ano e os polímeros de hidrogel têm sido uma das alternativas exploradas para aumentar a sobrevivência da cultura nestas épocas (Neves *et al.*, 2022). Esse tipo de polímero auxilia na viabilidade do

plantio ao longo de todo o ano, a partir de suas propriedades químicas que aumentam a retenção de água e sua liberação gradativa para a planta, fazendo com que a produção de floresta plantada de eucalipto seja menos dependente das variações climáticas observadas mês a mês (Felippe *et al.*, 2020; De Carvalho *et al.*, 2022).

Todo o processo de irrigação da silvicultura comercial é feito a partir do uso de hidrogel, material com propriedades físico-químicas que permitem que a disponibilidade de água no solo seja estendida, potencializando o aproveitamento de água no solo e, conseqüentemente, reduzindo o número de intervenções e o custo com esta atividade (Lopes *et al.*, 2010).

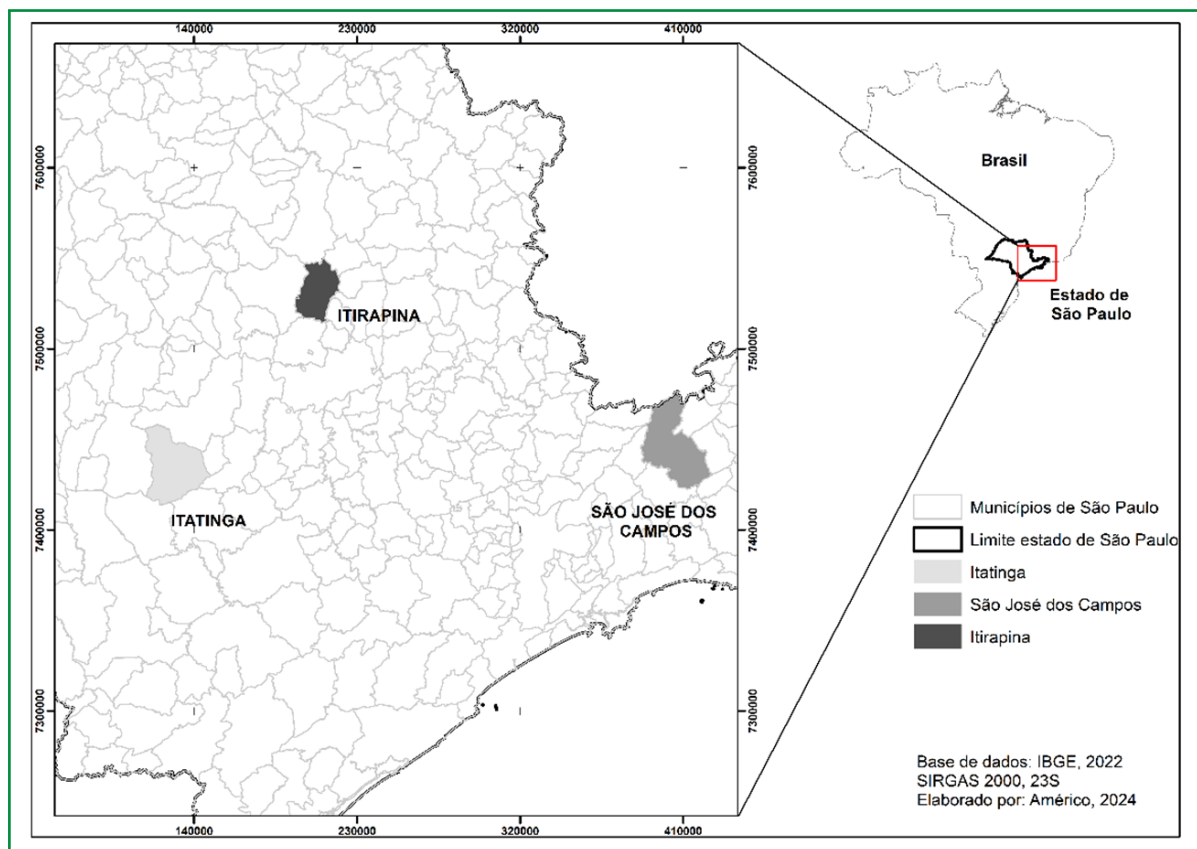
Com isso, o estudo visa analisar de forma comparativa o uso de diferentes tipos de metodologia operacional de irrigação de plantio de eucalipto e determinar seus principais ganhos, pontos de melhoria, desafios de operacionalização e potenciais impactos na sua otimização do processo de irrigação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende três fazendas florestais, localizadas nos municípios de Itirapina, Itatinga e São José dos Campos, que compõem uma das mais importantes regiões produtoras de madeira do estado de São Paulo (Figura 1). São José dos Campos pertence ao bioma Mata Atlântica, enquanto Itirapina e Itatinga pertencem a uma área de transição entre Mata Atlântica e Cerrado (IBGE, 2019). Em relação à altitude, os municípios de Itirapina, Itatinga e São José dos Campos, estão a 801, 714 e 738 m, respectivamente. (Alvares *et al.*, 2013).

