



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - Instituto de Ciências Biológicas

Departamento de Botânica

Programa de Pós-Graduação em Botânica

Crescimento e Análise Nutricional de *Arundo donax*: uma Gramínea Exótica Invasora em Áreas do Cerrado.

Ana Paula de Queiroz

Orientador: Augusto César Franco

Dissertação de Mestrado

Brasília, 05 de Abril de 2026.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA

Dissertação de Mestrado
ANA PAULA DE QUEIROZ

Título:
Crescimento e Análise Nutricional de *Arundo donax*: uma Gramínea Exótica Invasora em Áreas do Cerrado.

Banca Examinadora:

Augusto César Franco - Orientador

Thomas Christopher Rhys Williams - Membro

Marcelo Lattarulo Campos - Membro

Sarah Christina Caldas Oliveira - Suplente

Brasília, 05 de Abril de 2026.

[Ficha Catalográfica]

Queiroz, Ana Paula de.

Crescimento e Análise Nutricional de *Arundo donax*: uma Gramínea Exótica

Invasora em Áreas do Cerrado (UNB-IB-Dep. Botânica, mestre, Botânica, 2026).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Departamento de Botânica

1. Gramíneas Invasoras
2. Cerrado
3. *Arundo donax*
4. Biodiversidade
5. Botânica

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais exemplares somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva os demais direitos de publicação; nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Ana Paula de Queiroz

Dedicatória

À minha mãe, Maria, à Lucimar, minha mãe de coração, e aos meus filhos, Jhonny, Jhonnatan e Renata, razões da minha vida. A toda a minha família e amigos, pelo apoio constante e por sempre acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, minha rocha e fôlego de vida. Ele tornou este sonho possível, renovando minhas forças nos momentos mais difíceis e guiando meus passos fielmente até esta vitória.

À minha mãe, Maria, por todo o sacrifício e amor dedicado a mim, e à minha mãe de coração, Lucimar, meu porto seguro e exemplo de cuidado.

Aos meus filhos, Jhonny, Jhonnatan e Renata. Um agradecimento especial ao Jhonnatan, meu fiel companheiro de campo, que esteve comigo inclusive nas salas de aula da Universidade; vocês são o motivo de eu nunca desistir.

À minha família, pelo apoio incondicional, e as minhas queridas amigas: Luciene e Antonieta.

À Professora Cássia, minha eterna gratidão por ter acreditado em mim. Aos meus colegas de pós-graduação, que tornaram os dias mais leves. À Zilma e à Milena, pelas parcerias nas coletas de campo, e ao meu colega de mestrado Lucas, um verdadeiro companheiro nas horas difíceis.

Ao Professor Doutor Sergio, pelos ensinamentos durante o meu estágio.

Aos meus orientadores, Augusto César e Cristiane, pela paciência, pelos conhecimentos compartilhados e por acreditarem no meu trabalho.

À Universidade de Brasília (UnB) e a todos que, mesmo de longe, torceram por mim. Esta conquista é nossa!

RESUMO

A invasão por gramíneas exóticas representa uma das maiores ameaças à biodiversidade do Cerrado, alterando a ciclagem de nutrientes e a estrutura das comunidades vegetais. *A. donax* L. (Poaceae) se reproduz assexuadamente por rizomas e fragmentos de caule, colonizando rapidamente áreas abertas e roçadas mecanicamente, além de possuir alta capacidade de adaptação a ambientes de diferentes disponibilidades de recursos. Este trabalho objetivou avaliar o crescimento, a partição de biomassa e a dinâmica nutricional de *A. donax* sob diferentes níveis de fertilização em condições de casa de vegetação e de campo. O experimento em casa de vegetação seguiu um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x2, testando a adição de fertilizante mineral (NPK) e meio de cultura Murashige & Skoog (MS). Os resultados indicaram que a suplementação com NPK foi o principal indutor para o aumento da biomassa total, foliar e do caule ($p < 0,01$), enquanto a biomassa radicular não apresentou variações significativas, evidenciando uma estratégia de alocação preferencial para a parte aérea. A análise nutricional revelou que a interação NPK+MS promoveu um efeito sinérgico para o acúmulo de Enxofre (S) no colmo ($p = 0,018$), enquanto o meio MS isolado elevou os teores de Potássio e Magnésio. No sistema radicular, observou-se uma elevada retenção de Ferro (4,14 mg/g), independentemente do tratamento. Paralelamente, o experimento de campo avaliou o comportamento e a capacidade de rebrota de *A. donax* no Cerrado sob duas estações climáticas distintas (chuvosa e seca) após o corte da parte aérea. Os resultados dessa fase indicaram que as reservas orgânicas e minerais dos rizomas foram suficientes para sustentar o desenvolvimento do aparato fotossintético e a expansão de fitomassa foliar durante a estação chuvosa. Em contraste, o período de estiagem (estação seca) reduziu significativamente os teores de Magnésio, mas manteve elevados os níveis foliares de Potássio, atuando estrategicamente no controle do turgor celular e na tolerância ao estresse hídrico. Conclui-se que *A. donax* exibe elevada plasticidade fenotípica e eficiência na conversão de aporte nutricional em biomassa aérea, características que explicam o seu sucesso invasivo em áreas perturbadas do Cerrado e reforçam a necessidade de estratégias de manejo baseadas no controle de disponibilidade de recursos.

