



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

Larissa Rayanny Silva Da Fonseca

Água derivada da extração do petróleo e gás
Onshore* na irrigação de *Eucalyptus

MOSSORÓ/RN

2025

Larissa Rayanny Silva Da Fonseca

Água derivada da extração do petróleo e gás

Onshore* na irrigação de *Eucalyptus

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa:
Tecnologia em Nutrição de Plantas e Soluções para a Convivência com a Seca e Salinidade.

Orientador: Poliana Coqueiro Dias Araujo, D^a. Sc. – Prof^a. Adjunta da UFERSA.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F676Á Fonseca, Larissa Rayanny Silva da .
Água derivada da extração do petróleo e gás
onshore na irrigação de Eucalyptus / Larissa
Rayanny Silva da Fonseca. - 2025.
89 f. : il.

Orientador: Poliana Coqueiro Dias Araujo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2025.

1. gerenciamento da água produzida. 2. produção
de mudas. 3. reutilização de efluente. 4.
silvicultura. 5. semiárido. I. Araujo, Poliana
Coqueiro Dias, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Larissa Rayanny Silva Da Fonseca

Água derivada da extração do petróleo e gás
Onshore* na irrigação de *Eucalyptus

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologia em Nutrição de Plantas e Soluções para a Convivência com a Seca e Salinidade

Defendida em: 21 / 11 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora, Prof^a. Dr^a. Sc. Poliana Coqueiro Dias Araujo (UFERSA)

Presidente

Prof^a. Dr^a. Ane Cristina Fortes da Silva (UFERSA)

Membro Examinador

Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista (UFERSA)

Membro Examinador

Prof^a. Dr^a. Viviane Farias Silva (UFCEG)

Membro examinador

AGRADECIMENTOS

A caminhada até aqui foi feita com muitas mãos, e seria impossível atravessá-la sem o apoio, a paciência e a generosidade de tantas pessoas.

À minha orientadora, Poliana Coqueiro, minha sincera gratidão por sua orientação firme, exigente, paciente e generosa. Obrigada por confiar no meu trabalho, por acreditar no meu potencial, mesmo quando eu duvidei, e por me conduzir com ética e excelência científica.

Aos colegas do grupo de pesquisa Propagação e Melhoramento Florestal, obrigada pelas conversas, colaborações e pelas trocas que fizeram parte da minha formação.

Aos professores do programa, por construírem um ambiente de aprendizado crítico e estimulante, e à secretaria e equipe técnica, especialmente à Lidiane, técnica dos laboratórios da Eng. Florestal, por viabilizarem tantas etapas do processo.

Agradeço ao Programa de Recursos Humanos - 55 (PRH), à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e à FAPESP, pelo apoio financeiro e institucional, fundamentais. Registro também minha gratidão à empresa parceira que gentilmente disponibilizou a água produzida, viabilizando a execução experimental deste trabalho.

À minha mãe, Graça, que, com toda sua força de vontade, me mostra diariamente que as dificuldades são feitas para serem superadas, e não como fator limitante. Minha eterna gratidão pelo amor incondicional, pelo apoio silencioso e pelas renúncias que permitiram que eu chegasse até aqui. Aos meus irmãos, Jeferson, Lorena e Letícia, que me apoiam fielmente e estão comigo em todos os momentos. E, ainda dentro do parágrafo familiar, àquela que está comigo nos dias de chuva e de sol. Obrigada, Luine, pelo apoio, pela compreensão, pelo companheirismo e, não menos importante, pelo amor e carinho. Também não posso deixar de fora aqueles que me recebem sorrindo todos os dias, os meus amores, Billy e Bob.

Aos amigos de dentro e de fora da academia, que me acolheram nos dias difíceis e celebraram comigo cada pequena vitória, deixo meu carinho e reconhecimento (Gilmar, Lucas, Simone, APa, Bel, Matheus, Natália, Mayara, Pablo, Ramona, Lelê, Liss, ao Grupo de apoio, aos Cringes e às Bratz).

Por fim, dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditam na ciência como instrumento de transformação, social, ambiental e humana. Que este seja apenas um passo entre tantos que ainda virão.

RESUMO GERAL

O uso sustentável de recursos hídricos alternativos é um desafio estratégico para a expansão da silvicultura em regiões semiáridas. Assim, este trabalho investigou o potencial da Água Produzida tratada (AP), efluente oriundo da extração de petróleo e gás *onshore*, como fonte viável de irrigação para clones híbridos de *Eucalyptus spp.*, considerando as fases de enraizamento e crescimento inicial. O primeiro estudo avaliou o efeito da AP sobre o enraizamento adventício de 5 clones (C1 = 13, C2 = 14, C3 = 30, C4 = 104 e C5 = 106), quando propagados via miniestaquia, utilizando delineamento fatorial 2×5 (100% AP vs. água de abastecimento urbano – AA; cinco clones híbridos de *Eucalyptus*), com 5 repetições. Foram analisadas características morfológicas (percentual de enraizamento, altura, número de raízes, biomassa), bem como parâmetros da água (CE, RAS, TOG, metais e nutrientes). Os resultados mostraram que a AP, dentro dos limites regulatórios, não comprometeu o enraizamento (média = 92,8%) nem a sobrevivência (95,2%), com destaque para os clones 104 e 106, que apresentaram maior vigor sob irrigação com AP. A análise multivariada revelou perfis de tolerância genótipo-específicos, indicando o potencial da AP para uso na fase de propagação. O segundo estudo focou no crescimento inicial em vasos durante 91 dias, no segundo semestre de 2024, avaliando a alocação de biomassa, carbono (C) e a distribuição de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) em 5 clones sob 3 proporções de AP (0%, 50% e 100%). Houve forte interação genótipo $\times$ água, evidenciando distintas estratégias morfofisiológicas de resposta ao aumento iônico proporcionado pela AP. O clone C3 destacou-se pela maior alocação de C e eficiência de uso de K, enquanto o C5 adotou uma estratégia conservativa, priorizando a alocação radicular e o acúmulo de N e P na raiz. O clone C2 apresentou baixa eficiência no uso de N e menor produtividade, sendo mais sensível à composição iônica da AP. A irrigação com AP não comprometeu o desempenho produtivo dos clones mais tolerantes, indicando a viabilidade técnica do reuso. Contudo, recomenda-se manejo cauteloso e monitoramento edáfico contínuo, dada a potencial acumulação de sais e metais no solo. Assim, a AP tratada utilizada representa uma alternativa promissora para uso racional da água em sistemas florestais, desde que integrada a programas de melhoramento genético e práticas de manejo sustentáveis, com monitoramento constante.

Palavras-chave: gerenciamento da água produzida, produção de mudas, reutilização de efluente, silvicultura, semiárido.

ABSTRACT

The sustainable use of alternative water resources represents a strategic challenge for the expansion of forestry in semi-arid regions. Thus, this study investigated the potential of treated Produced Water (PW), an effluent derived from onshore oil and gas extraction, as a viable irrigation source for hybrid *Eucalyptus* spp. clones, considering the rooting and initial growth phases. The first experiment evaluated five clones (13, 14, 30, 104, and 106) during clonal propagation via mini-cuttings, using a 2×5 factorial design (100% PW vs. urban water supply – UWS), with five replicates. Morphological traits (rooting percentage, shoot height, root number, and biomass) and water quality parameters (EC, SAR, TOG, metals, and nutrients) were analyzed. The results showed that PW, within regulatory limits, did not compromise rooting (mean = 92.8%) or survival (95.2%), with clones 104 and 106 exhibiting greater vigor under PW irrigation. Multivariate analysis revealed genotype-specific tolerance profiles, indicating the potential efficacy of PW during the propagation phase. The second study focused on early growth in pots over 91 days during the second half of 2024, evaluating biomass allocation, carbon (C) accumulation, and the distribution of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) in five clones under three PW proportions (0%, 50%, and 100%). A strong genotype $\times$ water interaction was observed, evidencing distinct morphophysiological strategies in response to the ionic increase induced by PW. Clone C3 stood out for its higher C allocation and efficient use of K, while clone C5 adopted a conservative strategy, prioritizing root allocation and the accumulation of N and P in the root system. Clone C2 exhibited low N-use efficiency and reduced productivity, showing greater sensitivity to the ionic composition of PW. PW irrigation did not compromise the productive performance of the more tolerant clones, indicating the technical feasibility of its reuse. However, cautious management and continuous soil monitoring are recommended due to the potential accumulation of salts and metals in the soil. Therefore, the treated PW evaluated represents a promising alternative for rational water use in forestry systems, provided that it is integrated into genetic improvement programs and sustainable management practices with ongoing monitoring.

Keywords: produced water management, seedling production, effluent reuse, forestry, semi-arid.

LISTA DE FIGURAS

Article 1

Fig. 1 Effect of treated produced water on rooting performance and root morphological traits of mini-cuttings of five <i>Eucalyptus</i> clones.	19
Fig. 2 Interaction between irrigation water source and five <i>Eucalyptus</i> clones on biomass accumulation and partitioning in mini-cuttings.	21
Fig. 3 Effects of irrigation water source (under urban water supply - UWS and treated produced water - PW) and five <i>Eucalyptus</i> clones on survival and morphological traits of mini-cuttings.	23
Fig. 4 Photographic panel showing representative <i>Eucalyptus</i> spp. mini-cuttings of five clones (13, 14, 30, 104, and 106) irrigated with urban water supply (top row) or treated produced water (bottom row) after 25 days of rooting.	24
Fig. 5 Pearson correlation heatmap between morphophysiological traits and adventitious rooting indicators in mini-cuttings of five hybrid <i>Eucalyptus</i> clones cultivated under two irrigation water sources: urban water supply and treated produced water from the petroleum industry.	25
Fig. 6 (a) Principal component analysis (PCA) of morphological and physiological traits of <i>Eucalyptus</i> spp. mini-cuttings, showing three clusters based on Water × Clone combinations. (b) Radar chart comparing standardized mean values of the 18 traits across the identified clusters.	27

Artigo 2

Fig. 1. Crescimento em altura (cm), diâmetro do coleto (mm) e número de folhas (unidade) de clones híbridos de <i>Eucalyptus</i> irrigados com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%) ao longo de 12 avaliações quinzenais, durante o segundo semestre de 2024 no semiárido.	52
Fig. 2. Dados da avaliação final da parte aérea, diâmetro do coleto e área foliar de cinco genótipos híbridos de <i>Eucalyptus</i> sob irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%).	55
Fig. 3. Massas secas e frescas dos órgãos (caule, raiz e folha) e totais em cinco genótipos híbridos de <i>Eucalyptus</i> sob irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%).	57

Fig. 4. Alocação de biomassa e razão de matéria seca em órgãos de cinco genótipos híbridos de <i>Eucalyptus</i> submetidos à irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%).	59
Fig. 5. Teor de carbono por órgão e total em cinco genótipos híbridos de <i>Eucalyptus</i> sob irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada.	62
Fig. 6. Teores médios de potássio (K) e fósforo (P) nas raízes e folhas de cinco clones híbridos de <i>Eucalyptus</i> submetidos à irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (AP) e água de abastecimento (AA).	63
Fig. 7. Concentração de nitrogênio (N) em folhas e raízes de cinco clones híbridos de <i>Eucalyptus</i> irrigados com diferentes proporções de água produzida tratada (AP) e água de abastecimento (AA).	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2.REFERÊNCIAS	5
3.Article 1: Potential of “produced water” from oil and gas operations for irrigation in the rooting phase of <i>Eucalyptus</i> spp. mini-cuttings.....	8
Introduction	11
Materials and methods.....	12
<i>Experimental design and plant material</i>	12
<i>Water sources and treatment description</i>	13
<i>Characterization of irrigation solutions</i>	13
<i>Evaluation of morphological traits and biomass determination</i>	15
<i>Statistical analyses</i>	16
Results	17
<i>Correlation and multivariate relationships among morphological and biomass traits</i>	24
Discussion.....	28
Conclusions	31
Declarations	32
Ethics approval and consent to participate	32
Consent for publication	32
Availability of data and materials.....	32
Competing interests	32
Funding.....	32
Authors' contributions - CRediT Author Statement	32
Acknowledgements	32
References	34
4.Artigo 2: Respostas morfológicas e nutricionais de clones de eucalipto spp. sob irrigação com água produzida: implicações para a sustentabilidade silvicultural na região semiárida.....	38
Introdução	40
Material e métodos	41
<i>Área experimental</i>	41
<i>Descrição das fontes de água e dos tratamentos</i>	42
<i>Caracterização dos substratos e adubações</i>	44
<i>Material vegetal</i>	46
<i>Análises morfométricas e nutricionais</i>	47
<i>Delineamento experimental e análise estatística</i>	49

Resultados.....	50
<i>Crescimento inicial da parte aérea sob diferentes proporções de AP</i>	50
<i>Alocação de biomassa</i>	53
<i>Composição nutricional e padrões de resposta dos nutrientes nos diferentes órgãos</i>	60
Discussão.....	65
<i>Água produzida tratada: potencial de reuso e desafios para aplicação sustentável em florestas comerciais</i>	65
<i>Respostas dos clones de Eucalyptus spp. sob irrigação com água produzida.....</i>	67
Conclusões.....	70
Referências	72
5.CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

1. INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido do Nordeste brasileiro caracteriza-se por altas temperaturas, baixa pluviosidade e escassez hídrica (Cavalcante Junior *et al.*, 2019). Essas condições que limitam a expansão de atividades agroflorestais e pressionam o uso de fontes não convencionais de água. Paralelamente, embora não distribuída de maneira homogênea pela região, a indústria petrolífera *onshore*, especialmente na Bacia Potiguar, exerce papel relevante no desenvolvimento regional (Cavalcanti; Da Mata; Toscani, 2019). A extração de petróleo e gás gera resíduos, entre eles, a água produzida, cuja destinação adequada é um desafio ambiental global, devido ao seu potencial de contaminação, ao grande volume gerado e aos elevados custos de manejo (Pichtel, 2016).

A água está sempre presente nos reservatórios subterrâneos durante a extração de petróleo e gás, seja como saturação intersticial ou em aquíferos contíguos (Alsalem; Thiemann, 2024), e surge como um subproduto inevitável durante a extração, resultante de uma complexa mistura química cuja composição se altera ao longo da vida produtiva do poço (Ekechukwu; Asim; Hawez, 2024). Em poços maduros, essa proporção pode superar 50% e chegar a quase 99% nos estágios finais (Igunnu; Chen, 2014; Chen *et al.*, 2023), configurando um passivo volumoso e crescente. Sem tratamento adequado, esse efluente pode gerar impactos ambientais significativos (Sanchez-Rosario; Hildenbrand, 2022).

No cenário internacional, estudos têm avançado em tecnologias de tratamento e reuso de águas produzidas, sobretudo em contextos áridos e semiáridos, destacando-se alternativas mais econômicas que o descarte em poços profundos (Dolan; Cath; Hogue, 2018). Contudo, permanece uma lacuna científica relevante: a avaliação da viabilidade de utilizar água produzida tratada na produção de mudas e no crescimento inicial de espécies florestais em ambientes semiáridos, considerando limites regulatórios, variabilidade iônica e a tolerância genotípica. Trata-se de um campo ainda pouco explorado no Brasil, especialmente para sistemas clonais/florestais de *Eucalyptus* spp., apesar do potencial para reduzir a pressão sobre fontes convencionais e promover um manejo hídrico sustentável.

No Brasil, o uso de água para irrigação e o reuso de efluentes são regulados por um conjunto de normas federais e estaduais que estabelecem padrões de qualidade e diretrizes ambientais específicas para cada tipo de manancial. A Resolução CONAMA nº 396/2008 (Brasil, 2008) estabelece diretrizes para a classificação das águas subterrâneas,

amplamente utilizadas para abastecimento agrícola e industrial. Complementarmente, a Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011) dispõe sobre as condições e padrões para o lançamento de efluentes, incluindo limites para pH (entre 5 e 9), óleos e graxas (máximo de 20 mg L⁻¹), sólidos suspensos totais (100 mg L⁻¹) e limitação à remoção mínima de 60% da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além de valores máximos para metais pesados.

No Nordeste, alguns estados avançaram na normatização do reuso de efluentes industriais tratados. A Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017) possui relevância particular por apresentar parâmetros específicos para o reuso florestal, incluindo limites para salinidade, nutrientes, sólidos, microrganismos e metais, além de diretrizes para monitoramento do solo e mitigação de riscos. Tal marco regulatório é especialmente pertinente ao reuso da água produzida tratada em sistemas florestais, uma vez que estabelece critérios técnicos e ambientais compatíveis com o uso seguro desse efluente.

A Lei das Águas, Lei nº. 9.433/1997, estabelece a base da Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997), embora não defina parâmetros específicos de qualidade da água, orienta o uso sustentável e o gerenciamento dos recursos hídricos. No estado do Rio Grande do Norte, o tratamento, o descarte e o reuso da água são regulamentados por legislações locais, alinhadas às normas federais, mas com particularidades regionais, como a Lei Estadual RN nº. 6.908/1996 (Rio Grande do Norte, 1996) e a Lei Estadual RN nº. 11.332 (Rio Grande do Norte, 2022), que estabelecem diretrizes para a preservação dos recursos hídricos no estado e reforçam a importância do controle da poluição e da gestão do reuso de águas.

Conforme a legislação vigente, a água produzida pode ser destinada à irrigação de culturas não alimentícias, incluindo espécies florestais de uso industrial. Assim, o uso da água residuária proveniente da extração de petróleo e gás *onshore* é permitido para a produção de mudas e o estabelecimento de plantios florestais, desde que não seja aplicada em culturas destinadas ao consumo humano ou animal. Nesse contexto, o cultivo de espécies florestais, como o eucalipto, enquadra-se plenamente nas condições legais de reuso.

A produção florestal em regiões com forte limitação hídrica constitui uma alternativa estratégica para atender à crescente demanda por madeira destinada a diversos usos (Santos *et al.*, 2023), além de contribuir para o desenvolvimento sustentável em áreas sujeitas a longos períodos de estiagem. Entretanto, esses períodos, marcados por elevada luminosidade, disponibilidade hídrica reduzida e temperaturas intensas, são considerados

inadequados para o estabelecimento de plantios florestais, sobretudo devido ao aumento do estresse abiótico sobre as mudas (Gonçalves *et al.*, 2017; Loiola *et al.*, 2025). Nesse contexto, a água produzida tratada pode ser uma importante fonte de água para uso na irrigação de viveiros e plantios florestais na fase de implantação, amenizando os efeitos do estresse hídrico.

Durante a fase de viveiro e nos primeiros meses após o plantio, o sistema radicular das mudas ainda se encontra em formação, tornando-as altamente suscetíveis aos estresses abióticos. A oferta adequada de água nesse período crítico permite superar a limitação imposta pela irregularidade das chuvas, favorecendo o estabelecimento inicial das plantas. Além disso, o fornecimento hídrico contínuo promove incrementos em altura, diâmetro e biomassa, ao mesmo tempo em que reduz significativamente a mortalidade em campo (Carvalho *et al.*, 2021; Felix *et al.*, 2025). Por outro lado, a escolha de espécies florestais com adaptabilidade à seca e às elevadas temperaturas caracteriza-se como fator-chave para o sucesso desses empreendimentos (Florêncio; Martins; Fagundes, 2022; Loiola *et al.*, 2025).

Assim, espécies reconhecidas pela elevada adaptabilidade às condições semiáridas, como *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* e *E. brassiana*, bem como seus híbridos, devem ser priorizadas em estudos de irrigação com água produzida, por apresentarem plasticidade fisiológica (eficiência no uso da água, ajuste osmótico e sistemas radiculares eficientes) e potencial produtivo capaz de atender à demanda regional por produtos madeireiros (Silva *et al.*, 2016; Consultant, Gollenberg, Germany *et al.*, 2019; Ezzine *et al.*, 2023).

No Brasil, há, aproximadamente, 10 milhões de hectares de florestas plantadas; dessa área, mais de 77%, são de *Eucalyptus* spp (Serviço Florestal Brasileiro, 2025). Projeções recentes indicam que a área de plantações comerciais de árvores no país poderá continuar em expansão até 2030, com estimativas de incremento da ordem de milhões de hectares em relação à década anterior (Cerullo *et al.*, 2024). Além de sua importância econômica, o gênero desempenha papel social relevante ao fortalecer cadeias produtivas em regiões rurais, gerar emprego, renda e contribuir para o desenvolvimento de municípios de baixa diversificação econômica.

As plantações de *Eucalyptus* spp. apresentam elevado potencial de sequestro de carbono, aumento da matéria orgânica, melhora da estabilidade de agregados e enriquecimento da diversidade microbiana no solo, além de reduzirem a pressão sobre

remanescentes nativos, ao fornecerem madeira proveniente de sistemas manejados de forma sustentável (Zhang; Wang, 2021; He *et al.*, 2024; Vishal *et al.*, 2025).

O uso de água produzida tratada na produção de mudas e no estabelecimento de plantios florestais fortalece a interface entre a silvicultura e a gestão hídrica sustentável, alinhando-se a metas nacionais do Plano Nacional de Economia Circular (MDIC, 2025) e globais dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Especialmente àquelas relacionadas ao uso eficiente da água (ODS 6), à promoção da economia circular e do reuso seguro de efluentes (ODS 12) e à mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono florestal (ODS 13), além de contribuir indiretamente para o crescimento econômico sustentável em regiões dependentes da atividade florestal (ODS 8) (Ma *et al.*, 2022; Mannina; Gulhan; Ni, 2022; ONU, 2025).

Nesse contexto, genótipos de *Eucalyptus* selecionados para condições de alta temperatura e baixo índice pluviométrico devem ser testados antes de serem recomendados em regiões semiáridas, como o Oeste Potiguar. Nesse sentido, os clones híbridos de *Eucalyptus* spp. aparecem como alternativa para serem testados no estado do Rio Grande do Norte associados à irrigação com a água produzida proveniente das indústrias de extração de petróleo e gás *onshore* instaladas na região.

2. REFERÊNCIAS

ALSALEM, F.; THIEMANN, T. Produced Water from the Oil and Gas Industry as a Resource—South Kuwait as a Case Study. **Resources**, v. 13, n. 9, p. 118, 2024.

BRASIL. Resolução nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 12 nov. 2025.

BRASIL. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/FIGURAS/CRSS/CONAMA/CONAMA_430_2011.pdf.

BRASIL. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/FIGURAS/CRSS/CONAMA/CONAMA_396_2008.pdf.

CARVALHO, D. F. D. *et al.* Production and initial growth of forest species seedlings using sewage sludge and automated irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, p. e017321, 2021.

CAVALCANTE JUNIOR, C. A. *et al.* **Semiárido Brasileiro - Volume 1**: 10.5935, 2019. Disponível em: http://www.poisson.com.br/livros/semiario/volume1/Semiarido_voll.pdf. Acesso em: 12 nov. 2025.

CAVALCANTI, T.; DA MATA, D.; TOSCANI, F. Winning the oil lottery: the impact of natural resource extraction on growth. **Journal of Economic Growth**, v. 24, n. 1, p. 79–115, 2019.

CEARÁ. State Environmental Council - COEMA. **COEMA Resolution nº 02, de 02 de fevereiro de 2017**. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>.

CERULLO, G. *et al.* Conflicts and opportunities for commercial tree plantation expansion and biodiversity restoration across Brazil. **Global Change Biology**, v. 30, n. 3, p. e17208, 2024.

CHEN, F. *et al.* Reuse of Produced Water from the Petroleum Industry: Case Studies from the Intermountain-West Region, USA. **Energy & Fuels**, v. 37, n. 5, p. 3672–3684, 2023.

CONSULTANT, GOLLENBERG, GERMANY *et al.* Biomass Production and Carbon Sequestration by Cultivation of Trees under Hyperarid Conditions using Desalinated Seawater (Sewage Water). **Journal of Agriculture Food and Development**, v. 5, n. 1, p. 33–42, 2019.

DOLAN, F. C.; CATH, T. Y.; HOGUE, T. S. Assessing the feasibility of using produced water for irrigation in Colorado. **Science of The Total Environment**, v. 640–641, p. 619–628, 2018.

EKECHUKWU, O. M.; ASIM, T.; HAWEZ, H. K. Recent Developments in Hydrocyclone Technology for Oil-in-Water Separation from Produced Water. **Energies**, v. 17, n. 13, p. 3181, 2024.

EZZINE, H. *et al.* Physiological responses of three field-grown species (*Ceratonia siliqua*, *Eucalyptus camaldulensis*, and *Moringa oleifera*) to water deficits in a Mediterranean semi-arid climate. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 4536, 2023.

FELIX, V. J. L. *et al.* Growth and Energy Characteristics of Arboreal Wood Irrigated with Treated Effluent in Degraded Soil of Semi-Arid Regions. **Forests**, v. 16, n. 2, p. 354, 2025.

FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. F. A. Climate change on *Eucalyptus* plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115538, 2022.

GONÇALVES, J. L. *et al.* Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.

HE, Y. *et al.* Mixed *Eucalyptus* plantations enhance soil organic carbon accumulation and chemical stability through soil microbial community and multifunctionality. **CATENA**, v. 245, p. 108315, 2024.

IGUNNU, E. T.; CHEN, G. Z. Produced water treatment technologies. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 9, n. 3, p. 157–177, 2014.