O clima predominante, considerando o sistema de Köppen é do tipo Cwa, para o município de Itirapina, que se caracteriza como subtropical de altitude com precipitação no verão e seca no inverno (Alvares *et al.*, 2013) e do tipo Cfa para Itatinga e São José dos Campos, que se caracteriza por um clima subtropical, com verão quente. A pluviosidade média anual é de 1648 mm em Itirapina, 1350 mm em Itatinga e 1329 mm em São José dos Campos, conforme dados do Climate-Data (2024).

Figura 1 – Localização dos municípios Itirapina, Itatinga e São José dos Campos, no estado de São Paulo, Brasil



Fonte: Autores (2024)

O experimento foi conduzido nos três municípios no período de abril até dezembro de 2022. O estudo comparou diferentes volumes de água utilizados na irrigação, considerando o plantio irrigado, ou seja, realizado na mesma operação de plantio e o plantio convencional, em que o plantio e a irrigação ocorrem em operações separadas (Figura 2).

O experimento foi conduzido para avaliar a eficácia do uso de hidrogel combinado com diferentes regimes de irrigação em plantios de eucalipto, visando otimizar o consumo de água e reduzir a mortalidade das mudas em regiões com déficit hídrico.

Nestes dois métodos de plantio, aplicou-se 250 mL de volume de irrigação e 4 L por planta, para comparar a eficácia no volume de irrigação. Todo o processo de irrigação fez uso de hidrogel, conforme recomendação para plantio comercial.

Figura 2 – Tipos de plantio e irrigação, A - plantio irrigado com bomba costal (replantio) e B - plantio irrigado com tanque de irrigação



Fonte: Autores (2024)

O hidrogel utilizado foi o Polim-Agri PP, próprio para plantio de culturas florestais e agrícolas (Figura 3A). Sua recomendação para eucalipto é de 1 a 2,5 g por litro de água, formando uma textura gelatinosa com pequenos grânulos (Figura 3E). Sua composição básica é de um polímero constituído de monômeros de carbono ligados por pontes de hidrogênio, dando a capacidade de absorção de água pelas reações eletrolíticas do composto, de acordo com Rocha (2019).

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, permitindo a avaliação dos diferentes tratamentos em condições semelhantes, todos com o uso de hidrogel, sem comprometer a sobrevivência e o desenvolvimento das plantas. Todos os quatro tratamentos foram aplicados em cada tipo de plantio/irrigação.

O experimento foi dividido em T0 (Testemunha), sem irrigação; T1, com uma irrigação de 250 mL; T2, com duas irrigações de 250 mL cada e uma irrigação convencional de 4 L; T3, com uma irrigação convencional de 4 L; e T4, com duas irrigações convencionais de 4 L cada. Foram avaliadas a mortalidade das mudas e o rendimento operacional no período de 30 dias após o plantio, além da precipitação total registrada no mesmo intervalo. Os dados de temperatura e precipitação durante o experimento foram coletados no MeteoBlue (2022).

Figura 3 – (A) Produto de hidrogel utilizado no experimento; (B) Mistura do hidrogel; (C) Detalhe dos grânulos de hidrogel; (D) Controle de dose do hidrogel (1g/L); (E) Recipiente com o hidrogel já misturado



Fonte: Autores (2024)

Os volumes e formas de irrigação foram definidos com base nas necessidades hídricas do eucalipto e nas práticas recomendadas para o uso de hidrogel, visando reduzir o consumo de água.

