



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRONOMICAS E FLORESTAIS
CURSO DE AGRONOMIA

Márcio Abraão Cavalcante Albuquerque

RESPOSTA DE *MIMOSA CAESALPINIIFOLIA* E *MIMOSA TENUIFLORA* A
IRRIGAÇÃO COM ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO

MOSSORÓ

2025

Márcio Abraão Cavalcante Albuquerque

RESPOSTA DE *MIMOSA CAESALPINIIFOLIA* E *MIMOSA TENUIFLORA* A
IRRIGAÇÃO COM ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Agronomia

Orientador: Daniel Valadão Silva.

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 tornar-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.

C46r Cavalcante Albuquerque, Márcio Abraão.
Resposta de *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Mimosa tenuiflora* a irrigação com água produzida de Petróleo /
Márcio Abraão Cavalcante Albuquerque. - 2025.
31 f. : il.

Orientador: Daniel Valadão Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Agronomia,
2025.

1. Efluente de petróleo. 2. Reúso. 3. Caatinga.
4. Espécies nativas. 5. Semiárido. I. Silva, Daniel
Valadão, 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.

Márcio Abraão Cavalcante Albuquerque

**RESPOSTA DE *MIMOSA CAESALPINIIFOLIA* E *MIMOSA TENUIFLORA* A
IRRIGAÇÃO COM ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Agronomia.

Defendida em: 17/ 12/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Valadão Silva (UFERSA)
Presidente

Msc. Jesley Nogueira Bandeira
Membro Examinador

Dra. Valdívia Gomes de Sousa Bezerra
Membro Examinador

In Memoriam

À memória de minha mãe, Maria Lenilda Cavalcante Albuquerque (1970-2017), pelo amor, incentivo e valores transmitidos, que permaneceram como base durante toda a minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pela formação acadêmica oferecida e pela infraestrutura disponibilizada ao longo do curso de Agronomia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Valadão Silva, pelos ensinamentos, pela orientação técnica e científica, bem como pela disponibilidade e compromisso demonstrados durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

À banca examinadora, pelas contribuições, correções e considerações apresentadas, que foram fundamentais para o aprimoramento deste estudo em especial para a doutora Valdivia Gomes de Sousa Bezerra.

Aos colegas Ana Candida Lobão da Costa, Paulo Sérgio Fernandes das Chagas e Bruno Caio Chaves Fernandes, pelo apoio, colaboração e auxílio prestados durante a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Luiz Gustavo Alves de Alcântara e Marcelo Braz da Silva Melo pelo incentivo, apoio e compreensão ao longo de toda a graduação.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A falta de água no semiárido brasileiro impõe sérias restrições ao avanço da agricultura e à recuperação de áreas degradadas, tornando imprescindível a procura por fontes alternativas de água. Nesse contexto, a água produzida, efluente gerado em grandes volumes pela indústria de petróleo e gás, surge como um alternativo potencial, embora apresente riscos ambientais devido à sua composição química. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho inicial de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) e *Mimosa tenuiflora* (jurema-preta) submetida à irrigação com água produzida, bem como os efeitos desse efluente sobre parâmetros fisiológicos e de crescimento vegetal. O experimento foi realizado em casa de vegetação, utilizando um delineamento em blocos casualizados no esquema fatorial 2×3 , com quatro repetições. O primeiro fator refere-se as duas espécies e o segundo fator a três proporções de água produzida (0%, 50% e 100%). Foram analisados, a taxa de fotossíntese líquida, a altura das plantas, o diâmetro do caule e a massa seca total. Os resultados indicaram que a irrigação com água produzida não comprometeu o crescimento das mudas, não havendo efeitos negativos sobre altura, diâmetro do caule e biomassa seca. Observou-se, entretanto, aumento da taxa de fotossíntese nas duas espécies quando irrigadas com a proporção de 50% de água produzida. Independentemente da concentração do efluente, a *Mimosa tenuiflora* exibiu a maior taxa fotossintética e o maior acúmulo de biomassa quando comparada à *Mimosa caesalpiniiifolia*. Conclui-se que a água produzida, após tratamento adequado e em proporções controladas, pode ser utilizada de forma segura na produção de mudas de espécies nativas da Caatinga, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos industriais, a conservação dos recursos hídricos e a recuperação ambiental em regiões semiáridas.

Palavras-chave: Efluente petrolífero. Reúso. Caatinga. Espécies nativas. Semiárido.

ABSTRACT

Water scarcity in the Brazilian semi-arid region imposes serious constraints on agricultural development and the recovery of degraded areas, making the search for alternative water sources essential. In this context, produced water - an effluent generated in large volumes by the oil and gas industry - emerges as a potential alternative, although it poses environmental risks due to its chemical composition. This study aimed to evaluate the initial performance of seedlings of *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá) and *Mimosa tenuiflora* (jurema-preta) under irrigation with produced water, as well as the effects of this effluent on physiological and plant growth parameters. The experiment was conducted in a greenhouse using a randomized block design in a 2 × 3 factorial scheme, with four replicates. The first factor consisted of the two species, and the second factor comprised three proportions of produced water (0%, 50%, and 100%). Net photosynthetic rate, plant height, stem diameter, and total dry mass were evaluated. The results indicated that irrigation with produced water did not impair seedling growth, with no negative effects on height, stem diameter, or dry biomass. However, an increase in photosynthetic rate was observed in both species when irrigated with the 50% produced water proportion. Regardless of effluent concentration, *Mimosa tenuiflora* exhibited higher photosynthetic rates and greater biomass accumulation compared to *Mimosa caesalpinifolia*. It is concluded that produced water, after adequate treatment and when applied in controlled proportions, can be safely used in the production of seedlings of native Caatinga species, contributing to industrial waste reuse, water resource conservation, and environmental restoration in semi-arid regions.