LOIOLA, Â. T. *et al.* Influence of environmental factors on the survival and growth of *Eucalyptus tereticornis* provenances in the Brazilian semi-arid. **Forest Ecology and Management**, v. 593, p. 122925, 2025.

MA, Z. *et al.* Forests and Forestry in Support of Sustainable Development Goals (SDGs): A Bibliometric Analysis. **Forests**, v. 13, n. 11, p. 1960, 2022.

MANNINA, G.; GULHAN, H.; NI, B.-J. Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. **Bioresource Technology**, v. 363, p. 127951, 2022.

MDIC. **PLANO NACIONAL DE ECONOMIA CIRCULAR 2025 – 2034**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional/plano-nacional-de-economia-circular-2025-2034_03-06-2025.pdf.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 24 nov. 2025.

PICHTEL, J. Oil and Gas Production Wastewater: Soil Contamination and Pollution Prevention. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2016, p. 1–24, 2016.

RIO GRANDE DO NORTE. Lei nº 6.908, de 1 de julho de 1996. Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rn/lei-ordinaria-n-6908-1996-rio-grande-do-norte-dispoe-sobre-a-politica-estadual-de-recursos-hidricos-institui-o-sistema-integrado-de-gestao-de-recursos-hidricos-sigerh-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 12 nov. 2025.

RIO GRANDE DO NORTE. Lei nº 11.332, de 30 de dezembro de 2022. **Poder Legislativo.** Disponível em: <https://www.al.rn.leg.br/storage/legislacao/2023/xyly141mlwrywqdfisurxdpdlicmh.pdf>.

SANCHEZ-ROSARIO, R.; HILDENBRAND, Z. L. Produced Water Treatment and Valorization: A Techno-Economical Review. **Energies**, v. 15, n. 13, p. 4619, 2022.

SANTOS, M. E. C. D. *et al.* Variation in the Basic Density of Woods Produced in the Brazilian Semiarid Region Subjected to Different Irrigation Regimes. **Forests**, v. 14, n. 11, p. 2168, 2023.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, S. **Planted forests in Brazil 2024**. Brasília - DF: Sistema Nacional de Informações Florestais - SNIF, 2025. Painel interativo. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/>.

SILVA, P. *et al.* Seedling Growth and Physiological Responses of Sixteen Eucalypt Taxa under Controlled Water Regime. **Forests**, v. 7, n. 6, p. 110, 2016.

VISHAL, R. *et al.* Carbon sequestration potential of *Eucalyptus*-based agroforestry and cropping systems. **Plant Science Today**, 2025. Disponível em: <https://horizonpublishing.com/journals/index.php/PST/article/view/8621>. Acesso em: 24 nov. 2025.

ZHANG, Y.; WANG, X. Geographical spatial distribution and productivity dynamic change of *Eucalyptus* plantations in China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 19764, 2021.

3. Article 1: Potential of “produced water” from oil and gas operations for irrigation in the rooting phase of *Eucalyptus* spp. mini-cuttings

Authors

Larissa Rayanny Silva da Fonseca ¹

Enoch de Souza Ferreira¹

Ramona Rodrigues Amaro de Oliveira¹

Natália Isabel Lopes Quirino¹

Marcos Ilson de Oliveira Teixeira¹

Leandro Silva de Oliveira²

Poliana Coqueiro Dias-Araujo ^{1*}

Affiliations

¹ Department of Agricultural and Forestry Sciences, Federal Rural University of the Semi-Arid Region, Mossoró, RN, Brazil

² Institute of Agricultural Sciences, Federal University of Minas Gerais, Montes Claros, MG, Brazil

Corresponding author

Poliana Coqueiro Dias-Araujo

E-mail: poliana.coqueiro@ufersa.edu.br

ORCID and E-mail

L. R. S. da Fonseca: 0009-0000-0249-468X - larissa.fonseca@alunos.ufersa.edu.br

E. de S. Ferreira: 0000-0002-3175-154X - enoch.ferreira@alunos.ufersa.edu.br

R. R. A. Oliveira: 0000-0001-5234-8330 - ramona.oliveira@alunos.ufersa.edu.br

N. I. L. Quirino: 0000-0002-4895-5856 - isabelnataliaquirino@gmail.com

M. I. O. Teixeira: 0009-0006-2437-464X - marcos.teixeira55319@alunos.ufersa.edu.br

L. S. de Oliveira: 0000-0003-0800-5001 - leandroengflor@gmail.com

P. C. Dias-Araujo: 0000-0002-5744-2251 - *Corresponding author*

Potential of “produced water” from oil and gas operations for irrigation in the rooting phase of *Eucalyptus* spp. mini-cuttings

Abstract

In semi-arid regions, water scarcity restricts the expansion of industrial forestry, reinforcing the need for alternative and sustainable irrigation sources. This study evaluated the potential of treated produced water (PW), an effluent from onshore oil and gas extraction, as an irrigation source during the rooting phase of five hybrid *Eucalyptus* clones (13, 14, 30, 104, and 106). The experiment was conducted under controlled conditions using a completely randomized 2×5 factorial design (100% PW vs. 100% urban water supply – UWS; five genotypes), with five replicates of eleven mini-cuttings each. Morphological traits, including rooting percentage, survival, shoot height, stem diameter, root number and volume, and fresh and dry biomass, were assessed along with water quality parameters such as electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), total oil and grease (TOG), metals, and nutrients]. The PW presented an EC (0.53 dS m^{-1}), SAR (2.3), and TOG (2.19 ppm), all within irrigation quality limits established by Brazilian regulations, and did not impair rooting (92.8%) or survival (95.2% vs. 88.7% under UWS). A significant water $\times$ clone interaction ($p \leq 0.05$) was detected. Clones 104 and 106 showed greater vigor and biomass under PW irrigation, whereas clone 30 responded more favorably to UWS. These results were further supported by PCA, while k-means clustering organized the clones into biologically meaningful groups, clearly distinguishing tolerant, intermediate, and sensitive genotypes. These findings indicate that PW can safely sustain early-stage clonal propagation under controlled conditions, suggesting its potential for large-scale application in semi-arid industrial forestry within integrated water-reuse strategies.

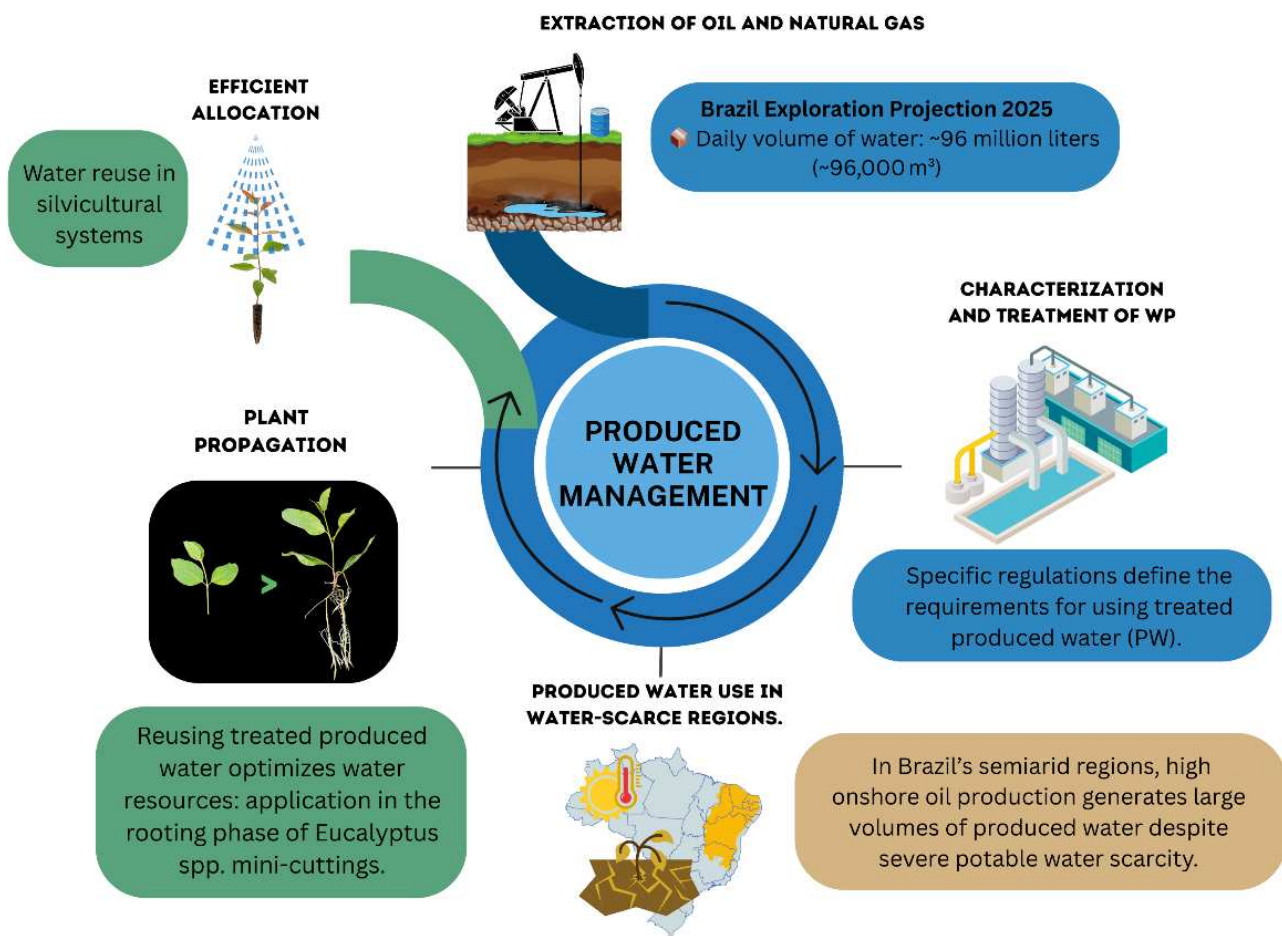
Keywords: irrigation water quality; water optimization; clonal propagation; nursery management, produced water reuse,

Highlights

- Produced water created a non-saline but ionically distinct environment for *Eucalyptus* rooting.
- Rooting responses to produced water depended strongly on clone identity.
- Forest nurseries enable safe reuse of oil industry produced water within circular forestry systems.

Graphical abstract

FROM PASSIVE TO RESOURCE: USE OF PRODUCED WATER IN THE ROOTING PHASE OF EUCALYPTUS SPP. MINI-CUTTINGS.



1 **Introduction**

2 Water scarcity constrains agricultural and forestry sustainability on a global scale
3 [40, 28]. In semi-arid regions, such as Northeastern Brazil, irregular rainfall and high
4 evapotranspiration sharply reduce annual water availability. Under these conditions, the
5 expansion of forestry depends on producing seedlings capable of tolerating water stress,
6 which makes it essential to identify more resilient genotypes and alternative water sources
7 for clonal propagation systems of *Eucalyptus* spp. [7, 30, 33].

8 *Eucalyptus* is fundamental to the Brazilian forestry sector because it supports
9 high-value industrial chains and contributes to carbon sequestration and soil quality
10 improvement [43, 6, 32]. The rising demand for high-quality seedlings reinforces the need
11 for more efficient production practices that are less dependent on freshwater [23, 45].

12 In Brazil, the reuse of produced water (PW) is restricted to non-food uses, such as
13 forest irrigation [53]. In other countries, however, it is also applied in agricultural
14 systems, provided that the PW complies with applicable regulatory standards [13, 14, 36].
15 The state of Rio Grande do Norte, a significant onshore oil and gas producer, generates
16 substantial volumes of this effluent, whose availability, after appropriate treatment,
17 underpins its potential for reuse in forest systems, including plant nurseries [20, 1, 15, 3,
18 26].

19 To assess the feasibility of using treated produced water (PW) in clonal
20 propagation of *Eucalyptus*, this study recognizes that the mini-cutting is highly sensitive
21 to irrigation water quality [22]. Residual compounds and potentially toxic ions may
22 interfere with osmotic balance, cellular differentiation, and root formation, thereby
23 directly affecting seedling production [21, 38]. In this context, analyzing the
24 morphological responses of different genotypes irrigated with treated PW is essential for
25 identifying risks and to supporting its adoption in forest nurseries for clonal propagation.

26 In this study, we evaluated the effects of treated produced water on the
27 adventitious rooting, survival, and morphological traits of five *Eucalyptus* genotypes
28 propagated via the mini-cutting technique. We tested the hypotheses that treated produced
29 water does not reduce rooting performance, that genotypes respond differently to the
30 effluent, and that the interaction between genotype and water source influences root and
31 stem vigor. By addressing this scientific gap, this study contributes to integrating effluent
32 reuse into the forestry sector and strengthens circular-economy and sustainable water-
33 management strategies aligned with the Sustainable Development Goals SDG 6 (Clean

Water and Sanitation), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action)[35].

Materials and methods

Experimental design and plant material

The experiment was conducted at the facilities of the Federal Rural University of the Semi-Arid Region (UFERSA), at coordinates of 5° 3' 40" S and 37° 23' 51" W, and at an altitude of 21 m, in Mossoró, Rio Grande do Norte state, Brazil. The rainfall regime is characterized by a rainy season concentrated in the summer, with an average annual precipitation of 794 mm and an average annual air temperature of 26.5°C [2].

Hybrid clones of *Eucalyptus* were used (Clone 13: *E. urophylla* × *E. brassiana*; Clone 14: *E. tereticornis* × *E. brassiana* × *E. urophylla*; Clone 30: *E. tereticornis* × *E. brassiana* × *E. grandis*; Clones 104 and 106: *E. urophylla* × *E. tereticornis*), established in a clonal mini-garden (spacing between mini-stumps of 10 cm × 10 cm), implemented in an elevated bed (1.2 m wide; 7.0 m long; 0.3 m deep) filled with sand and managed in a semi-hydroponic system.

After inducing epicormic shoots on the mini-stumps, apical shoots measuring 6 to 8 cm and containing two pairs of leaves were collected. For the cutting stage, the basal 2 cm of the mini-cuttings were inserted vertically into polyethylene plastic tubes with a capacity of 55 cm³, pre-filled with the commercial substrate Carolina Soil® (according to the manufacturer: Sphagnum peat and vermiculite, contaminant-free, inert substrate; water holding capacity = 300% w/w; EC = 1.0 mS/cm; dry bulk density = 130 kg/m³; pH = 5.50; maximum moisture = 60% w/w). For basal fertilization, a controlled-release fertilizer (Basacote Plus 6M, 16-08-12; nitrogen, phosphorus, and potassium, respectively) was incorporated at 5 g per kg of substrate.

Rooting took place in propagation chambers (1.2 m wide; 3.0 m long; 0.6 m high), covered with 200-micron transparent plastic and elevated on benches (90 cm above ground). Irrigation was performed using programmed sprinkling controlled by timers and activated by external pumps: every 2 hours the system ran for 30 seconds to ensure uniform coverage, totaling approximately 2.000 L (2 m³) of water over 25 days (equivalent to about 0.08 m³ of water per day to produce the chamber's maximum capacity of 700 propagules). The temperature inside the propagation chamber ranged

from 28 to 30 °C, and the humidity from 75 to 83%, as measured with a thermo-hygrometer.

Water sources and treatment description

The treated produced water used in the experiments originated from a petroleum production facility located in Mossoró, RN, Brazil, which operates in mature and marginal onshore oil fields. The effluent undergoes physical-chemical treatment at a Produced Water Treatment Station (PWTS) with an annual processing capacity of approximately 273,750 m³. The PW underwent a multi-stage physical-chemical treatment process prior to its use. The treatment process was designed to comply with Brazilian environmental standards established by CONAMA Resolution N.º 396/2008, which complements Resolution N.º 430/2011 [10, 12] regarding effluent discharge and water quality.

The PW used in this study originated from onshore oil and gas extraction operations and was supplied by a licensed water treatment station, where it had already undergone physical treatment processes involving gravitational separation and filtration. Throughout this manuscript, all references to PW refer exclusively to treated produced water from onshore production, as received from this facility.

The municipal supply water was obtained from the public water distribution system of Mossoró, which primarily sources water from underground aquifers due to their superior quality and availability. Surface water is also used occasionally, conveyed through the Jerônimo Rosado pipeline from the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir, located in the Piranhas-Açu River basin.

Characterization of irrigation solutions

The physicochemical characterization of both water sources (PW and UWS) was performed prior to irrigation, following the procedures recommended by the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [4]. All analyses were performed in triplicate at the Environmental Chemistry Laboratory of the Federal University of Ceará (UFC), following internal quality control procedures accredited by INMETRO [11].

The characterization of the main chemical and physicochemical parameters of the PW and the UWS was essential to contextualize the chemical environment under which

adventitious rooting occurred and to support the interpretation of genotype-dependent responses (Table 1).

Table 1. Physicochemical properties of irrigation water sources. PW, treated produced water; UWS, urban water supply.

Parameters	Unit	PW	UWS
<i>Physicochemicals</i>			
pH	–	7.94	8.33
Electrical Conductivity (EC)	dS m ⁻¹	0.53	0.50
Sodium Adsorption Ratio (SAR)	–	2.34	6.4
SAR adjusted	–	0.37	0.13
Hardness	mg CaCO ₃ L ⁻¹	149.5	41.0
Residual Sodium Carbonate (RSC)	mmol _c L ⁻¹	1.21	2.54
<i>Cations</i>			
Potassium (K ⁺)	mmol _c L ⁻¹	0.50	0.31
Sodium (Na ⁺)		2.86	4.20
Calcium (Ca ²⁺)		1.22	0.55
Magnesium (Mg ²⁺)		1.77	0.31
<i>Anions</i>			
Chloride (Cl ⁻)	mmol _c L ⁻¹	2.4	2.2
Carbonate (CO ₃ ²⁻)		0.4	0.1
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)		3.8	3.3
<i>Total Ions</i>			
Total Cations	mmol _c L ⁻¹	6.35	5.37
Total Anions		6.60	5.60

Mean values showing contrasts between PW and UWS are highlighted.

To complement the general physicochemical characterization of the water sources, a detailed assessment of trace metals and total oil and grease (TOG) content was conducted to identify potential chemical constraints associated with the use of PW. Table 2 summarizes the concentrations of essential micronutrients, potentially toxic elements, and organic residues in both irrigation sources.

Table 2. Trace elements and total oil and grease (TOG) concentrations in irrigation water sources. PW, treated produced water; UWS, urban water supply.

Element	Unit	PW	UWS
Aluminum (Al)		≤ 0.01	≤ 0.01
Antimony (Sb)		≤ 0.01	≤ 0.01
Arsenic (As)		0.003	0.003
Barium (Ba)		0.203	0.141
Cadmium (Cd)		≤ 0.0005	≤ 0.0005
Lead (Pb)		≤ 0.001	≤ 0.001
Chromium (Cr)		≤ 0.001	0.005
Mercury (Hg)		≤ 0.0001	≤ 0.0001
Boron (B)		0.226	0.124
Cobalt (Co)	mg L ⁻¹	≤ 0.005	≤ 0.005
Copper (Cu)		0.002	0.003
Iron (Fe)		≤ 0.005	≤ 0.005
Manganese (Mn)		≤ 0.001	≤ 0.001
Molybdenum (Mo)		0.007	0.003
Nickel (Ni)		≤ 0.001	≤ 0.001
Silver (Ag)		≤ 0.001	≤ 0.001
Selenium (Se)		≤ 0.001	≤ 0.001
Vanadium (V)		≤ 0.001	≤ 0.001
Zinc (Zn)		0.001	0.002
Total oil and grease (TOG)	ppm	2.19	–

Mean values showing contrasts between PW and UWS are highlighted.

Evaluation of morphological traits and biomass determination

The experiment was conducted in a completely randomized design with a 2 × 5 factorial scheme, corresponding to two irrigation solutions (100% PW and 100% UWS) and five genotypes, with five replicates and 11 mini-cuttings per plot. The mini-cuttings were maintained for 25 days in propagation chambers separated according to the water source and evaluated for adventitious rooting and survival percentage, number of leaves and roots, height, length and diameter of the longest root, stem collar diameter, root volume, and fresh and dry mass of roots, shoots, and total plant. Length measurements were taken with a metal ruler graduated in millimeters; diameters were measured using a digital caliper.

For quantifying shoot and root dry matter, the formula proposed by Carneiro [18] was used, which expresses dry matter as the ratio between dry mass and fresh mass

multiplied by 100. Total biomass for each individual was obtained by adding the dry biomass of the shoot and the dry biomass of the roots. For this purpose, plants were separated into the root system and shoot (leaves and stem), with each fraction weighed to obtain fresh weight and then oven-dried in forced-air circulation at 65 °C until reaching constant weight. After drying, samples were weighed on an analytical balance with a precision of four decimal places, and the dry mass values obtained for roots and shoots were added to represent the total biomass of each individual. For the analysis of root and shoot dry matter production, nine individuals per replicate were used, with five replicates.

Statistical analyses

All traits were first tested for normality using the Shapiro–Wilk test. When assumptions of normality and homoscedasticity were violated, data were transformed using either logarithmic or square root transformations, as appropriate. A two-way analysis of variance (ANOVA) was then performed, considering clone and irrigation water source as fixed factors, along with their interaction (clone × water). Statistical significance was evaluated using the F-test at a 5% probability level. When significant effects were observed ($p \leq 0.05$), mean comparisons were conducted using Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test at $\alpha = 0.05$. All statistical analyses were conducted in the R software environment [39].

Pearson correlation coefficients (r) were computed for all pairwise combinations of traits using the `rcorr()` function from the `Hmisc` package [24]. A corresponding matrix of p -values was generated to determine the significance of each correlation. The lower triangular portion of the correlation matrix was visualized using the `corrplot` package [51] and enhanced using `ggplot2` [52] for improved interpretability.

Principal Component Analysis (PCA) was performed using the `PCA()` function from the `FactoMineR` package [29] to identify response patterns among genotypes and irrigation sources, and to explore collinearity among traits. All data were z -score standardized to ensure comparability across variables with different units and scales. K -means clustering ($k = 3$), selected based on visual inspection and explained variance, was applied to classify multivariate treatment patterns. Statistical differences among the clusters identified by k -means were verified using Multivariate Analysis of Variance (MANOVA). Cluster visualization was performed using `ggplot()` with 95% confidence ellipses rendered via `stat_ellipse()` [52].

Radar charts summarizing standardized means for all 18 traits within each cluster were constructed using the `radarchart()` function from the `fmsb` package [34]. Visual enhancements included adjusted margins to prevent clipping, reduced gridline width (`cglwd = 0.6`), and semi-transparent fills (`alpha = 0.2`) for improved readability.

Results

Morphological traits are highly sensitive to the combined effects of water availability and genetic background, making them key indicators of initial adventitious rooting performance under contrasting irrigation conditions. To quantify how PW and UWS influenced growth and biomass allocation across genotypes, a two-way ANOVA was performed to test the main effects of Water, Clone, and their interaction (Water $\times$ Clone). This approach enabled the identification of traits in which genotypic responsiveness differed according to the irrigation source, highlighting whether PW affected all clones uniformly or elicited clone-specific patterns of adventitious rooting and early vegetative vigor. The results of this analysis are summarized in Table 3.

Table 3. P-values from two-way ANOVA evaluating the effects of irrigation water source (Water), *Eucalyptus* clones (Clone), and their interaction (Water × Clone) on survival, rooting, morphological, and biomass traits of mini-cuttings.