O estudo foi desenvolvido em três fases. Na Fase I, realizou-se a validação da metodologia em Itirapina e a análise de impacto na sobrevivência das mudas em uma área de 0,5 ha, com 64 mudas por tratamento, sem a aplicação de irrigações duplas. A Fase II foi executada no município de Itatinga, após a validação inicial, e o foco foi o rendimento operacional em uma área de 17,37 ha, com 2.880 mudas por tratamento. Finalmente, a Fase III foi desenvolvida em São José dos Campos, onde houve a validação final e ampliação dos testes em uma área de 155 ha, visando confirmar os resultados de rendimento operacional e mortalidade das mudas obtidos nas fases anteriores.

O rendimento operacional da atividade foi medido por meio de metodologia de tempos e movimentos, a partir da observação de cada etapa da operação e divisão entre tempo produtivo e não produtivo. As medições foram feitas por equipe com o uso de

um cronômetro de *smartphone* para medir o tempo de cada atividade executada, desde as paradas para refeição, abastecimento de água, manobras e o plantio e irrigação. A amostragem ocorreu ao longo de todo o plantio, até a sua finalização, variando de acordo com o tamanho da área plantada. Com isso, foi estimada a capacidade em hectare/hora para comparações posteriores.

As equipes avaliadas trabalham em turno administrativo das 07:00 às 16:40 e foram compostas de 20 ajudantes de plantio, 5 ajudantes de irrigação, 1 operador e 1 motorista para execução da operação.

Para os tratamentos com 4 L de água, foram utilizados tanques de irrigação de capacidade de 6.000L, com matracas de irrigação de alumínio instaladas com mangueiras de até 7 metros para manuseio dos ajudantes e o implemento completo ficou vinculado a tratores de 125 cv de potência. Para os tratamentos com 250 mL de água, utilizou-se bomba costal com capacidade de 20 L e matraca de alumínio de plantio com acoplamento na bomba costal.

A partir da coleta de dados, foi realizada análise estatística por meio do *software* estatístico R. Após avaliar a homogeneidade das variâncias, a normalidade e a independência dos resíduos/observações, os dados foram analisados por meio da Análise de Variância (ANOVA) e as médias foram comparadas com o Teste de Tukey a 5% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da Fase I confirmaram uma baixa taxa de mortalidade das plantas, permitindo a continuidade dos testes nas Fases II e III. Na primeira etapa, não foram observadas diferenças significativas na mortalidade de mudas entre os tratamentos T1 e T3 ($\alpha=0,05$), o que reforça a viabilidade da redução do volume de irrigação. Durante o período de teste, a precipitação foi baixa e não atingiu a fazenda, enquanto os picos de temperatura variaram entre 29°C e 30°C, com média de velocidade do vento de 15 km/h (Tabela 1).

Observa-se que as mudas sem irrigação (T0) apresentaram a maior taxa de mortalidade (7,81%), enquanto tratamentos com volumes maiores de água, como T3 (4 L/planta), resultaram em 0% de mortalidade. Isso indica que mesmo pequenas quantidades de irrigação, como no tratamento T1 (0,25 L/planta), reduzem a mortalidade, mas ter uma disponibilidade adequada de água é essencial para reduzir cada vez mais a mortalidade (Tabela 1). Na Fase II foram introduzidos os tratamentos T2 e T4, e observa-se que a mortalidade no controle (T0) aumentou para 8,29%, sugerindo condições mais adversas ou exigências maiores das mudas em estágios mais avançados. Os tratamentos com volumes elevados de água (T2 e T3) mantiveram baixas taxas de mortalidade, evidenciando a importância da irrigação consistente.

Embora o tratamento T4 (4,00 + 4,00 L/planta) tenha reduzido a mortalidade em relação ao controle, ainda apresentou valores superiores aos outros tratamentos, indicando que outros fatores podem influenciar a sobrevivência das mudas além do volume de água fornecido, porém não houve diferença significativa entre os tratamentos ($\alpha = 0,05$). Observou-se interferência de precipitação de 46,2 mm acumulados entre o dia 30/05/2022 e 01/06/2022, após 6 dias de plantio, já os picos de temperatura não passaram dos 25°C (Tabela 1).