Keywords: Oilfield effluent. Reuse. Caatinga. Native species. Semiarid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Taxa fotossintética líquida de <i>M. caesalpinifolia</i> e <i>M. tenuiflora</i>	25
Figura 2. Massa seca Total de <i>M. caesalpinifolia</i> e <i>M. tenuiflora</i>	26
Figura 3. Altura de mudas de <i>M. caesalpinifolia</i> e <i>M. tenuiflora</i> submetidas a irrigação com água produzida de petróleo.	27
Figura 4. Diâmetro do caule de mudas de mudas de <i>M. caesalpinifolia</i> e <i>M. tenuiflora</i>	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Padrões de qualidade de efluentes segundo a Resolução COEMA nº 02/2017	17
Tabela 2. Atributos químicos das águas utilizadas.	22
Tabela 3. Avaliação de metais nas amostras de água produzida.....	23

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
2.REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Escassez hídrica no semiárido e a busca por fontes alternativas de água ...	15
2.2 Água produzida: origem, impactos ambientais e composição	16
2.3 Reuso agrícola e florestal de efluentes industriais	16
2.4 Caatinga e recuperação de áreas degradadas	18
2.5 A importância ecológica e produtiva da <i>Mimosa caesalpinifolia</i> e <i>Mimosa tenuiflora</i>	18
2.6 Efeitos da Salinidade e Fitotoxicidade nas Plantas	19
3. MATERIAIS E METODOS	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS.....	30

1.INTRODUÇÃO

A escassez hídrica é um dos maiores desafios ambientais e socioeconômicos do século XXI, particularmente em regiões semiáridas como o Nordeste brasileiro, onde a disponibilidade de água condiciona o desenvolvimento sustentável. (Silva et al., 2021). Paralelamente, a indústria petrolífera gera um passivo ambiental de grandes proporções: a água produzida (AP), um efluente complexo de alta salinidade, que pode conter compostos orgânicos e metais pesados. O descarte inadequado representa um risco constante de contaminação para solos e aquíferos. Transformar este efluente em um recurso útil, direcionando-o para finalidades que atendam a necessidades regionais prementes, configura-se como uma estratégia duplamente benéfica, com relevante impacto ambiental, social e econômico (Fernandes; Cunha, 2023).

Nesse contexto, a recuperação do bioma Caatinga, fortemente degradado por processos de desertificação, emerge como uma prioridade, considerando, a própria limitação hídrica que caracteriza a região. O reflorestamento com espécies nativas resilientes é a base para reverter este quadro, criando uma convergência estratégica com a necessidade de destinação da AP. Duas espécies arbóreas se destacam nesse cenário pela sua importância ecológica e multifuncionalidade: a *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá) e a *Mimosa tenuiflora* (jurema-preta). Ambas são espécies de ocorrência na caatinga, evoluídas sob condições de estresse, sendo a sabiá amplamente utilizada na produção de madeira, recuperação de solos, sistemas agroflorestais e como forrageira, enquanto a jurema-preta possui notável valor para produção de lenha, carvão, medicina popular e como fonte de recursos para apicultura. Sua rusticidade e tolerância à seca as tornam candidatas ideais para estudos de adaptação a efluentes salinos (Carvalho.b, 2010; Pareyn; Araujo; Drumond, 2018)

No entanto, não há informações conclusivas sobre os efeitos deste efluente, em diferentes concentrações, no desenvolvimento inicial e nas respostas fisiológicas dessas espécies. Assim, a relevância desta pesquisa justifica-se, portanto, em múltiplas dimensões: ambiental, ao propor uma solução para um resíduo industrial de alto risco; científica, ao gerar conhecimento sobre a tolerância de espécies nativas a irrigação com AP; econômica, ao viabilizar uma fonte hídrica alternativa que pode reduzir custos em projetos de recuperação; e social, ao contribuir para

práticas sustentáveis que aliam desenvolvimento e preservação, beneficiando as comunidades do semiárido.

Diante desse quadro, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o desempenho de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Mimosa tenuiflora* submetidas à irrigação com diferentes proporções de água produzida. Para tanto, buscará atingir os seguintes objetivos específicos: 1) avaliar parâmetros de crescimento vegetal (altura, diâmetro do caule e massa seca total); 2) avaliar a taxa de fotossíntese líquida (A); e 3) comparar a resposta das duas espécies aos diferentes tratamentos para identificar seu nível de tolerância.

2.REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Escassez hídrica no semiárido e a busca por fontes alternativas de água

A região semiárida brasileira é caracterizada por períodos de chuvas irregulares e altas taxas de evaporação, com fontes hídricas superficiais e subterrâneos escassos. No caso do bioma Caatinga, os recursos hídricos são essenciais para o desenvolvimento de atividades agrícolas e a recuperação de campos degradados. Atualmente, com o aumento da demanda agrícola irrigada, industrial e demográfica, em níveis superiores à capacidade de renovação do ciclo hidrológico, é cada vez mais aceita a ideia de que, mesmo sendo um recurso natural renovável, a água torna-se cada vez mais escassa em termos quantitativos e qualitativos (Castro, 2025).

A escassez de água passa a ser um problema duplo, não sendo apenas uma questão ambiental, mas também traz problemas sociais e econômicos para a produção rural e a segurança alimentar das famílias próximas. Diante disso, há uma necessidade de buscar fontes alternativas de água não potável, como o reúso. Na prática, o uso de água reutilizável é conhecido como reuso de água, uma maneira estudada e praticada, é uma forma de diminuir a dependência de recursos convencionais e contribuir para o uso sustentável dos recursos naturais (Rocha *et al.*, 2025).

O reúso de efluentes industriais está sujeito a parâmetros técnicos rigorosos, uma vez que a composição química dessas águas pode degradar o solo e provocar fitotoxicidade. Nesse contexto, a água produzida pela indústria petrolífera emerge como uma alternativa potencial, desde que receba tratamento adequado, seja monitorada constantemente e sua aplicação obedeça a limites seguros de acordo com as normas estabelecidas. Dessa forma, seu reaproveitamento pode representar um avanço significativo nas práticas de reúso industrial.