Traits	p-value		
	Clone x Water	Water	Clone
Survival (%)	0.3062	0.0034*	0.0766
Rooting (%)	≤0.0001*	0.7321	0.6997
Height (cm)	0.5774	0.0004*	≤ 0.0001*
Stem diameter (cm)	≤ 0.0001*	0.0002*	≤ 0.0001*
Number of leaves per mini-cutting	0.8681	0.0826	0.0116*
Number of roots per mini-cutting	0.0184*	0.3217	0.506
Length of the longest root (cm)	0.0014*	≤ 0.0001*	0.7432
Diameter of the longest root (mm)	0.0632	0.3553	0.0223*
Root volume (cm ³)	0.0158*	0.2691	≤0.0001*
Total biomass (%)	≤0.0001*	≤0.0001*	≤0.0001*
Total fresh weight (g)	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*
Total dry weight (g)	0.2976	0.4283	≤ 0.0001*
Root fresh weight (g)	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*
Root dry weight (g)	0.0017*	0.1033	0.0015*
Root dry matter (%)	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*
Shoot fresh weight (g)	0.029*	≤ 0.0001*	≤ 0.0001*
Shoot dry weight (g)	0.8463	0.9228	0.0001*
Shoot dry matter (%)	0.0463*	0.0002*	≤ 0.0001*

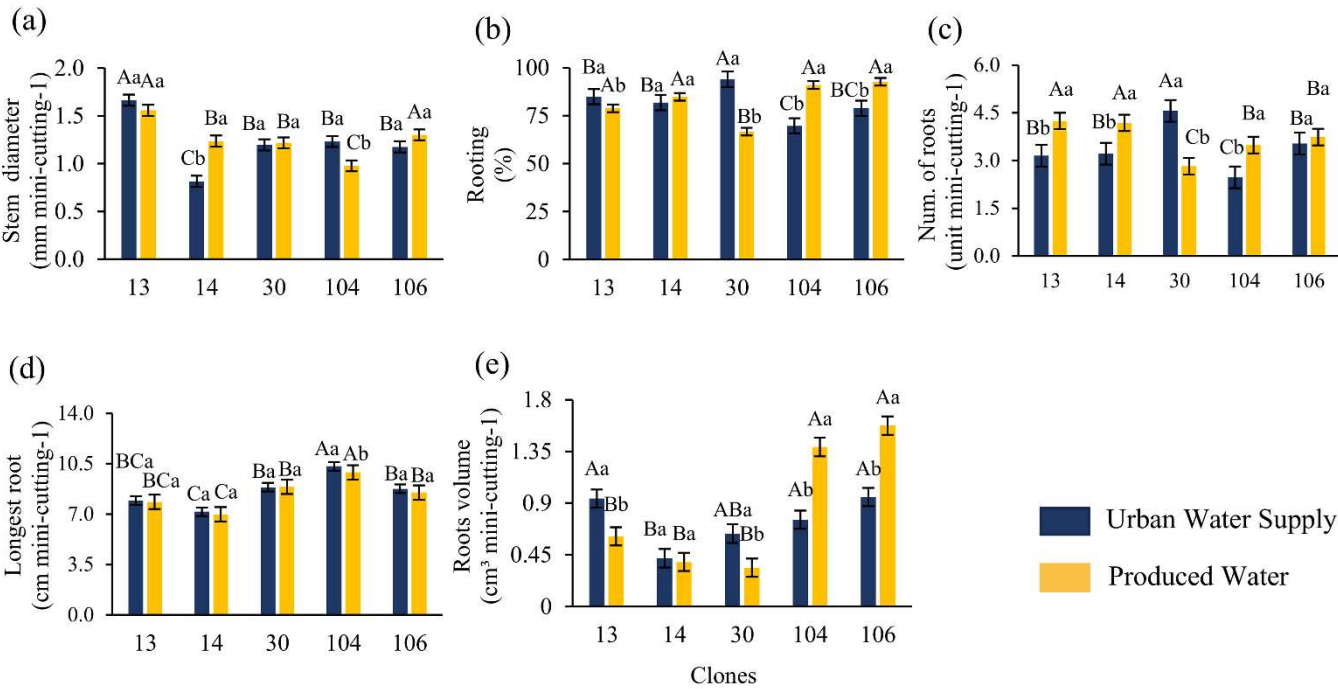
* Significant values by F-test ($p \leq 0.05$).

Across morphometric traits, significant Water × Clone interactions were detected for rooting, stem diameter, root number, root length and root volume (Tab. 3; Fig. 1). Rooting responses diverged among genotypes, with clones 13 and 30 showing reduced rooting under PW, while clones 104 and 106 exhibited higher rooting rates under PW (Fig. 1a). Stem diameter responded to the irrigation source only in specific genotypes, with clone 14 exhibited larger diameters under PW and clone 104 under UWS, whereas no uniform trend was observed across clones (Fig. 1b).

For root number (Fig. 1c), although the main effect of water was not significant ($p = 0.3217$), the significant interaction ($p = 0.0184$) demonstrates that responses differed among genotypes. Clones 13, 14, 30, and 104 showed within-clone differences between

PW and UWS, while clone 106 did not exhibit significant differences between irrigation sources. Root length differed only in clone 104, which produced longer roots under UWS (Fig.1d). Root volume showed contrasting genotype-specific patterns, being enhanced under PW in clones 104 and 106, whereas clones 13 and 30 had greater volume under UWS (Fig. 1e).

Fig. 1 Effect of treated produced water on rooting performance and root morphological traits of mini-cuttings of five *Eucalyptus* clones. (a) rooting percentage (%), (b) stem diameter (mm), (c) number of roots per mini-cutting, (d) length of the longest root (cm), and (e) root volume (cm³).



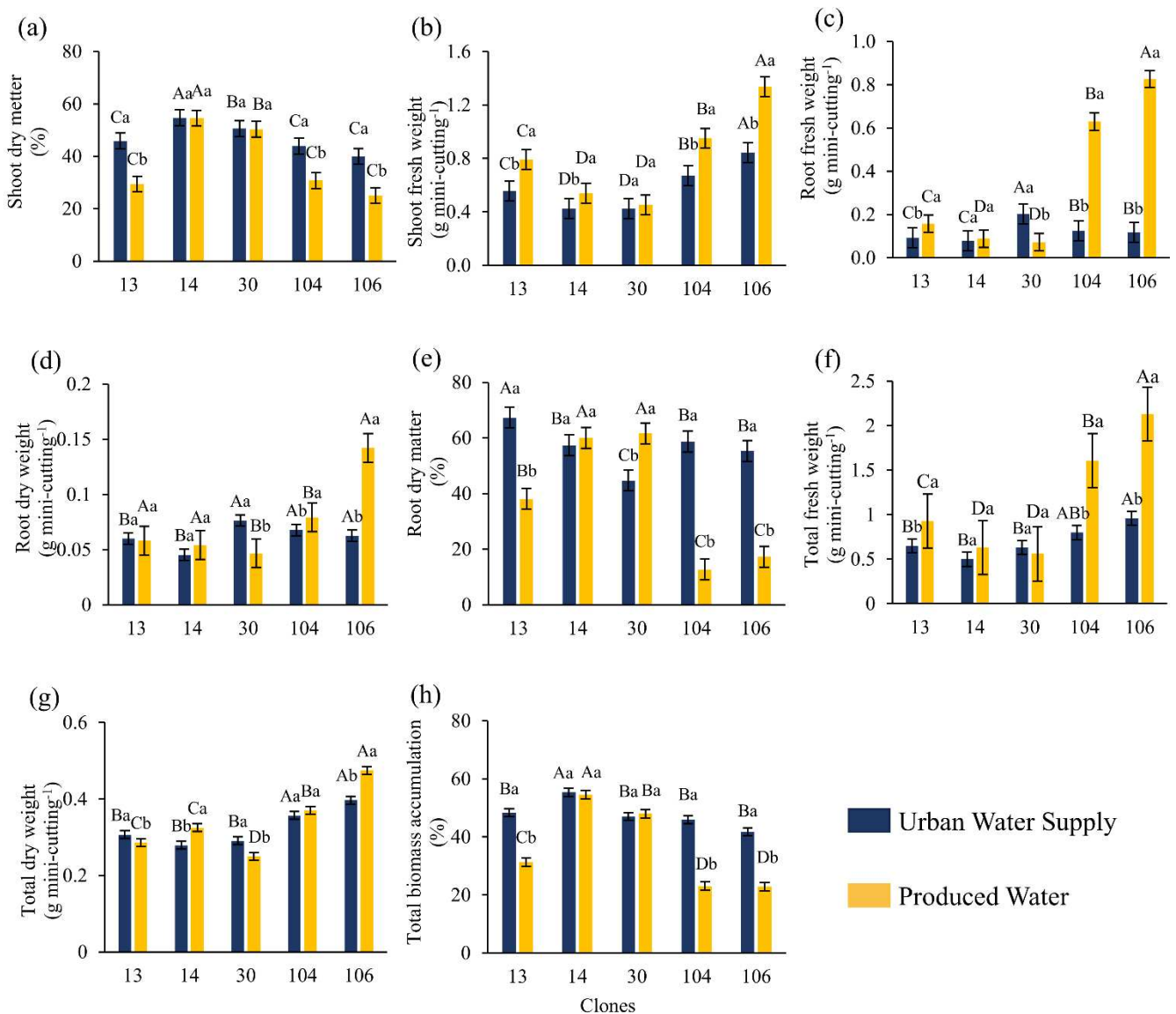
Note: Bars represent means $\pm$ standard error ($n = 5$). Lowercase letters indicate significant differences between irrigation sources within each clone; uppercase letters indicate differences among clones within each irrigation treatment. Different letters denote statistically significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Patterns of biomass accumulation and allocation confirmed genotype- and water source-dependent responses (Fig. 2). Irrigation with PW was associated with higher total fresh weight (Fig. 2f), mainly driven by increases in both shoot and root components (Fig. 2b - c), with the exception of clone 30, which showed no differences between water sources. The increase in fresh weight was strongly associated with root expansion under PW, observed in all clones except clone 30, with a greater magnitude in clones 104 and 106, indicating higher water retention and tissue expansion under this condition.

201 In contrast, dry matter allocation followed a different pattern. Shoot dry matter
202 percentage (Fig. 2a) was higher under UWS in clones 13, 104 and 106, whereas clones
203 14 and 30 did not differ between water sources. Similarly, root dry matter percentage
204 (Fig. 2e) was higher under UWS in clones 13, 104 and 106, while clone 14 showed no
205 difference and clone 30 exhibited higher values under PW, indicating contrasting biomass
206 allocation strategies among genotypes.

207 Root dry weight (Fig. 2d) showed a variable response, being higher under PW in
208 clones 104 and 106, higher under UWS only in clone 30, and similar between water
209 sources in clones 13 and 14. These patterns explain the response observed for total dry
210 weight (Fig. 2g), which was higher under PW in clones 14 and 106, higher under UWS
211 in clones 13 and 30, and did not differ between water sources in clone 104. Overall, the
212 results indicate that PW promotes greater biomass production in terms of fresh weight,
213 mainly via root system expansion, whereas UWS is associated with a higher proportion
214 of dry matter, with responses modulated by genotype and plant compartment.

Fig. 2 Interaction between irrigation water source and five *Eucalyptus* clones on biomass accumulation and partitioning in mini-cuttings. (a) shoot fresh weight (g), (b) shoot dry weight (%), (c) root fresh weight (g), (d) root dry weight (g), (e) root dry matter (%), (f) total fresh weight (g), (g) total dry weight (g), and (h) total biomass accumulation (%).

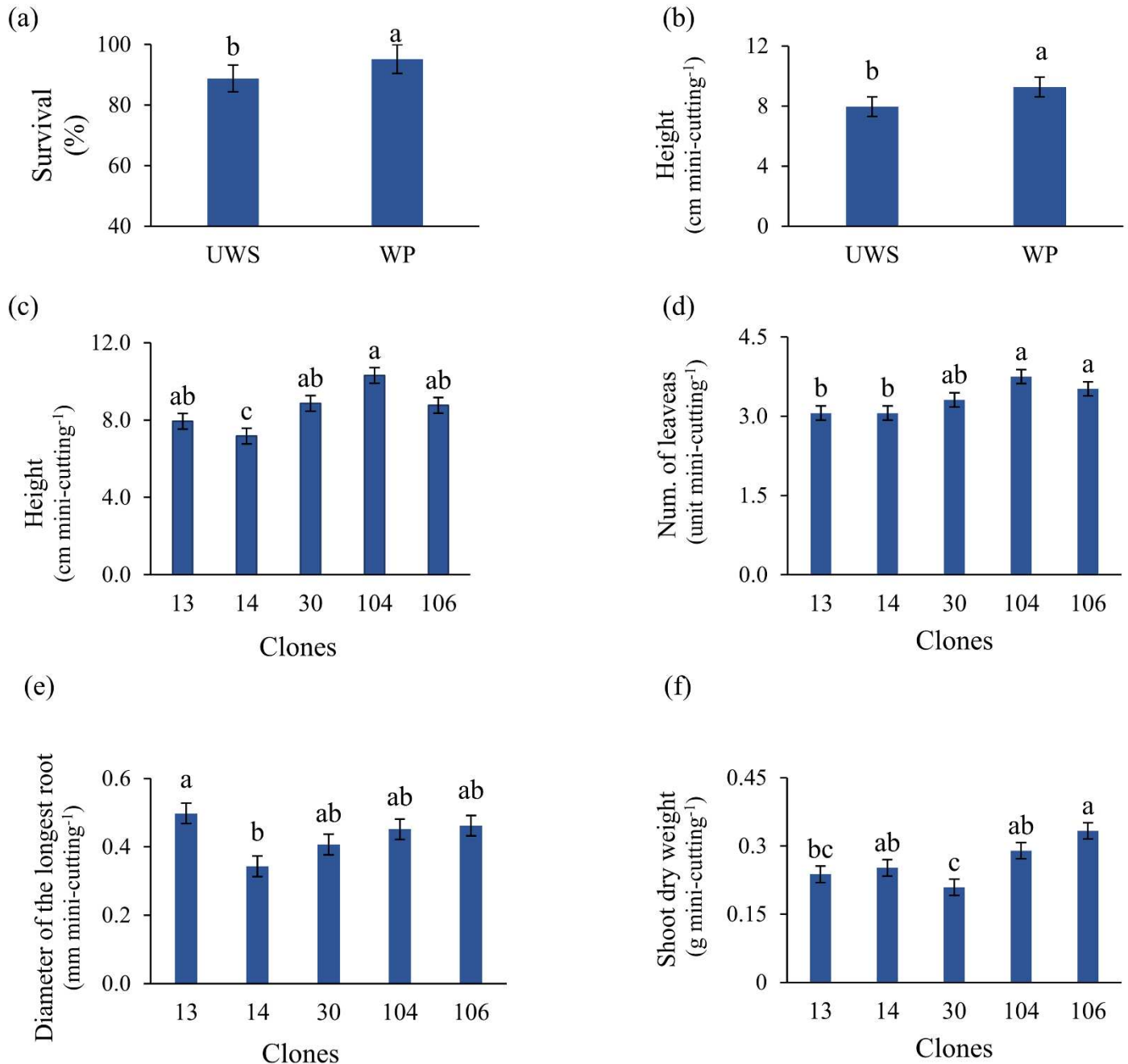


Notes: Urban water supply (UWS, navy bars) and treated produced water (PW, yellow bars). Bars represent means $\pm$ standard error ($n = 5$ per treatment). Lowercase letters indicate significant differences between irrigation sources within each clone; uppercase letters indicate differences among clones within each irrigation source. Different letters denote statistically significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Survival was affected independently by the irrigation source, with higher survival under PW (95.2%) compared to UWS (88.7%) (Fig. 3a). Shoot height was also influenced by the water source with higher values under PW (Fig. 3b). Clone identity significantly affected shoot height, number of leaves, root diameter and shoot dry weight (Fig. 3c–f). Clone 14 produced shorter shoots (Fig. 3c), while clones 104 and 106 showed higher leaf

229 numbers compared to clones 13 and 14 (Fig. 3d). Furthermore, root diameter was greater
230 in clone 13 (0.49 mm) than in clone 14 (0.34 mm) (Fig. 3e) and clone 106 (0.33 g)
231 exhibited the highest shoot dry weight compared to clones 13 and 30 (Fig. 3f).

Fig. 3 Effects of irrigation water source (under urban water supply - UWS and treated produced water - PW) and five *Eucalyptus* clones on survival and morphological traits of mini-cuttings. (a) Survival (%); (b) shoot height (cm mini-cutting⁻¹); (c) shoot height (cm mini-cutting⁻¹); (d) number of leaves (unit mini-cutting⁻¹); (e) diameter of the longest root (mm mini-cutting⁻¹); and (f) shoot dry weight (g mini-cutting⁻¹).

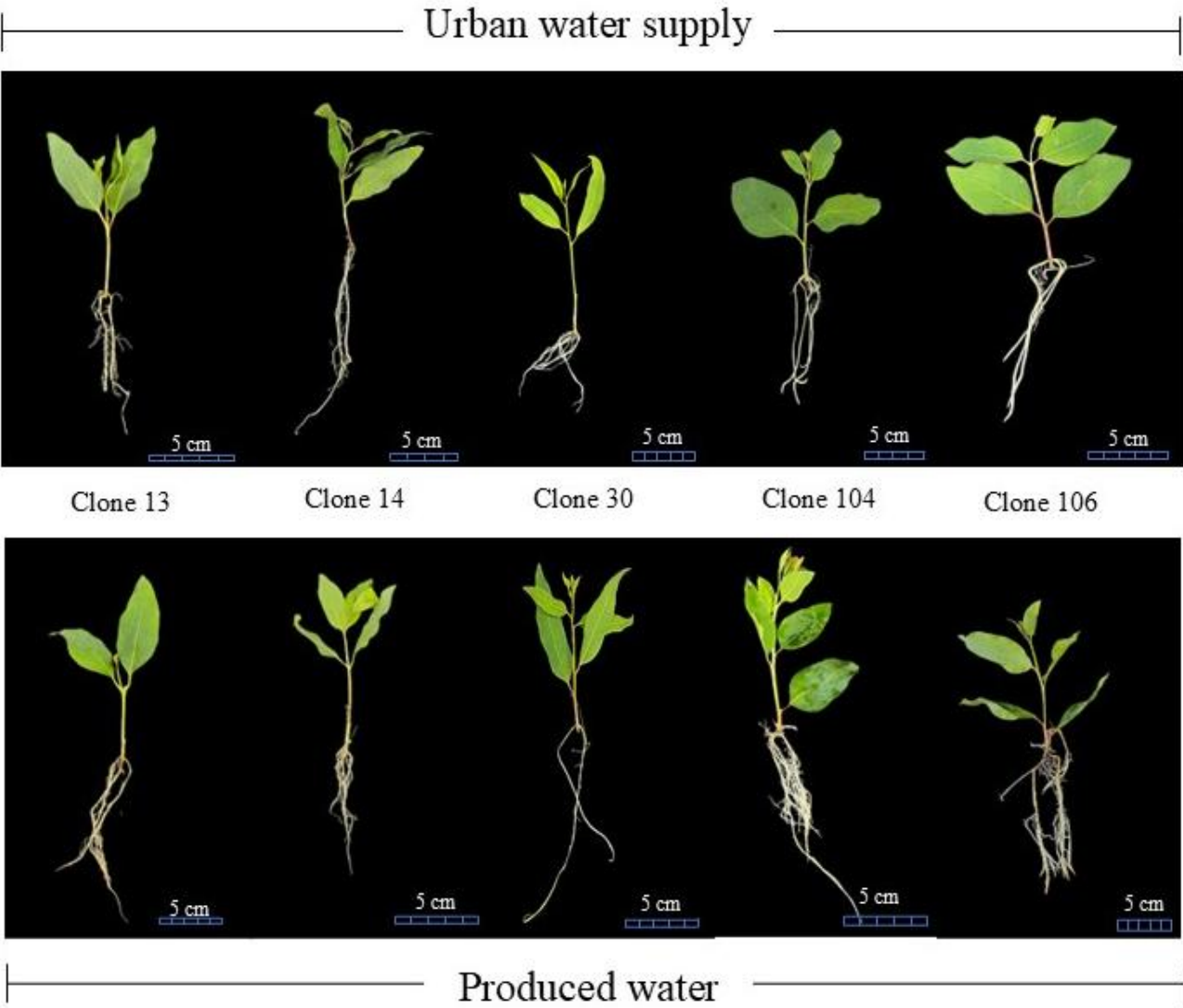


Notes: Bars represent means ± standard error (n = 5). Different lowercase letters above bars indicate statistically significant differences among irrigation water source or clones based on Tukey's test (p ≤ 0.05).

Qualitative observations supported the quantitative results. Adventitious root systems were more developed under PW, particularly in clones 104 and 106 (Fig. 4c–f),

which also showed higher shoot and root biomass. Clone-specific differences in overall architecture were evident, reflecting the interactive effects of genotype and irrigation treatment.

Fig. 4 Photographic panel showing representative *Eucalyptus* spp. mini-cuttings of five clones (13, 14, 30, 104, and 106) irrigated with urban water supply (top row) or treated produced water (bottom row) after 25 days of rooting.



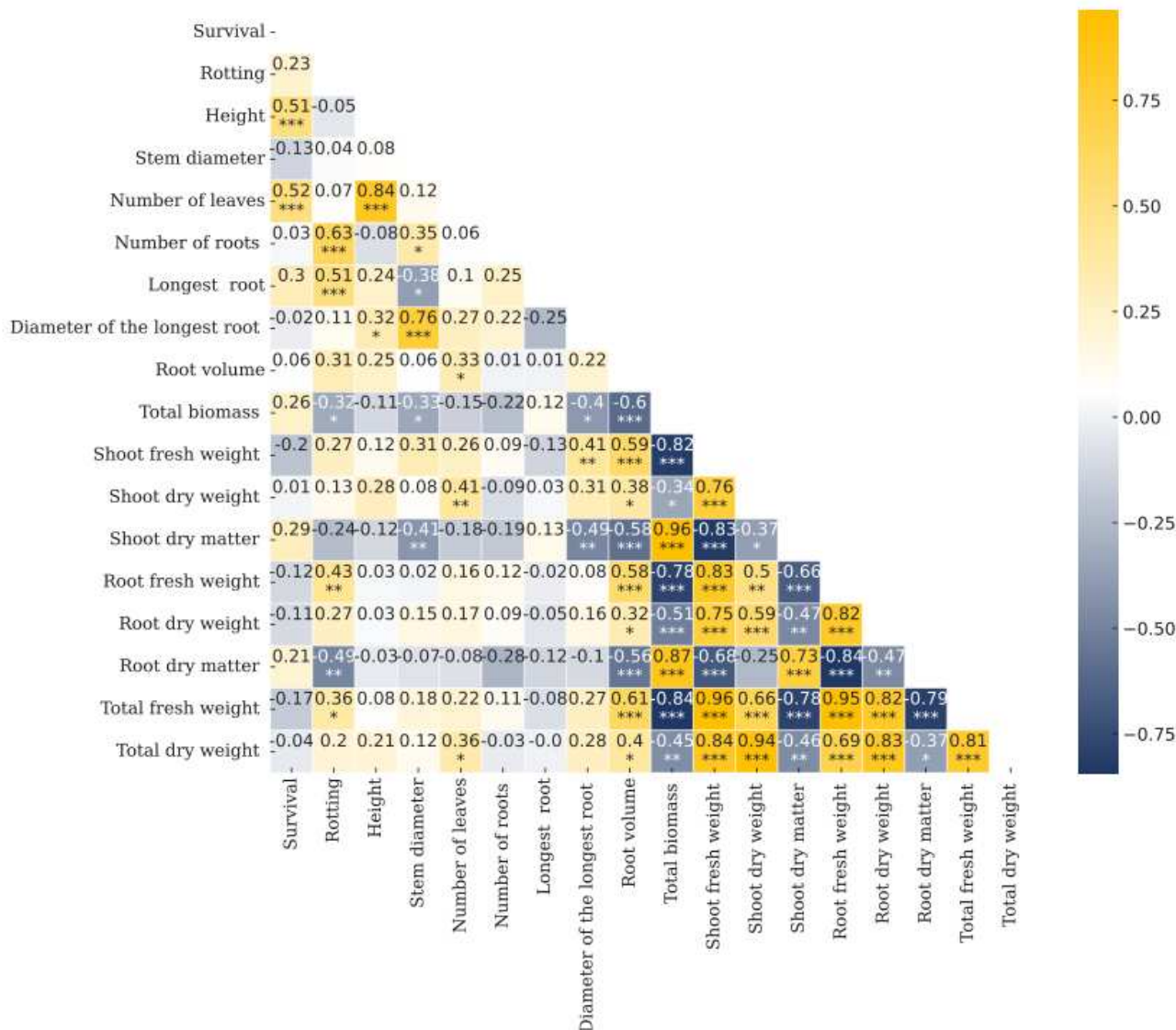
Notes: The images highlight morphological variation in shoot and root development for visual comparison among clones and irrigation treatments. Representative individuals were selected based on average morphological characteristics per treatment. Scale bars = 5 cm.

Correlation and multivariate relationships among morphological and biomass traits

The correlation matrix revealed consistent patterns of association among morphological and biomass-related traits (Fig. 5). Fresh weight variables of shoots, roots and whole plants were strongly and positively correlated, indicating coordinated variation

among plant compartments. Dry weight and dry matter percentage traits were positively correlated among themselves and showed inverse associations with fresh weight variables, suggesting contrasting patterns between tissue hydration and dry matter accumulation. Root morphological traits exhibited stronger correlations with fresh weight than with dry weight, indicating a closer association with traits related to tissue expansion and morphophysiological activity associated with adventitious rooting induction.

Fig. 5 Pearson correlation heatmap between morphophysiological traits and adventitious rooting indicators in mini-cuttings of five hybrid *Eucalyptus* spp. clones cultivated under two irrigation water sources: urban water supply and treated produced water from the petroleum industry.