Tabela 1 – Taxa de mortalidade (%) observada para os diferentes tratamentos nas Fases I e II

FASE I				FASE II			
Tratamento	Volume de água (L/planta)	Mudas mortas (und)	Taxa de mortalidade (%)	Tratamento	Volume de água (L/planta)	Mudas mortas (und)	Taxa de mortalidade (%)
T0	0	5	7,81 ^a	T0	0	239	8,29 ^a
T1	0,25	2	1,02	T1	0,25	19	0,65
				T2	0,25 + 4,00	6	0,2
T3	4	0	0	T3	4	4	0,14
				T4	4,00 + 4,00	37	1,28

Fonte: Autores (2024)

Em que: T0 – testemunha sem irrigação; T1 – uma irrigação de 250 mL; T2 – duas irrigações (1 250 mL + 4 L); T3 – uma irrigação de 4 L; T4 – duas irrigações de 4 L; Teste Tukey ao nível de significância de 5%.

Na Fase III do estudo, intensificou-se a amostragem para análise de mortalidade e rendimento, resultando em dados distintos em comparação com as fases anteriores. Nos dados coletados em junho, o tratamento sem irrigação (T0) apresentou uma taxa de mortalidade alta, com 50,1%, indicando a necessidade de irrigação para a sobrevivência das mudas. Já os tratamentos com irrigação, especialmente T1 (0,25 L/planta), T2 (0,25 + 4 L/planta) e T3 (4 L/planta), mantiveram as taxas de mortalidade abaixo de 2,5%, evidenciando a eficácia da irrigação na redução da mortalidade das mudas (Tabela 2).

Observou-se uma perda média de 1,6% na mortalidade do tratamento T1 em relação aos tratamentos T2, T3 e T4 ($\alpha=0,05$), durante o experimento iniciado em junho. Os picos de temperatura atingiram 25°C, com uma média de 23,6°C no mês do experimento, e houve intervenção de 2,5 mm de chuva entre os dias 18 e 21 de junho, após seis dias de plantio (Tabela 2).

Tabela 2 – Taxa de mortalidade (%) observada para os diferentes tratamentos na Fase III, durante os meses de junho e agosto

FASE III - junho				FASE III - agosto			
Tratamento	Volume de água (L/planta)	Mudas mortas (und)	Taxa de mortalidade (%)	Tratamento	Volume de água (L/planta)	Mudas mortas (und)	Taxa de mortalidade (%)
T0	0	3.964	50,1 ^a	T0	0	66.287	30,2 ^a
T1	0,25	97	1,23	T1	0,25	47.631	21,7 ^a
T2	0,25 + 4,00	160	2,02	T2	0,25 + 4,00	8.011	3,65
T3	4	154	1,94	T3	4	20.743	9,45 ^a
T4	4,00 + 4,00	182	2,23	T4	4,00 + 4,00	6.629	3,02

Fonte: Autores (2024)

Em que: T0 – testemunha sem irrigação; T1 – uma irrigação de 250 mL; T2 – duas irrigações (1 250 mL + 4 L); T3 – uma irrigação de 4 L; T4 – duas irrigações de 4 L; Teste Tukey ao nível de significância de 5%.

Em agosto, a mortalidade teve aumento em todos os tratamentos, sugerindo que as condições ambientais ou as necessidades das mudas mudaram. Essa nova medição revelou uma perda média de 20% na mortalidade para o tratamento T1 em

comparação com os tratamentos T2, T3 e T4 ($\alpha=0,05$). Durante este período, os picos de temperatura chegaram a 30°C, com uma média de 25,3°C.

Apesar de ter ocorrido precipitação entre os dias 19 e 21 de agosto, as chuvas foram isoladas e não afetaram a área do experimento, resultando em nenhuma intervenção de chuva neste estudo (Tabela 2). O controle (T0) atingiu 30,2% e mesmo os tratamentos irrigados apresentaram taxas elevadas, com o tratamento T3 (4 L/planta) alcançando 9,45%. Isso destaca a importância de ajustar o volume de água e os manejos conforme as condições sazonais para mitigar o aumento da mortalidade em períodos mais críticos.

Além de todo o processo morfológico da muda de eucalipto, há também a influência dos fatores externos que facilitam ou dificultam a disponibilidade de umidade e água no ambiente, como temperatura, precipitação e tipo de solo.