2.2 Água produzida: origem, impactos ambientais e composição

A AP é o maior fluxo volumétrico da produção de petróleo e gás. Estima-se que sua produção supere entre três a dez vezes o volume de petróleo extraído (ANP, 2025). Este efluente apresenta características complexas, incluindo alta concentração de sólidos totais dissolvidos, elevada salinidade, compostos orgânicos e traços de metais pesados, o que impõe significativos desafios para seu descarte (Rajbongshi; Gogoi, 2024). No entanto, mediante tratamento adequado que atinja padrões específicos de qualidade, a AP pode apresentar potencial para reúso na irrigação agrícola, transformando um passivo ambiental em alternativa hídrica valiosa, particularmente em regiões semiáridas com escassez de recursos convencionais.

A água produzida inclui a água de formação natural dos reservatórios, bem como quaisquer fluidos utilizados na extração de petróleo da terra. O conteúdo da água produzida é muito heterogêneo de acordo com as propriedades geológicas do local de armazenamento, a duração da exploração e as abordagens de extração. Geralmente, esse efluente apresenta alta salinidade com óleos e graxas, matéria orgânica dissolvida, metais pesados e, em alguns casos, até compostos radioativos naturais (Jiang *et al.*, 2021).

O descarte inadequado da água produzida pode resultar na contaminação do solo, cursos de água e reservatórios subterrâneos, o que pode prejudicar a biodiversidade e a saúde pública. A salinização do solo é um resultado dessa concentração, são algumas das consequências diretas do sal e do sódio na estrutura do solo, reduzindo assim sua fertilidade e tornando-o menos adequado para a agricultura (Mammadova, 2024). Portanto, é necessário projetar estratégias seguras e sustentáveis para o reuso da água produzida, que possam ser utilizadas como um recurso alternativo e sustentável.

2.3 Reuso agrícola e florestal de efluentes industriais

O reúso agrícola e florestal de efluentes industriais visa reduzir a demanda por água potável e promover a economia circular de resíduos. Atualmente, a agricultura depende de um volume de água tão significativo que a sustentabilidade

da produção de alimentos não poderá ser mantida sem o desenvolvimento de novas fontes de abastecimento e sem uma gestão adequada dos recursos hídricos (Rocha *et al.*, 2025).

Com controle adequado, esse processo fornece não apenas água, mas também nutrientes às plantas, reduzindo, conseqüentemente, os custos com fertilizantes. No entanto, para uma utilização segura de efluentes industriais, é necessário assegurar que seus parâmetros atendam aos padrões estabelecidos pelas normas vigentes (Tabela 1). O COEMA 2/2017 dispõe sobre as condições, parâmetros e padrões para lançamento de efluentes líquidos em corpos hídricos, sendo uma referência fundamental para avaliar a viabilidade e os limites seguros do reúso de efluentes, incluindo a água produzida, em atividades agrícolas e florestais.

Tabela 1. Padrões de qualidade de efluentes segundo a Resolução COEMA nº 02/2017

Grupo	Parâmetro	Unidade	Padrão COEMA 02/2017
Parâmetros físico-químicos	pH	-	6,0 -8,5
	Condutividade elétrica (CE)	dS m ⁻¹	≤ 3,0
	Relação de Adsorção de Sódio (RAS)	-	≤ 15
Metais e semimetais	Arsênio (As)	mg L ⁻¹	0,01
	Bário (Ba)	mg L ⁻¹	5,0
	Boro (B)	mg L ⁻¹	5,0
	Cádmio (Cd)	mg L ⁻¹	0,2
	Chumbo (Pb)	mg L ⁻¹	0,5
	Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	1,0
	Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	15,0
	Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	1,0
	Mercúrio (Hg)	mg L ⁻¹	0,01
	Selênio (Se)	mg L ⁻¹	0,01
	Zinco (Zn)	mg L ⁻¹	5,0
Compostos orgânicos (BTEx)	Benzeno	µg L ⁻¹	1,2
	Tolueno	µg L ⁻¹	1,2
	Etilbenzeno	µg L ⁻¹	0,84
	Xilenos totais	µg L ⁻¹	1,6

Fonte: adaptado do COEMA 2/2017

Assim sendo, as empresas devem tratar seus efluentes para alcançar os padrões exigidos e destiná-los ao reúso agrícola.

2.4 Caatinga e recuperação de áreas degradadas

A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro e possui alta biodiversidade adaptada ao clima semiárido. Embora tenha grande relevância ecológica, esse bioma enfrenta diversas manipulações devido ao desmatamento, uso inadequado do solo, expansão da agropecuária e exploração de recursos naturais sem a gestão devida. A retirada da Caatinga leva à desertificação, redução da biodiversidade, empobrecimento do solo e diminuição da capacidade produtiva (Justino *et al.*, 2025).

Compreende-se a importância da preservação de habitats naturais e os impactos significativos das atividades humanas na biodiversidade local, e a necessidade de práticas de manejo sustentáveis, como abordado por Rabelo-costa *et al.*, (2022). Nesse cenário, iniciativas de recuperação de áreas degradadas são essenciais para restabelecer funções ecológicas, proteger o solo da erosão e promover o equilíbrio ambiental. Uma das estratégias mais eficazes para a recuperação da Caatinga é o reflorestamento com espécies nativas, pois essas plantas já se adaptaram às condições ambientais adversárias (Demartelaere *et al.*, 2022).

No entanto, a escassez de água ainda representa um obstáculo para o sucesso das iniciativas de revegetação. Isso reforça a importância de alternativas hídricas viáveis, como a utilização de águas residuais.