Palavras-chave: Cerrado, Gramínea Invasora, Partição de Biomassa, Nutrição Mineral, Biodiversidade.

ABSTRACT

Invasion by exotic grasses represents one of the greatest threats to Cerrado biodiversity, altering nutrient cycling and the structure of plant communities. *A. donax* L. (Poaceae) is an invasive macrophyte with a high capacity to adapt to different resource availabilities. This study aimed to evaluate the growth, biomass partitioning, and nutritional dynamics of *A. donax* under different fertilization levels in greenhouse and field conditions. The greenhouse experiment followed a completely randomized design in a 2x2 factorial scheme, testing the addition of mineral fertilizer (NPK) and Murashige & Skoog (MS) culture medium. The results indicated that NPK supplementation was the main driver for the increase in total, leaf, and stem biomass ($p < 0.01$), while root biomass showed no significant variations, evidencing a strategy of preferential allocation to the shoot. Nutritional analysis revealed that the NPK+MS interaction promoted a synergistic effect for Sulfur (S) accumulation in the culm ($p = 0.018$), while the MS medium alone increased Potassium and Magnesium content. In the root system, a high retention of Iron (4.14 mg/g) was observed, regardless of the treatment. Concurrently, the field experiment evaluated the behavior and resprouting capacity of *A. donax* in the Cerrado under two distinct climatic seasons (rainy and dry) following the cutting of the shoot system. The results of this phase indicated that the organic and mineral reserves of the rhizomes were sufficient to sustain the development of the photosynthetic apparatus and the expansion of leaf biomass during the rainy season. In contrast, the dry period (dry season) significantly reduced Magnesium content but maintained elevated leaf Potassium levels, acting strategically in cell turgor control and drought tolerance. It is concluded that *A. donax* exhibits high phenotypic plasticity and efficiency in converting nutrient input into shoot biomass, characteristics that explain its invasive success in disturbed areas of the Cerrado and reinforce the need for management strategies based on the control of resource availability.

Keywords: Cerrado, Invasive Grass, Biomass Partitioning, Mineral Nutrition, Biodiversity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do gradiente estrutural e do perfil ecológico das principais fitofisionomias do bioma Cerrado, evidenciando a transição contínua entre as formações campestres, savânicas e florestais.

Figura 2: Panorama da supressão da vegetação nativa no bioma Cerrado (1985–2023): análise geoespacial do balanço de perda de cobertura vegetal e do estado de conservação regional, com destaque para a região do Matopiba.

Figura 3: Distribuição geográfica global e status de invasão de *A. donax* L. pelo mundo. Os pontos delimitam as coordenadas geográficas e os registros oficiais compilados pelo Center for Agriculture and Bioscience International. Os pontos em vermelho/laranja indicam áreas onde a espécie está amplamente distribuída, estabelecida ou classificada como invasora; os pontos em amarelo indicam registros de ocorrência pontual, distribuição restrita ou status de presença incerto. Escala cartográfica global adaptada.

Figura 4: Registros de ocorrência de *A. donax* L. no Brasil a partir de recortes regionais detalhados. Os painéis apresentam as ampliações das unidades federativas com ocorrências catalogadas (regiões Sul, Sudeste e Distrito Federal), organizadas de forma a otimizar a visualização dos pontos amostrais e contornar a sobreposição dos dados em escala nacional.

Figura 5: Mapeamento dos registros oficiais de coleta e ocorrência de *A. donax* L. no Distrito Federal. O detalhamento geoespacial apresenta a distribuição dos pontos amostrais catalogados e indexados na plataforma speciesLink, evidenciando as áreas de amostragem botânica e o histórico de documentação da espécie dentro do território da capital federal.