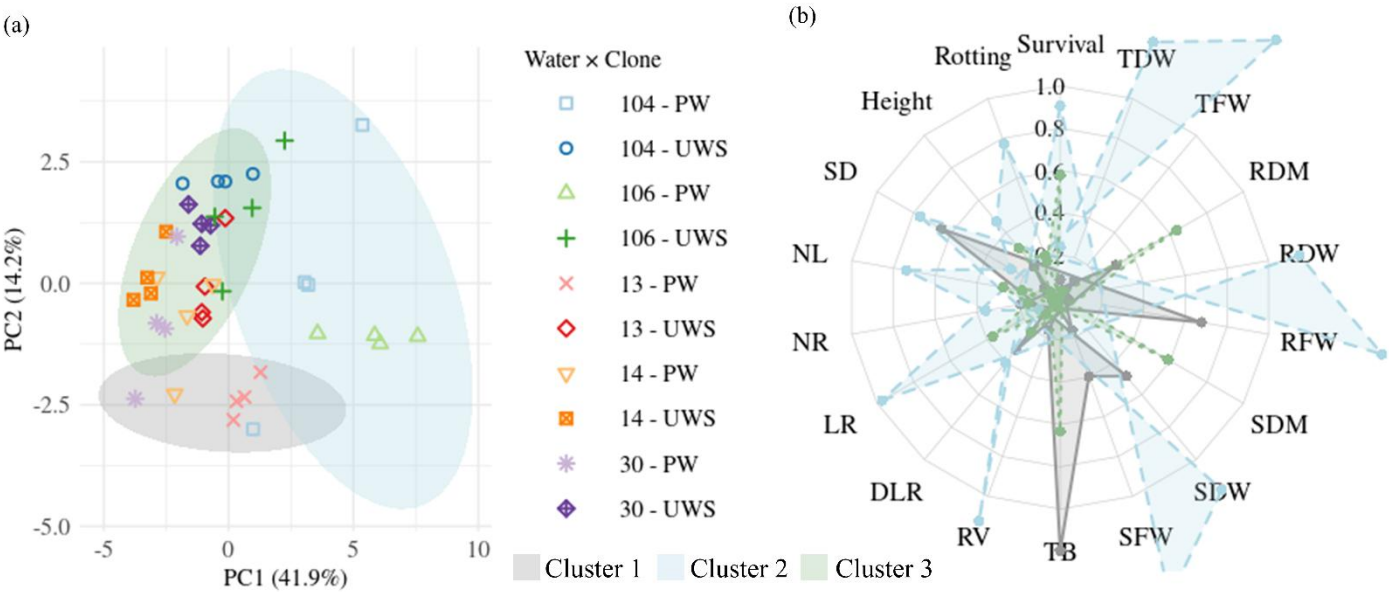


Notes: The heatmap displays only the lower triangular matrix, with a color gradient from dark blue (negative correlation) to yellow (positive correlation). Numerical values represent Pearson correlation coefficients (r), and asterisks below the values indicate significance levels ($p \leq 0.05$, $*p \leq 0.01$, $**p \leq 0.001$).

Principal component analysis (PCA) summarized multivariate variation among rooting, morphometric and biomass traits (Fig. 6a). The first two components explained 56.1% of the total variance (PC1 = 41.9%; PC2 = 14.2%). K-means clustering of PCA scores separated the ten Clone × Water combinations into three distinct multivariate clusters. Cluster 1 (gray ellipse) was predominantly composed of clone 13 irrigated with PW and was associated with comparatively high standardized values for a subset of traits, indicating a distinct, but not generalized performance profile. Cluster 2 (light blue ellipse) grouped mainly clones 104 and 106 under PW and exhibited higher standardized values across multiple growth- and biomass-related variables. Cluster 3 (light green ellipse) included all clones under UWS as well as clones 14 and 30 under PW and showed intermediate multivariate profiles between Clusters 1 and 2.

The radar plot summarizes standardized trait means for each cluster (Fig. 6b) and mirrors the PCA structure. Cluster 2 displayed higher values for most traits, whereas Cluster 1 showed elevated values restricted to specific traits. Cluster 3 presented intermediate values across traits. Together, these analyses indicate that clone × irrigation combinations form distinct multivariate response profiles rather than a uniform response to the water source.

Fig. 6 (a) Principal component analysis (PCA) of morphological and physiological traits of *Eucalyptus* spp. mini-cuttings, showing three clusters based on Water $\times$ Clone combinations. (b) Radar chart comparing standardized mean values of the 18 traits across the identified clusters. *PC1* and *PC2* explained 41.9 percent and 14.2 percent of the total variance, respectively. Shaded ellipses represent the three multivariate clusters identified by *k*-means. Trait acronyms: Survival; Rotting; Height; SD = stem diameter; NL = number of leaves; NR = number of roots; LR = longest root length; DLR = diameter of the longest root; RV = root volume; TB = total biomass; SFW = shoot fresh weight; SDW = shoot dry weight; RFW = root fresh weight; RDW = root dry weight; RDM = root dry matter (%); TFW = total fresh weight; TDW = total dry weight. PW = produced water; UWS = urban water supply.



Overall, under the non-saline and chemically balanced conditions previously characterized for both irrigation waters, morphometric and biomass responses during adventitious rooting were driven primarily by genotype-specific interactions with irrigation chemistry rather than osmotic or toxic stress. Treated produced water promoted greater fresh biomass and higher survival, mainly through the stimulation of root development, whereas the urban water supply favored higher tissue dry matter concentration in specific genotypes. These contrasting allocation patterns indicate that PW influences early clonal performance through subtle ionic and nutritional effects, linking the chemical composition of irrigation waters to genotype-dependent growth responses.

Discussion

The reuse of treated industrial effluents, such as produced water (PW) derived from oil and natural gas extraction, has emerged as an alternative to conventional water sources in forest nurseries [53]. The physical and physicochemical properties of the PW used in the present study were suitable for irrigation, without compromising rooting, survival, or biomass accumulation in mini-cuttings of hybrid *Eucalyptus* genotypes. These findings support the operational and chemical feasibility of PW during the rooting phase of clonal propagation via mini-cuttings for the evaluated genotypes, while also indicating the occurrence of genotype-dependent responses in seedling development [50].

Adventitious rooting is a complex morphogenetic process based on cellular totipotency. According to Steffens and Rusmussen [46], this phenomenon requires the dedifferentiation of somatic cells, which regain meristematic competence for the formation of root primordia. This cellular reprogramming is coordinated by the interaction between endogenous factors, associated with genetic constitution, hormonal balance, and the presence of inhibitors, and exogenous factors, related to substrate conditions and the nutritional and water status of the growth environment [5, 25, 54].

In the present study, considering the classical criteria for mini-cutting establishment proposed by Hartmann *et al.* [25], PW did not compromise establishment during the rooting phase, maintaining adequate levels of survival and rooting percentage, although it modulated biomass allocation and the expression of morphological traits in a genotype-dependent manner. Survival values were higher under PW, accompanied by greater shoot height (Fig. 3), indicating the maintenance of physiological activity associated with initial growth under this water regime.

The inclusion in the crosses-of species described in the literature as adapted to tropical environments and restrictive edaphoclimatic conditions, such as *E. urophylla*, *E. tereticornis*, and *E. brassiana*, may have contributed to this response pattern, without evidence of limiting effects on root growth [41]. Accordingly, responses to environmental stimuli varied as a function of genotype, resulting in distinct morphological strategies among the evaluated crosses. Total fresh biomass was generally higher under PW, reflecting higher water content in seedling tissues. This increase was mainly associated with greater shoot fresh biomass in all clones, except clone 30 (*E. tereticornis* × *E. brassiana* × *E. grandis*). Root fresh weight was higher under PW in clones 13 (*E. urophylla* × *E. brassiana*), 104 and 106 (*E. urophylla* × *E. tereticornis*), with more pronounced increases observed in the latter clones. This pattern indicates greater water

retention in plant tissues, reflecting the maintenance of cellular turgor during the rooting phase, as described for woody propagules under adequate water balance conditions [47].

Clone 30 (*E. tereticornis* × *E. brassiana* × *E. grandis*) exhibited higher values under irrigation with UWS for traits associated with volumetric expansion and root number. In contrast, the greater accumulation of root dry matter under PW in this genotype indicates that this water source was associated with structural biomass deposition in the root system, even without an increase in the number of emitted structures. This pattern suggests the adoption of a distinct morphological strategy under PW, characterized by individually denser roots, in contrast to the greater root proliferation observed under UWS [8]. The participation of *E. grandis*, a species described as resource-demanding [19], did not result in limitations to early development under PW, indicating that the ionic composition of this water was sufficient to sustain the observed root growth, albeit with differences in biomass allocation patterns.

This pattern of phenotypic plasticity indicates that, for the evaluated genotypes, PW acted as an environmental factor capable of modifying morphological allocation patterns within the root system, as evidenced by differences in fresh and dry biomass allocation among the evaluated crosses [5, 46]. At the same time, the absence of significant differences in the length of the longest root for most clones (13, 14, 30, and 106) demonstrates that PW did not impose limiting effects on root growth.

The higher availability of cations and micronutrients (trace elements) in PW (Tables 1 and 2) is consistent with an integrated effect during the induction and expansion phases of adventitious roots. Potassium (K) is associated with the maintenance of cellular turgor, favoring the expansion of developing tissues [49], whereas calcium (Ca) plays a structural role in the cell wall and participates in processes related to cell division and tissue differentiation, which are essential for adventitious root formation [42, 48]. Magnesium (Mg) contributes to photosynthetic efficiency and carbohydrate translocation, ensuring the energy supply required for early root growth [27]. Boron (B) acts on cell wall integrity and pectin synthesis and is particularly relevant during root tissue differentiation, as its deficiency disrupts meristem organization and tissue differentiation in roots [56].

The response to PW application was dependent on the evaluated clones, indicating that its use should consider the morphological strategy and the specific growth demands of each hybrid. In this context, the supply of structural cations, such as Ca^{2+} present at

higher concentrations in PW (Table 1), was associated with the support of root system formation and expansion, without evidence of stress induction [48].

The effects observed under PW were also related to the balance between nutrient input and ionic stress control. Although UWS exhibited higher SAR values, the ionic composition of PW was associated with the attenuation of the potential effects of Na^+ due to the greater relative activity of Ca^{2+} and Mg^{2+} [55]. This relationship is relevant because excess Na^+ can antagonize K^+ uptake and impair growth in Na^+ -sensitive *Eucalyptus* spp. [44].

Additionally, the physicochemical stability of PW, evidenced by the electrical conductivity equivalence between water sources ($\text{EC} = 0.5 \text{ dS m}^{-1}$), indicates the absence of differential osmotic stress during the rooting phase. The slightly lower pH of PW compared with UWS may have influenced rhizosphere chemical dynamics [49], increasing the availability of micronutrients such as B and Mo, which are associated with rhizogenic processes due to their roles in nodule formation and function, nitrogen fixation and assimilation, and, consequently, nitrogen supply and metabolic conditions related to cell division and tissue differentiation in roots [9, 16].

The use of PW, with a duly characterized physicochemical composition (Tables 1 and 2), was compatible with the adventitious rooting phase in forest nurseries. The results indicate that, when treated and in compliance with current regulations, PW can be incorporated as a water source in clonal propagation systems, contributing to reduced reliance on conventional water sources, particularly in nurseries located in regions with limited water availability and in proximity to oil and gas extraction facilities.

The treatment of PW for reuse purposes presents lower costs than those associated with reservoir reinjection or controlled disposal, particularly when considering the energy, operational, and environmental monitoring requirements involved in these processes [20]. The local use of PW in forest nurseries reduces dependence on conventional water sources and is particularly relevant in areas where PW production occurs in close geographic proximity to silvicultural activities.

Beyond the economic aspect, the application of PW is aligned with the principles of the circular economy by promoting the reintegration of a treated industrial effluent as a productive input, reducing pressure on higher-quality water resources and contributing to the rational use of water in productive systems [31, 37]. This approach is directly related to the Sustainable Development Goals, particularly SDG 6, associated with

sustainable water management, and SDG 12, focused on responsible consumption and production [35].

Additionally, the presence of cations and micronutrients in PW, as evidenced in this study, indicates a complementary potential for nutrient supply, which may reduce the demand for conventional agricultural inputs during the rooting phase without altering the observed morphological patterns of the seedlings.

The limitations of this study are associated with the adopted experimental scope. The physical and chemical quality of PW may vary depending on the oil and gas extraction well, temporal variation within the same well, and the treatment methodology applied, which may affect the quality of treated PW and, consequently, its operational applicability in forest nurseries [17]. In addition, the evaluations focused on morphological traits during the rooting phase and did not include physiological or biochemical analyses that would allow a deeper understanding of the mechanisms underlying the observed responses. The duration of the experiment was intentionally restricted to the critical period of induction and formation of adventitious roots, which limits extrapolations to subsequent growth phases. Nevertheless, this approach is consistent with the proposed objective, as rooting represents the determining stage for the success of clonal propagation.

Conclusions

This study demonstrates that treated produced water (PW) is technically suitable for the rooting phase of *Eucalyptus* mini-cuttings under controlled nursery conditions. The physicochemical composition of PW did not impair rooting, survival, or initial biomass accumulation, confirming its compatibility with clonal propagation systems.

Plant responses were strongly genotype dependent. Clones 104 and 106 showed superior rooting and early vegetative vigor under PW, whereas clone 30 performed better under the urban water supply, indicating a limited capacity to exploit the ionic environment provided by PW.

Although restricted to the rooting phase, the absence of negative effects indicates that the ionic differences between PW and the urban water supply were not sufficient to limit early development. Overall, treated PW represents a viable alternative to freshwater for clonal *Eucalyptus* propagation, provided that responsive genotypes are selected and water quality is routinely monitored.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

Not applicable

Consent for publication

Not applicable

Availability of data and materials

The datasets used and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Competing interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding

This work was carried out with financial support from the Human Resources Program of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels – PRH-ANP, (PRH 55) within the scope of the Federal Rural University of the Semi-Arid Region - UFERSA, through the management of FAPESP (agreement n°. 25/02752-7).

Authors' contributions - CRediT Author Statement

L. R. S. F.: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data curation, Formal analysis, Writing – original draft, Project administration.

E. S. F.: Formal analysis.

R.A. O.: Data collection, Visualization.

N. I. L. Q.: Methodology, formal analysis.

M. I. O. Teixeira: Data analysis.

L. S. O.: Writing – review

P. C. D. A.: Supervision, Writing – review & editing.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Human Resources Program 55 and the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (PRH 55 – ANP), which enabled the development of this research, as well as the financial assistance from the São Paulo Research Foundation (FAPESP), grant number 25/02752-

7. We also extend our thanks to the Federal Rural University of the Semi-Arid Region (UFERSA) for providing the infrastructure necessary for conducting the experiments and analyses. Finally, we express our gratitude to FAPEMIG RED-00225-23.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process.

During the preparation of this work, the author used ChatGPT 5o, developed by OpenAI, to support the translation, linguistic refinement, and adaptation of technical content into academic English. After using this tool, the author thoroughly reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of the published article.

References

1. Al-Ghouti MA, Al-Kaabi MA, Ashfaq MY, Da'na DA (2019) Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering* 28:222–239. doi: 10.1016/j.jwpe.2019.02.001
2. Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, de Moraes Gonçalves JL, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
3. Amakiri KT, Canon AR, Molinari M, Angelis-Dimakis A (2022) Review of oilfield produced water treatment technologies. *Chemosphere* 298:134064. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134064
4. APHA (2017) 5520 oil and grease. In: *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association
5. Arteca RN (1996) Rooting. In: *Plant Growth Substances*. Springer US, Boston, MA, pp 127–146
6. Bacani VM, Machado Da Silva BH, Ayumi De Souza Amede Sato A, Souza Sampaio BD, Rodrigues Da Cunha E, Pereira Vick E, Ribeiro De Oliveira VF, Decco HF (2024) Carbon storage and sequestration in a *Eucalyptus* productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models. *Journal of Cleaner Production* 444:141291. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141291
7. Baesso G, Paixão CF, Santos GAD, Souza GAD, Canal GB, Pimenta TM, Caiafa KF, Lorenzoni AP (2024) Early selection of *Eucalyptus* hybrids tolerant to water deficit, pests, and diseases. *RARV* 48:1–15. doi: 10.53661/1806-9088202448263765
8. Basílio JJN, Campoe OC, Queiroz TB, De Souza CR, Carneiro RL, Alvares CA, Figura MA (2024) Fine Root Density Dynamics and Carbon Stock of *Eucalyptus* spp.: Interplay of Age, Genotype, and Edaphoclimatic Conditions. *Plants* 13:1503. doi: 10.3390/plants13111503
9. Blevins DG, Lukaszewski KM (1998) BORON IN PLANT STRUCTURE AND FUNCTION. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 49:481–500. doi: 10.1146/annurev.arplant.49.1.481
10. Brazil (2011) Resolution No. 430, of May 13, 2011
11. Brazilian Association of Technical Standards (2000) NBR 14546: Water – Determination of oils and greases – Gravimetric method. Brazilian Association of Technical Standards, Rio de Janeiro, Brazil
12. Brazil (2008) Resolution No. 396, of April 3, 2008
13. Burkhardt A, Gawde A, Cantrell CL, Baxter HL, Joyce BL, Stewart CN, Zheljazkov VD (2015) Effects of Produced Water on Soil Characteristics, Plant Biomass, and Secondary Metabolites. *J Environ Qual* 44:1938–1947. doi: 10.2134/jeq2015.06.0299

14. Burkhardt A, Gawde A, Cantrell CL, Zheljazkov VD (2015) Effect of varying ratios of produced water and municipal water on soil characteristics, plant biomass, and secondary metabolites of *Artemisia annua* and *Panicum virgatum*. *Industrial Crops and Products* 76:987–994. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.08.018
15. California Regional Water Quality Control Board (2019) Food Safety Project White Paper. Central Valley Regional Water Quality Control Board
16. Camacho-Cristóbal JJ, Rexach J, González-Fontes A (2008) Boron in Plants: Deficiency and Toxicity. *JIPB* 50:1247–1255. doi: 10.1111/j.1744-7909.2008.00742.x
17. Camarillo MK, Stringfellow WT (2018) Biological treatment of oil and gas produced water: a review and meta-analysis. *Clean Techn Environ Policy* 20:1127–1146. doi: 10.1007/s10098-018-1564-9
18. Carneiro JG de A (1995) Production and Quality Control of Forest Seedlings. Universidade Federal do Paraná Universidade Estadual do Norte Fluminense Fundação de Pesquisas Flore., Viçosa, MG
19. Castro Filho MND, Tagliaferre C, Oliveira FDS, Silva BLD, Alves RO, Paula AD, Barros FM (2022) BIOMASS OF TWO *Eucalyptus* CLONES (*E. grandis* × *E. urophylla*) IRRIGATED WITH SALINE WATER. *Rev Árvore* 46:e4612. doi: 10.1590/1806-908820220000012
20. Clark CE, Veil JA (2009) Produced water volumes and management practices in the United States.
21. Giehl RFH, Gruber BD, Von Wirén N (2014) It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals. *Journal of Experimental Botany* 65:769–778. doi: 10.1093/jxb/ert421
22. Gonçalves JL, Alvares CA, Rocha JH, Brandani CB, Hakamada R (2017) Eucalypt plantation management in regions with water stress. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 79:169–183. doi: 10.2989/20702620.2016.1255415
23. Grossnickle SC, MacDonald JE (2018) Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. *Forests* 9:283. doi: 10.3390/f9050283
24. Harrel FE (2024) Hmisc: Harrell Miscellaneous
25. Hartmann H, Kester D, Davies F, Geneve R, Wilson S (2018) Hartmann & Kester's Plant Propagation: Principles and Practices. Pearson, NY, NY
26. Jabri FA, Muruganandam L, Rajamohan N (2025) Sustainable treatment of oil produced water using novel methods – A review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 18:100658. doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100658
27. Jiao C, Zhang J, Yu H, He N (2024) Variation of magnesium drives plant adaption to heterogeneous environments by regulating efficiency in photosynthesis on a large scale. *Journal of Ecology* 112:2758–2770. doi: 10.1111/1365-2745.14411

28. Jones ER, Bierkens MFP, Van Vliet MTH (2024) Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality. *Nat Clim Chang* 14:629–635. doi: 10.1038/s41558-024-02007-0
29. Lê S, Josse J, Husson F (2008) FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* 25:1–18
30. Loiola ÂT, Pinheiro ES, Silva Souza ARD, Muller Da Silva PH, Holanda ACD, Dias Araujo PC (2025) Influence of environmental factors on the survival and growth of *Eucalyptus tereticornis* provenances in the Brazilian semi-arid. *Forest Ecology and Management* 593:122925. doi: 10.1016/j.foreco.2025.122925
31. MDIC (2025) PLANO NACIONAL DE ECONOMIA CIRCULAR 2025 – 2034
32. Medeiros PLD, Pimenta AS, Miranda NDO, Melo RRD, Amorim JDS, Azevedo TKBD (2025) The Myth That *Eucalyptus* Trees Deplete Soil Water—A Review. *Forests* 16:423. doi: 10.3390/f16030423
33. Milhomem SBB, Ramos NDS, Gonçalves FB, Medeiros GHD, Fernandes HE, Dotto MC, Hakamada RE, Siebeneichler SC, Lemus Erasmo EA (2025) Response of *Eucalyptus* Seedlings to Water Stress in a Warm Tropical Region in Brazil. *Forests* 16:1802. doi: 10.3390/f16121802
34. Nakazawa M (2023) fmsb: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data
35. ONU (2025) Sustainable consumption and production. In: United Nations Sustainable Development. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>. Accessed 19 Dec 2025
36. Pica NE, Carlson K, Steiner JJ, Waskom R (2017) Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: Effects on switchgrass and rapeseed germination, physiology and biomass yield. *Industrial Crops and Products* 100:65–76. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.02.011
37. PNRH (2022) Plano Nacional de Recursos Hídricos
38. Podar D, Maathuis FJM (2022) The role of roots and rhizosphere in providing tolerance to toxic metals and metalloids. *Plant Cell & Environment* 45:719–736. doi: 10.1111/pce.14188
39. R Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing
40. Rosa L, Chiarelli DD, Rulli MC, Dell’Angelo J, D’Odorico P (2020) Global agricultural economic water scarcity. *Sci Adv* 6:eaz6031. doi: 10.1126/sciadv.eaz6031
41. Saadaoui E, Ben Yahia K, Dhahri S, Ben Jamaa ML, Khouja ML (2017) An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp. *Forestry Studies* 67:86–96. doi: 10.1515/fsmu-2017-0014

42. Sattelmacher B, Gerendas J, Thoms K, Brück H, Bagdady NH (1993) Interaction between root growth and mineral nutrition. *Environmental and Experimental Botany* 33:63–73. doi: 10.1016/0098-8472(93)90056-L
43. Soares M, Sousa V de, Leite CC (2018) Energy forests: potential of dedicated biomass in Brazil. Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), São Paulo
44. Souza MNDS, Leite FA, Santos EF, Ferraz ADV, Goncalves JLD, Lavres J (2021) Partial Substitution of K by Na Alleviates Drought Stress and Increases Water Use Efficiency in *Eucalyptus* Species Seedlings. *Front Plant Sci* 12:632342. doi: 10.3389/fpls.2021.632342
45. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, De Vries W, Vermeulen SJ, Herrero M, Carlson KM, Jonell M, Troell M, DeClerck F, Gordon LJ, Zurayk R, Scarborough P, Rayner M, Loken B, Fanzo J, Godfray HCJ, Tilman D, Rockström J, Willett W (2018) Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562:519–525. doi: 10.1038/s41586-018-0594-0
46. Steffens B, Rasmussen A (2016) The Physiology of Adventitious Roots. *Plant Physiology* 170:603–617. doi: 10.1104/pp.15.01360
47. Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy AS (2015) *Plant physiology and development*, Sixth edition. Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts
48. Thor K (2019) Calcium—Nutrient and Messenger. *Front Plant Sci* 10:440. doi: 10.3389/fpls.2019.00440
49. Timilsena YP, Adhikari R, Casey P, Muster T, Gill H, Adhikari B (2015) Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *J Sci Food Agric* 95:1131–1142. doi: 10.1002/jsfa.6812
50. Vilasboa J, Da Costa CT, Fett-Neto AG (2019) Rooting of eucalypt cuttings as a problem-solving oriented model in plant biology. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 146:85–97. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.12.007
51. Wei T, Simko V (2021) *corrplot: Visualization of a Correlation Matrix*
52. Wickham H (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer
53. Wiltse ME, Ballenger B, Stewart CB, Blewett TA, Wadler C, Roth HK, Coupanec M, Malik HT, Xu P, Tarazona Y, Zhang Y, Sudowe R, Rosenblum JS, Quinn JC, Borch T (2025) Oil and gas produced water for cattle, crops, and surface water discharge: Evaluation of chemistry, toxicity and economics. *Journal of Hazardous Materials* 494:138581. doi: 10.1016/j.jhazmat.2025.138581
54. Xavier A (2021) *Silvicultura clonal: princípios e técnicas*, 3rd ed. Editora UFV, Viçosa, MG
55. Xie Y, Ning H, Zhang X, Zhou W, Xu P, Song Y, Li N, Wang X, Liu H (2024) Reducing the Sodium Adsorption Ratio Improves the Soil Aggregates and Organic Matter

in Brackish-Water-Irrigated Cotton Fields. *Agronomy* 14:2169. doi: 10.3390/agronomy14092169

56. Zhou GF, Peng SA, Liu YZ, Wei QJ, Han J, Islam MdZ (2014) The physiological and nutritional responses of seven different citrus rootstock seedlings to boron deficiency. *Trees* 28:295–307. doi: 10.1007/s00468-013-0949-y

4. Artigo 2: Respostas morfológicas e nutricionais de clones de eucalipto sob irrigação com água produzida: implicações para a sustentabilidade silvicultural na região semiárida.