2.5 A importância ecológica e produtiva da *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Mimosa tenuiflora*

A *Mimosa caesalpiniiifolia*, ou sabiá, é uma árvore nativa do semiárido brasileiro que é muito utilizada em sistemas agroflorestais, na produção de madeira e na recuperação de áreas degradadas. Seu crescimento rápido, aliado à rusticidade e à capacidade de fixação de nitrogênio no solo, confere a essa espécie um grande valor ambiental e econômico. Além de sua importância na produção de lenha, estacas e mourões, o sabiá também desempenha papel fundamental na melhoria da fertilidade do solo e na proteção contra processos erosivos. Sua capacidade de se adaptar a solos pobres e condições climáticas adversas faz dele um candidato para pesquisas sobre o uso de água de menor qualidade na irrigação

(Embrapa, 2018).

A *Mimosa tenuiflora*, também chamada de jurema-preta, é uma das espécies mais resistentes da Caatinga, demonstrando grande resistência à seca e habilidade de rebrota após cortes ou queimadas. Tem grande valor ecológico e é extremamente utilizado na recuperação de áreas degradadas, além de ter relevância econômica na produção de lenha e carvão vegetal. Além de possuir propriedades medicinais conhecidas pela medicina popular, a jurema-preta tem grande contribuição para a apicultura, fornecendo néctar e pólen. Sua capacidade de adaptação a ambientes com pouca água e com solos de baixa qualidade, sua adaptação indica um alto potencial para resistir a condições desfavoráveis, incluindo o uso de águas salinas e efluentes tratados. Ambientes com pouca água e solos de baixa qualidade indicam um alto potencial para resistir a condições desfavoráveis, incluindo o uso de águas salinas e efluentes tratados (Carvalho.b, 2010).

2.6 Efeitos da Salinidade e Fitotoxicidade nas Plantas

A irrigação com água salina impõe um duplo estresse às plantas, afetando profundamente sua fisiologia e desenvolvimento. Em nível radicular, o aumento da salinidade no meio reduz o potencial hídrico, dificultando a absorção de água e induzindo desidratação celular (estresse osmótico). Simultaneamente, a absorção excessiva de íons, principalmente sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), pode desencadear toxicidade iônica direta, comprometendo a integridade de membranas celulares, a atividade enzimática e o equilíbrio nutricional.

Os efeitos fitotóxicos se manifestam por meio de sintomas visuais como clorose, necrose foliar, redução drástica do crescimento e, em casos severos, a morte da planta. Conforme destacado por Acosta-Motos *et al.*, (2017) sinais de toxidez tendem a se tornar evidentes quando a condutividade elétrica (CE) da solução do meio ultrapassa aproximadamente $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. A avaliação de parâmetros morfológicos e fisiológicos, como altura, diâmetro do caule, produção de biomassa seca e taxa fotossintética, constitui um método para quantificar a tolerância das espécies e o grau de prejuízo imposto pela salinidade.

Diante desse estresse, as plantas ativam um conjunto de mecanismos de resistência, que definem sua capacidade de sobreviver e crescer em ambientes

salinos. Entre as principais estratégias de tolerância destacam-se: a exclusão ou restrição da absorção de sais pelas raízes; a compartimentação segura dos íons tóxicos em vacúolos; a síntese de compostos osmoprotetores para o ajuste osmótico; e a ativação de sistemas antioxidantes para neutralizar as espécies reativas de oxigênio geradas (Hao *et al.*, 2021). A análise integrada das respostas morfológicas, de crescimento e fisiológicas é, portanto, fundamental para avaliar os impactos da irrigação com efluentes salinos e estabelecer limites seguros para seu uso com diferentes espécies vegetais.

3. MATERIAIS E METODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró, RN, Brasil. As mudas de *M. caesalpinifolia* e *M. tenuiflora* foram adquiridas em um viveiro comercial especializado e transplantadas para colunas de PVC (100 mm de diâmetro x 50 cm de altura), preenchidas com solo até atingir o peso total de 4,5 kg, por unidade experimental.

A adubação de fundação foi realizada em todas as unidades experimentais, com a aplicação de 2 g de Monoamônio Fosfato (MAP) por coluna, seguida de umedecimento. Após o período de aclimação, em que as plantas receberam apenas água de abastecimento (AB) durante 15 dias, os tratamentos foram aplicados por 150 dias, com a irrigação realizada conforme a capacidade de vaso (aproximadamente 400 ml por unidade experimental). O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram organizados em um esquema fatorial 2 x 3, totalizando seis tratamentos. O primeiro fator correspondeu às duas espécies florestais e o segundo fator as concentrações de AP (0%, 50% e 100%).

A AP, já tratada, foi fornecida por uma empresa do ramo petrolífero. Os parâmetros físico-químicos e as análises de elementos-traço das diluições (0%, 50% e 100%) de AP foram determinados conforme método padrão estabelecido pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater da American Public Health Association* (APHA, 2017). As amostras para a determinação de compostos orgânicos voláteis BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), foram analisadas por microextração em fase sólida no modo *headspace* (HS-SPME) usando

Cromatografia Gasosa (CG) acoplada ao Detector de Ionização de Chama (FID). A Relação de Adsorção de Sódio (RAS) foi calculada com base na FAO (2023).

A taxa de fotossíntese líquida (A) foi avaliada aos 90 dias usando um analisador portátil de dióxido de carbono infravermelho (IRGA) modelo WALZ GFS-3000FL (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Alemanha). A altura da planta, diâmetro do caule e a massa seca total (MST), aos 150 dias após a aplicação (DAA) de AP, onde após a coleta das plantas, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, até atingir massa constante. A massa seca total foi determinada em balança de precisão (0,000 g).

Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste F ($p \leq 0,05$). Nos casos de significância, os fatores isolados e a interação entre eles foram comparados pelo teste de comparação de médias de Tukey ($p \leq 0,05$) com o software estatístico SISVAR®5.3 (Ferreira, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A AP avaliada apresentou característica não salobra conforme a Resolução 357 do CONAMA e se manteve abaixo dos padrões exigidos (Tabela 2), pelo COEMA 2/2017.

Tabela 2. Atributos químicos das águas utilizadas.

Parâmetro	Unidade	A.A.	50%	100%	(COEMA, 2017)
pH	-	8,30	8,00	7,80	6,0–8,5
CE	dS m ⁻¹	0,44	0,46	0,52	≤ 3,0
P total	mg L ⁻¹	—	2,3	1,3	
K ⁺	mmolc L ⁻¹	0,26	0,36	0,43	-
Na ⁺	mmolc L ⁻¹	3,65	2,60	1,82	
Ca ²⁺	mmolc L ⁻¹	0,75	1,90	2,60	-
Mg ²⁺	mmolc L ⁻¹	0,75	0,60	1,60	-
Cl ⁻	mmolc L ⁻¹	7,05	4,00	4,00	-
HCO ₃ ⁻	mmolc L ⁻¹	2,70	4,40	4,50	-
Dureza	mg L ⁻¹	75	125	210	-
RAS	-	4,2	2,3	1,3	15
CROSS	(mmolc L ⁻¹) ^{0,5}	4,9	2,6	1,5	-

pH (H₂O): Potencial hidrogeniônico em água; CE: Condutividade elétrica; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Mg²⁺: magnésio; Ca²⁺: cálcio; Cl: cloro; P total: fósforo; HCO₃: bicarbonato; RAS: razão de adsorção de sódio. AA = água de abastecimento; 50% = 50% de água de abastecimento e 50 e água produzida; 100% = 100% de água produzida.

Fonte: Autoria própria

A AP avaliada nesse estudo, mesmo na sua concentração integral (100%), apresentou-se em conformidade com os limites estabelecidos pelo padrão de referência COEMA 2/2017 para os parâmetros legislados. Analisando os parâmetros específicos, o pH de todos os tratamentos, água de abastecimento (0% AP), diluição a 50% e AP pura (100%), manteve-se dentro da faixa permitida de 6,0 a 8,5. A condutividade elétrica (CE), indicadora da salinidade, registrou valores bem inferiores ao limite máximo de 3, dS m⁻¹, com a AP pura apresentando o maior valor (dS m⁻¹) porém ainda muito abaixo do teto normativo. De modo relevante, a Razão de Adsorção de Sódio (RAS), que avalia o risco de sodificação do solo, apresentou valores decrescentes com o aumento da concentração de AP, 4,2 (0% AP), 2,3 (50% AP) e 1,3 (100% AP), todos significativamente abaixo do limite máximo de 15. Isso indica um baixo risco de impacto negativo à estrutura do solo por excesso de sódio, mesmo para a água produzida não diluída. Portanto, do ponto de vista químico e dentro dos parâmetros regulados, a AP em estudo atende aos padrões vigentes, apresentando potencial para reúso sem representar, nessas variáveis, um risco de salinização ou sodificação fora dos limites permitidos.

Os traços de metais (tabela 3), mantiveram-se bem abaixo dos padrões exigidos pelo COEMA 2/2017.

Tabela 3. Avaliação de metais nas amostras de água produzida

Parâmetro	Unid	AA	50%	100%	(COEMA, 2017)
Al	mg.L ⁻¹	<0,010	<0,010	<0,010	—
Sb		0,010	0,010	0,010	—
As		0,003	0,004	0,003	0,01
Ba		0,041	0,156	0,203	5
B		0,124	0,186	0,226	5
Cd		<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,2
Pb		<0,001	<0,001	<0,001	0,5
Co		<0,005	<0,005	<0,005	—
Cu		<0,001	<0,001	<0,001	1
Cr		<0,005	<0,002	<0,002	—
Fe		<0,005	<0,005	<0,005	15
Mn		<0,001	<0,001	<0,001	1
Hg		<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,01

Mo	<0,001	<0,001	<0,001	—
Ni	<0,001	<0,005	<0,007	—
Ag	<0,001	<0,001	<0,001	—
Se	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
V	<0,001	<0,006	<0,001	—
Zn	<0,001	<0,002	<0,001	5

Nota: Al = Alumínio; Sb = Antimônio; As = Arsênio; Ba= Bário; B= Boro; Cd = Cádmio; Pb = Chumbo; Co= Cobalto; Cu = Cobre; Cr = Cromo; Fe= Ferro; Mn = Manganês; Hg = Mercúrio; Mo = Molibdênio; Ni= Níquel; Ag = Prata; Se = Selênio; V = Vanádio; Zn = Zinco. AA = água de abastecimento; 50% = 50% de água de abastecimento e 50 e água produzida; 100% = 100% de água produzida.

A análise de metais traço nas amostras de água (Tabela 3) demonstra que, para todos os elementos com limite estabelecido pela norma COEMA 2/2017, as concentrações encontradas nos três tratamentos mantiveram-se significativamente abaixo dos valores máximos permitidos.

Os elementos regulamentados e seus respectivos limites, como arsênio (As: 0,01 mg.L⁻¹), bário (Ba: 5 mg.L⁻¹) boro (B: 5 mg.L⁻¹), cádmio (Cd: 0,2 mg.L⁻¹), chumbo (Pb: 0,5 mg.L⁻¹), cobre (Cu: 1 mg.L⁻¹), ferro (Fe: 15 mg.L⁻¹), manganês (Mn: 1 mg.L⁻¹), mercúrio (Hg: 0,01 mg.L⁻¹), selênio (Se: 0,01 mg.L⁻¹) e zinco (Zn: 5 mg.L⁻¹) apresentaram concentrações muito inferiores, muitas vezes abaixo do limite de quantificação dos métodos analíticos.

