

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

José Antônio Dos Santos Rabelo

**Dinâmica do carbono e atributos químicos do solo na
recuperação e produção de pastagem de *Urochloa*
decumbens com aplicação de polihalita**

Dracena

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA

**Dinâmica do carbono e atributos químicos do solo na
recuperação e produção de pastagem de *Urochloa*
decumbens com aplicação de polihalita**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Ciências Agrárias e
Tecnológicas – Unesp, Câmpus de Dracena
como parte das exigências para conclusão do
curso.

Orientador: Prof. Dr. Reges Heinrichs
Coorientadores: Me. Flaviane Wanessa Lopes Fernandes
Dr. Maurício Bruno Prado da Silva

Dracena
2026

Certificado de aprovação.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Dinâmica do carbono e atributos químicos do solo na
recuperação e produção de pastagem de *Urochloa*
decumbens com aplicação de
polihalita, de

Modalidade: Trabalho de ... **Atividades de pesquisa;**

Autor: José Antônio Dos Santos Rabelo

Orientador (a): Reges Heinrichs

Co-orientador(es): Flaviane Wanessa Lopes Fernandes e Maurício Bruno Prado da
Silva

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 22/05/2026

Reges Heinrichs

Vitor Corrêade Mattos Barreto

Gabriela da Silva Freitas

DEDICATÓRIA

Aos meus dois avôs José Assorino Dos Santos e Antônio Rabelo Sobrinho que infelizmente faleceram antes de ver essa conquista, duas pessoas que marcaram minha vida sendo exemplos de pessoas que foram fundamentais para a minha vida pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao GENAP (Grupo de Experimentação em Nutrição e Adubação de Plantas) pelos ensinamentos, pela convivência e pela troca de experiências que muito contribuíram para minha formação acadêmica. Participar do grupo de estudos foi fundamental para ampliar meus conhecimentos, desenvolver meu pensamento crítico. Levo comigo não apenas o aprendizado técnico, mas também o companheirismo, o incentivo e as experiências compartilhadas ao longo dessa trajetória.

À minha família que lutou por mim desde o começo, me incentivando a ser uma pessoa melhor, me aconselhando a tomar as melhores decisões possíveis para ser um ser humano decente ter orgulho em carregar no coração as lições passadas pelos meus pais, ao amor incondicional prestado a mim, pelos meus pais, irmã, tias, primas e avôs.

Agradeço a minha namorada que esteve do meu lado me apoiando mesmo quando eu não conseguia fazer o mesmo, aquela que me incentiva a fazer o melhor pensado no futuro de maneira leve e promissora, não tenho palavras para agradecer a esse amor dado a mim.

Aos amigos e companheiros que estiveram ao meu lado em momentos difíceis, que me ajudaram a suportar os pesares dessa caminhada, mas sem essa luta não teria a possibilidade de conhecê-los tão bem e os considerar verdadeiros, reconheço meus muitos erros, mas não possuo o erro de não enxergar a presença de todos à minha volta que queriam meu bem.

Aos meus veteranos que não tinham nenhuma obrigação de me dar suporte, mas o fizeram sem pedir nada em troca, mostrando suas vivências e apontando meus erros, ajudando em escolhas difíceis, e mostrando que mesmo nas situações mais caóticas existem várias soluções que podem ser tomadas.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

As pastagens degradadas representam um desafio para a pecuária brasileira, pois reduzem a produtividade da forrageira, comprometem a qualidade do solo e limitam a dinâmica do carbono no sistema. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adubação com polihalita na recuperação de uma pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, considerando a produção de forragem, o desenvolvimento radicular, a nutrição mineral e a dinâmica do carbono no solo. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições e sete tratamentos, envolvendo controle, adubação com nitrogênio (N) + fosforo (P) + calagem, doses de óxido de potássio (K_2O) via polihalita e tratamento comparativo com K_2O via cloreto de potássio. Foram avaliadas a produção de massa seca da parte aérea, altura de plantas, massa seca de raízes, carbono total do solo, razão isotópica do carbono ($\delta^{13}C$) e teores foliares de macro e micro nutrientes. A produção de massa seca foi favorecida principalmente pela polihalita parcelada associada a N, P e calagem, enquanto a aplicação isolada de polihalita não foi suficiente para promover maior recuperação da pastagem. Os tratamentos com manejo completo de adubação também favoreceram o desenvolvimento radicular e a nutrição da forrageira. O $\delta^{13}C$ evidenciou diferenças na origem relativa do carbono ao longo do perfil do solo. Conclui-se que a polihalita apresenta potencial para a recuperação de pastagens degradadas quando associada à calagem e ao fornecimento de N e P.

Palavras-chave: *Urochloa decumbens*. Polihalita. Carbono do solo. Fertilidade do solo. Pastagem degradada.

ABSTRACT

Degraded pastures represent a major challenge for Brazilian livestock production, as they reduce forage productivity, impair soil quality, and limit carbon dynamics within the system. The objective of this study was to evaluate the effect of polyhalite fertilization on the recovery of a degraded pasture of *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, considering forage production, root development, mineral nutrition, and soil carbon dynamics. The experiment was conducted using a randomized complete block design with four replications and seven treatments, including a control, fertilization with nitrogen (N) + phosphorus (P) + liming, potassium oxide (K₂O) rates supplied via polyhalite, and a comparative treatment with K₂O supplied via potassium chloride. The evaluated variables included shoot dry matter yield, plant height, root dry matter, total soil carbon, carbon isotopic ratio ($\delta^{13}\text{C}$), and leaf concentrations of macro- and micronutrients. Dry matter production was mainly enhanced by split polyhalite applications combined with N, P, and liming, whereas the isolated application of polyhalite was not sufficient to promote greater pasture recovery. Treatments receiving complete fertilization management also favored root development and forage nutrition. The $\delta^{13}\text{C}$ values revealed differences in the relative origin of carbon throughout the soil profile. It can be concluded that polyhalite has potential for the recovery of degraded pastures when associated with liming and the supply of N and P.

Keywords: *Urochloa decumbens*. Polyhalite. Soil carbon. Soil fertility. Degraded pasture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demarcação das parcelas experimentais e condução dos tratamentos de adubação	20
Figura 2 - Temperaturas médias e precipitações no decorrer do experimento ano agrícola 2025/2026.....	21
Figura 3 - Amostragem da forragem para determinação da massa seca da parte aérea	22
Figura 4 - Preparo de as amostras da parte aérea, após serem digeridas para determinação dos teores de nutrientes.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de massa seca da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk submetida a diferentes tratamentos de adubação25

Tabela 2 – Altura média de plantas de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk em função dos tratamentos de adubação27

Tabela 3 – Massa seca de raízes de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk em diferentes profundidades do solo sob tratamentos de adubação29

Tabela 4 – Carbono total do solo em diferentes profundidades sob tratamentos de adubação em pastagem de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk31

Tabela 5 – Razão isotópica do carbono do solo ($\delta^{13}\text{C}$) em diferentes profundidades sob tratamentos de adubação em pastagem de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk
.....32

Tabela 6 – Teores de macronutrientes da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob tratamentos de adubação35

Tabela 7 – Teores de micronutrientes da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob tratamentos de adubação38

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	10
2OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Específico	13
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 Degradação de pastagens e necessidade de recuperação	14
3.2 Adubação como estratégia de recuperação de pastagens de Urochloa decumbens cv. Basilisk	15
3.3 Polihalita como fonte de múltiplos nutrientes	17
3.4 Carbono do solo, raízes e uso do $\delta^{13}\text{C}$ em pastagens	18
4MATERIAL E METODOS	20
5RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
6CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as pastagens são formadas principalmente por plantas da família das Poaceae, destacando-se a *Urochloa decumbens*, explorada de forma extrativista, muitas vezes estabelecida em solos de baixa fertilidade e manejo inadequado para a espécie, com sobrepastejo e sem adubação (Heinrichs; Soares Filho, 2014). A espécie *Urochloa decumbens* cv. Basilisk possui ampla utilização nos sistemas pecuários brasileiros devido à sua elevada capacidade de produção de forragem, adaptação a solos de baixa fertilidade e boa persistência sob condições tropicais. A forragem produzida por essa gramínea constitui a principal fonte de nutrientes para os rebanhos mantidos a pasto, contribuindo diretamente para o desempenho animal e para a viabilidade econômica dos sistemas de produção. Dessa forma, a manutenção da produtividade e da qualidade dessas pastagens é fundamental para a sustentabilidade da pecuária nacional.

A falta de reposição de nutrientes inicia rapidamente processos de esgotamento e degradação, caracterizando um ciclo vicioso de baixa produtividade e necessidade periódica de reforma de pastagens (Dias-Filho, 2014). Além de sua importância para a alimentação animal, as pastagens também exercem funções ecológicas relevantes, como a proteção do solo e o sequestro de carbono (Almeida *et al.*, 2025). Nesse contexto, a recuperação de pastagens degradadas assume importância fundamental e atende os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, como importância produtiva, ambiental e social, além de dialogar diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas. O tema se relaciona principalmente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, (ODS) 15 da ONU, que propõe, até 2030, combater a desertificação, restaurar terras e solos degradados e buscar a neutralidade da degradação da terra. De forma complementar, o estudo também se aproxima do ODS 2, voltado à adoção de sistemas sustentáveis de produção de alimentos e de práticas agrícolas resilientes que contribuam para manter os ecossistemas e melhorar progressivamente a qualidade do solo e da terra.