RESUMO

Este estudo avaliou a resposta de cinco clones de *Eucalyptus* sob irrigação com Água Produzida (AP) proveniente da extração de petróleo e gás *onshore*, analisando o crescimento inicial por 91 dias, as razões de biomassa, a alocação de carbono (C) e a distribuição de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) nos tecidos vegetais. Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 3×5 (três proporções de AP e cinco clones), com cinco repetições por tratamento, sendo a unidade experimental um vaso com uma planta. Em seguida, os dados foram submetidos à ANOVA bifatorial, e as médias, comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Os resultados demonstram um polimorfismo clonal na resposta ao estresse iônico. O clone C3 apresentou a melhor performance produtiva, com máxima alocação de carbono total e menor razão raiz/parte aérea ($R/PA = 1,02$), associada à alta concentração foliar de K, indicando superioridade no ajuste osmótico e na eficiência do uso de nutrientes. Em contrapartida, o clone C5 adotou uma estratégia morfológica resiliente, com a maior R/PA (1,36) e priorização de N e P na raiz, o que pode ser vantajoso para adaptação em ambientes mais restritivos. Já o clone C2 apresentou baixa alocação de C e ineficiência no uso de N, revelando-se mais sensível ao uso de AP. Conclui-se que a AP é uma fonte viável para irrigação na silvicultura, desde que haja seleção genotípica. Ressalta-se que os impactos edáficos não foram abordados; assim, o uso prolongado da AP requer monitoramento periódico do solo e estratégias adequadas de manejo para garantir a sustentabilidade do sistema produtivo.

Palavras-chave: circularidade da água produzida; alocação de carbono; silvicultura e indústrias de petróleo.

PAPER 2:

Morphological and nutritional responses of *Eucalyptus* clones under irrigation with produced water: implications for silvicultural sustainability in the semiarid region

ABSTRACT

This study evaluated the response of five *Eucalyptus* clones under irrigation with Produced Water (PW) derived from onshore oil and gas extraction, analyzing initial growth over 91 days, biomass partitioning, carbon (C) allocation, and the distribution of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) in plant tissues. The experiments were conducted in a randomized block design, in a 3×5 factorial scheme (three PW proportions and five clones), with five replicates per treatment, each experimental unit consisting of one plant per pot. Residual normality and homoscedasticity were verified by the Shapiro–Wilk and Levene tests, both at a 5% significance level. Data were then subjected to two-way ANOVA, and means were compared using Tukey’s test at a 5% probability level. The results demonstrated clonal polymorphism in response to ionic stress. Clone C3 exhibited the best productive performance, with the highest total carbon allocation and the lowest root-to-shoot ratio ($R/S = 1.02$), associated with a high foliar K concentration, indicating superiority in osmotic adjustment and nutrient use efficiency. In contrast, clone C5 adopted a morphological resilience strategy, with the highest R/S ratio (1.36) and prioritization of N and P in the roots, which may be advantageous for adaptation to more restrictive environments. Clone C2, however, showed low C allocation and inefficient N use, revealing higher sensitivity to PW irrigation. In conclusion, PW is a viable water source for forestry irrigation, provided that rigorous genotype selection is conducted. It is noteworthy that soil impacts were not assessed; therefore, the long-term use of PW requires periodic soil monitoring and appropriate management strategies to ensure the sustainability of the production system.

Keywords: ionic stress, produced water circularity, carbon allocation, genetic selection

Introdução

Os plantios florestais constituem um componente relevante na bioeconomia mundial ao promover a provisão sustentável de biomassa lignocelulósica e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono e da redução da pressão sobre remanescentes florestais nativos (FAO, 2025). A contribuição desses sistemas depende do sucesso do estabelecimento inicial das mudas, fase fenológica crítica devido à elevada vulnerabilidade ao estresse abiótico (Gebirehiwot, 2023).

Em escala global, a limitação hídrica, intensificada pelas mudanças climáticas e pelas projeções de aumento da frequência de eventos extremos, condiciona a viabilidade técnica dos plantios florestais (Water action | UNEP, 2024; Castro, 2025). Nesse contexto, a otimização do estabelecimento inicial em ambientes de restrição hídrica demanda o aporte de tecnologias de manejo de precisão e a incorporação de fontes hídricas alternativas.

Entre as fontes potenciais, destaca-se o principal resíduo líquido da extração de óleo e gás natural, a água produzida (AP), que é composta por águas de formação e/ou injetadas, podendo conter elevadas concentrações de sais, metais, óleos e outros contaminantes orgânicos e inorgânicos (Cooper *et al.*, 2022; Nath; Chowdhury; Rhaman, 2023). Assim, exige tratamento prévio e caracterização físico-química antes de qualquer forma de disposição ou reuso, de modo a atender aos limites estabelecidos na legislação ambiental vigente (Cooper *et al.*, 2022).

A geração de AP aumenta com o avanço da maturação dos campos petrolíferos, independentemente de incrementos na produção de óleo. Entre janeiro de 2022 e janeiro de 2025, a produção média *onshore* brasileira de AP foi de aproximadamente 1.603.486 bbl d⁻¹. Nesse período, a Bacia Potiguar brasileira concentrou aproximadamente 60% do volume nacional de AP. Projeções indicam aumento da produção onshore de água produzida até 2028, associado à exploração de campos maduros (Assunção; Vieira; Almeida, 2018; ANP, 2025).

A destinação predominante da AP ainda é a injeção subterrânea, prática que inviabiliza o reaproveitamento e eleva os custos operacionais. (Dolan; Cath; Hogue, 2018; Sanchez-Rosario; Hildenbrand, 2022). A incorporação de princípios da economia circular ao setor petrolífero, portanto, converte esse passivo ambiental em recurso estratégico, em consonância com o Plano Brasileiro de Economia Circular (MDIC, 2025).

Nesse contexto, o uso desse efluente tratado em sistemas de irrigação florestal pode mitigar impactos ambientais da indústria do petróleo e, ao mesmo tempo, suprir demandas da silvicultura regional (Abdelhamid *et al.*, 2024). Espécies com plasticidade fenotípica apresentam elevado potencial para aproveitamento desse insumo alternativo no estabelecimento inicial de plantios florestais (Saadaoui *et al.*, 2017).

O gênero *Eucalyptus* destaca-se pela existência de espécies que apresentam plasticidade e a adaptabilidade às condições climáticas extremas, rápido crescimento e elevado valor econômico (Drumond; Oliveira; Ribaski, 2016). Avanços no melhoramento genético e nas práticas silviculturais têm permitido expandir as plantações para ambientes mais secos e quentes, com a utilização de espécies tolerantes como *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* e *E. brassiana*, em programas de hibridação para conferir maior resistência hídrica a clones comerciais de *E. grandis* (Gándara *et al.*, 2023; Basílio *et al.*, 2024).

Assim, o uso da água produzida tratada na irrigação de *Eucalyptus* spp. representa uma oportunidade de integrar a economia circular da indústria petrolífera com a silvicultura sustentável em regiões com limitação hídrica. Além de potencializar a formação de biomassa, importante sumidouro de carbono atmosférico, já que cerca de 50% da massa seca das árvores é carbono, essa prática pode recuperar áreas degradadas e mitigar mudanças climáticas (Angelotti; Fernandes Junior; Sa, 2011; Minhas *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2022; Waly; Mickovski; Thomson, 2023).

Diante desse quadro, justifica-se a investigação científica sobre o potencial dessa fonte hídrica alternativa na produção florestal, particularmente em genótipos híbridos de *Eucalyptus*. Assim, este estudo adota uma abordagem multidisciplinar para avaliar os efeitos da irrigação com água produzida tratada no desenvolvimento e no crescimento inicial desses materiais genéticos em condições que simulam o ambiente de campo, oferecendo subsídios técnicos para a economia circular na indústria petrolífera e para a silvicultura sustentável, com potencial para gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais de elevado impacto.

Material e métodos

Área experimental

O experimento foi conduzido entre julho e dezembro de 2024, os primeiros 45 dias em ambiente protegido (casa de vegetação) e, posteriormente, 91 dias a pleno sol, no campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), nas coordenadas

5°12'21''S, 37°19'11'' O e altitude de 21 m acima do nível do mar, localizada no município de Mossoró-RN.

As condições meteorológicas durante o período do experimento a pleno sol (entre setembro e o início de dezembro de 2024) foram monitoradas por meio dos registros diários obtidos na Estação Meteorológica Automática da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Mossoró, localizada nas proximidades da área experimental. A temperatura média do ar no período foi de 28,20 °C, enquanto as médias das temperaturas máxima e mínima foram de 35,69 °C e 22,62 °C.

Esses valores são compatíveis com o padrão climático da região semiárida, caracterizada por temperaturas elevadas e ampla variação térmica diária, conforme descrito nas Normais Climatológicas do INMET (2020) e nas classificações climáticas de Alvares *et al.*, (2013).

A umidade relativa oscilou significativamente, com máxima média de 78,40% e mínima média de 29,97%, e a precipitação média diária foi praticamente nula (0,01 mm), confirmando a condição de estiagem típica do semiárido potiguar (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002). Tais condições influenciam diretamente o crescimento inicial das mudas, reforçando a importância do monitoramento microclimático no delineamento experimental.

Descrição das fontes de água e dos tratamentos

A caracterização física e físico-química da água de abastecimento urbano (AA) e da água produzida tratada (AP) foi realizada previamente à aplicação dos tratamentos de irrigação, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). As medições de pH e condutividade elétrica (CE) foram realizadas em equipamento multiparâmetro de bancada. As concentrações dos cátions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , bem como dos metais presentes em baixas concentrações (Fe, Zn, Cu, Mn, Pb e Cd), foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica. Os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- e HCO_3^- foram quantificados por métodos titulométricos ou turbidimétricos, conforme o procedimento específico para cada íon. A análise de óleos e graxas totais (TOG) foi realizada por laboratório certificado, utilizando extração gravimétrica, em conformidade com Johnson *et al.* (1996), Olusola (2020) e a Norma Brasileira 14546 (Brazilian Association of Technical Standards, 2000).

A avaliação da sodicidade incluiu o cálculo da razão de adsorção de sódio (RAS), conforme Richards (1964), da RAS ajustada, estimada a partir da relação entre a condutividade elétrica e a razão $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$, segundo Ayers e Westcot (1999), bem como do índice de carbonato de sódio residual (CSR). Todas as concentrações iônicas utilizadas nos cálculos foram expressas em miliequivalentes por litro (meq L^{-1}).

As análises dos elementos-traço foram realizadas em triplicata no Laboratório de Química Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC), que opera com procedimentos internos de controle de qualidade e rastreabilidade reconhecidos pelo INMETRO. A AP utilizada no experimento foi fornecida por uma estação de tratamento de água produzida (ETAP). Ao longo do manuscrito, o termo AP refere-se exclusivamente ao lote tratado proveniente dessa instalação.

A caracterização indicou que a AP e a AA apresentaram valores semelhantes de CE (0,53 e 0,50 dS m^{-1} , respectivamente) e índices de sodicidade enquadrados em classes não restritivas ao uso agrícola, segundo Ayers e Westcot, (1999). Os valores completos referentes aos principais parâmetros de qualidade da água encontram-se apresentados na Tabela 1.

Os elementos não incluídos na tabela descritiva apresentaram concentrações semelhantes entre as duas fontes hídricas. Para todos esses elementos, os valores permaneceram abaixo dos limites estabelecidos nas referências de qualidade da água adotadas neste estudo. Esses elementos corresponderam exclusivamente ao alumínio (Al), antimônio (Sb), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cobalto (Co), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), prata (Ag), selênio (Se) e vanádio (V).

Os tratamentos consistiram em três proporções de AP aplicadas na irrigação: (i) 0% de AP, correspondente ao controle, irrigado exclusivamente com AA; (ii) mistura em proporção 1:1 entre AA e AP; e (iii) 100% de AP, composta integralmente pela água produzida tratada. As soluções foram previamente preparadas e armazenadas em reservatórios individuais de 1.000 L, garantindo a padronização e o manejo independente dos tratamentos ao longo do experimento.

Tabela 1. Caracterização das fontes hídricas utilizadas na irrigação de cinco clones de *Eucalyptus* no semiárido. PW, água produzida tratada; UWS, água de abastecimento urbano. Apresentam-se os parâmetros físico-químicos, índices relacionados à sodicidade, cátions e ânions majoritários, concentração total de íons e elementos traço selecionados.

Parâmetros	Unidade	PW	UWS
Físicoquímicos			
pH	–	7.94	8.33
Razão de Adsorção de Sódio (RAS)	–	2.34	6.4
RAS ajustada	–	0.37	0.13
Dureza	mg CaCO ₃ L ⁻¹	149.5	41.0
Carbonato de Sódio Residual (CSR)	mmol _c L ⁻¹	1.21	2.54
Cátions			
K ⁺ (potássio)	mmol _c L ⁻¹	0.50	0.31
Na ⁺ (sódio)		2.86	4.20
Ca ²⁺ (cálcio)		1.22	0.55
Mg ²⁺ (magnésio)		1.77	0.31
Ânions			
Cl ⁻ (cloreto)	mmol _c L ⁻¹	2.4	2.2
CO ₃ ²⁻ (carbonato)		0.4	0.1
HCO ₃ ⁻ (bicarbonato)		3.8	3.3
Íons totais			
Cátions totais	mmol _c L ⁻¹	6.35	5.37
Ânions totais		6.60	5.60
Elementos			
Ba (bário)	mg L ⁻¹	0.203	0.141
Cr (cromo)		≤ 0.001	0.005
B (boro)		0.226	0.124
Cu (cobre)		0.002	0.003
Mo (molibdênio)		0.007	0.003
Zn (zinco)		0.001	0.002
Óleos e Graxas Totais (TOG)		2.19	–

Caracterização dos substratos e adubações

O substrato das mudas utilizadas no experimento era composto pelo Carolina Soil Florestal® (turfa de sphagnum, vermiculita expandida, casca de arroz torrefada e hidrofibra; pH de $5,5 \pm 0,5$; condutividade elétrica (CE) $0,7 \pm 0,3$ dS m⁻¹; densidade de 145kg/m³; Capacidade de retenção de água e umidade máxima de 55% e 50%,

respectivamente). Os recipientes utilizados foram tubetes de polietileno com capacidade de 55 cm³.

Após o transplante, no início da fase de aclimação, o solo utilizado na condução do experimento foi disponibilizado pela empresa parceira fornecedora da AP. A caracterização físico-química do solo, bem como os índices de fertilidade calculados, encontra-se na Tabela 2. O solo foi adotado como substrato-base uniforme para todos os tratamentos, garantindo que a resposta das plantas refletisse exclusivamente o efeito das diferentes fontes de irrigação e as respostas dos genótipos.

Tabela 2. Caracterização físico-química, composição textural e índices de fertilidade do solo utilizado na condução do experimento em vasos a pleno sol.

Categoria	Parâmetro	Unidade	Valor / Descrição
Solo do experimento	Classe textural	—	Franco siltoso
	Argila	%	2.0
	Areia	%	39.0
	Silte	%	59.0
	Densidade global	kg dm ⁻³	1.1
	pH em água	—	7.7
	Condutividade elétrica (CE)	dS m ⁻¹	0.1
	Carbono orgânico	%	0.4
	Matéria orgânica	g dm ⁻³	6.2
	Nitrogênio (N)	mg dm ⁻³	0.7
	Fósforo (P)	mg dm ⁻³	0.9
	Potássio (K ⁺)	cmolc dm ⁻³	0,36
	Cálcio (Ca ²⁺)	cmolc dm ⁻³	12.6
	Magnésio (Mg ²⁺)	cmolc dm ⁻³	5.2
	Sódio (Na ⁺)	cmolc dm ⁻³	0.4
	Acidez potencial (H ⁺ + Al ³⁺)	cmolc dm ⁻³	1.1
	Ferro (Fe)	mg dm ⁻³	5.6
	Zinco (Zn)	mg dm ⁻³	5.1
	Cobre (Cu)	mg dm ⁻³	0.3
	Manganês (Mn)	mg dm ⁻³	8.7
Índices de fertilidade do solo	Soma de bases (SB)	cmolc dm ⁻³	23.4
	Capacidade de troca catiônica (CTC)	cmolc dm ⁻³	24.5
	Capacidade de troca efetiva (t)	cmolc dm ⁻³	19.7
	Saturação por bases (V)	%	94.4
	Percentagem de sódio trocável (PST)	%	1.6

Considerando a baixa disponibilidade inicial de N e P no solo, foi realizada adubação de base com o objetivo de padronizar a condição nutricional inicial entre os

tratamentos. A adubação de base consistiu na incorporação dos fertilizantes Basacote plus® 16-08-12 (N-P-K) e YaraMilla SUPERSTART® 13-33-08 (N-P-K), ambos aplicados na dose de 1.0 kg m⁻³, misturados ao substrato.

A fertirrigação semanal foi adotada como estratégia para manter o suprimento nutricional ao longo do experimento, minimizando a ocorrência de limitações nutricionais que pudessem interferir nas respostas fisiológicas associadas às fontes hídricas. Todas as unidades experimentais receberam as mesmas concentrações e volumes de solução nutritiva, de modo que o aporte nutricional não constituiu fator de variação experimental, preservando o foco das análises nas fontes de água e nas respostas genótípicas.

A adubação de cobertura foi realizada por meio de fertirrigação, com aplicações a cada sete dias de 200 mL por planta, visando atender às exigências nutricionais das plantas durante as fases de aclimação e rustificação. A solução nutritiva foi preparada em laboratório, armazenada em reservatório de 50 L mantido na casa de vegetação e utilizada ao longo do experimento. As concentrações dos sais empregados (g L⁻¹) foram: nitrato de cálcio [Ca (NO₃)₂], 0,220; fosfato monopotássico (KH₂PO₄), 0,240; nitrato de potássio (KNO₃), 0,140; sulfato de magnésio (MgSO₄), 0,360; sulfato de ferro (FeSO₄), 0,040; sulfato de zinco (ZnSO₄), 0,024; sulfato de manganês (MnSO₄), 0,050; sulfato de cobre (CuSO₄), 0,005; molibdato de sódio (Na₂MoO₄), 0,002; e ácido ascórbico (C₆H₈O₆), 0,640. A condutividade elétrica da solução nutritiva manteve-se entre 1,5 e 2,0 dS m⁻¹, faixa compatível com valores recomendados para soluções nutritivas de (Ayers; Westcot, 1999)

Material vegetal

Os cinco clones híbridos de *Eucalyptus* utilizados no experimento, denominados C1, C2, C3, C4 e C5, são provenientes de um viveiro florestal. O clone C1 origina-se do cruzamento interespecífico entre *E. urophylla* S.T. Blake e *E. brassiana* S.T. Blake. O clone C2 resulta de cruzamento triplo envolvendo *E. tereticornis* Sm., *E. brassiana* e *E. urophylla*. O clone C3 é produto do cruzamento entre *E. tereticornis*, *E. brassiana* e *E. grandis* W. Hill ex Maiden. Os clones C4 e C5 compartilham o mesmo cruzamento interespecífico entre *E. urophylla* e *E. tereticornis*. A diversidade de combinações interespecíficas representada pelos cinco clones foi deliberada, visando contemplar distintas estratégias morfofisiológicas de resposta à composição da AP e ampliar o espectro de inferências sobre a tolerância genotípica ao efluente em condições semiáridas.

As mudas desses clones foram transplantadas em vasos plásticos cônicos, com capacidade máxima de 3,8 L e abertura superior de 17 cm de diâmetro (área de referência = 0,02270 m²), contendo o solo previamente descrito. No momento do transplante, as mudas apresentavam, em média 15 cm de altura. O experimento foi conduzido em duas fases sequenciais: aclimação (45 dias, em casa de sombra) e crescimento e rustificação (91 dias, a pleno sol).

Na fase de aclimação, durante os primeiros 7 dias, todas as plantas foram irrigadas exclusivamente com água de abastecimento (AA). Os tratamentos com diferentes proporções de AP foram iniciados no oitavo dia de aclimação. A partir desse momento, cada planta recebeu aproximadamente 0,4 L por dia do tratamento correspondente. Considerando o período de 38 dias entre o início dos tratamentos e o final da aclimação, cada indivíduo recebeu um volume total de 15,2 L da solução correspondente ao seu tratamento.

A fase de rustificação e crescimento inicial teve duração de 91 dias e envolveu 75 plantas (5 genótipos × 3 soluções × 5 repetições). O manejo hídrico foi realizado com duas irrigações diárias (manhã e tarde), iniciando com 0,2 L por aplicação, com incrementos de 0,2 L a cada 15 dias até atingir 0,8 L por aplicação, totalizando 1,6 L planta⁻¹ dia⁻¹ ao final do ciclo. O volume total de água aplicado por planta ao longo do período foi de aproximadamente 109,6 L, resultando em uma média diária de 1,205 L planta⁻¹ dia⁻¹. Considerando as 75 plantas utilizadas, o volume total aplicado foi de cerca de 8.220 L, dos quais 4.110 L corresponderam à AP e o mesmo volume, à AA.

Com base na área do vaso, o valor calculado corresponde a uma lâmina média diária aplicada de aproximadamente 53,1 mm dia⁻¹. Este valor representa exclusivamente o volume de irrigação fornecido e não reflete a evapotranspiração real das plantas, uma vez que o experimento não incluiu medições de drenagem, percolado ou variações de peso dos recipientes.

Análises morfológicas e nutricionais

Crescimento aéreo e alocação de biomassa

As características de crescimento da parte aérea (altura, diâmetro do coleto e número de folhas) foram avaliadas no início da aplicação dos tratamentos e a cada intervalo de 15 dias (Benincasa, 2003). A altura foi medida desde a base do coleto até a região onde se localiza a gema apical, adotando-se uma régua milimetrada. O diâmetro

do coleto foi determinado com auxílio de paquímetro digital, posicionado imediatamente acima do nível do substrato. O número de folhas foi registrado por contagem direta de todas as folhas presentes em cada planta, sendo consideradas folhas com pelo menos 5 cm de comprimento.

Ao final do ensaio, as plantas foram coletadas e separadas em folhas, caules e raízes. As massas frescas foram coletadas e destinadas à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 70 °C, durante 72 horas, até atingirem massa constante, sendo então determinados os valores de massa seca de cada órgão (Hunt, 1991). A quantificação da matéria seca da parte aérea e radicular seguiu a fórmula usada por Carneiro (1995).

A partir desses caracteres, foram obtidas as razões de massa foliar (LMR), caulinar (SMR) e radicular (RMR), que indicam a alocação de biomassa entre os diferentes órgãos vegetativos, permitindo avaliar o padrão de crescimento dos genótipos sob diferentes fontes de irrigação.

A área foliar foi determinada ao final do experimento, utilizando todas as folhas presentes em cada planta no momento da coleta. A área foliar total correspondeu à soma das superfícies de todas as folhas, independentemente do estágio de expansão. Após a coleta, as folhas foram distribuídas sobre uma superfície plana revestida com tecido preto, organizadas sem sobreposição e fotografadas com a inclusão de uma régua para calibração da escala. As imagens foram processadas no software ImageJ, conforme Schneider, Rasband e Eliceiri (2012), permitindo a delimitação dos contornos foliares e o cálculo da área individual de cada folha. A soma dessas áreas constituiu a área foliar total por planta. Para cada tratamento, foram analisadas três repetições, resultando em três imagens processadas por tratamento.

Análises nutricionais

Ao final do experimento, foram selecionadas três plantas por tratamento, correspondentes a três repetições do delineamento. Cada planta constituiu uma unidade amostral independente. Todo o material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até massa constante e, posteriormente, moído em moinho tipo Wiley para obtenção de amostras homogêneas. As análises nutricionais foram realizadas individualmente para cada repetição, sem a composição de amostras entre plantas. A quantificação dos teores de N, P e K foi realizada em amostras de folhas e raízes secas e moídas. As amostras foram digeridas por via úmida, utilizando a mistura sulfúrica-peróxídica (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997).

O teor de N total foi determinado pelo método de Kjeldahl (Silva, 2008). O P foi quantificado por colorimetria, segundo (Murphy; Riley, 1962) e o K foi determinado por fotometria de chama, conforme descrito por Malavolta; Vitti; Oliveira (1997).

O material vegetal foi previamente seco em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até massa constante, para obtenção da matéria seca de cada órgão. Em seguida, as amostras foram finamente moídas e submetidas à combustão em mufla a 550 °C por 4 horas, para determinação da matéria orgânica (MO). O teor de carbono total foi estimado a partir do conteúdo de matéria orgânica, considerando que o carbono corresponde, em média, a 58% da massa da matéria orgânica ($C = MO \times 0,58$) (Carmo; Silva, 2012; Poorter *et al.*, 2012)

Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 3×5 (três proporções de AP e cinco clones de *Eucalyptus*), com cinco repetições, sendo cada repetição composta por um vaso contendo uma única planta.

Durante a fase de aclimação, os vasos foram distribuídos aleatoriamente nas bancadas da casa de vegetação. Em seguida, na fase de rustificação, os vasos foram reorganizados em blocos, cada um contendo 15 plantas, uma planta por vaso por tratamento. Nessa etapa, os vasos foram dispostos com espaçamento aproximado de 40 cm entre si, e os blocos, mantidos a uma distância aproximada de 1,5 m. A partir dessa fase, a disposição dos vasos foi mantida fixa até a finalização do experimento, sem rotação entre posições.

A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk, e a homogeneidade das variâncias, pelo teste de Levene, ambos considerando o nível de significância de 5%. Atendidas essas premissas, os dados foram submetidos à análise de variância bifatorial (two-way ANOVA) e, quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software GraphPad Prism, versão 10.4.2 (GraphPad Software, 2020).