Portanto, do ponto de vista da contaminação por metais, a água produzida em estudo, mesmo em sua forma não diluída (100%), atende integralmente aos padrões de qualidade estabelecidos pelo COEMA 2/2017, não representando um risco adicional sob este parâmetro específico para a finalidade investigada.

A análise dos compostos BTEX revelou concentrações inferiores ao Limite de Detecção (LD) em todas as amostras. Considerando que o LD é significativamente inferior aos limites da Resolução COEMA nº 02/2017, conclui-se que o efluente estudado atende integralmente aos requisitos de qualidade concernentes aos contaminantes orgânicos voláteis, não impondo riscos para o reuso agrícola e florestal.

De acordo com a análise de variância, verificou-se efeito isolado nas espécies e nas concentrações para a taxa de fotossíntese líquida (Figura 1).

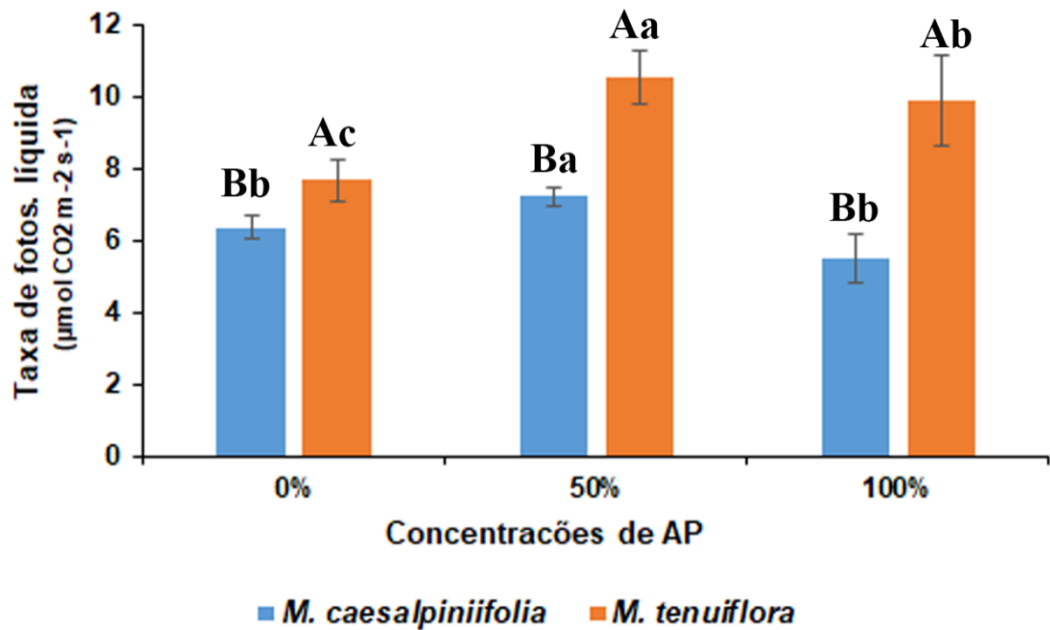


Figura 1. Taxa fotossintética líquida de *M. caesalpinifolia* e *M. tenuiflora*. As letras maiúsculas diferem entre as espécies e as letras minúsculas diferem entre as concentrações de AP à ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 1 mostra que os efeitos observados para a taxa fotossintética líquida ocorreram de forma isolada, tanto para as espécies quanto para as concentrações de água produzida (AP). O efeito significativo entre espécies, indica que *M. tenuiflora* apresenta maior taxa de fotossíntese líquida que *M. caesalpinifolia*, em todas as concentrações de AP. Essa diferença pode estar relacionada à variabilidade genética entre as espécies, que influencia características fisiológicas (Braga *et al.*, 2024).

O aumento da fotossíntese na concentração com 50% de AP, para as duas espécies, indica que a diluição proporcionou um equilíbrio entre disponibilidade de íons e salinidade. Em níveis moderados, íons como Ca^{2+} e Mg^{2+} podem atuar como cofatores enzimáticos e favorecer a estabilidade das membranas fotossintéticas, enquanto a pequena elevação de sais pode estimular o ajuste osmótico, favorecendo a entrada de água nas folhas (Taiz *et al.*, 2017; Tian *et al.*, 2021). Além disso, a ausência de água produzida, para *M. tenuiflora*, apontou menor aporte mineral e, por isso, resultou na menor taxa fotossintética, sugerindo que a água de petróleo forneceu mais nutrientes as mudas, dessa espécie, o que resultou em maior estímulo metabólico.

O aumento da fotossíntese não só melhora a eficiência metabólica imediata, mas também cria uma base energética para crescimento radicular, expansão foliar, formação de novos tecidos e acúmulo de reservas. Portanto, o estímulo fotossintético proporcionado pelas concentrações moderadas de AP pode contribuir para otimizar esses processos bioenergéticos, favorecendo as fases subsequentes de crescimento das mudas.

A massa seca total (Figura 2) foi influenciada exclusivamente pelas espécies, com a *M. tenuiflora* exibindo maior acúmulo de biomassa, o que reforça seu maior vigor inicial.

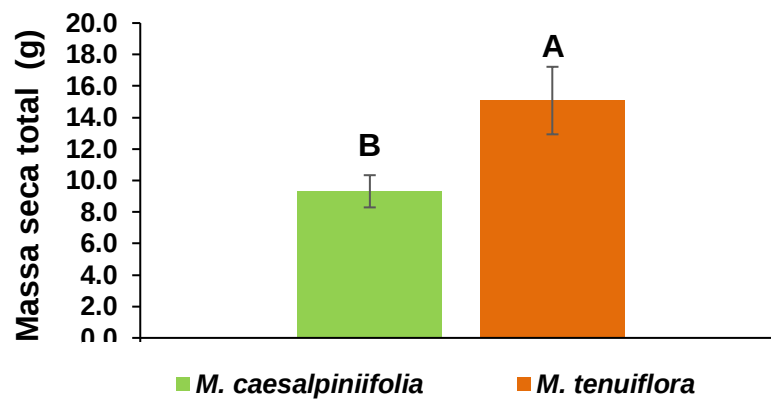


Figura 2. Massa seca Total de *M. caesalpinifolia* e *M. tenuiflora*. As letras maiúsculas diferem entre as espécies à ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria (2025)

A altura das plantas (Figura 2) não foi afetada significativamente em relação a irrigação com AP quando comparadas ao controle.