De acordo com Dias-Filho (2017), a degradação trata-se de um fenômeno multifatorial, frequentemente associado ao manejo inadequado, envolvendo alterações químicas, físicas e biológicas do solo, com reflexos sobre a produtividade

da forrageira e a qualidade do solo. Nessas condições, a recuperação da área exige intervenção técnica planejada, com diagnóstico correto do nível de degradação e adoção de práticas compatíveis com a realidade do sistema produtivo.

Em condições tropicais, *Urochloa decumbens* cv. Basilisk mantém grande importância agronômica, ressaltam a relevância na produção de biomassa (Paciullo *et al.*, 2016), reconhecida pela sua alta capacidade de estabelecimento em solos intemperados, de baixa a média fertilidade (Frontado *et al.*, 2025). Entretanto, essa rusticidade não elimina a necessidade de manejo adequado da fertilidade. Em sistemas conduzidos de forma extrativista, sem reposição compatível com a exportação de nutrientes, a pastagem tende a perder vigor, reduzir a rebrota e apresentar menor produtividade, favorecendo a instalação e o avanço da degradação.

Além da resposta produtiva da forrageira, a avaliação da dinâmica do carbono no solo é fundamental para compreender os efeitos do manejo sobre a qualidade do sistema em recuperação. Balesdent, Mariotti e Guillet (1987) demonstraram que a abundância natural de ^{13}C pode ser utilizada como traçador em estudos de dinâmica da matéria orgânica do solo. Posteriormente, Bernoux *et al.* (1998) reforçaram a utilidade dos isótopos estáveis de carbono para estimar a renovação da matéria orgânica e interpretar a contribuição relativa de vegetações com diferentes rotas fotossintéticas para o carbono orgânico do solo. Em áreas de pastagem, essa abordagem é especialmente útil para compreender como o manejo e a recuperação da forrageira influenciam o comportamento do carbono no perfil do solo.

Ao analisarem a adubação de pastos, Cabral *et al.* (2021) destacam que a adubação nitrogenada está entre as estratégias mais estudadas para elevar a produção de forragem, em razão de seus efeitos sobre a emissão de folhas, o perfilhamento e o acúmulo de biomassa. No entanto, o aumento do suprimento de N leva a uma maior extração de K, uma vez que o nitrogênio estimula o crescimento da planta, aumentando a produção de folhas, perfilhos e biomassa, o que eleva a demanda por potássio para a manutenção dos processos fisiológicos e metabólicos. Dessa forma, o uso de fertilizantes potássicos na recuperação das pastagens se faz necessário para manter o aumento da produção frente à adubação nitrogenada (Avelino Cabral *et al.*, 2021). Esse raciocínio é particularmente relevante em áreas degradadas, nas quais a recuperação da forrageira depende não apenas do

fornecimento isolado de um nutriente, mas do restabelecimento mais equilibrado da fertilidade do solo.

Entre as alternativas de manejo nutricional para recuperação de pastagens degradadas, destaca-se a polihalita, fertilizante multinutriente que fornece potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Seu interesse agrônômico está relacionado ao fornecimento conjunto desses nutrientes, potencialmente relevantes para o restabelecimento da fertilidade do solo e para a recuperação da produtividade da forrageira. Em pastagens de *Urochloa decumbens*, esse tema tem ganhado atenção recente, sobretudo em estudos voltados à recuperação de áreas degradadas.

A hipótese do trabalho é que a aplicação de polihalita, quando associada ao manejo adequado da fertilidade do solo, favorece a recuperação da pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, contribuindo para o aumento da produção de forragem, melhora desenvolvimento radicular e alterações na dinâmica do carbono no solo. Assim, o uso da polihalita pode representar uma alternativa complementar em programas de recuperação de pastagens, desde que associada à correção da acidez e ao fornecimento de nutrientes limitantes, como nitrogênio e fósforo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da adubação com polihalita na recuperação de uma pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, com ênfase na produção de forragem, desenvolvimento radicular, nutrição mineral e dinâmica do carbono no solo.

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a produção de massa seca da forragem em resposta à aplicação de polihalita;
- Determinar a razão isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) no solo em diferentes profundidades;
- Determinar os teores de macro e micro nutrientes na parte aérea da forrageira;
- Avaliar a eficiência dos diferentes manejos de adubação com polihalita na recuperação da pastagem degradada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Degradação de pastagens e necessidade de recuperação

O uso de pastagens ocupa posição central na produção agropecuária brasileira. Segundo dados mais recentes do MapBiomas (2024) o Brasil possuía cerca de 155 milhões de hectares de pastagens, correspondendo a aproximadamente 18% do território nacional. Nesse mesmo levantamento, a condição de vigor das pastagens foi classificada em 21,6% de baixo vigor (33,4 Mha), 43,0% de médio vigor (66,6 Mha) e 35,4% de alto vigor (54,8 Mha), evidenciando que parcela expressiva dessas áreas apresenta limitações produtivas e demanda atenção quanto ao manejo e à recuperação. Esses números mostram que a degradação de pastagens não é um problema pontual, mas um entrave estrutural à eficiência dos sistemas pecuários e à conservação do solo. Segundo a Embrapa (2024), pastagem degradada é a “condição resultante do processo de degradação em que a pastagem perde sua capacidade de regeneração natural em função do baixo vigor das plantas forrageiras e/ou da infestação elevada por plantas invasoras”, sendo esse processo associado a fatores como manejo inadequado das plantas e do solo, condições climáticas, superpastejo, ocorrência de pragas e doenças.

Ao tratar da recuperação, Dias-Filho (2017) e Cordeiro *et al.* (2022) destacam que o diagnóstico do nível de degradação é decisivo para a escolha da estratégia de intervenção, variando desde uma manutenção, a degradação da pastagem e como pior a degradação do solo. Em áreas com degradação leve a moderada, a recuperação da mesma espécie forrageira pode ser viável com correção da fertilidade, ajuste da taxa de lotação e eliminação de espécies invasoras. Já em níveis mais severos, frequentemente são necessárias intervenções mais profundas, com reforma da pastagem ou reestruturação do sistema produtivo.

3.2 Adubação como estratégia de recuperação de pastagens de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk

Entre as forrageiras tropicais, *Urochloa decumbens* cv. Basilisk destaca-se pela ampla adaptação a condições de clima tropical, boa persistência e tolerância relativa a solos ácidos e de baixa fertilidade, atingindo grande relevância no sistema forrageiro do Brasil (Paciullo *et al.*, 2016). Mais recentemente, ao avaliarem genótipos de *Brachiaria decumbens*, incluíram a cultivar Basilisk e demonstraram que ela responde a melhorias nutricionais, especialmente ao fósforo, tanto em características produtivas quanto morfogênicas (Frontado *et al.*, 2025).

Apesar da rusticidade, a espécie não deve ser interpretada como indiferente ao manejo da fertilidade. Idalgo e Piza (2024), observaram incremento de massa fresca, massa seca e altura de plantas com o aumento das doses de nitrogênio, com destaque para a dose de 160 kg ha⁻¹ de N. Esses resultados reforçam que a persistência da forrageira em ambientes restritivos não elimina sua capacidade de responder ao manejo nutricional, sobretudo em áreas antigas ou empobrecidas.

Segundo Taiz *et al.* (2017), o potássio atua na regulação do potencial osmótico celular e no controle da abertura e fechamento dos estômatos, influenciando diretamente a eficiência fotossintética e o uso da água pelas plantas. Revisões recentes destacam que o K exerce papel central na fotossíntese, no crescimento e na tolerância das plantas a estresses ambientais. Em pastagens, esse nutriente ganha ainda mais relevância porque sistemas adubados com nitrogênio tendem a aumentar a demanda por potássio, o que pode limitar a resposta produtiva quando o K não é repostado adequadamente.

Em *Brachiaria decumbens*, Mattos, Monteiro e Dechen (2001) estudaram a distribuição e a eficiência de uso de potássio em cultivo hidropônico e verificaram que o nutriente foi majoritariamente acumulado nas lâminas foliares recém-expandidas, com elevada absorção do K fornecido em solução nutritiva. Esse trabalho é importante porque mostra, de forma direta, que *B. decumbens* apresenta resposta fisiológica clara ao suprimento de potássio, o que justifica a atenção dada a esse nutriente em estratégias de recuperação de pastagens.

O magnésio, por sua vez, é o elemento central da molécula de clorofila e participa da ativação de numerosas enzimas, além de atuar no transporte de

fotoassimilados e no metabolismo energético. A deficiência de Mg compromete a fotossíntese, a produção de carboidratos e o desempenho fisiológico das plantas (Cakmak; Yazici, 2010). Em gramíneas forrageiras, esse nutriente merece atenção por estar diretamente ligado à produção de biomassa e ao funcionamento metabólico da planta.

Já o enxofre é um macronutriente essencial por participar da composição de aminoácidos como cisteína e metionina, de enzimas, coenzimas e compostos antioxidantes, além de contribuir para a síntese proteica e para mecanismos de defesa vegetal (Malavolta, 2006). A nutrição sulfatada influencia o crescimento, o desenvolvimento e a resiliência das plantas. Para pastagens, isso é especialmente importante porque a resposta ao N tende a ser mais eficiente quando o suprimento de S é adequado.