Para o estado de São Paulo, tem-se características que transitam entre o clima subtropical e tropical, atingindo de 12°C a 25°C médios de acordo com as regiões e uma alta variação nas características de relevo e solo. Além disso, para a região tem-se os maiores picos de chuva entre dezembro e fevereiro e, ao final de abril, a intensidade pluviométrica reduz com a chegada do outono. A média do estado chega a 1500 mm, atingindo picos de 3000 mm em áreas próximas a Serra do Mar e menos de 1000 mm em regiões mais à oeste (Novais *et al.*, 2022).

Vale destacar também que os solos do estado de São Paulo são predominantemente Latossolos e possuem teor de argila entre 15% a 80%, o que facilita a retenção e disponibilidade de água no solo. Para as localidades onde os experimentos foram instalados, este percentual atingiu média de 40% (Embrapa, 2013). Ou seja, nos intervalos do experimento, trabalhou-se com picos de temperatura entre 25°C até 30°C, baixa pluviosidade (período seco) e solos parcialmente argilosos.

Nessa condição, embora tenha ocorrido intervenção de chuva em algumas repetições, estas ocorreram após 6 (seis) dias de plantio, mostrando a maior durabilidade das mudas sem a necessidade de irrigação (no modelo convencional,

uma segunda intervenção já é necessária 24h depois do plantio e 1ª irrigação). Todavia, a redução do volume de água em conjunto com a aplicação via plantio irrigado com hidrogel permitiram manter a disponibilidade de água para a muda de eucalipto, uma vez que a água é incorporada junto à operação de plantio, ficando abaixo da terra junto ao substrato, impedindo a perda de água que ocorre no plantio convencional, no qual a água é aplicada acima do plantio com a muda já plantada (Figura 7) (Vicente *et al.*, 2015).

A Tabela 3 compara os dois tratamentos de plantio em relação ao uso de água. No plantio convencional, o consumo total de água aumentou significativamente (11.040 litros), pois foram utilizados 4 litros/planta por irrigação. No plantio irrigado, a primeira irrigação requer apenas 0,25 litros por planta, e o consumo total é reduzido pela metade (5.865 litros). Apesar da redução, a densidade de plantio permaneceu constante, indicando que a eficiência hídrica pode ser alcançada sem afetar a área plantada.

Os resultados para o rendimento operacional foram promissores, uma vez que, a partir da conjugação das atividades, o rendimento se manteve em linha com o esperado para as operações de plantio, o que mostra potencial de redução com custos da atividade de irrigação para a primeira irrigação.

Tabela 3 – Consumo de Água por tratamento de plantio convencional e irrigado

Tratamento	Volume de água (L/planta)	Hectare operacional (plantas)	1º irrigação (L totais)	2º irrigação (L totais)	Volume de água total (L totais)
Plantio convencional	4,00	1.380	5.520	5.520	11.040
Plantio irrigado	0,25	1.380	345	5.520	5.865

Fonte: Autores (2024)

O rendimento médio com o plantio irrigado com gel foi de 1,30 ha/colaborador/dia, enquanto o plantio convencional apresentou rendimento médio de 0,70 ha/

colaborador/dia, 42% menor. O comparativo entre os tratamentos T1 e T2 com os tratamentos T3 e T4 foram significativos, o que evidencia a diferença de rendimento entre o método de plantio irrigado e plantio convencional (Tabela 4).

Tabela 4 – Comparativo de rendimento operacional entre o plantio irrigado e plantio convencional, para diferentes tratamentos

Tratamento	Número de árvores plantadas	Rendimento
T0	1200	1,41
T1	1200	1,33 ^a
T2	1200	1,23 ^b
T3	1200	0,70 ^a
T4	1200	0,72 ^b

Fonte: Autores (2024)

Em que: T0 – testemunha sem irrigação; T1 – uma irrigação de 250 mL; T2 – duas irrigações (1 250 mL + 4 L); T3 – uma irrigação de 4 L; T4 – duas irrigações de 4 L; Teste Tukey de 5% de significância para rendimento operacional.

Além do rendimento, o fato de realizar atividades desvinculadas reflete diretamente na necessidade de maior mão-de-obra para sua execução, uma vez que o plantio necessita que a primeira irrigação seja feita imediatamente após o plantio para que não haja perdas de qualidade e mortalidade das mudas. Por esta razão, a realização do plantio irrigado apresenta, além de vantagens diretas de rendimento em uma única atividade, também possibilita a otimização de mão-de-obra e, consequentemente, redução dos custos operacionais (Silva *et al.*, 2004; Simões *et al.*, 2012), além de suportar de forma significativa as grandes dificuldades de formação de equipes manuais e trabalhadores rurais pela baixa disponibilidade e alta competitividade no mercado (Soler *et al.*, 2019).