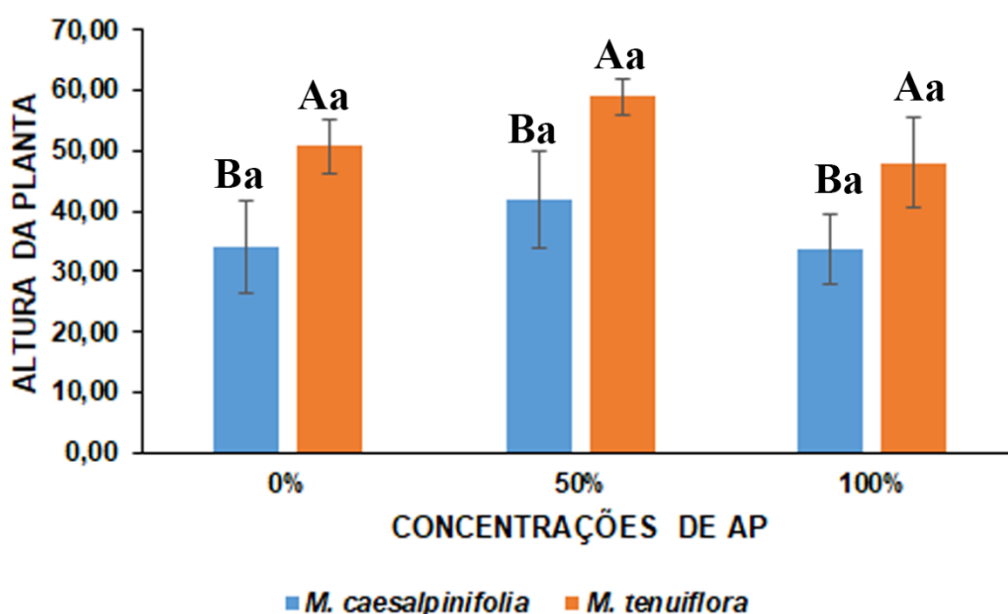


Figura 3. Altura de mudas de *M. caesalpinifolia* e *M. tenuiflora* submetidas a irrigação com água produzida de petróleo em cm. Letras maiúsculas comparam diferenças entre espécies ($p < 0,05$); letras minúsculas comparam diferenças entre concentrações dentro de cada espécie ($p < 0,05$). Barras representam erro padrão da média.

Fonte: Autoria própria (2025)

A altura das mudas apresentou diferença significativa em função da espécie ($F = 19,87$; $p < 0,001$). Conforme esperado pela variabilidade genética inerente a espécies distintas, *M. tenuiflora* demonstrou altura média substancialmente superior (56,8 cm) em comparação a *M. caesalpinifolia* (34,7 cm), correspondendo a uma diferença absoluta de 22,2 cm (64% maior). Este resultado corrobora a premissa de que características morfofisiológicas divergentes entre espécies constituem fator determinante no desenvolvimento vegetal.

Por outro lado, as diferentes concentrações de AP não exerceram influência significativa sobre a altura das mudas, indicando que este parâmetro não constituiu fator limitante ao crescimento axial nas condições experimentais avaliadas. Adicionalmente, a ausência de interação significativa entre os fatores espécie e concentração de AP evidencia que o padrão de resposta às concentrações testadas foi similar entre as espécies, sugerindo mecanismos de tolerância ou sensibilidade compartilhados, apesar das diferenças basais de crescimento. A irrigação com AP não interferiu significativamente no diâmetro do caule (Figura 4).

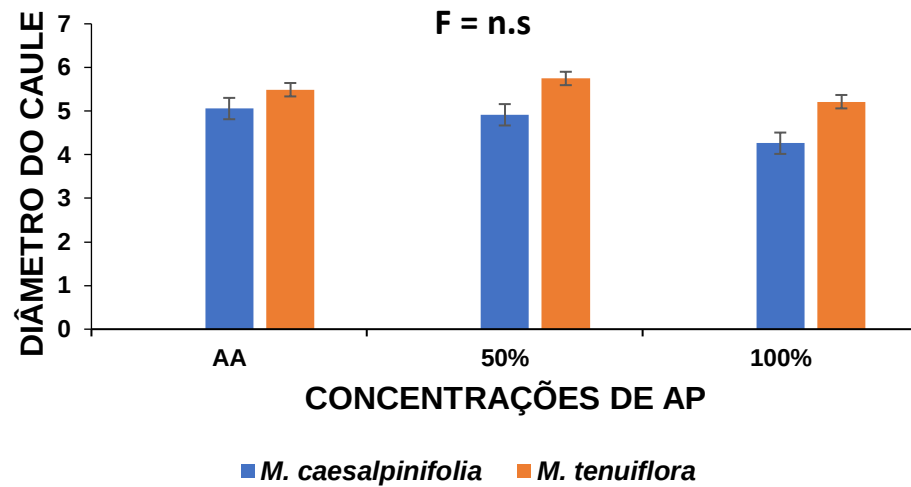


Figura 4. Diâmetro do caule de mudas de mudas de *M. caesalpinifolia* e *M. tenuiflora* em cm. Fn.s = não significativo ($p < 0,05$).