No caso específico de *Brachiaria decumbens*, Santos e Monteiro (1999) avaliaram a produção e o perfilhamento da espécie em função de doses de enxofre, mostrando que o nutriente interfere no desempenho da forrageira. Posteriormente, Oliveira *et al.* (2010) estudaram o valor nutritivo do capim-braquiária no primeiro ano de recuperação com aplicações de nitrogênio e enxofre, reforçando a importância dessa interação para a recuperação da espécie em pastagens degradadas. Embora grande parte dos estudos específicos com *Urochloa decumbens* tenha se concentrado em N, P, K e S, a presença simultânea de Ca e Mg em fontes multinutrientes amplia o interesse agrônomo do tema, principalmente em sistemas de baixa fertilidade e em áreas em recuperação.

Mais recentemente, Cabral *et al.* (2021) ressaltaram que a adubação de pastos gera impactos técnicos e econômicos relevantes, especialmente em gramíneas tropicais, e destacaram que a adubação nitrogenada aumenta a produção de forragem, mas também eleva a extração de outros nutrientes, como o potássio.

3.4 Polihalita como fonte de múltiplos nutrientes

A polihalita vem sendo estudada como fertilizante multinutriente capaz de fornecer, em uma única fonte, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Yermiyahu *et al.* (2017) descrevem esse mineral natural como um sulfato hidratado de fórmula $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ e ressaltam seu potencial agrônomo como fonte combinada de nutrientes. Entre as principais vantagens agrônômicas da polihalita, a literatura destaca o fornecimento simultâneo de múltiplos macronutrientes, a liberação mais gradual em comparação com fontes altamente solúveis e a possibilidade de uso em sistemas sensíveis à presença de cloreto. Yermiyahu *et al.* (2017) descrevem a fonte como alternativa promissora para o suprimento combinado de nutrientes, enquanto Singh, Shekhawat e Singh (2023) relatam desempenho positivo da polihalita em sistema milho-trigo, reforçando seu potencial como fertilizante de efeito residual mais prolongado.

Do ponto de vista nutricional, a relevância da polihalita para pastagens está associada ao papel dos nutrientes que a compõem. O potássio participa de processos relacionados à ativação enzimática, regulação osmótica e transporte de assimilados; o enxofre está ligado à formação de aminoácidos, enzimas e mecanismos de defesa; o cálcio atua em funções estruturais e fisiológicas; e o magnésio é elemento central da clorofila e da fotossíntese. Na revisão de Almeida (2025), esses pontos são usados para sustentar a hipótese de que uma fonte capaz de fornecer quatro dos principais macronutrientes pode representar alternativa relevante em estratégias de recuperação de áreas degradadas. Assim, mais do que uma simples fonte potássica, a polihalita deve ser compreendida como insumo de caráter multinutriente, com potencial para atuar na reconstrução da fertilidade do solo.

Apesar dessas características favoráveis, os estudos com polihalita ainda se concentram majoritariamente em culturas anuais. Almeida (2025) observa, em sua revisão, que os trabalhos disponíveis se concentram sobretudo em culturas como cevada, milho, cana-de-açúcar, mostarda e trigo, indicando que o uso da polihalita em pastagens ainda é relativamente pouco explorado. Essa observação é importante para o presente trabalho, pois permite posicionar a pesquisa não como repetição direta da dissertação anterior, mas como continuidade de uma linha ainda

recente, na qual o uso da polihalita em *Urochloa decumbens* permanece como tema de interesse científico e agrônômico.

3.4 Carbono do solo, raízes e uso do $\delta^{13}\text{C}$ em pastagens

O carbono do solo é um dos principais indicadores da qualidade de sistemas sob recuperação. O carbono orgânico do solo desempenha papel fundamental na manutenção da fertilidade e da qualidade do solo, pois está relacionado à ciclagem de nutrientes, à estabilidade dos agregados, à retenção de água e à atividade biológica. Em pastagens, o acúmulo de carbono é frequentemente utilizado como indicador da sustentabilidade do sistema, uma vez que reflete o equilíbrio entre a entrada de resíduos vegetais, especialmente provenientes da biomassa radicular, e as perdas decorrentes da decomposição da matéria orgânica. Dessa forma, práticas que favorecem o crescimento das forrageiras e das raízes tendem a aumentar os estoques de carbono no solo, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas. Balesdent, Mariotti e Guillet (1987) demonstraram que a abundância natural de ^{13}C pode ser utilizada como traçador da dinâmica da matéria orgânica do solo. Em sequência, Bernoux *et al.* (1998) mostraram que alterações nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ permitem estimar a renovação da matéria orgânica e distinguir a contribuição relativa de vegetações com diferentes rotas fotossintéticas, o que é especialmente útil em áreas convertidas de vegetação nativa C_3 para pastagens C_4 . Essas obras clássicas continuam sendo a base conceitual para estudos isotópicos em solos de pastagens.

No Brasil, Costa Junior *et al.* (2011) avaliaram carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no Cerrado e mostraram que mudanças de uso da terra alteram o carbono do solo e sua assinatura isotópica. Essa contribuição é importante para o seu estudo porque indica que o $\delta^{13}\text{C}$ não é apenas uma medida complementar, mas uma ferramenta robusta para interpretar a origem do carbono e a dinâmica da matéria orgânica em sistemas pastoris tropicais.

Além disso, o sistema radicular tem papel decisivo nesse processo. Dos Anjos *et al.* (2024), ao estudarem o acúmulo de carbono e nitrogênio em raízes de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk em monocultivo e consórcio, mostraram que a biomassa radicular pode representar um componente relevante do sequestro de

carbono no sistema. Em Coutinho *et al.* (2025) aprofundaram essa discussão ao demonstrarem, em *Urochloa decumbens*, que a decomposição radicular sob diferentes doses de nitrogênio ou em consórcio com leguminosa contribui diretamente para a entrada de carbono e nutrientes no solo. Assim, a avaliação conjunta de produção da forrageira, raízes e $\delta^{13}\text{C}$ é coerente com uma abordagem que pretende compreender não apenas a recuperação produtiva da pastagem, mas também seus efeitos sobre o solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado a campo na área experimental nova da Unesp de Dracena. O solo da área é caracterizado com textura média-arenosa e classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. A área está ocupada com pastagem de *Urochloa decumbens*, implantada há aproximadamente 20 anos, com aproximadamente 10 plantas por m², com baixo potencial de crescimento e recomposição. Para iniciar o experimento, com a demarcação das parcelas e aplicação dos tratamentos, a área foi rebaixada com corte homogêneo, com altura de resíduo de 10 cm.

Figura 1 – Demarcação das parcelas experimentais e condução dos tratamentos de adubação.



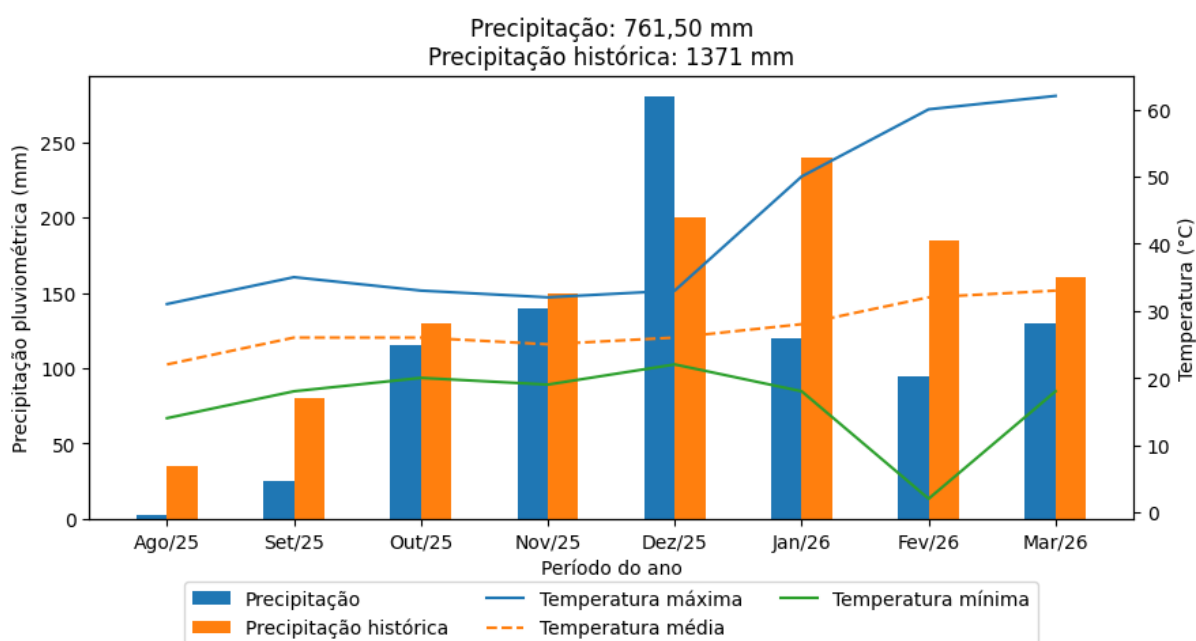
Fonte: Elaborado pelo autor

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por: T1: Controle (sem adubação), T2: N+P+calcário, T3: Trat 2 + 30 kg/ha K₂O via polihalita, T4: Trat 2 + 60 kg/ha K₂O via polihalita, T5: Trat 2 + 60 (30+30) kg/ha K₂O via polihalita, T6: 60 kg/ha K₂O via

polihalita e T7 Trat;2+ 60 kg/ha de K_2O via cloreto de potássio, todos aplicados a lanço. A dose de calcário calculada foi para atingir a saturação por base para 50%. A dose de N e P_2O_5 foi de, respectivamente, 75 e 60 kg ha^{-1} . O N foi aplicado em três doses iguais, nos primeiros cortes, enquanto o P_2O_5 foi aplicado totalmente no início do período das águas. As parcelas foram formadas por 12 m^2 (4 m x 3 m), descartando-se 0,5 m das bordaduras para formar a área útil para as avaliações conforme a figura 1. Os tratamentos foram aplicados em superfície, a lanço, de forma homogênea em toda parcela.