Figura 6: Acompanhamento do crescimento da *A. donax* no Cerrado, durante a estação chuvosa. Foto 1: Planta de *A. donax* em fase inicial de rebrota, 10 dias após o corte, mostrando a altura inicial da planta, cerca de 10 cm, e o surgimento de novos brotos. Foto 2: Rebrota de *A. donax* 30 dias após o corte, cerca de 2 m, demonstrando o crescimento da planta em altura em relação à foto anterior. Foto 3: Rebrota de *A. donax* 63 dias após o corte, cerca de 4m, evidenciando o crescimento contínuo da planta em altura ao longo do período de acompanhamento.

Figura 7: Fluxograma Metodológico do Experimento de Crescimento de *A. donax* Submetida a Diferentes Regimes Nutricionais em Casa de Vegetação.

Figura 8: Parâmetros de crescimento e desenvolvimento de *A. donax* L. aos 63 dias após o transplântio sob diferentes tratamentos nutricionais. (A) Comprimento do Perfilho Dominante (CPD); (B) Número Total de Perfilhos (NTP); (C) Número de Folhas do Perfilho Dominante (NFPD). As barras representam a média de 10 repetições e as barras verticais representam o erro padrão da média. Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada variável, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 9: Área Foliar Total (AFT) de *A. donax* L. aos 63 dias sob diferentes tratamentos nutricionais. As barras representam a média de 10 repetições e as linhas verticais o erro padrão da média. Dados analisados via ANOVA Aligned Rank Transform (ART); médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Transformação de Postos Alinhados para Contrastes (Aligned Rank Transform for Contrasts — ART-C) ($p < 0,05$).

Figura 10: Partição de biomassa seca (g) de *A. donax* L. aos 63 dias após o transplântio sob diferentes tratamentos nutricionais. As cores representam a contribuição relativa de cada órgão (raiz, caule e folha) na composição da barra empilhada da biomassa total. Médias da biomassa total seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As frações correspondentes à biomassa radicular não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$).

Figura 11: Aspecto geral da área de estudo (aproximadamente 1.000 m²) com presença de adensamentos de *A. donax* L. em área de Cerrado antropizado no campus da Universidade de Brasília (UnB).

Figura 12: Unidade experimental de *A. donax* L. sob condições de campo: (A) Padrão da planta selecionada no momento do corte inicial, exibindo a homogeneidade de diâmetro e altura adotada como critério de seleção; (B) Aspecto da mesma unidade após o período de rebrota, evidenciando o desenvolvimento da haste única a partir do rizoma.

Figura 13: Acúmulo de fitomassa seca (g) em caule e folhas de *A. donax* submetida a corte da parte aérea. Dados obtidos após 63 dias de rebrota durante as estações chuvosa e seca em área de Cerrado antropizado. As barras representam a média $\pm$

erro padrão (n=5). Asteriscos (***) indicam diferença estatística significativa entre as estações para cada órgão pelo teste t de Welch ($p < 0,001$).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização físico-química do substrato final (Bioplante e subsolo 2:1) utilizados no Experimento Casa de Vegetação e do subsolo do Cerrado (EEB).

Tabela 2: Delineamento experimental e descrição dos tratamentos nutricionais aplicados a *A. donax* L. em casa de vegetação.

Tabela 3: Composição de macro e micronutrientes, vitaminas e outros componentes presentes no Meio MS 5519 (Sigma-Aldrich, catálogo M5519), com suas respectivas concentrações em mg/L.

Tabela 4: Caracterização química do fertilizante mineral sólido empregado no experimento: teores de macro e micronutrientes.

Tabela 5: Teores de macronutrientes e micronutrientes (mg/g) em diferentes órgãos de *A. donax* L. sob diferentes tratamentos nutricionais aos 63 dias. Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna, dentro de cada órgão (Folha, Caule ou Raiz), diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para um mesmo órgão, a ausência de letras indica efeito não significativo dos tratamentos sobre o elemento ($p > 0,05$).

Tabela 6: Conteúdo total acumulado (estoque) de macro e micronutrientes (g) nos diferentes órgãos e no total da planta de *A. donax* L. submetida a diferentes regimes de adubação aos 63 dias.

Tabela 7: Caracterização química dos solos em áreas de invasão de *A. donax* L. (Centro de Recuperação de Áreas Degradadas – CRAD e Parque Estação Biológica – PQEB) e em área de Cerrado preservado (Águas Lindas - GO).