Para as variáveis avaliadas ao longo do tempo, foram ajustados modelos de regressão. A altura da planta e o diâmetro do coleto foram analisados por regressão linear simples em função dos dias após o início dos tratamentos, com a obtenção das equações de tendência e dos respectivos coeficientes de determinação (R^2). Para o número de folhas, ajustou-se um modelo de regressão não linear do tipo polinomial de segunda

ordem, que representou o comportamento curvilíneo observado ao longo das avaliações. Os ajustes de regressão e a estimativa dos parâmetros dos modelos também foram realizados no GraphPad Prism.

Resultados

Crescimento inicial da parte aérea sob diferentes proporções de AP

A altura e o diâmetro do coleto apresentaram aumento progressivo ao longo do tempo em todos os tratamentos, com padrões temporais semelhantes entre as proporções de AP. Em contraste, o número de folhas apresentou variação ao longo do período experimental, expressa por curvas que indicam alterações no padrão temporal, especialmente no início da fase de rustificação (Fig. 1).

Não foi observado diferenças no comportamento temporal da altura (Fig. 1A, D e G) e do diâmetro do coleto (Fig. 1B, E e H) das mudas submetidas às diferentes proporções de AP. Em todas as proporções avaliadas, as mudas apresentaram incremento progressivo ao longo do período experimental, sem indicação de resposta diferencial associada à fonte hídrica.

O efeito principal de clone foi observado durante todo o experimento, com os genótipos C1 e C3 apresentando as maiores médias para ambos os caracteres (Fig. 1A e B). Essas diferenças refletem a variabilidade genética entre os materiais avaliados e se mantiveram consistentes ao longo das fases de aclimação e rustificação.

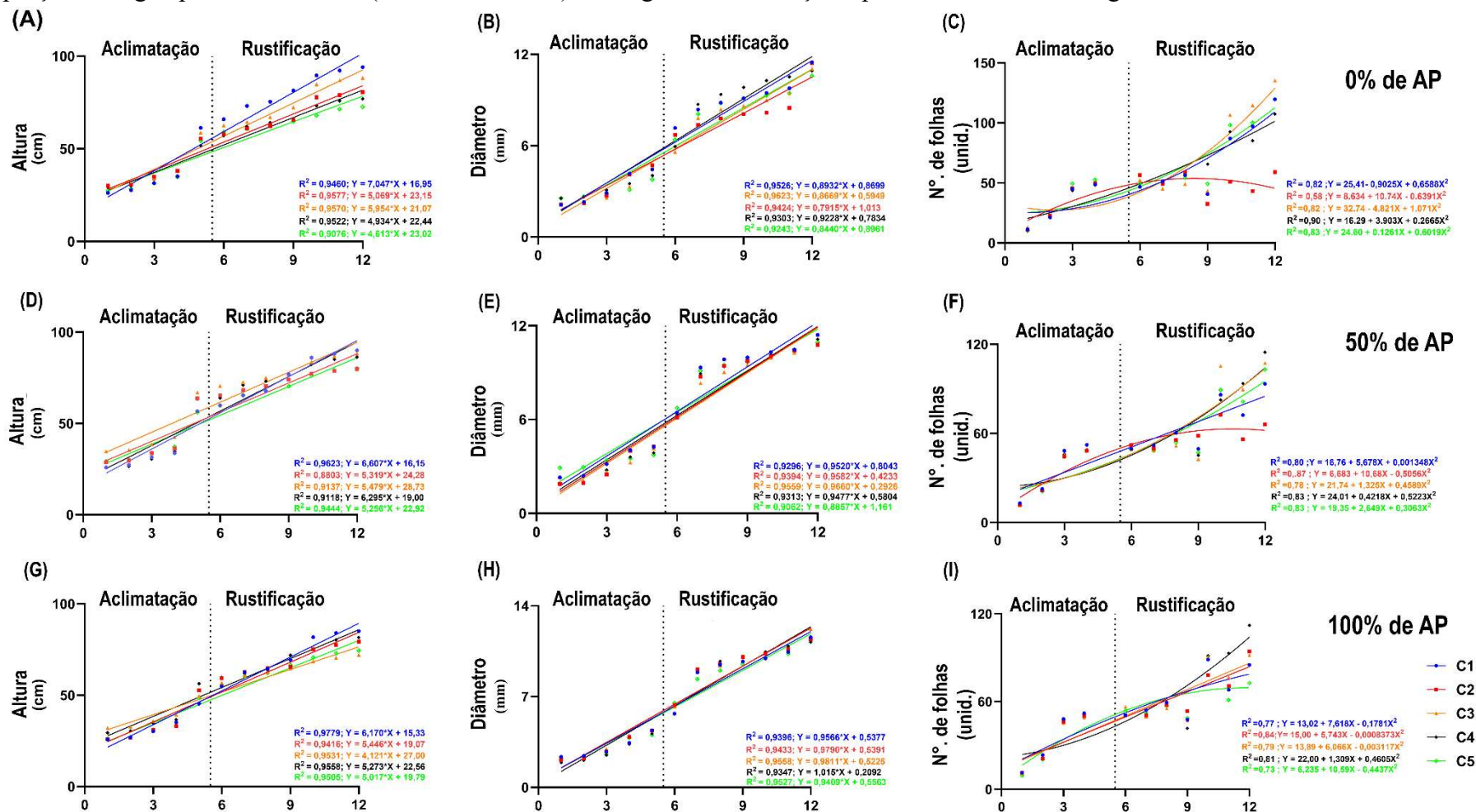
As curvas de variação temporal do número de folhas indicaram que o clone C2 apresentou comportamento distinto dos demais genótipos sob as proporções de 0% e 50% de AP (Fig. 1C e F). Nessas condições, após o início da fase de rustificação, o clone C2 exibiu estabilização, seguida de redução do número de folhas nas avaliações finais, contrastando com a tendência geral de aumento observada para os demais clones.

Em contraste, sob a proporção de 100% de AP, o comportamento do C2 mostrou-se visualmente semelhante ao dos demais genótipos, com incremento contínuo do número de folhas ao longo das avaliações e ausência de queda acentuada na fase final do experimento (Fig. 1I).

As observações relativas ao comportamento de crescimento da parte aérea dos clones em função das proporções de AP são apresentadas de forma descritiva, sem inferência estatística. As considerações sobre o número de folhas decorrem do acompanhamento temporal desse caractere, realizado com finalidade exploratória. Os

padrões observados auxiliam na interpretação dos resultados de área foliar, variável que foi submetida à análise estatística formal.

Fig. 1. Crescimento em altura (cm), diâmetro do coleto (mm) e número de folhas (unidade) de clones híbridos de *Eucalyptus* irrigados com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%) ao longo de 12 avaliações quinzenais, durante o segundo semestre de 2024 no semiárido.



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: (A, D e G) Representam a variação da altura (cm) das plantas para as proporções de 0%, 50% e 100% (primeira coluna) de água produzida tratada, respectivamente. (B, E e H) Correspondem ao crescimento em diâmetro do coleto (mm) para as mesmas proporções de irrigação. (C, F e I) Apresentam os dados do número de folhas, seguindo a mesma sequência das proporções de AP. Na parte esquerda de cada gráfico, o desenvolvimento durante a fase de aclimação e ao lado direito, na fase de rustificação. Cor Azul representando o clone C1, vermelha o clone C2, laranja C3, preta C4 e verde C5.

Alocação de biomassa

Os padrões de alocação de biomassa foram acompanhados por variações nas características estruturais das plantas. As diferenças observadas em altura e diâmetro do coleto entre os clones forneceram o contexto do desenvolvimento da parte aérea, enquanto a área foliar e as massas fresca e seca dos órgãos evidenciaram contrastes na distribuição da biomassa entre folha, caule e raiz (Tabela 1). Essas variações refletiram respostas diferenciadas quanto ao investimento relativo em compartimentos vegetativos e se expressaram tanto na biomassa total da planta quanto nos teores de matéria seca, indicando estratégias distintas de crescimento ao final do período experimental.

A análise de variância indicou que os caracteres de crescimento estrutural, altura e diâmetro do coleto, não apresentaram interação significativa entre clone e proporção de AP, nem efeito isolado da proporção de AP (Tabela 1). Para ambos os caracteres, foi observado efeito significativo apenas do fator clone ($p = 0,0001$), evidenciando diferenças entre os genótipos quanto ao crescimento estrutural, independentemente da proporção de AP utilizada.

Em contraste, para a maioria dos caracteres associados à área foliar, à biomassa fresca e seca, aos teores de matéria seca e às razões de alocação, a ANOVA revelou interação significativa entre clone e proporção de AP ($p \leq 0,05$; Tabela 1). Para esses caracteres, a resposta das plantas variou conforme a combinação entre genótipo e proporção de AP, sendo a interpretação dos efeitos condicionada à interação entre os fatores. Adicionalmente, para parte desses caracteres, observou-se efeito isolado da proporção de AP e do fator clone, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Síntese da significância estatística (p-valores) dos parâmetros morfológicos avaliados em clones híbridos de *Eucalyptus* irrigados com diferentes proporções de Água Produzida tratada (0, 50 e 100%).

Parâmetro	Clone × Água	Água	Clone
Altura	0.0501 ns	0.0517 ns	0.0001***
Diâmetro	0.1867 ns	0.5262 ns	0.0001***
Área foliar	0.0433*	0.0114*	0.0001***
Massa fresca (folha)	0.0112*	0.0001***	0.0001***
Massa fresca (caule)	0.007**	0.0003**	0.0001***
Massa fresca (raiz)	0.0001***	0.0452*	0.0001***
Massa fresca total	0.0001***	0.0494*	0.0001***
Massa seca (folha)	0.0001***	0.0001***	0.0001***
Massa seca (caule)	0.0049**	0.0196*	0.0001***
Massa seca (raiz)	0.0001***	0.6941 ns	0.0001***
Massa seca total	0.0001***	0.0021**	0.0001***
Matéria seca (folha)	0.0001***	0.0012**	0.0001***
Matéria seca (caule)	0.0001***	0.0001***	0.0037**
Matéria seca (raiz)	0.0001***	0.7884 ns	0.0032**
Matéria seca total	0.0024**	0.007*	0.0287*
Razão raiz/parte aérea	0.0001***	0.0001***	0.0001***
Razão massa foliar (LMR)	0.0001***	0.0147*	0.0022**
Razão massa caulinar (SMR)	0.0001***	0.0001***	0.067 ns
Razão massa radicular (RMR)	0.0001***	0.0083**	0.278 ns

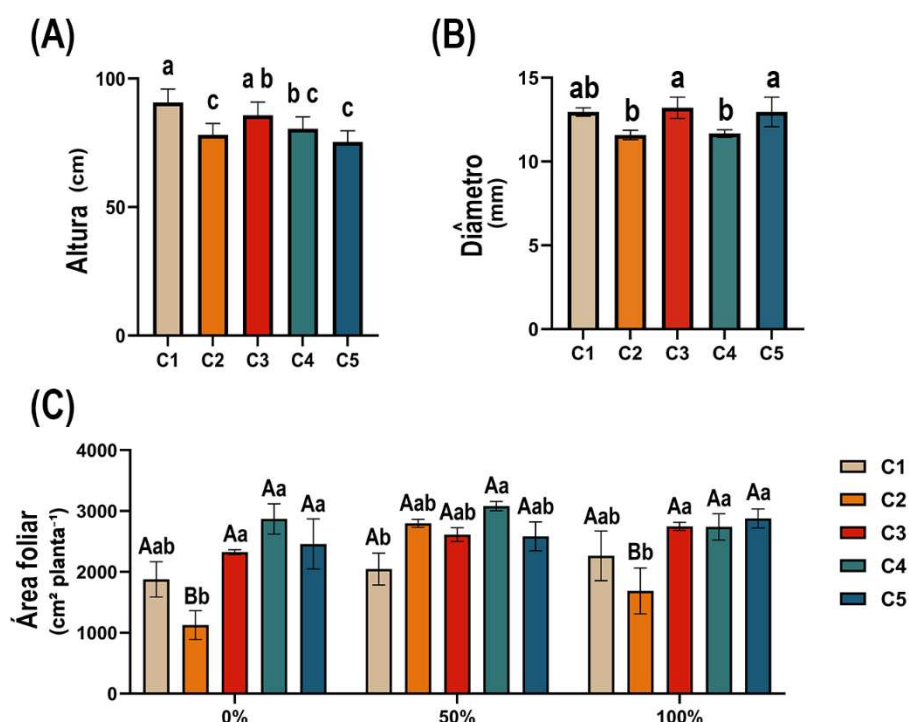
Fonte: Dados experimentais (2025).

Nota: ns = não significativo ($p > 0,05$); * = $p \leq 0,05$; ** = $p \leq 0,01$; *** = $p \leq 0,001$.

No crescimento em altura, o clone C1 diferiu de C2, C4 e C5, mas manteve-se estatisticamente semelhante a C3 (Fig. 2A). Por sua vez, o clone C3 não apresentou diferença em relação a C4, o qual se assemelhou aos clones de menor porte (C2 e C5). Quanto ao diâmetro do coleto, o clone C1 não diferiu dos demais clones, enquanto C3 e C5 foram superiores a C2 e C4 (Fig. 2B).

A área foliar foi governada pela interação clone $\times$ água (Fig. 2C). Para os clones C1, C3, C4 e C5, a expansão foliar não foi afetada pelas proporções de AP, mantendo estabilidade estatística entre o controle e os tratamentos. No clone C2, a dose de 50% de AP promoveu área foliar superior ao controle e à 100% da AP.

Fig. 2. Dados da avaliação final da parte aérea, diâmetro do coleto e área foliar de cinco genótipos híbridos de *Eucalyptus* sob irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%). (A) Altura média das plantas (cm); (B) Diâmetro do coleto (mm); (C) Área foliar média (cm² planta⁻¹).



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: Os genótipos C1, C2, C3, C4 e C5 estão representados pelas cores indicadas na legenda. Barras representam média $\pm$ erro padrão ($n = 3$). Letras maiúsculas comparam, em cada genótipo, os diferentes tratamentos de água; letras minúsculas comparam entre genótipos dentro de cada tratamento de água (Tukey, $p < 0,05$).

Os perfis de acúmulo de biomassa revelaram respostas contrastantes entre os órgãos vegetativos e os genótipos de *Eucalyptus* sob diferentes regimes de irrigação (Fig. 3A a H). O clone C1 demonstrou estabilidade fisiológica absoluta, não apresentando diferenças estatísticas para nenhum dos caracteres de massa seca ou fresca analisados (Fig. 3A-H).

Para a massa fresca dos órgãos e total, o clone C2 não diferiu entre 0% e 100% de AP (Fig. 3B; D; F e H). Na massa seca radicular, o valor em 0% de AP foi maior ao de 100% de AP (Fig. 3C); contudo, essa variação não se refletiu na massa seca total, que permaneceu semelhante entre os dois tratamentos.

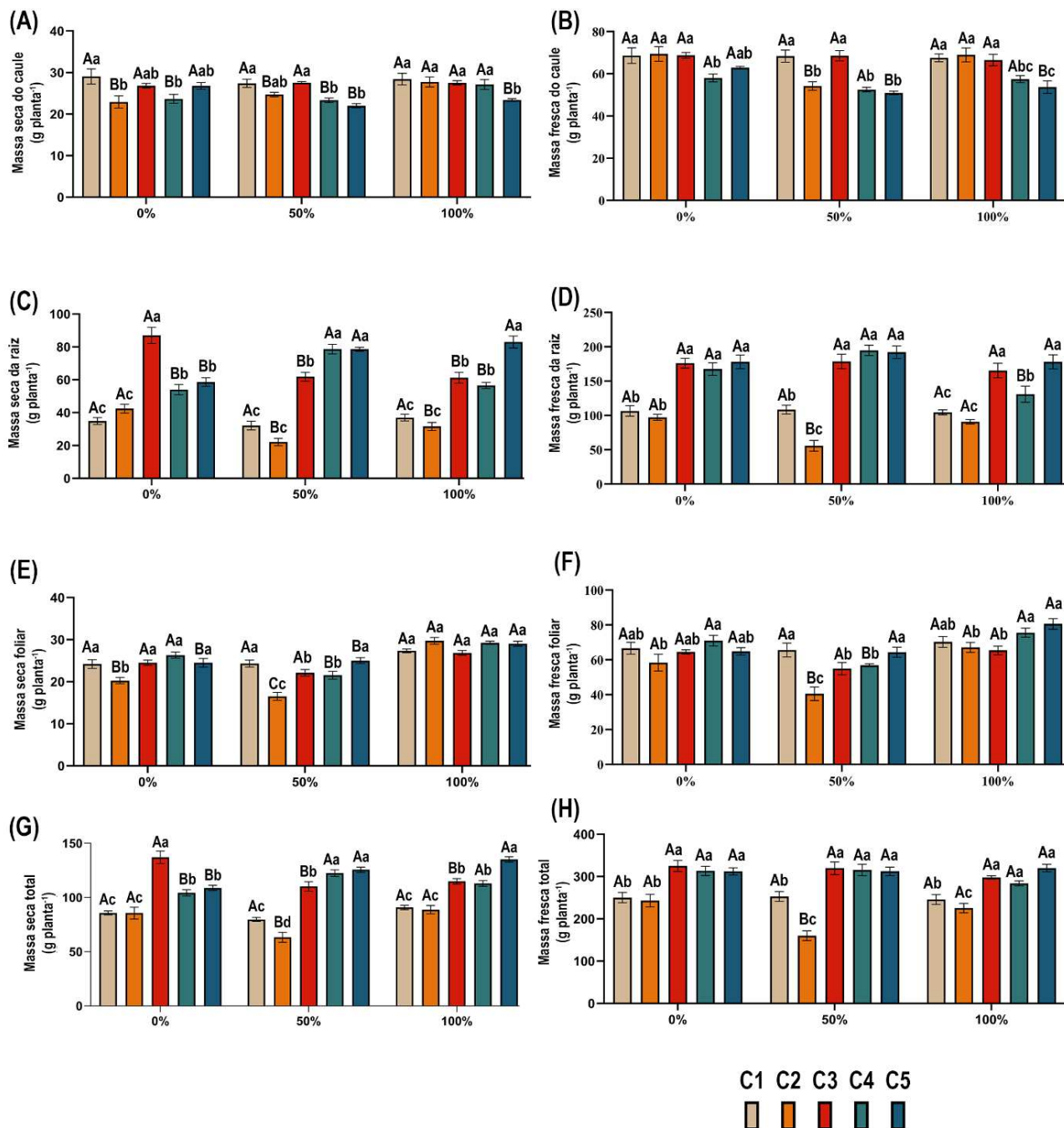
O clone C3 também manteve estabilidade na maioria dos caracteres, exceto na massa seca de raiz (Fig. 3C) e na massa seca total (Fig. 3G), nas quais o controle (0% AP) foi estatisticamente superior às demais proporções de AP.

Para o clone C4, a massa seca do caule foi maior sob irrigação com 100% de AP em comparação às demais proporções (Fig. 3A). Em contraste, a massa fresca do caule não apresentou diferença estatística entre os tratamentos de irrigação (Fig. 3B). De forma consistente, a massa seca total, a massa fresca total e a massa fresca de folhas não diferiram entre o controle e a condição de 100% de AP (Fig. 3F–H), indicando ausência de variação detectável nesses componentes de biomassa entre as proporções avaliadas.

Para o clone C5, as massas frescas sob irrigação com 100% de AP não diferiram estatisticamente do controle, com exceção da massa fresca do caule (Fig. 3B–D). Em relação às massas secas, os valores obtidos sob 100% de AP foram superiores ao controle para a maioria dos órgãos, exceto para o caule, no qual foi detectada diferença estatística entre as proporções avaliadas (Fig. 3A, C, E).

A massa fresca total (Fig. 3H) não foi afetada pela substituição da AA por AP em todos os clones, indicando manutenção do status hídrico. Contudo, a massa seca total (Fig. 3G) revelou a natureza genótipo-dependente da resposta: enquanto C1 e C2 mantiveram-se estáveis entre os extremos (0% e 100%), o C3 apresentou redução com a AP, ao passo que C4 e C5 demonstraram ser os materiais com tendência a maior acúmulo de massa seca sob irrigação com efluente petrolífero.

Fig. 3. Massas secas e frescas dos órgãos (caule, raiz e folha) e totais em cinco genótipos híbridos de *Eucalyptus* sob irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%). (A) Massa seca do caule (g planta^{-1}); (B) Massa fresca do caule (g planta^{-1}); (C) Massa seca de raízes (g planta^{-1}); (D) Massa fresca de raízes (g planta^{-1}); (E) Massa seca de folhas (g planta^{-1}); (F) Massa fresca de folhas (g planta^{-1}); (G) Massa seca total (g planta^{-1}); (H) Massa fresca total (g planta^{-1}).



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: Resultados expressos como média $\pm$ erro padrão para cada nível de AP (0%, 50% e 100%) e 5 genótipos (C1 a C5). Letras maiúsculas comparam, em cada genótipo, os diferentes tratamentos hídricos; letras minúsculas indicam diferenças entre genótipos dentro de cada tratamento hídrico. Letras iguais indicam ausência de diferença estatística significativa entre grupos, enquanto letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para as variáveis relacionadas à alocação de biomassa e às razões de matéria seca entre órgãos, as diferenças entre as proporções de irrigação foram restritas a combinações específicas de clone e variável, não sendo observada resposta uniforme ao fator água (Fig. 4).

O clone C1 não apresentou diferenças estatísticas entre as proporções de irrigação para nenhuma das variáveis analisadas, incluindo as matérias secas de raiz, caule e folhas, bem como as razões de massa entre órgãos (Fig. 4A–G).

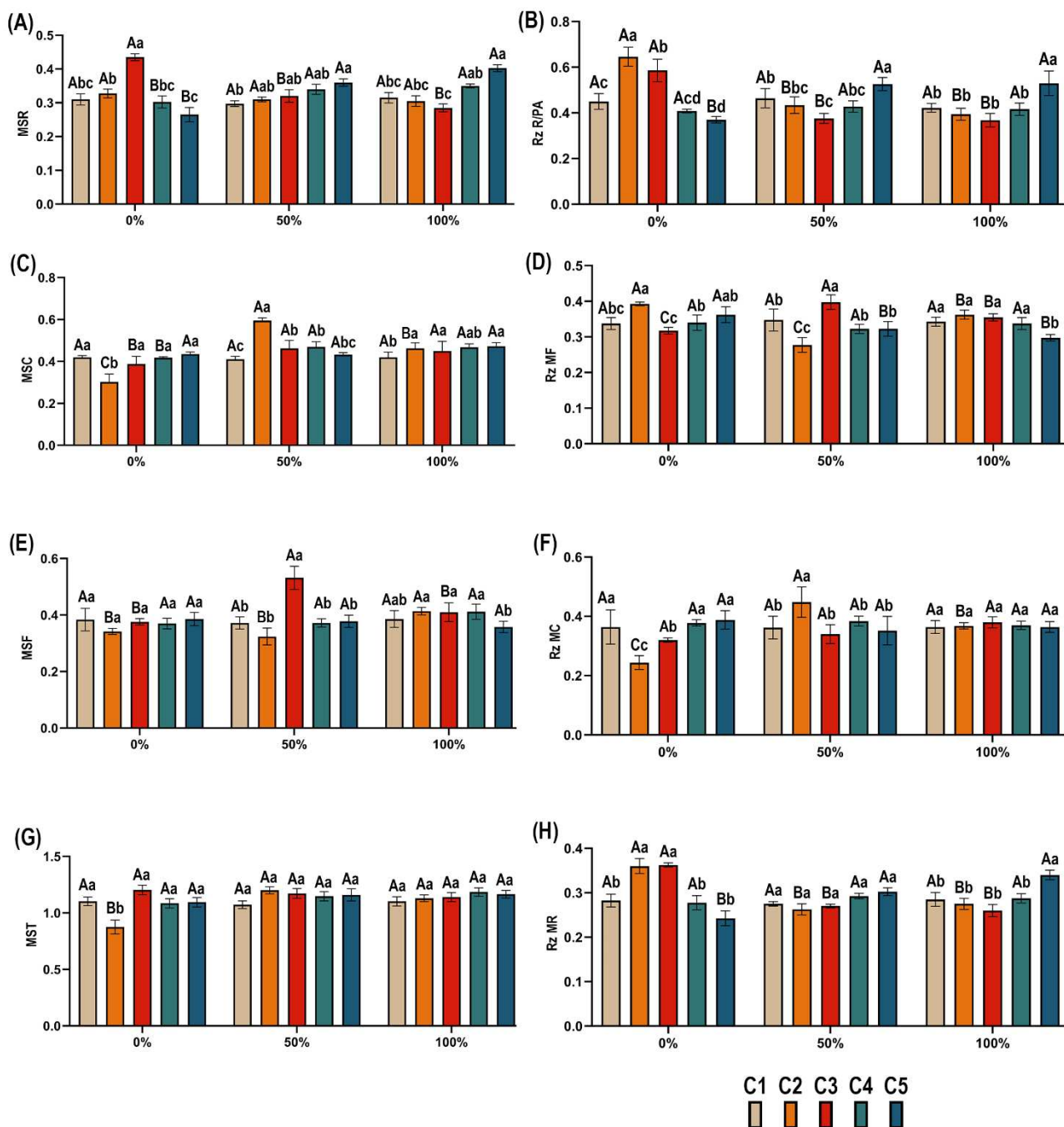
Nos clones C2 e C3, a razão raiz/parte aérea apresentou valores superiores sob irrigação com o controle, em comparação às proporções contendo AP (Fig. 4B). Esse padrão foi consistente com os maiores valores de matéria seca de raiz observados nessas mesmas condições (Fig. 4A), sem, contudo, se estender de forma sistemática às demais razões de alocação.