Durante a realização da pesquisa foram coletados os registros meteorológicos, aproximadamente, a 300 m da área experimental (Figura 2).

Figura 2 - Temperaturas médias e precipitações no decorrer do experimento ano agrícola 2025/2026



Fonte: Elaborado pelo autor

O experimento iniciou em dezembro de 2025, com a aplicação dos tratamentos exceto a calagem, que foi realizada conforme a necessidade, mediante análise de

solo, que é realizada anualmente no final de cada ano agrícola (junho). As avaliações do presente projeto foram referentes ao segundo ano agrícola da pesquisa (2025/2026).

Produção de massa seca da parte aérea

Foi analisada a massa seca total da forragem por meio do uso de um retângulo de ferro com 0,5 m² (1 m x 0,5 m), sendo retirada uma amostra por unidade experimental evidenciado na figura 3. Os amostradores foram posicionados em pontos em ponto aleatório e representativos de cada parcela e a forragem contida no interior do retângulo foi cortada a 15 cm de altura do solo e foi obtida a massa verde de forragem. Para a avaliação da massa seca a cada corte foi retirada uma subamostra da forragem, a qual foi pesada imediatamente e seca em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até peso constante, conforme descrição de Silva e Queiroz (2002) . A partir desses valores foi calculada a massa seca produzida por hectare.

Figura 3 – Amostragem da forragem para determinação da massa seca da parte aérea.



Fonte: Elaborado pelo autor

Determinação da razão isotópica do carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$)

A calibração do equipamento espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS) foi realizada com padrões internacionais certificados, e a precisão analítica foi mantida dentro de $\pm 0,2\%$. As análises foram conduzidas em laboratório especializado com rastreabilidade metrológica e controle de qualidade interno baseado em amostras de referência e replicatas analíticas.

Foi realizada a coleta de amostras de solo nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. A razão isotópica de carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) foi determinada por espectrometria de massas de razão isotópica (IRMS), acoplada a um analisador elementar (EA), o qual promoveu a combustão completa das amostras sob atmosfera de oxigênio, convertendo o carbono orgânico em CO_2 . O gás foi separado cromatograficamente e injetado no espectrômetro de massas para quantificação da razão isotópica.

Equação utilizada para o cálculo da razão isotópica do carbono do solo ($\delta^{13}\text{C}$), expressa em partes por mil (‰), a partir da relação entre os isótopos $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra e do padrão internacional. (Balesdent, Mariotti e Guillet (1987) e Bernoux *et al.* (1998).

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left(\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{amostra}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000$$

A análise isotópica do carbono-13 foi empregada com o objetivo de identificar a contribuição relativa de resíduos vegetais de diferentes origens fotossintéticas (C_3 e C_4) na matéria orgânica do solo, conforme descrito por Balesdent *et al.* (1987) e Bernoux *et al.* (1998).

Sistema Radicular

Foi avaliada a massa seca de raízes no final do segundo ano agrícola. A profundidade de amostragem foi de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, por meio da coleta do solo + raízes com trado holandês. Após, as raízes foram lavadas sobre

uma peneira para remoção do solo e, em seguida, secas a 65°C. Com os dados foi calculada a massa de raízes para expressar os valores, de cada camada, em g dm⁻³.

Teores de macro e micro nutrientes da parte aérea da forrageira

A massa seca da forragem foi moída em moinho tipo Wiley com peneira de 1 mm e o teor de N total foi determinado pela digestão sulfúrica seguido por destilação pelo Método semi-micro Kjeldahl. As concentrações dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Zn, Fe, Mn e Cu) foram determinadas de acordo com Malavolta (1997). O acúmulo de nutrientes na forragem foi calculado multiplicando a concentração pela quantidade de massa seca produzida.

Figura 4– Preparo das amostras da parte aérea, após serem digeridas para determinação dos teores de nutrientes.



Fonte: Elaborado pelo autor

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando constatada significância, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade usando o programa R.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, observa-se que a produção de massa seca da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk apresentou diferença significativa entre os tratamentos nos três cortes avaliados.

Tabela 1 – Produção de massa seca mensal da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk submetida a diferentes tratamentos de adubação

Tratamentos	1º corte	2º corte	3º corte
Kg ha ⁻¹			
T1	1231,50 ab	957,50 cd	1071,00 c
T2	1242,00 ab	1116,50 bc	2091,25 b
T3	1501,67 a	1447,00 a	2039,00 b
T4	973,25 b	1131,75 bc	1991,25 b
T5	1618,50 a	1573,00 a	2871,00 a
T6	1027,00 b	735,17 d	2193,33 b
T7	1334,67 ab	1337,75 ab	2425,50 ab
Média	1275,51	1185,52	2097,48
Pr > Fc	0,0020	<0,001	<0,001
CV (%)	15,50	11,01	12,74

Valores expressos em kg ha⁻¹ de massa seca da parte aérea. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

No primeiro corte, os maiores valores foram observados nos tratamentos T5 e T3 respectivamente, O T7 apresentou valor intermediário, não diferindo estatisticamente dos tratamentos superiores nem de T1 e T2. Já os menores valores

foram observados em T4 e T6. Esse resultado indica que, no início das avaliações, a resposta produtiva foi maior nos tratamentos com manejo completo associado à polihalita, especialmente quando aplicada de forma parcelada ou em menor dose.

No segundo corte, os tratamentos T5 e T3 novamente apresentaram os maiores valores de massa seca. O T7, ficou em posição intermediária, enquanto o menor valor foi observado em T6. Esse comportamento reforça que a polihalita isolada não foi suficiente para sustentar maior produção de forragem, mesmo fornecendo K, Ca, Mg e S. A ausência de N, P e calagem nesse tratamento limitou o crescimento da forrageira, pois a recuperação produtiva de pastagens degradadas depende do equilíbrio entre correção da acidez e fornecimento de nutrientes essenciais.

No terceiro corte, houve maior separação entre os tratamentos, com destaque para T5 novamente. O T7 permaneceu em grupo intermediário, enquanto T2, T3, T4 e T6 ficaram no mesmo grupo estatístico. O menor valor foi observado no controle.

A superioridade de T5 reforça que a polihalita apresentou melhor resposta quando associada a N + P + calagem. Esse resultado é coerente com Almeida *et al.* (2025), que avaliaram a recuperação de pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk com aplicação de polihalita e observaram que a recuperação foi mais eficiente quando a fonte foi associada à calagem e a adubação com N e P, enquanto a polihalita isolada não foi suficiente para restaurar a produtividade da forrageira.

A resposta produtiva observada também está relacionada à importância do nitrogênio no crescimento de gramíneas tropicais. Idalgo, Piza e David (2024), trabalhando com *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, verificaram que a adubação nitrogenada favoreceu a produtividade da forrageira.

Além do nitrogênio, o fornecimento equilibrado de nutrientes é determinante para recuperação de pastagens degradadas. Ribeiro *et al.* (2024), em estudo com *Urochloa decumbens* em área degradada, observaram que a associação entre fertilização mineral e condicionadores do solo aumentou a produção de matéria seca em relação ao controle, reforçando que a melhoria do ambiente nutricional é essencial para elevar a produtividade da forrageira em sistemas degradados.

Tabela 2 Altura média de plantas de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk em função dos tratamentos de adubação medidas mensalmente.

Tratamentos	1º corte	2º corte	3º corte
	cm		
T1	36,90 b	39,35 c	53,85 bc
T2	36,55 b	42,95 bc	65,10 ac
T3	38,50 b	44,50 ac	64,55 ac
T4	36,10 b	44,40 ac	69,85 a
T5	38,85 b	45,45 ab	64,05 ac
T6	38,05 b	39,05 c	52,60 c
T7	47,40 a	49,40 a	66,10 ab
CV (%)	9,30	5,49	8,94
Média	38,91	43,59	62,30
Pr > Fc	0,0053	<0,001	0,0023

Valores expressos em centímetros (cm). Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

No primeiro corte, o tratamento T7 apresentou a maior altura média das plantas, diferindo dos demais tratamentos. Esse resultado indica resposta inicial mais expressiva da forrageira à adubação completa associada ao cloreto de potássio, fonte potássica convencional de alta solubilidade. A resposta inicial mais rápida do T7 está relacionada à maior disponibilidade imediata de K no solo, favorecendo o crescimento vegetativo no período inicial de rebrota. Essa interpretação é coerente com a função do potássio na regulação osmótica, ativação enzimática, transporte de assimilados e manutenção do crescimento vegetal. Além

disso, a literatura indica que a polihalita apresenta menor solubilidade em relação ao KCl, podendo liberar nutrientes de forma mais gradual ao longo do tempo (Yermiyahu *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2025).