Tabela 8: Parâmetros morfométricos, distribuição de biomassa e índices de área foliar de *A. donax* após 63 dias de rebrota nas estações chuvosa e seca. AFT corresponde à área foliar total, AFE à área foliar específica e RAF, à razão de área foliar. Dados expressos em termos de média $\pm$ erro padrão ($M \pm EP$), $n = 5$ plantas.

Tabela 9: Teores médios ($\pm$ Erro Padrão) de macro e micronutrientes em diferentes estruturas de *A. donax* nas estações Chuvosa e Seca no Cerrado.

Tabela 10: Conteúdo total médio (estoque) de macro e micronutrientes (mg) acumulados na parte aérea (folhas e caules) de *A. donax* L. após 63 dias de rebrota nas estações chuvosa e seca no Cerrado.

Tabela Suplementar 1: Resumo da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de biomassa e dinâmica foliar de *A. donax* L. aos 63 dias.

Tabela Suplementar 2: Médias ($\pm$ erro padrão) das variáveis de biomassa e dinâmica foliar de *A. donax* L. sob diferentes tratamentos nutricionais aos 63 dias.

Tabela Suplementar 3: Resumo da Análise de Variância (ANOVA) para as concentrações de macro e micronutrientes nos órgãos de *A. donax* L. aos 63 dias.

Tabela Suplementar 4: Parâmetros de biomassa e índices morfofoliares de *A. donax* L. sob sazonalidade em condições de campo.

Tabela Suplementar 5A: Partição do estoque total (conteúdo acumulado) de macronutrientes nos diferentes órgãos da parte aérea de *A. donax* L. sob condições de campo nas estações chuvosa e seca.

Tabela Suplementar 5B: Partição do estoque total (conteúdo acumulado) de micronutrientes nos diferentes órgãos da parte aérea de *A. donax* L. sob condições de campo nas estações chuvosa e seca.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A. donax: Abreviação de *Arundo donax*.

AFE: Área Foliar Específica.

AFT: Área Foliar Total.

ANOVA ART: Análise de Variância utilizando a técnica Aligned Rank Transform (para dados não paramétricos).

ANOVA One-Way: Análise de Variância de via única (usada para comparar as médias de dois grupos, Estação Chuvosa e Estação Seca).

ANOVA: Análise de Variância (Analysis of Variance).

AT: Altura Total (ou crescimento em altura).

ATP: Trifosfato de Adenosina

C/N: Razão Carbono/Nitrogênio (indicador de qualidade nutricional e decomposição).

C3: Refere-se ao ciclo fotossintético de fixação de carbono (Ciclo de Calvin), onde o primeiro composto estável tem três carbonos.

Ca/Mg: Relação Cálcio/Magnésio.

CaCl₂: Cloreto de Cálcio (utilizado na medição de pH do solo).

CO₂: Dióxido de carbono.

CTC: Capacidade de Troca Catiônica.

Cu: Cobre.

DIC: Delineamento Inteiramente Casualizado.

EDTA: Ácido etilenodiamino tetra-acético (agente quelante).

EEB: Estação Experimental de Biologia (UnB).

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

EP: Erro Padrão (utilizado nas médias descritivas).

F: Estatística do teste de Fisher (razão de variâncias na ANOVA).

Fe: Ferro.

GBIF: Global Biodiversity Information Facility (Sistema Global de Informação sobre Biodiversidade).

HSD: Teste de Diferença Significativa Honesta de Tukey (Tukey's Honestly Significant Difference).

IC95%: Intervalo de Confiança de 95%.

K: Potássio (elemento químico nutriente).

m%: Saturação por Alumínio.

MapBiomass: Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil.

MATOPIBA: Acrônimo para a região que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia.

mg/g: Miligramas por grama (unidade de concentração).

mg/planta: Miligramas por planta (unidade de estoque).

Mn: Manganês.

MS: Meio de cultura Murashige e Skoog.

N: Nitrogênio.

n=5: Tamanho da amostra (número de repetições por grupo no experimento de campo, Estação Chuvosa e Estação Seca).

NADPH: Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo Fosfato.

NFPD: Número Total de Folhas de Perfilhos Dominantes.

Nº FOLHAS: Número de folhas emitidas.

NPK: Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) – fórmula de adubação mineral.

NTP: Número Total de Perfilhos.

p/p-valor: Nível de significância estatística.

P: Fósforo.

PPFD: Densidade de Fluxo de Fótons Fotossinteticamente Ativos (Photosynthetic Photon Flux Density).