Ao observar os potenciais em redução operacional com a otimização da atividade, o principal reflexo se dá pela redução da estrutura de irrigação necessária, uma vez que, com menor volume de água, os caminhões pipa e seus tanques podem ser em menor número ou reaproveitados para outras atividades, já que a necessidade

de abastecimento ao longo do dia será menor ou menor quantidade de caminhões/tanques.

A Tabela 5 analisa a otimização do uso de caminhões-pipa na irrigação, destacando a produtividade e o consumo de água tratada. O T0 sem irrigação tem a maior produtividade (1,41 ha/h) e não requer fornecimento adicional. T1 (irrigação de 250 mL) e T2 (2 irrigações (250 mL + 4 litros)) foram um pouco menos produtivos e necessitaram de menor oferta (0,22 e 3,41, respectivamente). T3 (1 irrigação de 4 L) e T4 (2 irrigações de 4 L) são os menos produtivos (0,70 e 0,72 ha/h), requerem maior abastecimento de água (1,83 e 3,76) e isso indica baixa eficiência de utilização.

Tabela 5 – Potencial de otimização de estrutura de caminhão/tanque pipa pela redução no consumo de água durante a irrigação de plantio a partir do reflexo da quantidade de abastecimentos por dia produtivo

Tratamentos	Produtividade (ha/h)	Horas trabalhadas	Produção/ dia	Árvores/ hectare	Árvores totais	1ª e 2ª irrigação (L/planta)	Irrigação total (L)	Pipa (Capacidade L)	Abaste- cimentos (quantidade)
T0	1,41	6,80	9,59	1.200	11.506	–	–	12.500	–
T1	1,33 ^a	6,80	9,04*	1.200	10.853	0,25	2.713	12.500	0,22a
T2	1,23 ^b	6,80	8,36**	1.200	10.037	4,25	42.656	12.500	3,41
T3	0,70 ^a	6,80	4,76*	1.200	5.712	4,00	22.842	12.500	1,83a
T4	0,72 ^b	6,80	4,90**	1.200	5.875	8,00	47.002	12.500	3,76

Fonte: Autores (2024)

Legenda: T0 – testemunha sem irrigação; T1 – uma irrigação de 250 mL; T2 – duas irrigações (1 250 mL + 4 L); T3 – uma irrigação de 4 L; T4 – duas irrigações de 4 L; Teste Tukey de 5% de significância para abastecimento.

A atividade de irrigação é uma das atividades mais caras dentre os processos silviculturais necessários para a produção de eucalipto, sendo uma das operações onde mais se busca formas de otimização para ganhos em custos de produção florestal (Brainer, 2021). Por este motivo, é importante reforçar que a irrigação tem maior influência significativa no início do ciclo do eucalipto, ainda nos primeiros meses de idade da muda, uma vez que seu metabolismo é mais acelerado. Após o estabelecimento e rustificação do plantio, irrigações realizadas em florestas acima de

um ano não apresentam resultados significativos no incremento de madeira (Santos *et al.*, 2020).

Os potenciais de otimização de irrigação a partir da redução do volume de água com o plantio irrigado na primeira irrigação para 0,25 l apresentaram resultados positivos em relação ao plantio convencional, porém reforçaram a necessidade de, pelo menos, duas irrigações em período mais quente para São Paulo que, mesmo diante de suas características climatológicas favoráveis ao desenvolvimento do eucalipto, com temperaturas médias de 25°C, solos mais argilosos (Latosolos) e precipitação média anual de 1.300 mm, apresentam picos desfavoráveis de altas temperaturas de 30°C e baixa precipitação no segundo e terceiro trimestre do ano.

Com isso, os ganhos operacionais são significativos para a redução do volume de água na primeira irrigação de plantio de eucalipto, porém ainda é preciso explorar novas tecnologias e técnicas para reduzir a intensidade de irrigação (apenas uma irrigação diante da média de duas irrigações necessárias atualmente para o estado de São Paulo). Assim, é possível ter ganhos e otimizações consideráveis de redução do uso de estrutura e mão-de-obra.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o tratamento T3 demonstrou potencial de eficiência operacional, principalmente ao reduzir o volume de água utilizado na primeira irrigação, mantendo-se a segunda irrigação de forma convencional. Esse tratamento apresentou desempenho superior em termos de mortalidade e rendimento quando comparado ao tratamento T4, sugerindo que é possível otimizar o uso da água sem comprometer a saúde e o desenvolvimento das plantas.