No segundo corte, o tratamento T7 novamente apresentou maior altura média, sendo estatisticamente superior ou semelhante aos tratamentos T5, T3 e T4. Esse comportamento reforça que a adubação completa associada ao KCl favoreceu resposta inicial da *Urochloa decumbens* cv. Basilisk. A resposta da cultivar ao manejo nutricional também foi observada por Idalgo, Piza e David (2024), que verificaram incremento produtivo e de altura de plantas em *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob adubação nitrogenada. Dessa forma, os resultados indicam que a altura da forrageira foi favorecida principalmente quando houve fornecimento conjunto de nutrientes, especialmente N, P, K e correção da acidez do solo.

No terceiro corte, houve aumento geral na altura das plantas em relação aos cortes anteriores, com maior valor observado no tratamento T4, seguido por T7 e pelos tratamentos T2, T3 e T5, que apresentaram valores superiores a 64 cm. O melhor desempenho do T4 sugere que a polihalita apresentou resposta mais expressiva após maior tempo de interação com o solo e com o sistema radicular da forrageira.

O menor desempenho observado em T6, próximo ao controle, indica que a aplicação isolada de polihalita não foi suficiente para promover maior crescimento em altura da forrageira. Esse resultado reforça que, embora a polihalita forneça K, Ca, Mg e S, sua eficiência na recuperação da pastagem depende da associação com outros nutrientes limitantes, principalmente N e P. Em estudo semelhante, Almeida *et al.* (2025) também verificaram que a aplicação isolada de polihalita não foi suficiente para maximizar a recuperação da pastagem, enquanto o manejo com N + P + calagem + 60 kg ha⁻¹ de K₂O via polihalita apresentou melhor desempenho.

Assim, o desempenho superior do T7 nos dois primeiros cortes pode ser atribuído à maior disponibilidade inicial do potássio fornecido via KCl, enquanto a resposta superior do T4 no terceiro corte sugere efeito mais gradual da polihalita quando associada à adubação completa. Esse comportamento evidencia que a fonte potássica convencional pode favorecer resposta inicial mais rápida, ao passo que a polihalita tende a apresentar maior potencial quando integrada a um programa de

correção e adubação equilibrado, especialmente em pastagens degradadas de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk.

Tabela 3 – Massa seca radicular de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk em diferentes profundidades do solo sob tratamentos de adubação.

Tratamentos	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
T1	22,04 a	4,17 b	3,23 a	0,76 b
T2	11,02 b	5,07 b	3,92 a	0,77 b
T3	14,29 b	4,70 b	2,81 a	1,74 a
T4	17,46 a	7,79 a	2,81 a	1,65 a
T5	16,80 a	8,64 a	3,43 a	1,96 a
T6	11,94 b	5,28 b	2,11 a	0,84 b
T7	17,50 a	8,18 a	4,54 a	1,60 b
CV (%)	18,56	17,49	19,34	16,39
Média	15,86	6,26	3,26	1,33
Pr > Fc	0,0092	0,00084	0,0102**	0,00003

Valores expressos em g dm⁻³. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste estatístico adotado a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 3, observa-se que a massa seca de raízes variou significativamente entre os tratamentos nas profundidades avaliadas. No entanto, na camada de 20–40 cm, o teste de médias não separou os tratamentos, uma vez que todos permaneceram com a mesma letra estatística.

Na camada de 0–10 cm, os maiores valores foram observados em T1, T4, T5 e T7. O maior valor numérico no tratamento controle pode estar relacionado à condição de menor disponibilidade nutricional, na qual a planta tende a direcionar maior proporção de assimilados ao sistema radicular como estratégia de exploração do solo. De acordo com Lopez *et al.* (2023), condições de deficiência nutricional, principalmente de N e P, podem aumentar a relação raiz: parte aérea, indicando maior investimento relativo nas raízes. Além disso, em gramíneas tropicais, a maior parte da biomassa radicular tende a se concentrar nas camadas superficiais do solo, como observado por Kanno *et al.* (1999) em estudo com *Brachiaria decumbens* cv.

Basilisk, no qual a biomassa de raízes diminuiu rapidamente com o aumento da profundidade. Os tratamentos T4 e T5, que receberam polihalita associada ao manejo completo, apresentaram maior massa seca de raízes nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, indicando melhor desenvolvimento radicular na zona de maior atividade de absorção de água e nutrientes.

A maior massa seca de raízes observada em T4 e T5 também pode estar relacionada ao fornecimento conjunto de nutrientes pela polihalita, especialmente o potássio, associado ao fornecimento de N e P e à correção da acidez. O K exerce papel importante no crescimento e no desenvolvimento do sistema radicular, participando da expansão celular, da sinalização vegetal, do transporte de assimilados e da arquitetura das raízes. Segundo Sustr, Soukup e Tylova (2019), o potássio atua como um dos fatores reguladores do crescimento radicular, contribuindo para o funcionamento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Além do K, o cálcio fornecido pela polihalita também pode contribuir para o desenvolvimento radicular, uma vez que o Ca^{2+} atua na sinalização celular e na regulação da morfogênese das raízes. Zhang *et al.* (2020) destacam que o Ca^{2+} participa da regulação do crescimento da raiz primária e de respostas relacionadas ao desenvolvimento radicular.

O tratamento T7 também apresentou bom desempenho radicular, principalmente nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, além do maior valor numérico em 20–40 cm. Esse comportamento indica que o fornecimento de K via fonte convencional, quando associado ao manejo completo, também favoreceu a exploração radicular do solo. Entretanto, em 40–60 cm, os maiores valores ocorreram em T3, T4 e T5, todos com polihalita, enquanto o T7 permaneceu em grupo inferior. Assim os tratamentos com polihalita associada ao manejo completo apresentaram resposta mais favorável em profundidade, especialmente quando se considera a última camada avaliada.

No entanto, o tratamento T6, que recebeu apenas polihalita, apresentou baixos valores em 0–10 cm, 10–20 cm e 40–60 cm, reforçando que a polihalita isolada não foi suficiente para promover maior desenvolvimento radicular.

Tabela 4 – Carbono total do solo em diferentes profundidades sob tratamentos de adubação em pastagem de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk

Tratamentos	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm	20–40 cm	40–60 cm
T1	0,57 a	0,65 a	0,44 b	0,39 ac	0,28 d
T2	0,63 a	0,68 a	0,54 a	0,40 ab	0,33 ab
T3	0,70 a	0,79 a	0,56 a	0,45 a	0,33 ab
T4	0,70 a	0,78 a	0,53 a	0,37 ac	0,31 bc
T5	0,73 a	0,72 a	0,49 ab	0,38 ac	0,35 a
T6	0,69 a	0,69 a	0,48 ab	0,31 c	0,31 bd
T7	0,73 a	0,72 a	0,48 ab	0,34 bc	0,29 cd
CV (%)	8,18	9,30	6,02	7,94	3,81
Média	0,68	0,72	0,50	0,38	0,32
Pr > Fc	0,0464	0,2538	0,0072	0,0034	<0,001

Valores expressos em carbono total (%). Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores de carbono total do solo apresentaram diferença significativa entre os tratamentos nas profundidades. Na profundidade de 5–10 cm, não houve diferença significativa entre os tratamentos. De maneira geral, observou-se redução dos teores médios de carbono total com o aumento da profundidade.

Esse comportamento indica maior concentração de carbono nas camadas superficiais do solo, o que é esperado em áreas de pastagem, devido ao maior aporte de resíduos vegetais, material senescente, raízes finas e maior atividade biológica próxima à superfície. Costa Junior *et al.* (2011), ao avaliarem carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em solo sob vegetação nativa e pastagem no Cerrado, também observaram que o uso e o manejo do solo alteram a distribuição do carbono no perfil, sendo comum maior concentração nas camadas superiores.

Na profundidade de 10–20 cm, os tratamentos T2, T3 e T4 apresentaram os maiores teores. Esse resultado indica que os tratamentos com N e P, associados ou

não à polihalita, favoreceram maior concentração de carbono nessa camada intermediária em comparação ao controle.

Na camada de 20–40 cm, o tratamento T3 apresentou o maior teor de carbono total, diferindo dos tratamentos com menores valores, especialmente T6 e T7. Já na profundidade de 40–60 cm, o maior valor foi observado em T5, seguido por T2 e T3. Esse resultado mostra que a resposta do carbono total não ficou restrita às camadas superficiais, havendo diferenças também em profundidade.

A presença de maiores teores de carbono em algumas camadas subsuperficiais está relacionada ao sistema radicular da *Urochloa decumbens*, que contribui para a entrada de carbono no solo por meio de raízes mortas, exsudatos radiculares e decomposição de resíduos subterrâneos. Coutinho *et al.* (2025), trabalhando com raízes de *Urochloa decumbens*, destacaram que a decomposição radicular participa diretamente da entrada de carbono e nutrientes no solo, sendo um componente importante para a dinâmica da matéria orgânica em pastagens.

Tabela 5 Razão isotópica do carbono do solo ($\delta^{13}\text{C}$) em diferentes profundidades sob tratamentos de adubação em pastagem de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk.