Para o clone C4, a maioria das variáveis de alocação não diferiu entre as proporções de irrigação. Diferenças estatísticas foram observadas apenas para a matéria seca de raiz e a matéria seca de caule, com maiores valores sob irrigação com 100% de AP em comparação ao controle (Fig. 4A, C).

Para o clone C5, a matéria seca total e as matérias secas absolutas de raiz e caule não diferiram entre as proporções de irrigação (Fig. 4A, C, G). Em contraste, foram detectadas diferenças nas razões de alocação entre órgãos, com maior razão raiz/parte aérea e maior razão de massa radicular sob irrigação com 100% de AP, acompanhadas por menores valores de razão de massa caulinar e de matéria seca foliar nessa condição (Fig. 4B, D, E e F).

De forma geral, os resultados indicam que a alocação de biomassa entre órgãos foi majoritariamente dependente do genótipo, com efeitos pontuais da proporção de AP, sem evidência de um padrão global de resposta associado ao fator água nas condições avaliadas (Fig. 4).

Fig. 4. Alocação de biomassa e razão de matéria seca em órgãos de cinco genótipos híbridos de *Eucalyptus* submetidos à irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (0%, 50% e 100%). (A) MSR – Matéria seca da raiz; (B) Rz R/PA – Razão raiz/parte aérea; (C) MSC – Matéria seca caular; (D) Rz MF – Razão da massa foliar; (E) MSF – Matéria seca foliar; (F) Rz MC – Razão da massa caular; (G) MST – Matéria seca total; (H) Rz MR – Razão da massa radicular



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: As barras representam a média ± erro padrão dos genótipos C1, C2, C3, C4 e C5 irrigados com 0% (água de abastecimento), 50% e 100% (água produzida). Letras maiúsculas indicam diferenças entre proporções de água dentro de cada genótipo; letras minúsculas indicam diferenças entre genótipos dentro de cada tratamento. Letras iguais dentro de cada comparação indicam ausência de diferença estatística pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$), enquanto letras diferentes indicam diferença significativa no nível de 5% de probabilidade.

Composição nutricional e padrões de resposta dos nutrientes nos diferentes órgãos

A análise de variância dos teores de C, P, K e N nos diferentes compartimentos vegetais evidenciou efeitos distintos dos fatores clone, água e da interação clone $\times$ água, dependendo do nutriente e do órgão avaliado (Tabela 3).

Para o teor de carbono (C), a interação clone $\times$ água foi significativa nas folhas, no caule e na raiz, enquanto não foi detectada interação para o teor total de C. O fator água apresentou efeito significativo para o teor de C em todos os compartimentos e no teor total, ao passo que o fator clone foi significativo para folhas, caule e teor total, mas não para o teor de C na raiz.

O fósforo (P) apresentou interação clone $\times$ água significativa tanto nas folhas quanto nas raízes. Adicionalmente, os fatores água e clone influenciaram significativamente o teor de P em ambos os compartimentos avaliados.

Para o potássio (K), a interação clone $\times$ água foi significativa nas folhas e nas raízes. O fator água apresentou efeito significativo apenas para o teor de K nas folhas, enquanto, para as raízes, não foi detectado efeito da fonte hídrica. O fator clone foi significativo para o teor de K em ambos os compartimentos.

Em relação ao nitrogênio (N), não foram detectados efeitos significativos do fator água nem da interação clone $\times$ água, tanto nas folhas quanto nas raízes. Em contraste, o fator clone apresentou efeito significativo para o teor de N em ambos os compartimentos avaliados.

Em conjunto, os resultados indicam que o efeito da fonte hídrica sobre a composição nutricional foi nutriente- e órgão-dependente, enquanto as diferenças genotípicas exerceram influência consistente sobre todos os nutrientes avaliados, com exceção do teor de C na raiz. A interação clone $\times$ água ocorreu principalmente para C, P e K, refletindo respostas diferenciadas entre genótipos às proporções de irrigação (Tabela 3).

Tabela 3. Síntese da significância estatística (p-valores) dos parâmetros nutricionais avaliados em clones híbridos de *Eucalyptus* irrigados com diferentes proporções de Água Produzida tratada (0, 50 e 100%).

	Clone x Água	Água	Clone
Teor de C - folha	0.0002***	0.0002***	0.0001***
Teor de C - caule	0.0025**	0.0008***	0.0001***
Teor de C - raiz	0.0019**	0.0004**	0.0508 ns
Teor de C - total	0.0641 ns	0.0265*	0.0001***
P na folha	0.0001***	0.0051**	0.0001***
P na raiz	0.0001***	0.0316*	0.0001***
K na folha	0.0001***	0.0001***	0.0001***
K na raiz	0.0001***	0.8613 ns	0.0001***
N na folha	0.4379 ns	0.3983 ns	0.0004***
N na raiz	0.3178 ns	0.8479 ns	0.0005***

Notas: As abreviações apresentadas na Tabela correspondem aos seguintes termos P, K, N e C representam, respectivamente, os teores de fósforo, potássio, nitrogênio e carbono nos tecidos vegetais. As siglas ns, *, ** e *** indicam, respectivamente, ausência de significância estatística ($p > 0,05$), significância ($p \leq 0,05$), alta significância ($p \leq 0,01$) e significância muito elevada ($p \leq 0,001$).

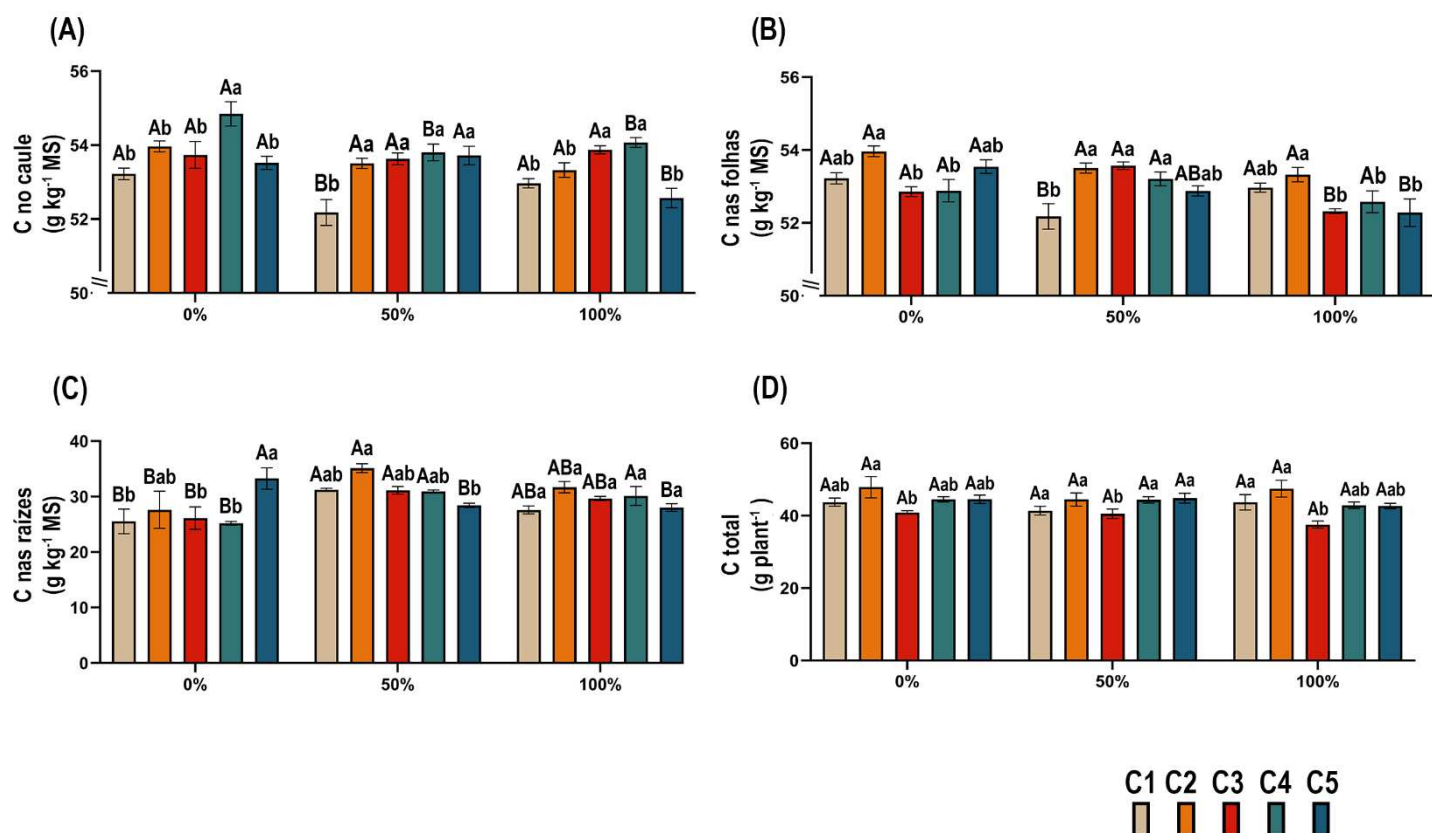
No caule, o teor de carbono variou conforme a interação genótipo $\times$ proporção de AP (Fig. 5A). Os clones C1, C2 e C3 mantiveram valores semelhantes entre 0% e 100% de AP. No C4, os teores sob 50% e 100% de AP foram menores do que no controle. No C5, o valor em 100% de AP foi menor que nas demais proporções.

Para o carbono foliar, C1, C2 e C4 não diferiram entre 0% e 100% de AP. O C3 apresentou valor menor em 100% de AP, sem diferença entre 0% e 50%. No C5, não houve diferença entre 0% e 50%, nem entre 50% e 100% de AP.

Nas raízes, o padrão também dependeu do genótipo (Fig. 5C). Apenas o C5 apresentou menor teor em 100% de AP em relação a 0% de AP. C1, C2 e C3 não mostraram diferenças entre as proporções, enquanto o C4 apresentou aumento do teor com a adição de AP à solução de irrigação.

O teor de carbono total por planta não apresentou diferenças estatísticas entre as proporções de irrigação para nenhum dos clones avaliados (Fig. 5D). No entanto, diferenças entre genótipos foram observadas dentro de cada proporção, como o observado para o clone C3, que apresentou valores inferiores aos demais sob irrigação com 50% de AP.

Fig. 5. Teor de carbono por órgão e total em cinco genótipos híbridos de *Eucalyptus* sob irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada. (A) Teor de carbono no caule (g kg^{-1} de matéria seca); (B) Teor de carbono em folhas (g kg^{-1} de matéria seca); (C) Teor de carbono em raízes (g kg^{-1} de matéria seca); (D) Teor de carbono total por planta (g planta^{-1}).



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: Os dados representam média $\pm$ erro padrão para cada genótipo (C1 a C5) e tratamento hídrico: 0% (água de abastecimento), 50% e 100% (água produzida tratada). Letras maiúsculas indicam diferenças entre tratamentos para cada genótipo; letras minúsculas indicam diferenças entre genótipos dentro de cada tratamento. Letras iguais indicam ausência de diferença estatística significativa entre os grupos comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

As concentrações de potássio (K) e fósforo (P) foram influenciadas pelo genótipo e pelo compartimento vegetal, com efeitos dependentes da proporção de AP, sem um padrão uniforme de resposta entre clones ou nutrientes (Fig. 6A–D).

No clone C1, nas respostas radiculares e foliares, tanto para K quanto para P, não houve diferenças entre o controle e a de 100% de AP. Curiosamente, sob a irrigação com 50% de AP, o clone se sobressaiu às demais proporções quanto à determinação de P nas folhas (Fig. 6A–D).

Já o clone C2, apresentou um comportamento semelhante ao do clone mencionado anteriormente, com a diferença de que, na determinação de P foliar, o C2 teve um valor maior sob 100% de AP (Fig. 6A–D).

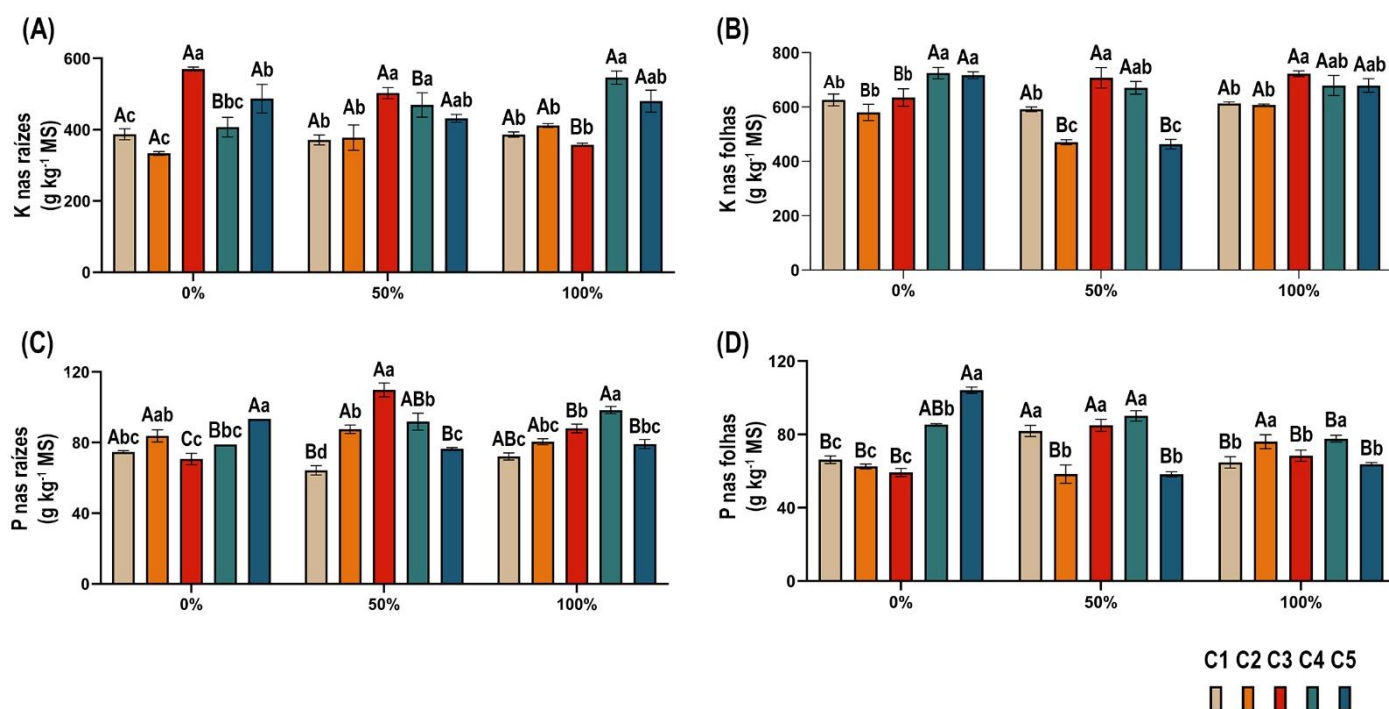
Para o clone C3, na determinação dos nutrientes nas raízes, a irrigação com 100% de AP desproporcionou a quantidade de K (Fig. 6A), mas se manteve indiferente sob as irrigações de 0 e 50% de AP; para a determinação de P (Fig. 6C), o maior valor foi obtido sob a irrigação com 50% de AP. Nas folhas, para o K, as proporções de 50 e 100% de AP não diferiram entre si (Fig. 6B), mas apresentaram diferença em comparação ao controle. Para o P, o controle e a proporção de 100% de AP não diferiram, mas foram inferiores a 50% de AP (Fig. 6D).

O sistema radicular e foliar do clone C4 se mostraram-se indiferentes sob a irrigação com o controle e 100% de AP para os dois nutrientes (K e P) (Fig. 6A–D).

Na determinação de K, o clone C5 apresentou comportamento semelhante tanto nas raízes quanto nas folhas: não diferiu entre 0% e 100% de AP. Já na determinação de P nas raízes e folhas, a resposta sob 100% de AP foi inferior sob a irrigação com o controle (Fig. 6A–D).

Em conjunto, os resultados indicam que as respostas nutricionais ao uso de AP foram nutriente-, órgão- e genótipo-dependentes, sem evidência de resposta direcional consistente associada ao aumento da proporção de AP (Fig. 6).

Fig. 6. Teores médios de potássio (K) e fósforo (P) nas raízes e folhas de cinco clones híbridos de *Eucalyptus* submetidos à irrigação com diferentes proporções de água produzida tratada (AP) e água de abastecimento (AA). (A) Teor de potássio nas raízes (g kg^{-1} de matéria seca); (B) Teor de potássio nas folhas (g kg^{-1} de matéria seca); (C) Teor de fósforo nas raízes (g kg^{-1} de matéria seca); (D) Teor de fósforo nas folhas (g kg^{-1} de matéria seca).



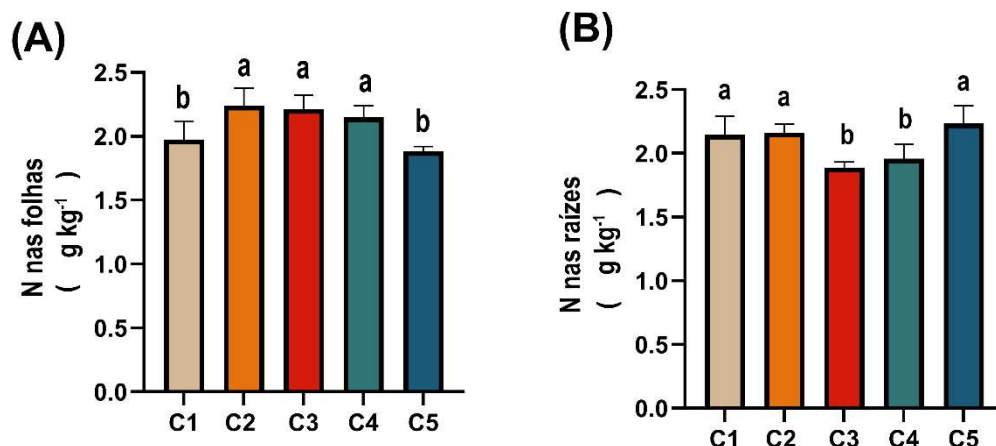
Fonte: Autoria própria (2025).

Notas: Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos de irrigação (AA, mistura e AP) dentro de cada clone, enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre clones dentro do mesmo tratamento de irrigação, conforme o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As concentrações de nitrogênio (N) em folhas e raízes diferiram entre clones (Fig. 7A–B). Para o N foliar, os clones C2, C3 e C4 apresentaram valores superiores aos observados em C1 e C5 (Fig. 7A). Em contraste, para o N radicular, os clones C1, C2 e C5 apresentaram maiores concentrações em comparação aos clones C3 e C4 (Fig. 7B).

Não foi detectado efeito significativo da fonte hídrica nem da interação clone $\times$ água para o teor de N, tanto nas folhas quanto nas raízes, indicando que as diferenças observadas foram atribuídas exclusivamente ao fator genético (Fig. 7).

Fig. 7. Concentração de nitrogênio (N) em folhas e raízes de cinco clones híbridos de *Eucalyptus* irrigados com diferentes proporções de água produzida tratada (AP) e água de abastecimento (AA).



Fonte: Autoria própria (2025).

Notas: Letras maiúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos de irrigação (AA, mistura e AP) dentro de cada clone, e letras minúsculas indicam diferenças entre clones dentro de um mesmo tratamento, conforme o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

De forma geral, os resultados indicaram que o crescimento, os atributos morfológicos, a biomassa, as razões de alocação e a composição nutricional foram majoritariamente determinados pelo genótipo, com efeitos específicos da proporção de AP e interações clone $\times$ água restritas a determinados caracteres e compartimentos.

Discussão

Água produzida tratada: potencial de reuso e desafios para aplicação sustentável em florestas comerciais

A caracterização físico-química das águas de irrigação demonstrou que tanto a água de abastecimento (AA) quanto a água produzida (AP) apresentam parâmetros compatíveis com o uso agrícola não restritivo, segundo as diretrizes clássicas de Ayers e Westcot (1999). Os valores de pH (7,94 para a AP e 8,33 para a AA) e de condutividade elétrica (0,53 e 0,50 dS m⁻¹, respectivamente) indicam que ambas as fontes hídricas se enquadram no espectro de águas de baixa salinidade, não impondo riscos imediatos de estresse osmótico ou toxidez salina às plantas.

Tal comportamento é atribuído à qualidade química da água utilizada, cujas concentrações de sais e íons potencialmente tóxicos não atingiram níveis críticos de fitotoxidez imediata, permitindo que a expressão do vigor vegetativo fosse regida essencialmente pela plasticidade intrínseca de cada clone (Minhas; Qadir; Yadav, 2019; Serraye *et al.*, 2025).

A AP apresenta composição iônica distinta da UWS, porém sem indicar risco imediato de salinidade, sodicidade ou toxidez. Apesar da maior carga iônica total, a AP exibiu SAR e SAR ajustado inferiores, refletindo uma maior contribuição de Ca²⁺ e Mg²⁺ em relação ao Na⁺, condição associada a uma menor sodicidade efetiva da solução. A maior dureza e o menor RSC da AP indicam um ambiente químico mais estável, com menor tendência à precipitação de cátions bivalentes e à elevação progressiva do pH na zona radicular. Essa configuração ajuda a explicar a ausência de efeitos negativos consistentes sobre o crescimento, a biomassa total e o balanço de C e N, observada experimentalmente (Minhas; Qadir; Yadav, 2019; Hailu, 2021). Assim, mesmo águas de baixa RAS podem demandar estratégias de manejo que evitem o acúmulo de sódio ao longo do tempo.

A composição dos elementos-traço evidenciou que a AP não apresenta um perfil direcional único em relação à UWS, mas sim diferenças específicas por elemento, com Ba e Mo em maiores concentrações na AP, enquanto Cr, Cu e Zn ocorreram em níveis inferiores. Esse comportamento heterogêneo é consistente com a natureza do efluente produzido, cuja composição reflete tanto a geologia do reservatório quanto as etapas de tratamento aplicadas, resultando em enriquecimento seletivo de determinados elementos e na redução de outros (Emmons *et al.*, 2022).

A ausência de respostas negativas nos parâmetros vegetais avaliados indica que, nas condições do experimento, as diferenças observadas nos elementos-traço não se traduziram em restrições fisiológicas detectáveis, reforçando que o uso da AP esteve associado a um enriquecimento químico moderado, e não a um cenário de contaminação.

A composição nutricional também diferencia as duas fontes. A AA caracteriza-se como oligotrófica, apresentando concentrações mínimas de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . Em contraste, a AP é nutricionalmente mais rica, refletindo uma maior dureza devido aos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , além de incrementos em B e Mo. Esses elementos podem atuar como nutrientes suplementares (Phogat *et al.*, 2020; RTI, 2020). Curiosamente, o Carbonato de Sódio Residual (CSR) foi inferior na AP ($1,21 \text{ mmol-L}^{-1}$) em relação à AA ($2,54 \text{ mmol-L}^{-1}$), indicando que, sob o ponto de vista químico, a AP apresenta menor potencial de sodificação do solo do que a própria AA. Esse resultado reforça a necessidade de análise integrada dos parâmetros químicos ao invés de inferências isoladas.

A análise de metais-traço e compostos orgânicos fortalece a segurança do uso da AP. Elementos como Al, Sb, Cd, Pb, Hg, Co, Fe, Mn, Ni, Ag e Se permaneceram abaixo dos limites de quantificação tanto na AA quanto na AP, o que aponta para um processo de tratamento eficiente. O teor de óleos e graxas totais ($TOG = 2,19 \text{ ppm}$) detectado apenas na AP é considerado baixo, situando-se abaixo dos valores reconhecidos internacionalmente como críticos para a irrigação agrícola (Hussain; Priyadarshi; Dubey, 2019; Soleimani *et al.*, 2023). Tal perfil evidencia que o tratamento aplicado removeu adequadamente compostos orgânicos persistentes, reduzindo riscos de contaminação do solo e de fitotoxicidade.

Para além da qualidade físico-química, o uso da AP deve ser interpretado no contexto da política hídrica e de sustentabilidade nacional. Sua aplicação se alinha aos objetivos do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH, 2022), que prioriza o uso integrado e racional da água, e às diretrizes do Plano Brasileiro de Economia Circular (MDIC, 2025), que incentiva a reincorporação de resíduos tratados como insumos produtivos.

No semiárido brasileiro, onde a disponibilidade hídrica é limitada e a demanda florestal tende a crescer, o reuso de AP representa um arranjo estratégico, reduzindo a pressão sobre mananciais superficiais e subterrâneos e reforçando a sustentabilidade hídrica da cadeia florestal. Além disso, práticas de reuso hídrico associam-se à geração

de oportunidades econômicas locais e à consolidação de cadeias produtivas resilientes, especialmente em regiões vulneráveis.