R: Software/Linguagem de programação para computação estatística.

RAF: Razão de Área Foliar.

RuBP: Ribulose-1,5-bifosfato.

S: Enxofre.

SpeciesLink: Rede de informação que integra dados de coleções científicas.

Teste t de Student: Teste estatístico para comparar as médias de dois grupos independentes.

Teste t de Welch: Uma variação do teste t de Student usada quando as variâncias entre os dois grupos são diferentes.

UnB: Universidade de Brasília.

USP: Universidade de São Paulo (citada na referência do Instituto de Biociências).

V%: Saturação por bases.

W: Estatística do teste de Shapiro-Wilk para normalidade.

Zn: Zinco.

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	19
1.1 Invasões Biológicas e Impactos no Cerrado	21
1.2. Ecologia e Comportamento de <i>A. donax</i>	25
1.3. Competição e Impacto Nutricional de Espécies Invasoras no Cerrado.....	28
1.4. Crescimento e Adaptação de Plantas no Cerrado	29
1.5. Estratégias de Manejo e Controle de <i>Arundo donax</i>	31
2. RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	33
3. OBJETIVOS	34
3.1 Objetivo geral	34
3.2 Objetivos específicos	35
4. HIPÓTESES.....	35
CAPÍTULO I	36
EFEITOS DA APLICAÇÃO DE NUTRIENTES NO CRESCIMENTO, DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA E BALANÇO NUTRICIONAL DE <i>A. DONAX</i>	36
1. INTRODUÇÃO	37
2. METODOLOGIA.....	39
2.1 Experimento em Casa de Vegetação.....	39
2.2 Caracterização do Substrato.....	42
2.3 Delineamento Experimental e Tratamentos	43
2.4 Protocolo de Aplicação dos Tratamentos Nutricionais	46
2.5 Duração do Experimento e Avaliações	48
2.6 Análise Nutricional do Material Vegetal	49
3. RESULTADOS	49
3.1 Crescimento Vegetativo e Perfilhamento.....	50
3.2 Dinâmica da Área Foliar	53
3.3 Acúmulo e Partição de Biomassa.....	54

4. COMPOSIÇÃO MINERAL E ALOCAÇÃO DE NUTRIENTES	56
5. DISCUSSÃO	61
CAPÍTULO II	64
CRESCIMENTO, POTENCIAL DE REBROTA E ANÁLISE FISIOLÓGICA DE A. <i>DONAX</i> SOB A SAZONALIDADE HÍDRICA DO CERRADO	64
1. INTRODUÇÃO	65
1.1 Objetivo e Local de Estudo	66
1.2 Abordagem Experimental para avaliação do Efeito da Sazonalidade (Estação Chuvosa vs. Estação Seca)	67
2. PROTOCOLO DE MONITORAMENTO E COLETA (COMUM A AMBOS EXPERIMENTOS).	68
3. RESULTADOS	70
3.1 Crescimento Morfométrico e Dinâmica de Perfilamento	72
3.2 Acúmulo e Distribuição de Fitomassa Seca	74
3.3 Dinâmica e Ajustes da Área Foliar.....	76
3.4 Composição Nutricional e Alocação de Nutrientes sob Sazonalidade	77
3.5 Dinâmica de Acúmulo e Estoque de Nutrientes na Parte Aérea	79
4 DISCUSSÃO	81
4.1. Seletividade de Habitat e Antropização do Solo	81
4.2. Plasticidade Fenotípica e Estratégias de Alocação de Biomassa	82
4.3. Ajustes Morfológicos e Resistência à Seca.....	82
4.4. Homeostase Nutricional e o Papel Protetor dos Micronutrientes..	83
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6 CONSIDERAÇÕES GERAIS	85
7 REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A.....	96
APÊNDICE B.....	99

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é reconhecido como um hotspot de biodiversidade mundial (MYERS, *et al.*, 2000), caracterizado por ter alto grau de endemismo. Este bioma tem sofrido intensa ação antrópica, resultando na substituição da paisagem natural por atividades agropecuárias, construção de hidrelétricas, garimpo, expansão urbana, mineração e infraestrutura rodoviária (VELAZCO, *et al.*, 2019). Os solos predominantes no Cerrado são de origem arenítica e quartzosa, apresentando crostas lateríticas ferruginosas e texturas arenoso-argilosas, além de serem tipicamente ácidos, pobres em nutrientes e ricos em óxidos de ferro e alumínio (BORGHETTI, *et al.*, 2023; RIBEIRO & WALTER, 2008). O clima predominante no Domínio do Cerrado é o Tropical sazonal, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual varia entre 22-23 °C, e as temperaturas máximas podem atingir 40 °C e a precipitação anual varia entre 800 e 2000 mm (RIBEIRO & WALTER, 2008).