Tratamentos	0–5 cm	5–10 cm	10–20 cm	20–40 cm	40–60 cm
T1	-17,04 ac	-17,17 bc	-18,37 c	-20,49 c	-21,64 bc
T2	-17,31 c	-17,30 c	-18,31 bc	-19,72 b	-21,69 bc
T3	-17,07 bc	-17,31 c	-17,58 a	-18,89 a	-20,20 a
T4	-16,61 ab	-16,69 a	-18,04 b	-20,20 bc	-21,39 bc
T5	-16,68 ab	-16,77 a	-18,71 d	-20,09 bc	-21,56 bc
T6	-16,53 a	-16,96 ab	-18,11 bc	-19,82 b	-21,73 c
T7	-17,02 ac	-17,95 d	-18,13 bc	-19,78 b	-21,09 b
CV (%)	1,01	0,54	0,61	0,97	0,95
Média	-16,89	-17,16	-18,18	-19,86	-21,33
Pr > Fc	0,0014	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Valores expressos em $\delta^{13}\text{C}$, em partes por mil (‰), em relação ao padrão internacional PDB/VPDB. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A razão isotópica do carbono do solo, expressa por $\delta^{13}\text{C}$, apresentou diferença significativa entre os tratamentos em todas as profundidades avaliadas. De modo geral, observou-se que os valores médios foram menos negativos nas camadas superficiais e tornaram-se progressivamente mais negativos com o aumento da profundidade, passando de -16,89‰ na camada de 0–5 cm para -21,33‰ na camada de 40–60 cm.

Os valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ são normais em amostras de solo e de matéria orgânica vegetal, pois essa variável expressa a relação entre os isótopos ^{13}C e ^{12}C em comparação com um padrão internacional. Portanto, o sinal negativo não indica ausência de carbono, baixa qualidade do solo ou resultado inadequado. A interpretação deve ser feita observando se os valores são mais negativos ou menos negativos. Em termos gerais, plantas de metabolismo C_3 apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos, normalmente entre -35‰ e -20‰, enquanto plantas de metabolismo C_4 , como *Urochloa decumbens*, apresentam valores menos negativos, geralmente entre -19‰ e -9‰.

Assim, em uma área cultivada com gramínea C_4 , valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ no solo indicam maior influência relativa do carbono derivado da pastagem atual. Por outro lado, valores mais negativos indicam menor participação relativa desse carbono recente da forrageira, podendo estar relacionados à maior contribuição de carbono previamente existente no solo ou à menor renovação da matéria orgânica naquela profundidade. Dessa forma, o $\delta^{13}\text{C}$ não deve ser interpretado como uma medida direta de carbono ativo ou inativo, mas sim como uma ferramenta para identificar a origem e a renovação relativa do carbono no solo. Essa interpretação está de acordo com Balesdent, Mariotti e Guillet (1987) e Bernoux *et al.* (1998), que utilizaram a abundância natural de ^{13}C como traçador da dinâmica da matéria orgânica do solo.

Na camada de 0–5 cm, os valores menos negativos foram observados em T6 (-16,53‰), T4 (-16,61‰) e T5 (-16,68‰). Esse resultado indica maior proximidade com a assinatura isotópica de plantas C_4 na superfície do solo, sugerindo maior influência relativa do carbono proveniente da *Urochloa decumbens*. Essa resposta pode estar associada à maior deposição de resíduos vegetais na superfície e à renovação de raízes finas nas camadas mais superficiais, onde ocorre maior entrada de material orgânico recente.

Na profundidade de 5–10 cm, T4 (-16,69‰) e T5 (-16,77‰) apresentaram os valores menos negativos, mantendo a tendência de maior influência relativa do carbono da pastagem nesses tratamentos. Já T7 apresentou o valor mais negativo nessa camada (-17,95‰), sugerindo menor participação relativa de carbono recente derivado da gramínea nessa profundidade específica. No entanto, essa interpretação deve ser feita com cautela, pois o $\delta^{13}\text{C}$ indica a origem relativa do carbono, mas não permite afirmar isoladamente se esse carbono é mais lábil, ativo ou estável.

Nas profundidades de 10–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm, o tratamento T3 apresentou os valores menos negativos, com -17,58‰, -18,89‰ e -20,20‰, respectivamente. Esse comportamento indica que o manejo com N + P + calagem + 30 kg ha⁻¹ de K₂O via polihalita apresentou maior influência relativa de carbono de origem C₄ nas camadas intermediárias e profundas. Esse resultado pode estar relacionado à contribuição do sistema radicular da forrageira, uma vez que as raízes representam um importante via de entrada de carbono no solo em pastagens tropicais perenes.

Costa Junior *et al.* (2011), avaliando solo sob vegetação nativa e pastagem no Cerrado, também destacaram que o $\delta^{13}\text{C}$ permite identificar mudanças na origem do carbono em função do uso do solo e da contribuição de plantas C₃ e C₄. No presente trabalho, o gradiente observado, com valores menos negativos na superfície e mais negativos em profundidade, é coerente com áreas sob pastagens formadas por gramíneas C₄. Nas camadas superficiais, a matéria orgânica tende a receber maior influência dos resíduos recentes da forrageira. Em profundidade, essa influência direta diminui, e a matéria orgânica pode apresentar maior participação de carbono previamente estabilizado no solo.

A interpretação conjunta com o carbono total permite uma análise mais completa. Quando um tratamento apresenta maiores valores de carbono total associados a valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$, pode-se inferir maior quantidade de carbono no solo e maior participação relativa de carbono derivado da pastagem atual. No presente estudo, o T3 apresentou valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ nas camadas de 10–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm, indicando maior influência relativa do carbono da *Urochloa decumbens* em profundidade. Já tratamentos que apresentam valores elevados de carbono total, mas $\delta^{13}\text{C}$ mais negativo, podem estar

acumulando carbono com maior participação de material antigo ou de uma mistura entre carbono recente da pastagem e carbono previamente presente no solo.

De modo geral, os resultados indicam que o $\delta^{13}\text{C}$ foi eficiente para evidenciar diferenças na origem relativa do carbono ao longo do perfil do solo. Os tratamentos T4 e T5 apresentaram maior influência de carbono derivado da pastagem nas camadas superficiais, enquanto T3 se destacou nas camadas intermediárias e profundas. O aumento dos valores negativos com a profundidade sugere redução da influência direta do carbono recente da *Urochloa decumbens* e maior participação de carbono previamente estabilizado no solo. Portanto, o $\delta^{13}\text{C}$ deve ser interpretado como indicador da origem e da renovação relativa da matéria orgânica, e não como medida direta de carbono ativo ou inativo.

Tabela 6 Teores de macronutrientes da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob tratamentos de adubação

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
g/kg						
T1	8,45 cd	3,58 a	17,34 b	3,62 a	1,48 b	0,67 c
T2	11,32 ab	3,90 a	20,70 ab	3,68 a	1,75 ab	1,08 ac
T3	10,13 bd	4,26 a	19,64 ab	3,80 a	1,75 ab	1,29 ab
T4	12,86 a	4,32 a	21,34 a	4,13 a	1,81 a	1,61 a
T5	10,55 bc	4,36 a	20,74 ab	4,02 a	1,84 a	1,47 a
T6	8,31 d	4,13 a	20,36 ab	3,55 a	1,66 ab	1,60 a
T7	11,39 ab	4,23 a	22,72 a	3,86 a	1,96 a	0,83 bc
CV (%)	9,04	12,52	7,90	7,39	8,06	21,46
Média	10,43	4,11	20,41	3,81	1,75	1,22
Pr > Fc	<0,001	0,3630	0,0081	0,0810	0,0050	<0,001

Médias de macronutrientes seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O nitrogênio apresentou uma das respostas mais evidentes entre os macronutrientes foliares. O maior teor foi observado no tratamento T4, correspondente à aplicação de N + P + 60 kg ha⁻¹ de K₂O via polihalita, seguido por T7 e T2, que também permaneceram entre os maiores grupos estatísticos. Os menores valores ocorreram em T1 e T6, justamente os tratamentos sem adubação nitrogenada. Esse comportamento reforça que a polihalita isolada não foi suficiente para melhorar o estado nutricional da forrageira em relação ao N, pois esse nutriente não faz parte da composição da fonte. Heinrichs *et al.* (2013), avaliando *Brachiaria decumbens* sob adubação com nitrogênio e enxofre, observaram que a adubação nitrogenada elevou os teores de N em folhas verdes e demais componentes da parte aérea, reforçando que a resposta foliar desse nutriente está diretamente associada ao fornecimento de N no manejo. Assim, a maior resposta em T4 deve ser atribuída ao manejo conjunto com N, P, calagem e polihalita, e não à polihalita de forma isolada. Esse resultado também foi observado em Almeida *et al.* (2025), que, observou melhor recuperação de pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk quando a polihalita foi associada à adubação com N, P e calagem.

O fósforo não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, apesar dos maiores teores de P no solo nos tratamentos adubados com fosfato. Isso pode ser explicado pela baixa mobilidade do P no solo e pela sua forte interação com a fração mineral, o que limita sua disponibilidade imediata às plantas.