Fonte: Autoria própria (2025)

A irrigação com AP não influenciou significativamente o diâmetro do caule, independentemente da concentração utilizada ($F = n.s$). Da mesma forma, não foi observada diferença significativa entre as duas espécies estudadas (*M. caesalpinifolia* e *M. tenuiflora*). Os valores médios de diâmetro do caule, em todas as combinações de tratamento, mantiveram-se estatisticamente semelhantes.

Resultados semelhantes foram observados por Dantas *et al.*, (2019) que relataram bom crescimento inicial de espécies da caatinga sob irrigação com água de condutividade elétrica (até $6,78 \text{ dS m}^{-1}$). Além disso, Lucas (2024) observou que concentrações intermediárias de AP (50%) promoveram melhorias em parâmetros agrônômicos como altura e diâmetro para espécies da caatinga reforçando que a diluição do efluente pode ser uma estratégia segura para otimizar a produção de mudas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A irrigação com água produzida de petróleo não afetou negativamente o desempenho morfológico das espécies *M. caesalpiniiifolia* e *M. tenuiflora*, mantendo parâmetros como massa seca total, altura e diâmetro do caule. Pelo contrário, observou-se um aumento na taxa fotossintética em ambas as espécies quando submetidas ao tratamento com 50% de água produzida. Comparativamente, *M. tenuiflora* apresentou maior altura, maior incremento de massa seca total e maior taxa fotossintética que *M. caesalpiniiifolia*.

Dessa forma, o efluente em questão pode ser direcionado com segurança para a irrigação de mudas dessas espécies, reduzindo a demanda por fontes convencionais de água e mitigando os impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado. Portanto, o reaproveitamento da água produzida contribui não apenas para a conservação dos recursos hídricos, mas também se configura como uma estratégia inovadora e alinhada às práticas de manejo sustentável, especialmente em regiões de maior vulnerabilidade hídrica, evidenciando seu papel potencial na economia circular e na sustentabilidade dos setores agrícola e florestal.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MOTOS, J. R. *et al.* Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. **Agronomy**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 18, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/7/1/18>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- ANP. **Boletim da produção de Petróleo e Gás Natural**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiOTcxMjQzMTEtNWQ4YS00NzRILWI3NzktMDA2YTNINDRjMjNmliwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtytNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkyMyJ9>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- CARVALHO, B. P. E. R. **Jurema-preta: Mimosa tenuiflora**. - Portal Embrapa. [S. l.], 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1140012/jurema-preta-mimosa-tenuiflora>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- CASTRO, C. N. D. **Texto para Discussão 3086**. [S. l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2025. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/16862/1/TD_3086_web.pdf. Acesso em: 27 dez. 2025.
- COEMA. **Coema 02 2017 | PDF | Águas residuais | Efluente**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/618244304/COEMA-02-2017>. Acesso em: 17 maio 2025.
- DANTAS, B. F. *et al.* Biosaline production of seedlings of native species from the Caatinga dry forest. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 1551–1567, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/31221>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- DEMARTELAERE, A. C. F. *et al.* Revisão bibliográfica: impactos em áreas nativas da caatinga causadas pelas atividades econômicas e as técnicas de reflorestamento / Bibliographic review: impacts on native areas the caatinga caused by economic activities and reforestation techniques. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 25285–25306, 2022. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/46321>. Acesso em: 27 dez. 2025.
- EMBRAPA. **Mimosa caesalpinhiifolia: Sabiá**. - Portal Embrapa. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1103458/mimosa-caesalpinhiifolia-sabia>. Acesso em: 27 dez. 2025.
- FERNANDES, E.; CUNHA, R. Review of Water Reuse from a Circular Economy Perspective. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 848, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/5/848>. Acesso em: 17 maio 2025.
- HAO, S. *et al.* A Review on Plant Responses to Salt Stress and Their Mechanisms of Salt Resistance. **Horticulturae**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 132, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/7/6/132>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- JIANG, W. *et al.* A Critical Review of Analytical Methods for Comprehensive Characterization of Produced Water. **Water**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 183, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/2/183>. Acesso em: 3 nov. 2025.

JUSTINO, S. T. *et al.* Spatial-temporal analysis of vegetation cover and soil degradation from Landsat time-series – A case study in the Caatinga, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 160, p. 105528, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981125001907>. Acesso em: 13 nov. 2025.

LUCAS, L. E. F. **Utilização de água produzida do petróleo sintética no cultivo de mudas de plantas nativas da Caatinga**. 2024. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/be7ad242-475e-42e4-bcdd-83074fa48bdc>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MAMMADOVA, N. I. Environmental Impacts of Chemical Composition Produced Water. **Herald of Azerbaijan Engineering Academy**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 67–74, 2024. Disponível em: <https://journal.ama.com.az/index.php/pub/article/view/133>. Acesso em: 3 nov. 2025.

PAREYN, F. G. C.; ARAUJO, E. L.; DRUMOND, M. A. **Mimosa caesalpiniiifolia: Sabiá. - Portal Embrapa**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1103458/mimosa-caesalpiniiifolia-sabia>. Acesso em: 26 nov. 2025.

RAJBONGSHI, A.; GOGOI, S. B. A review on oilfield produced water and its treatment technologies. **Petroleum Research**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 640–656, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096249524000541>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ROCHA, R. D. D. L. *et al.* AGRICULTURA SUSTENTÁVEL COM REÚSO DE EFLUENTES TRATADOS: BENEFÍCIOS NUTRICIONAIS, REGULAMENTAÇÃO E RISCOS À SAÚDE. **Revista DCS**, [s. l.], v. 22, n. 85, p. e3858, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadcs.com/index.php/revista/article/view/3858>. Acesso em: 27 dez. 2025.

SILVA, J. F. C. B. da C. *et al.* Analysis of the response of the Epitácio Pessoa reservoir (Brazilian semiarid region) to potential future drought, water transfer and LULC scenarios. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 1347–1371, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04736-3>. Acesso em: 12 abr. 2025.