Por outro lado, os tratamentos que utilizaram apenas uma única irrigação mostraram maiores taxas de mortalidade das mudas, indicando que a redução da irrigação pode comprometer a sobrevivência das plantas.

Esses resultados ressaltam a necessidade de outros estudos mais direcionados, especialmente no desenvolvimento de novas tecnologias e práticas de manejo que possam promover a redução do número de irrigações sem desconsiderar a eficiência produtiva e a saúde das plantas. É fundamental que se considere ainda as características climatológicas, a variabilidade pluviométrica, bem como as condições específicas de retenção de água e solo de cada local, garantindo que as soluções propostas sejam adaptadas e eficazes para diferentes cenários florestais.

Assim, este estudo reforça a importância de equilibrar o uso de recursos hídricos com técnicas sustentáveis e inovadoras para garantir a viabilidade de tais estratégias considerando a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ABRAF - **Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**. Anuário estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011. 2013.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AMORIM, V. da S. S.; MONTEIRO, K. M. S.; SOUSA, G. O.; DAMASCENA, J. F.; PEREIRA, J. A.; MORAES, W. dos S. Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. Research, **Society and Development**, v. 10, n. 11, e318101119604, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i11.19604.
- BARATELLI, A. E. S.; LUIZ, L.F.; de MEDEIROS, G.N. A expansão do eucalipto e a dinâmica da pecuária no município de Três Lagoas/MS. Pegada – **A Revista da Geografia do Trabalho**, v. 21, n. 3, p. 161–182, 2021. DOI: 10.33026/peg.v21i3.8249
- BRAINER, M. S. C. P. **Silvicultura. Banco do Nordeste do Brasil**, n. 154, 2021.
- BERNARDINO, L. T.; BONOMO, R.; de SOUZA, J.M. Desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 1, p. 3169-3179, 2019. DOI: 10.7127/rbai.v13n100833
- BUZETTO, F. A.; BIZON, J. M. C.; SEIXAS, F. Avaliação de polímero adsorvente à base de acrilamida no fornecimento de água para mudas de *Eucalyptus urophylla* em pós-plantio. **Circular Técnica IPEF**, n. 195, p. 1-5, 2002 Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/>. Acesso em: 04 out. 2024.

CLIMATE-DATA. **Clima: Itirapina, Itatinga e São José dos Campos**. Disponível em: <http://pt.climate-data.org/location>. Acesso em 3 de dezembro de 2022.

COSTA, B.; OLIVEIRA, M.L. Florestas plantadas de eucalipto no Brasil: uma cultura nociva aos recursos hídricos? **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, n. 36, p. 123-141, 2019. DOI: 10.18623/rvd.v16i36.1671

DE CARVALHO, J. M.; CALDEIRA, D.S.A.; VIEIRA, C. L.; da SILVA, G.V.B.; ROCHA, R.R.; de CAMPOS, I. Crescimento inicial de mudas de *Sapindus saponária* com uso de hidrogel e lâminas de água. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 1, 2022. DOI: 10.36560/15120221489

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3, 2013.

FELIPPE, D., NAVROSKI, M.C.; de AGUIAR, N.S.; PEREIRA, M. DE O.; MORAES, C.; AMARAL, M. Crescimento, sobrevivência e trocas gasosas de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden submetidas a regimes de irrigação e aplicação de hidrogel. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 17, n. 40, p. 11-20, 2020. DOI: 10.18845/v17i40.4902

GUERRA, S. P. S., SOLER, R. R., SEREGHETTI, G. C., OGURI, G. An evaluation of the economics and productivity of fully mechanised tree seedling planting in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 81, n. 3, p. 281-284, 2019. DOI: 10.2989/20702620.2019.1615225

IBÁ - **Indústria Brasileira de Árvores**. Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores. Ano base 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas do Brasil. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomas.html>. Acesso em: 04 out. 2024.