O potássio foliar apresentou diferença significativa entre os tratamentos, com maiores teores em T7 e T4. O desempenho de T7 pode ser atribuído ao fornecimento de K via cloreto de potássio, fonte de elevada solubilidade e rápida disponibilidade no solo. Entretanto, o fato de T4 permanecer no mesmo grupo estatístico demonstra que a polihalita, quando associada à adubação com N, P e calagem, também foi eficiente no fornecimento de K à *Urochloa decumbens* cv. Basilisk. Esse resultado é relevante, pois a polihalita apresenta menor solubilidade em relação ao KCl, o que pode favorecer liberação mais gradual dos nutrientes no sistema solo-planta (YERMIYAHU *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2025).

A comparação entre as fontes mostra que o KCl favoreceu maior disponibilidade imediata de K, enquanto a polihalita demonstrou capacidade de manter teores foliares semelhantes quando integrada a um manejo nutricional completo. Esse comportamento reforça que a resposta da polihalita depende da

associação com N, P e calagem, conforme também observado por Almeida *et al.* (2025) em pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk. Assim, T4 evidencia o potencial da polihalita como fonte multinutriente para recuperação de pastagens, enquanto T7 funciona como referência de comparação com a fonte potássica convencional.

O cálcio foliar não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, possivelmente em função da calagem realizada na área, que contribuiu para maior uniformidade na disponibilidade de Ca entre os tratamentos adubados. Além disso, o cálcio possui baixa mobilidade no floema e sua concentração foliar depende do fluxo transpiratório, o que pode reduzir diferenças entre tratamentos.

O magnésio foliar apresentou diferença significativa, com maiores valores em T7, T5 e T4. Esse resultado é relevante, pois T4 e T5 receberam polihalita associada à adubação completa, e o Mg é um dos nutrientes presentes nessa fonte. Em estudo com milho forrageiro, Lillywhite *et al.* (2020) observaram que a polihalita atuou como fonte multinutriente eficiente, com resposta produtiva e nutricional semelhante ou superior a fontes convencionais em parte das avaliações, reforçando seu potencial em gramíneas quando inserida em manejo adequado de fertilização. Portanto, os tratamentos com manejo completo e fonte multinutriente apresentaram melhor condição de Mg no solo e maior teor foliar.

O enxofre apresentou diferença significativa entre os tratamentos, com os maiores teores observados em T4, T5 e T6, enquanto os menores valores ocorreram em T1 e T7. Esse resultado está diretamente relacionado à composição da polihalita, uma vez que essa fonte fornece enxofre na forma de sulfato.

O T7, apresentou menor teor de S em comparação aos tratamentos com polihalita. Esse padrão é coerente com Almeida *et al.* (2025), observa que a recuperação da pastagem foi mais eficiente quando a polihalita foi associada à calagem e à adubação com N e P, além de relatarem maiores concentrações de N e S no tratamento com N + P + calagem + 60 kg ha⁻¹ de K₂O via polihalita. Esse resultado reforça que a polihalita tem maior potencial agrônômico quando inserida em um manejo nutricional completo, e não como fonte isolada.

A importância do enxofre para gramíneas forrageiras também já foi demonstrada em trabalhos com *Brachiaria decumbens*. Santos e Monteiro (1999) observaram que doses de enxofre influenciaram a produção e o perfilhamento do

capim-braquiária, demonstrando que esse nutriente participa diretamente do crescimento da forrageira. Além disso, Oliveira *et al.* (2010), avaliando aplicações de nitrogênio e enxofre no primeiro ano de recuperação do capim-braquiária, destacaram a importância da combinação desses nutrientes para o valor nutritivo da forrageira em processo de recuperação.

Outro ponto importante é a relação entre enxofre e nitrogênio. Heinrichs *et al.* (2013), em estudo com *Brachiaria decumbens* sob adubação nitrogenada e sulfatada, avaliaram a interação entre esses nutrientes e mostraram que o manejo conjunto de N e S influencia o estado nutricional da forrageira. Essa relação ajuda a explicar por que os tratamentos com polihalita associados a N, P e calagem apresentaram melhor resposta geral do que a polihalita isolada.

Tabela 7– Teores de micronutrientes da parte aérea de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob tratamentos de adubação.

Tratamentos	Fe	Mn	Zn	Cu
mg/kg				
T1	107,67 a	144,69 ab	16,33 b	1,18 c
T2	49,86 bc	165,44 ab	18,86 a	2,17 a
T3	77,53 b	194,69 ab	19,24 a	2,12 ab
T4	58,98 bc	189,65 ab	19,15 a	1,85 ab
T5	56,41 bc	200,45 a	18,47 a	1,93 ab
T6	59,22 bc	178,15 ab	15,83 b	1,50 bc
T7	43,67 c	129,48 b	17,69 ab	1,19 c
CV (%)	19,61	17,17	4,61	16,47
Média	64,76	171,79	17,94	1,70
Pr > Fc	<0,001	0,0236	<0,001	<0,001

Médias de micronutrientes seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

. Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto aos micronutrientes foliares, observou-se diferença significativa entre os tratamentos para Fe, Mn, Zn e Cu. A interpretação desses resultados deve considerar que os micronutrientes metálicos são fortemente influenciados pelo pH,

matéria orgânica, calagem, textura, mineralogia, disponibilidade no solo e crescimento das plantas.

O ferro apresentou maior teor no tratamento T1, enquanto os menores valores ocorreram nos tratamentos adubados, especialmente em T7. Esse resultado é relacionado ao efeito de concentração, no qual plantas com menor crescimento podem apresentar maior concentração de determinado nutriente no tecido vegetal, sem que isso represente maior absorção total ou melhor desempenho agrônomo. Jarrell e Beverly (1981) descrevem esse fenômeno como um dos principais cuidados na interpretação de análises nutricionais, pois o aumento da biomassa pode diluir a concentração de nutrientes nos tecidos.

O manganês apresentou maior valor em T5, enquanto T7 apresentou o menor teor. Dessa forma, a maior concentração de Mn em T5 pode estar relacionada ao equilíbrio do tratamento com polihalita parcelada, N, P.

O zinco apresentou maiores teores nos tratamentos T2, T3, T4 e T5, enquanto os menores valores ocorreram em T1 e T6. Esse resultado indica que os tratamentos com manejo mais completo, envolvendo, N, P e fonte potássica, favoreceram melhor estado nutricional da forrageira para esse micronutriente.

O cobre apresentou maior teor em T2, seguido por T3, T4 e T5, enquanto os menores valores ocorreram em T1 e T7, no entanto, a resposta não deve ser atribuída diretamente à polihalita, pois essa fonte não fornece Cu como nutriente principal. A maior resposta nos tratamentos com manejo completo sugere efeito indireto da melhoria do ambiente químico do solo e do crescimento das plantas.

6 CONCLUSÃO

A adubação com polihalita influenciou a recuperação da pastagem degradada de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, principalmente quando associada ao fornecimento de nitrogênio, fósforo e calagem. O tratamento cinco Trat 2 + 60 (30+30) kg/ha K₂O via polihalita, com aplicação parcelada de polihalita apresentou melhor resposta na produção de massa seca da parte aérea, enquanto a aplicação isolada de polihalita não foi suficiente para promover maior recuperação da pastagem. Os tratamentos com manejo nutricional completo favoreceram o desenvolvimento radicular, especialmente nas camadas superficiais do solo, e contribuíram para melhores teores foliares de nutrientes, com destaque para K, Mg e S nos tratamentos com polihalita. A razão isotópica do carbono do solo ($\delta^{13}\text{C}$) evidenciou diferenças na origem relativa do carbono ao longo do perfil, indicando maior influência do carbono derivado da pastagem nas camadas superficiais e variações entre tratamentos em profundidade.

Conclui-se que a polihalita apresenta potencial para uso na recuperação de pastagens degradadas, desde que associada ao fornecimento adequado de N e P, devendo ser utilizada como parte de um programa integrado de manejo da fertilidade do solo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Fabiano Martins. **Acúmulo de massa seca de forragem, concentração e extração de macronutrientes na recuperação de pastagem de Urochloa decumbens cv. Basilisk com aplicação de polihalita**. 2025. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Dracena, 2025. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/295899>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- ALMEIDA, Fabiano Martins de; HEINRICHS, Reges; MARTINEZ, Flavia Rodrigues; SILVA, Maurício Bruno Prado da; PAGLIARI, Paulo Humberto; SOARES-FILHO, Cecilio Vieg. Recovery of degraded Urochloa pasture: effects of polyhalite on dry mass accumulation and macronutrient dynamics. **Agronomy**, Basel, v. 15, n. 10, art. 2300, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15102300.
- ALOVISI, Alessandra Mayumi Tokura; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, [S. l.], v. 22, e00298, 2020. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00298.
- ANDRADE, Rafael Gouveia de. **Efeito da calagem e adubação fosfatada na produção de Brachiaria decumbens Stapf. em argissolo vermelho amarelo**. 2013. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/663>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- ANJOS, Albert José dos; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Carbon and nitrogen accumulation in roots of signal grass–forage peanut intercropped pastures at varying planting spacings. **Agronomy**, [S. l.], v. 14, n. 12, art. 3023, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14123023.
- BALESDENT, Jérôme; MARIOTTI, André; GUILLET, Bernard. Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 25-30, 1987. DOI: 10.1016/0038-0717(87)90120-9.
- BERNOUX, Martial; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. **Geoderma**, Amsterdam, v. 82, n. 1-3, p. 43-58, 1998. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00096-7.
- BHATT, Rajan; SINGH, Paramjit; ALI, Omar M.; LATEF, Arafat Abdel Hamed Abdel; LAING, Alison M.; HOSSAIN, Akbar. Polyhalite positively influences the growth, yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in potassium and calcium-deficient soils in the semi-arid tropics. **Sustainability**, [S. l.], v. 13, n. 19, art. 10689, 2021. DOI: 10.3390/su131910689.
- BHATT, Rajan; IMAS, Patricia; PERELMAN, Adi; VERMA, Krishan K.; AL-SHURAYM, Laila A.; SAYED, Samy; GABER, Ahmed; HOSSAIN, Akbar. Polyhalite improves growth, yield, and quality and reduces insect pest incidence in sugarcane

(*Saccharum officinarum* L.) in the semiarid tropics. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [S. I.], v. 8, 2024. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1388916.