Por fim, embora a AP apresente propriedades adequadas para a irrigação, sua aplicação prática depende intrinsecamente da capacidade fisiológica, nutricional e morfoestrutural das plantas de tolerar e responder à composição desse recurso hídrico. Tais respostas genotípicas, essenciais para determinar a viabilidade do reuso em escala florestal, são discutidas na seção seguinte.

Respostas dos clones de Eucalyptus spp. sob irrigação com água produzida

Os híbridos de *Eucalyptus* apresentam ampla variação de crescimento e adaptação em função das combinações interespecíficas envolvidas. Híbridos com *E. urophylla* apresentam maior tolerância a estresses ambientais, conforme observado no clone C1. O clone C2, oriundo de cruzamento triplo, apresenta elevado potencial de recombinação genética, o que pode resultar em respostas diferenciadas de crescimento e adaptação. A incorporação de *E. brassiana* nos clones C1, C2 e C3 é relevante, uma vez que essa espécie contribui para a adaptação a estresses abióticos, enquanto a combinação com *E. grandis*, presente no clone C3, está associada a um maior potencial de crescimento, porém com possível aumento de sensibilidade a estresses. Os clones C4 e C5 compartilham o mesmo cruzamento interespecífico, apresentando padrões semelhantes de crescimento e alocação de biomassa, compatíveis com os efeitos de heterose já descritos na literatura (Denison; Kietzka, 1993; Chen *et al.*, 2018; Weng *et al.*, 2014; Kannan; Bhandari; Sivarajan, 2023; Zhu *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2025).

Considerando a ausência de evidências de toxidez ao longo do experimento, as respostas de crescimento observadas refletem predominantemente diferenças genotípicas associadas à capacidade de absorção, uso e redistribuição de nutrientes, em detrimento de efeitos diretos da qualidade hídrica. Nesse contexto, o clone C3 destacou-se por apresentar maiores teores foliares de N, associados a respostas consistentes de K entre os tratamentos, o que indica maior eficiência no uso de N e K no aproveitamento desses nutrientes, independentemente da proporção de AP utilizada na irrigação.

Em contraste, o clone C5 apresentou maior alocação relativa de N e P no sistema radicular, mantendo a razão raiz/parte aérea estatisticamente estável entre os tratamentos. Esse padrão indica uma redistribuição interna de nutrientes, com maior direcionamento ao compartimento radicular, sem redução do acúmulo total de biomassa, sugerindo um

ajuste fisiológico de alocação interna frente ao aumento da carga iônica da AP, e não uma resposta associada a limitações nutricionais ou estresse salino.

O clone C2 apresentou resposta não linear às proporções de AP, com maior acúmulo de biomassa e expansão da área foliar sob a condição intermediária de 50% de AP, em comparação aos tratamentos extremos. Esse comportamento sugere que a mistura das águas promoveu um equilíbrio físico-químico mais favorável, ao reduzir a predominância relativa de Na na AA e, simultaneamente, aumentar a disponibilidade de Ca e Mg oriundos da AP. Assim, a resposta observada está associada à otimização da nutrição mineral, e não a efeitos de salinidade ou toxidez (Munns, 2002).

O clone C4 apresentou estabilidade nos parâmetros de crescimento, na razão raiz/parte aérea e na alocação de carbono, independentemente da proporção de AP aplicada. Esse comportamento indica elevada capacidade de manter a absorção e o uso de nutrientes sob diferentes composições iônicas da água de irrigação, tanto em condições de maior aporte relativo de Na quanto em cenários enriquecidos com Ca, Mg e K. A manutenção desse padrão sugere menor necessidade de ajustes alométricos compensatórios, refletindo uma resposta fisiológica consistente e crescimento estável frente às variações na qualidade hídrica (Munns, 2002).

Do ponto de vista nutricional, a distribuição de N, P e K evidenciou estratégias contrastantes entre os clones. C1 e C3 apresentaram maior alocação de K nas folhas, nutriente diretamente associado à regulação osmótica, ao turgor celular e à manutenção da atividade fotossintética. Em contraste, o clone C5 concentrou proporções mais elevadas de N e P no sistema radicular, indicando um padrão de retenção preferencial nesses compartimentos, associado a mecanismos de ajuste iônico e controle da disponibilidade interna de nutrientes. O clone C2, embora tenha apresentado maiores teores foliares de N, não converteu esse aporte em maior acúmulo de biomassa, sugerindo menor eficiência no uso do nutriente (Cheng; Yu, 2025).

A razão raiz/parte aérea do clone C5 manteve-se estável ou apresentou discreto aumento sob maiores proporções de AP, indicando preservação da expansão radicular mesmo em condições de maior disponibilidade iônica. Esse padrão sugere manutenção da funcionalidade do sistema radicular, favorecendo a aquisição de K^+ e Ca^{2+} em contextos de maior presença relativa de Na^+ e Cl^- (Bernstein, 1975). Já a maior concentração de N nas raízes indica um forte indício de limitação na translocação de N para a parte aérea ou sequestro intencional de N na raiz, possivelmente devido à

necessidade de cocompartimentalização com íons Na^+ ou como parte de uma resposta de detoxificação radicular (Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 2012).

No clone C2, o aumento dos teores foliares de N não foi acompanhado por incremento proporcional de biomassa, indicando dissociação entre absorção e utilização do nutriente. Esse comportamento sugere menor eficiência no uso de N, possivelmente associada a custos metabólicos adicionais para manutenção do equilíbrio iônico, sem reflexo direto na produção de matéria seca (Castro Filho *et al.*, 2022). Assim, embora o nutriente esteja disponível e seja absorvido, sua conversão em crescimento estrutural mostrou-se menos eficiente quando comparada aos demais genótipos.

A análise integrada da produção de biomassa e do carbono total por planta indicou ausência de diferenças estatísticas consistentes entre as proporções de AP, enquanto a variabilidade entre clones foi pronunciada. Esse resultado reforça que o desempenho observado está majoritariamente associado ao controle genotípico da alocação de recursos, e não à qualidade da água per se. Clones como C1 e C3 apresentaram maior estabilidade na distribuição de biomassa entre os compartimentos, enquanto outros genótipos evidenciaram redistribuições internas mais acentuadas, com potencial impacto sobre a resiliência em condições ambientais menos favoráveis.

Em conjunto, os resultados demonstram que a irrigação com AP é tecnicamente viável na fase inicial de crescimento de híbridos de *Eucalyptus*, desde que associada à seleção de genótipos com eficiência fisiológica compatível. A presença de macronutrientes na AP contribuiu para atenuar limitações nutricionais da AA, particularmente em condições de mistura, sem evidência de restrição ao crescimento. No entanto, a composição iônica da AP e sua razão de adsorção de sódio reforçam a necessidade de manejo criterioso e monitoramento contínuo do solo, sobretudo em ambientes semiáridos. A integração entre reuso de AP e seleção clonal emerge, portanto, como estratégia promissora para conciliar produtividade florestal, reaproveitamento de efluentes industriais e sustentabilidade hídrica.

As limitações deste estudo devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A avaliação restringiu-se a algumas variáveis nutricionais, variáveis morfológicas e de composição de biomassa, sem incluir medidas fisiológicas diretas. Adicionalmente, o período experimental de 91 dias a pleno sol, embora suficiente para a avaliação do crescimento inicial, não permite inferências sobre o comportamento dos clones em fases posteriores de desenvolvimento, nas quais a acumulação progressiva de sais no perfil do solo pode impor restrições crescentes à absorção de água e nutrientes. A

condução do experimento em vasos também constitui uma limitação inerente, uma vez que o sistema radicular confinado e o volume fixo de substrato podem amplificar respostas que seriam atenuadas em condições de campo, onde os processos de lixiviação e a maior capacidade tampão do solo atuariam sobre a composição da solução radicular.

Por fim, a variabilidade composicional intrínseca da AP, que pode diferir entre poços, períodos de extração e processos de tratamento, reforça que os resultados obtidos referem-se especificamente ao lote de AP caracterizado neste estudo, sendo recomendável a replicação dos experimentos com amostras de diferentes origens e períodos antes de generalizações para escala operacional.

Conclusões

A irrigação com Água Produzida (AP) evidenciou respostas contrastantes entre os clones de *Eucalyptus*, refletindo diferenças genotípicas nos mecanismos de absorção, transporte e alocação de nutrientes sob condições de maior carga iônica. Os resultados indicam que a AP não impôs restrições generalizadas ao crescimento inicial, mas atuou como um fator seletivo, destacando estratégias morfofisiológicas distintas entre os genótipos avaliados. Clones como C1 e C3 mantiveram a produção de biomassa e a distribuição equilibrada de nutrientes mesmo sob irrigação exclusiva com AP, enquanto o clone C5 apresentou maior direcionamento de biomassa e nutrientes ao sistema radicular, caracterizando uma estratégia de alocação mais conservativa, associada à manutenção da funcionalidade radicular em detrimento do crescimento aéreo.

Esses padrões confirmam que a viabilidade do uso da AP na silvicultura está fortemente condicionada à escolha clonal, sendo a resposta das plantas mais dependente do controle genotípico da alocação de recursos do que da qualidade hídrica per se, desde que não haja evidências de toxicidade ou salinidade limitante. A presença de macronutrientes na AP contribuiu para atenuar limitações nutricionais da água de abastecimento, especialmente em condições de mistura, sem comprometer o crescimento inicial das plantas.

Entretanto, os resultados obtidos se restringem à fase inicial de crescimento e não contemplam os efeitos cumulativos do uso contínuo da AP sobre o sistema solo-planta. A variabilidade inerente à composição química da AP, particularmente em relação à salinidade, à sodicidade e ao potencial acúmulo de elementos-traço, reforça a necessidade de monitoramento edáfico sistemático em cenários de uso prolongado, com atenção especial à condutividade elétrica, à razão de adsorção de sódio e às alterações na estrutura

e na fertilidade do solo. Assim, a integração do reuso de AP à produção florestal demanda manejo criterioso e seleção clonal orientada por critérios fisiológicos, de modo a assegurar a sustentabilidade do sistema produtivo em regiões com limitação hídrica.

Referências

- ABDELHAMID, C. *et al.* Produced Water Treatment Technologies: A Review. **Energies**, v. 18, n. 1, p. 63, 2024.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p. 711–728, 2013.
- ANGELOTTI, F.; FERNANDES JUNIOR, P. I.; SA, I. B. Mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: medidas de mitigação e adaptação., 2011. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/923057>. Acesso em: 5 set. 2025.
- ANP. **Produção em campos terrestres de petróleo e gás deve crescer até 29% nos próximos cinco anos.**, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/producao-em-campos-terrestres-de-petroleo-e-gas-deve-crescer-ate-29-nos-proximos-cinco-anos. Acesso em: 5 set. 2025.
- APHA. 5520 oil and grease. *In*: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.: American Public Health Association, 2017. (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater). Disponível em: <https://www.standardmethods.org/doi/abs/10.2105/SMWW.2882.107>. Acesso em: 9 nov. 2025.
- ASSUNÇÃO, M. V. D. D.; VIEIRA, M. M.; ALMEIDA, M. R. D. Fatores influenciadores na produção indesejada da água produzida de petróleo: um estudo na bacia Potiguar/Brasil. **HOLOS**, v. 2, p. 146–160, 2018.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. 2nd ed.: (FAO Studies: Irrigation and Drainage, 29 Revised 1)., 1999. v. translated by H. R. Gheyi, J. F. de Medeiros and F. A. V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p.
- BASÍLIO, J. J. N. *et al.* Fine Root Density Dynamics and Carbon Stock of *Eucalyptus* spp.: Interplay of Age, Genotype, and Edaphoclimatic Conditions. **Plants**, v. 13, n. 11, p. 1503, 2024.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise De Crescimento De Plantas (Noções Básicas)**.: Funep, 2003.
- BERNSTEIN, L. Effects of Salinity and Sodicty on Plant Growth. **Annual Review of Phytopathology**, v. 13, n. 1, p. 295–312, 1975.
- BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS. **NBR 14546: Water – Determination of oils and greases – Gravimetric method**. Rio de Janeiro, Brazil: Brazilian Association of Technical Standards, 2000. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2774>. Acesso em: 7 out. 2025.
- CARMO, D. L. D.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1211–1220, 2012.

CARNEIRO, J. G. de A. **Production and Quality Control of Forest Seedlings**. Viçosa, MG: Universidade Federal do Paraná Universidade Estadual do Norte Fluminense Fundação de Pesquisas Flore., 1995.

CASTRO, C. N. de. Semiárido, escassez hídrica e articulação de políticas públicas., 2025. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/16862>. Acesso em: 5 set. 2025.

CASTRO FILHO, M. N. D. *et al.* BIOMASS OF TWO *Eucalyptus* CLONES (*E. grandis* × *E. urophylla*) IRRIGATED WITH SALINE WATER. **Revista Árvore**, v. 46, p. e4612, 2022.

CHEN, S. *et al.* Genetic parameters for growth and wood chemical properties in *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* hybrids. **Annals of Forest Science**, v. 75, n. 1, p. 16, 2018.

CHENG, J.; YU, S. Nitrogen allocation among leaves and roots mediates the interaction between plant life history trade-off and density dependence. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1549801, 2025.

COOPER, C. M. *et al.* Oil and Gas Produced Water Reuse: Opportunities, Treatment Needs, and Challenges. **ACS ES&T Engineering**, v. 2, n. 3, p. 347–366, 2022.

DENISON, N. P.; KIETZKA, J. E. The Use And Importance Of Hybrid Intensive Forestry In South Africa. **South African Forestry Journal**, v. 165, n. 1, p. 55–60, 1993.

DOLAN, F. C.; CATH, T. Y.; HOGUE, T. S. Assessing the feasibility of using produced water for irrigation in Colorado. **Science of The Total Environment**, v. 640–641, p. 619–628, 2018.

DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R. de; RIBASKI, J. **Eucalipto no Semiárido Brasileiro.**: Sidinei Anunciação Silva, 2016.

EMMONS, R. V. *et al.* Unraveling the Complex Composition of Produced Water by Specialized Extraction Methodologies. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 4, p. 2334–2344, 2022.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2025.**: FAO, 2025. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd6709en>. Acesso em: 19 jan. 2026.

GÁNDARA, J. *et al.* Drought effects on water status, plant hydraulics and growth in *Eucalyptus grandis* and clonal hybrids with red gums and *E. urophylla*. **Agrociencia Uruguay**, v. 27, n. NE2, p. e1251, 2023.

GEBIREHIWOT, H. T. Review on Factors Affecting Early Survival of Tree /Shrub Seedlings and it's Remedy in Restoration Sites of Ethiopia. **Journal of Landscape Ecology**, v. 16, n. 1, p. 128–148, 2023.

GRAPHPAD SOFTWARE. **GraphPad Prism, versão 10.4.2**. Boston, Massachusetts, EUA: [s. d.], 2020. 10.4.2. Disponível em: www.graphpad.com.

HAILU, B. Impacts of Soil Salinity/Sodicity on Soil-Water Relations and Plant Growth in Dry Land Areas: A Review. **Journal of Natural Sciences Research**, 2021. Disponível em: <https://iiste.org/Journals/index.php/JNSR/article/view/55656>. Acesso em: 13 nov. 2025.

HUNT, R. **Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

HUSSAIN, A.; PRIYADARSHI, M.; DUBEY, S. Experimental study on accumulation of heavy metals in vegetables irrigated with treated wastewater. **Applied Water Science**, v. 9, n. 5, p. 122, 2019.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.**, 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

JOHNSON, S. J. *et al.* An Overview of Oil and Grease Determination in Produced Water. In: Spe Health, Safety And Environment In Oil And Gas Exploration And Production Conference, 1996, New Orleans, Louisiana. **SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference**. New Orleans, Louisiana: SPE, 1996. p. SPE-35877-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEHSE/proceedings/96HSE/96HSE/SPE-35877-MS/58484>. Acesso em: 24 nov. 2025.

KANNAN, K.; BHANDARI, S.; SIVARAJAN, A. Variation in Growth and Wood Properties of Four *Eucalyptus* Species, their Hybrids and Clones in Vidarbha Region, Maharashtra, India. **Indian Forester**, v. 149, n. 8, p. 827, 2023.

LOPES, A. D. S. *et al.* Volume, biomass, carbon stock and efficiency of water use in irrigated *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 2, p. 1047–1060, 2022.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2nd Editioned.: POTAFOS, 1997.

Marschner's Mineral Nutrition Of Higher Plants. The University of Adelaide, Australia: Petra Marschner, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123849052/marschners-mineral-nutrition-of-higher-plants>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MDIC - Ministério Do Desenvolvimento, Indústria, Comércio E Serviços. **Plano Nacional de Economia Circular 2025–2034**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/participamaisbrasil/plano-nacional-de-economia-circular>.

MINHAS, P. S. *et al.* Effect of long-term irrigation with wastewater on growth, biomass production and water use by *Eucalyptus* (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) planted at variable stocking density. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 151–160, 2015.

MINHAS, P. S.; QADIR, M.; YADAV, R. K. Groundwater irrigation induced soil sodification and response options. **Agricultural Water Management**, v. 215, p. 74–85, 2019.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, n. 2, p. 239–250, 2002.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.

NATH, F.; CHOWDHURY, M. O. S.; RHAMAN, M. M. Navigating Produced Water Sustainability in the Oil and Gas Sector: A Critical Review of Reuse Challenges, Treatment Technologies, and Prospects Ahead. **Water**, v. 15, n. 23, p. 4088, 2023.

OLUSOLA, F. O. Groundwater Quality Evaluation For Drinking, Domestic And Irrigation Uses In Parts Of Ode Irele Local Government Area Of Ondo State, Nigeria. **Water Conservation and Management**, v. 4, n. 1, p. 32–41, 2020.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: [s. d.], 2002.

PHOGAT, V. *et al.* Impact of long-term recycled water irrigation on crop yield and soil chemical properties. **Agricultural Water Management**, v. 237, p. 106167, 2020.

PNRH - **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasil, Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília: MDR, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/pnrh_2022_para_baixar_e_imprimir.pdf.

POORTER, H. *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012.

RICHARDS, L. A. **Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos**.: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas., 1964. v. Colección general Biblioteca

RTI. **Água produzida em campos petrolíferos: uma fonte alternativa para irrigação de culturas** | RTI., 2020. Disponível em: <https://www.rti.org/impact/oilfield-produced-water-alternative-source-crop-irrigation>. Acesso em: 15 nov. 2025.

SAADAOUI, E. *et al.* An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp. **Forestry Studies**, v. 67, n. 1, p. 86–96, 2017.

SANCHEZ-ROSARIO, R.; HILDENBRAND, Z. L. Produced Water Treatment and Valorization: A Techno-Economical Review. **Energies**, v. 15, n. 13, p. 4619, 2022.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012.

SERRAYE, A. *et al.* Dynamics of *Eucalyptus* and Sorghum biomass growth and nitrogen assessment at a Saharan sandy soil irrigated with treated wastewater. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 18551, 2025.

SILVA, F. C. da. **Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes**.: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

SOLEIMANI, H. *et al.* Ecological risk assessment and heavy metals accumulation in agriculture soils irrigated with treated wastewater effluent, river water, and well water combined with chemical fertilizers. **Heliyon**, v. 9, n. 3, p. e14580, 2023.

WALY, M. M.; MICKOVSKI, S. B.; THOMSON, C. Application of Circular Economy in Oil and Gas Produced Water Treatment. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2132, 2023.

WATER ACTION | UNEP., 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/global-water-shortages-are-looming-here-what-can-be-done-about-them>. Acesso em: 5 set. 2025.

WENG, Q. *et al.* Hybridizing ability and heterosis between *Eucalyptus urophylla* and *E. tereticornis* for growth and wood density over two environments. **Silvae Genetica**, v. 63, n. 1–6, p. 15–23, 2014.

XU, J. *et al.* Across-rotation genetic analysis and multitrait selection in a cloned cross of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis*. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1553819, 2025.

ZHU, X. *et al.* Xylem Transcriptome Analysis in Contrasting Wood Phenotypes of *Eucalyptus urophylla* × *tereticornis* Hybrids. **Forests**, v. 13, n. 7, p. 1102, 2022.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nos dois estudos que compõem esta dissertação demonstram, de forma convergente, que a Água Produzida tratada (AP) proveniente da extração de petróleo e gás *onshore* apresenta viabilidade técnica como fonte alternativa de irrigação em sistemas de produção florestal baseados em clones híbridos de *Eucalyptus*, tanto na fase de enraizamento adventício de miniestacas quanto no crescimento inicial em condições de campo simulado.

No primeiro estudo, a AP não comprometeu o percentual de enraizamento nem a sobrevivência das miniestacas, com médias de 92,8% e 95,2%, respectivamente, valores compatíveis com os obtidos sob irrigação com água de abastecimento urbano (AA). Esse resultado é particularmente relevante por demonstrar que as diferenças na composição iônica entre as fontes hídricas, especialmente a maior concentração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e micronutrientes como B e Mo na AP, não representaram restrição à fase crítica de indução e formação de raízes adventícias. Pelo contrário, para os clones 104 e 106 (*E. urophylla* × *E. tereticornis*), a irrigação com AP esteve associada a maior vigor vegetativo, sugerindo que a composição nutricional desse efluente pode exercer papel complementar ao substrato na sustentação do desenvolvimento inicial das mudas. A análise multivariada revelou perfis de tolerância genótipo-específicos, confirmando que a resposta à AP não é uniforme entre clones e que a seleção do material genético é variável determinante para o sucesso do reuso em viveiros florestais.

No segundo estudo, os resultados evidenciaram que a irrigação com AP não impôs restrições generalizadas ao crescimento em altura, diâmetro do coleto ou acúmulo total de carbono por planta ao longo de 91 dias a pleno sol. O fator genótipo exerceu papel preponderante sobre a maioria dos caracteres avaliados, com efeitos da proporção de AP restritos a combinações específicas de clone e caractere. Esse padrão indica que a resposta fisiológica à AP é mediada predominantemente pela capacidade intrínseca de cada clone em absorver, distribuir e utilizar nutrientes, e não por um possível efeito estressante direto do efluente sobre o metabolismo vegetal. Entre os clones avaliados, C3 destacou-se pela maior eficiência no uso de carbono e potássio, enquanto C5 adotou estratégia conservativa com maior alocação de biomassa e nutrientes ao sistema radicular, padrão interpretado como ajuste fisiológico adaptativo, e não como sintoma de estresse. O clone C2, por sua vez, apresentou resposta não linear, com melhor desempenho sob a proporção de 50% de AP, resultado que evidencia que o equilíbrio entre as fontes de água pode gerar condição mais favorável do que qualquer uma delas isoladamente, aspecto com implicação prática

direta para o manejo da irrigação em viveiros com disponibilidade simultânea das duas fontes hídricas.

A convergência entre os dois estudos aponta para um princípio interpretativo comum: a AP tratada, dentro dos parâmetros de qualidade caracterizados nesta pesquisa, atua como fator seletivo e não como fator limitante universal ao desenvolvimento de *Eucalyptus* spp. em condições semiáridas. Essa distinção é cientificamente relevante porque reposiciona a AP de uma fonte de risco a ser gerenciado para uma alternativa hídrica estratégica a ser otimizada por meio da seleção clonal e do monitoramento criterioso.

Do ponto de vista da sustentabilidade hídrica regional, o reuso da AP tratada na produção florestal no semiárido brasileiro representa uma contribuição concreta à economia circular da indústria petrolífera. Essa prática alinha-se diretamente ao Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH, 2022), ao Plano Brasileiro de Economia Circular (MDIC, 2025) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, em especial o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 15 (Vida Terrestre).

Contudo, a aplicação operacional desse reuso exige cautela em dimensões que transcendem os resultados aqui obtidos. A variabilidade composicional intrínseca da AP, condicionada pela geologia do reservatório, pelo tempo de operação do poço e pelo processo de tratamento aplicado, impõe que cada lote seja previamente caracterizado antes do uso florestal, não sendo seguro extrapolar automaticamente os resultados deste estudo para outras fontes de AP sem caracterização equivalente.

Adicionalmente, o monitoramento edáfico sistemático é indispensável em cenários de uso prolongado, com atenção especial à condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, à razão de adsorção de sódio, ao percentual de sódio trocável e aos teores de boro e bário, elementos presentes em maior concentração na AP avaliada e com potencial fitotóxico em condições de acumulação progressiva. A ausência de efeitos negativos detectáveis no período experimental não elimina o risco de sodificação gradual do solo em cultivos de ciclo mais longo, cenário que demanda estudos de médio e longo prazo para avaliação segura da sustentabilidade do sistema.

Em síntese, esta dissertação demonstra que o reuso de AP tratada é tecnicamente viável nas fases de enraizamento e crescimento inicial de clones de *Eucalyptus* em condições semiáridas, desde que associado à seleção de genótipos responsivos, à caracterização contínua do efluente e ao monitoramento integrado do sistema solo-planta.

A integração entre silvicultura sustentável, gestão hídrica circular e melhoramento genético florestal emerge, portanto, como caminho promissor para conciliar produtividade, conservação dos recursos naturais e desenvolvimento regional em um dos biomas mais vulneráveis às mudanças climáticas globais.