LOPES, J. L. W. *et al.* Uso de hidrogel na sobrevivência de mudas de *Eucalyptus urograndis* produzidas com diferentes substratos e manejos hídricos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 217-224, 2010. DOI: 10.5902/198050981847

METEOBLUE. **MeteoBlue**. . Disponível em: <https://www.meteoblue.com>. Acesso em: 15 dez. 2022.

NEVES, O. S. C.; SAAD, J.C.C.; ANGELICO, T dos S. Retenção de água em substratos com hidrogel: influência das características do material e nível de adubação. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1751-1767, 2022. DOI: 10.5902/1980509843240

NOVAIS, G. T., GALVANI, E. Uma tipologia de classificação climática aplicada ao estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, v. 42, 2022. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.184630

ROCHA, I. G. da. Comportamento da condutividade elétrica do lixiviado em função de doses de hidrogel. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

SANTOS, P. M.; JUNIOR, J. A.; SENA, C. C.; DOMINGOS, M. V. H.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; BATTISTI, R.; SOUSA, J. M. F. Necessidade de se irrigar a fase inicial de floresta de Mogno-Africano no cerrado. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 41399-41409, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n6-615

SILVA, K. R.; MINETTI, L. J.; FIEDLER, N. C.; VENTUROLI, F.; MACHADO, E. G. B.; SOUZA, A. P. Custos e rendimentos operacionais de um plantio de eucalipto em região de cerrado. **Revista Árvore**, v. 28, 2004.

SIMÕES, D.; da SILVA, M.R. Desempenho operacional e custos de um trator na irrigação pós-plantio de eucalipto em campo. **Revista Ceres** – Engenharia Agrícola, 2012. DOI: 10.1590/S0034-737X2012000200003

SOLER, R. R.; GUERRA, S. P. S.; ESPERANCINI, M. S. T.; SEREGHETTI, G. C.; OGURI, G. Avaliação econômica da operação de plantio mecanizado de eucalipto em dois diferentes espaçamentos. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 34, n. 4, p. 462-470, 2019. DOI: 10.17224/EnergAgric.2019v34n4p462-470

VICENTE, M. R.; MENDES, A. A.; SILVA, N. F.; OLIVEIRA, F. R.; MOTTA, M.; LIMA, V. O. B. Uso de gel hidrorretentor associado à irrigação no plantio do eucalipto. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** - RBAI, v. 9, n. 5, p. 344-349, 2015. DOI: 10.7127/RBAI.V9N500332

Contribuição de Autoria

1 Camila Macedo Teixeira

Engenheira Florestal, Mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

<https://orcid.org/0000-0001-5864-6208> • camilamtxa@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Administração do projeto; Disponibilização de ferramentas; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Redação do manuscrito original; Escrita – revisão e edição

2 Carla Américo

Engenheira Florestal, Doutora em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

<https://orcid.org/0000-0002-3553-3929> • carla.americo@gmail.com

Contribuição: Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Escrita - revisão e edição

3 Lausanne Soraya de Almeida

Engenheira Florestal, Doutora em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Professora

<https://orcid.org/0000-0001-8689-580X> • lausannesoraya@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Supervisão; Escrita – revisão e edição

4 Kenia Michele de Quadros

Engenheira Florestal, Doutora em Engenharia Florestal, Professora

<https://orcid.org/0000-0003-0873-9582> • kenia.tronco@unir.br

Contribuição: Conceitualização; Metodologia

5 José Mauro Santana da Silva

Engenheiro Florestal, Doutor em Irrigação e Drenagem, Professor

<https://orcid.org/0000-0003-0662-4132> • josemauro@ufscar.br

Contribuição: Conceitualização; Supervisão; Validação de dados e experimento

Como citar este artigo

TEIXEIRA, C. M.; AMÉRICO, C.; ALMEIDA, L. S.; QUADROS, K. M.; SILVA, J. M. S. Redução do volume de irrigação de plantio de eucalipto e seus impactos operacionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 35, e84918, p. 1-19, 2025. DOI 10.5902/1980509884918. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509884918>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.

Declaração de Disponibilidade de Dados:

Os dados relacionados a este artigo estão disponíveis mediante solicitação a/ao autora/autor correspondente.

Avaliador do artigo:

Gilvano Ebling Brondani, *Editor de Seção*

Equipe Editorial:

Prof. Dr. Cristiane Pedrazzi, *Editores-Chefe*

Prof. Dr. Dalton Righi, *Editor Associado*

Miguel Fávila, *Editor Gerente*