CABRAL, C. E. A.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Impactos técnico-econômicos da adubação de pastos. **Nativa**, Sinop, v. 9, n. 2, p. 173-181, 2021. DOI: 10.31413/nativa.v9i2.12047.

CAKMAK, Ismail; YAZICI, Ahmet M. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crops**, Norcross, v. 94, n. 2, p. 23–25, 2010.

CORDEIRO, Luciano Adriano Maia; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. **Estratégias para recuperação e renovação de pastagens degradadas no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2022. 27 p. (Documentos, 397). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1152245>. Acesso em: 8 abr. 2026.

COSTA JÚNIOR, Ciniro; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 4, p. 1241-1252, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000400017.

COUTINHO, Danielle Nascimento; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Root decomposition in *Urochloa decumbens* pastures fertilized with increasing nitrogen doses or intercropped with *Calopogonium mucunoides*. **Scientific Reports**, [S. I.], v. 15, art. 6850, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-91796-1.

DIAS-FILHO, Moacyr Bernardino. **Degradação de pastagens: o que é e como evitar**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 19 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1070416>. Acesso em: 8 abr. 2026.

DIAS-FILHO, Moacyr Bernardino. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36 p. (Documentos, 402). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/986147>. Acesso em: 8 abr. 2026.

EMBRAPA. **Políticas públicas para pastagens: da degradação ao uso sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 2024. 112 p.

FAGUNDES, Jailson Lara; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* adubados com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 4, p. 397-403, abr. 2005.

FAGUNDES, Jailson Lara; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Índice de área foliar, densidade de perfilhos e acúmulo de forragem em pastagem de capim-braquiária adubada com nitrogênio. **Boletim de Indústria Animal**, [S. I.], v. 62, n. 2, p. 125-133, 2005.

FARIA, Bruna Moscat; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Growth and bromatological characteristics of *Brachiaria decumbens* and *Brachiaria ruziziensis*

under shading and nitrogen. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, n. 3, p. 529-536, 2018. DOI: 10.5935/1806-6690.20180060.

FRONTADO, Néstor Eduardo Villamizar; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Phosphorus use efficiency: morphogenetic and productive responses of *Brachiaria decumbens* genotypes (syn. *Urochloa decumbens*). **Grasses**, Basel, v. 4, n. 2, art. 20, 2025. DOI: 10.3390/grasses4020020.

HEINRICHS, Reges; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. *Brachiaria* sp. yield and nutrient contents after nitrogen and sulphur fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 4, p. 997-1003, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000400017.

HEINRICHS, Reges; SOARES FILHO, Cecílio Viega. **Adubação e manejo de pastagens**. Birigui, SP: Boreal Editora, 2014. 166 p.

IDALGO, Julio Henrique Casaca; PIZA, Marina Laís Sabião Toledo; DAVID, Evelize de Fátima Saraiva. Produtividade de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob diferentes doses de adubação nitrogenada. **Revista AgroFIB**, Bauru, v. 4, n. 1, 2024. DOI: 10.59237/agrofib.v4i1.776.

IEIRI, A. Y.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na recuperação de pastagem com braquiária. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1154-1160, 2010. DOI: 10.1590/S1413-70542010000500011.

JARRELL, Wesley M.; BEVERLY, Reuben B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, [S. l.], v. 34, p. 197-224, 1981. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60887-1.

KAIR FILHO, José Artur. **Aplicação de fontes de fósforo incorporado e superficial na recuperação de *Brachiaria decumbens* degradada**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/42509>. Acesso em: 8 abr. 2026.

KANNO, Tsutomu; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian savannas. **Grassland Science**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 9-14, 1999.

LI, Guangdi D.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Long-term liming changes pasture mineral profile. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 14, art. 3558, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-53908-1.

LILLYWHITE, Robert; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. The response of winter barley (*Hordeum vulgare*) and forage maize (*Zea mays*) crops to polyhalite, a multi-nutrient fertilizer. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 158, n. 4, p. 269-278, 2020. DOI: 10.1017/S002185962000060X.

LOPEZ, G.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, art. 1067498, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2022.1067498.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, Eurípedes; VITTI, Godofredo Cesar; OLIVEIRA, Sebastião Alberto de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MAPBIOMAS. **Destaques do mapeamento anual de cobertura e uso da terra: pastagem na agropecuária no Brasil (1985–2024): Coleção 10**. São Paulo: MapBiomass, 2025. 13 p.

MAPBIOMAS. **Pastagens brasileiras ocupam área equivalente a todo o estado do Amazonas**. [S. l.], 13 out. 2021. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2021/10/13/pastagens-brasileiras-ocupam-area-equivalente-a-todo-o-estado-do-amazonas/>. Acesso em: 8 abr. 2026.

MATTOS, Waldssimiler Teixeira de; MONTEIRO, Francisco Antonio; DECHEN, Antonio Roque. Potassium distribution and use efficiency in *Brachiaria decumbens*. In: HORST, Walter J.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES] (ed.). **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research**. Dordrecht: Springer, 2001. p. 822-823. DOI: 10.1007/0-306-47624-X_400.

MENDOZA RIQUEIRO, J.; AÑAZCO CHÁVEZ, J. Evaluación de tres dosis de fertilización nitrogenada en cultivo de pasto *Brachiaria decumbens* en el cantón Quinindé. **Revista Tse'de**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 42-58, 2022.

OLIVEIRA, Daniela Alves de; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Valor nutritivo do capim-braquiária no primeiro ano de recuperação com aplicações de nitrogênio e enxofre. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 716-726, 2010. DOI: 10.1590/S1516-35982010000400004.

OLIVEIRA, Patrícia Perondi Anchão; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Liming and fertilization to restore degraded *Brachiaria decumbens* pastures grown on an Entisol. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 1, p. 125-131, 2003. DOI: 10.1590/S0103-90162003000100019.

OLIVEIRA, Stella Mendes Pio de; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Efeito residual no solo do uso de polihalita na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 55, e81758, 2025. DOI: 10.1590/1983-40632025v5581758.

PACIULLO, Domingos Sávio Campos; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. **Tecnologia e custo de produção de *Brachiaria decumbens* para uso sob pastejo**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2016. 6 p. (Circular Técnica, 111). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1054144>. Acesso em: 8 abr. 2026.

PEGORARO, Rodinei Facco; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 859-868, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000500012.

RIBEIRO, Diego O.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Restoration of degraded pasture of *Urochloa decumbens* through different managements using mineral fertilizers and biochar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 28, n. 8, e275538, 2024. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v28n8e275538.

SANTOS, Antonio Rodrigues dos; MONTEIRO, Francisco Antonio. Produção e perfilhamento de *Brachiaria decumbens* Stapf. em função de doses de enxofre. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 689-692, 1999. DOI: 10.1590/S0103-90161999000300025.

SARDANS, J.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications. **Plants**, Basel, v. 10, n. 2, art. 419, 2021. DOI: 10.3390/plants10020419.

SILVA, Dirceu Jorge da; QUEIROZ, Augusto César de. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2002. 235 p.

SINGH, Vinod Kumar; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Optimizing polyhalite (POLY-4) use in the maize-wheat system: a comparative case study from upper and Trans Indo-Gangetic plains of India. **Heliyon**, [S. l.], v. 9, e22566, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22566.

SUSTR, Marek; SOUKUP, Ales; TYLOVA, Edita. Potassium in root growth and development. **Plants**, Basel, v. 8, n. 10, art. 435, 2019. DOI: 10.3390/plants8100435.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MØLLER, Ian Max; MURPHY, Angus. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TOMAZ, Roberta Maria Amorim. **Efeito de fertilizante organomineral no desenvolvimento de gramíneas do gênero *Urochloa***. 2024. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78662>. Acesso em: 8 abr. 2026.

VALE, F. Calcium and magnesium movement in soil profile with polyhalite as potassium fertilizer for soybean crop. In: FERTBIO, 2016, Goiânia. **Proceedings [...]** Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

VENDRAME, Paulo Roberto Silva; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na região

do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000600013.

YERMIYAHU, Uri; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Polyhalite as a multi nutrient fertilizer: potassium, magnesium, calcium and sulfate. **Israel Journal of Plant Sciences**, [S. l.], v. 64, n. 3-4, p. 145-157, 2017. DOI: 10.1163/22238980-06401001.

ZHANG, X. P.; [COMPLETAR COM OS DEMAIS AUTORES]. Roles and mechanisms of Ca^{2+} in regulating primary root growth in plants. **Plant Signaling & Behavior**, [S. l.], v. 15, n. 6, 2020. DOI: 10.1080/15592324.2020.1748283.