A flora nativa do bioma ainda sofre a concorrência com as espécies exóticas invasoras, o que gera impactos para a manutenção de populações das espécies autóctones (LOPES, *et al.*, 2023). A invasão de espécies exóticas causa danos biológicos, estruturais e econômicos em diversos ecossistemas. São plantas que prejudicam as autóctones em distintos níveis, como no desequilíbrio das comunidades vegetais, deslocamento de nichos de espécies autóctones, alterações nos ciclos reprodutivos e ecológicos, redução de disponibilidade de nutrientes e alterações no ciclo hidrológico e no regime de incêndios (HERRERA VALE, 2022). Além disso, as plantas invasoras levam a prejuízo econômico pela redução da produtividade, aumento do custo de produção e colheita de culturas agrícolas (LIMA, *et al.*, 2014; PASTORE *et al.*, 2012; BARBIZAN SÜHS *et al.*, 2024).

A família botânica Poaceae inclui diversas espécies invasoras capazes de colonizar variadas formações vegetacionais no país. *A. donax* L., conhecida como cana-do-reino, cana-gigante e canavieira, é um exemplo proeminente, com origem possivelmente no Oriente Médio ou Ásia Menor (MONTEIRO *et al.*, 2015; SIMÕES, 2014).

A espécie é utilizada como cobertura de solo, biocompósito na construção civil, como combustível não fóssil, biochar e substrato para a produção de cogumelos comestíveis

(DOS SANTOS *et al.*, 2026; ITA *et al.*, 2018; MIGUEL *et al.*, 2021). A planta se reproduz assexuadamente por rebrota dos rizomas e por fragmentos do caule, em áreas descampadas e submetidas a roçagem mecânica, sendo essa uma característica adaptativa que permite rápida colonização e estabelecimento em novas áreas (CALAZANS *et al.*, 2023; MONTEIRO *et al.*, 2015; SIMÕES, 2014). Fisiologicamente, caracteriza-se por ter ciclo fotossintético C₃, ser eficiente no uso de água — apresentando taxas superiores à maioria das espécies C₃ típicas — e mostrar boa resistência à seca e à inundação, fatores que permitem a rápida expansão da espécie (MONTEIRO *et al.*, 2015; SÁNCHEZ *et al.*, 2016).

Em escala global, invasões biológicas são a segunda maior ameaça à biodiversidade vegetal (MYERS *et al.*, 2000). Espécies invasoras como *A. donax* competem por recursos, alterando a distribuição e fenologia de espécies nativas e degradando ecossistemas (LOPES *et al.*, 2023; ZENNI; ZILLER, 2011), causando prejuízos severos como a redução da disponibilidade hídrica local, a exaustão de nutrientes do solo e o sombreamento agressivo sobre a flora nativa de menor porte. A plasticidade ecológica de *A. donax*, a ausência de inimigos naturais e a formação de densos aglomerados facilitam sua expansão em diversas formações vegetais, confirmando projeções que indicam um aumento da sua área de ocorrência na região neotropical devido ao aquecimento global (LOPES *et al.*, 2023).

O conhecimento dos requisitos para o funcionamento biológico de *A. donax* é crucial para fundamentar estratégias eficientes de manejo e controle ambiental. Isso inclui compreender seu equilíbrio nutricional oportunista, sua elevada capacidade de acúmulo de biomassa e sua ampla tolerância a estresses bióticos e abióticos (LANNES, 2024; SÁNCHEZ *et al.*, 2016), fatores ecofisiológicos que explicam o sucesso adaptativo da espécie em detrimento da flora nativa do Cerrado, a qual apresenta estratégias de crescimento e alocação de recursos distintas (HOFMANN; FRANCO, 2003).

Estudar o crescimento e a análise do perfil nutricional de *A. donax* no Cerrado é fundamental para entender como essa espécie invasora utiliza os recursos do ecossistema e afeta as espécies nativas e o solo. Compreender as demandas nutricionais de *A. donax* pode fornecer insights valiosos para desenvolver estratégias de controle, prevenindo sua expansão e mitigando os danos à biodiversidade e à funcionalidade dos ecossistemas locais. Além disso, analisar seu perfil nutricional permite compreender melhor sua adaptabilidade a diferentes condições do Cerrado,

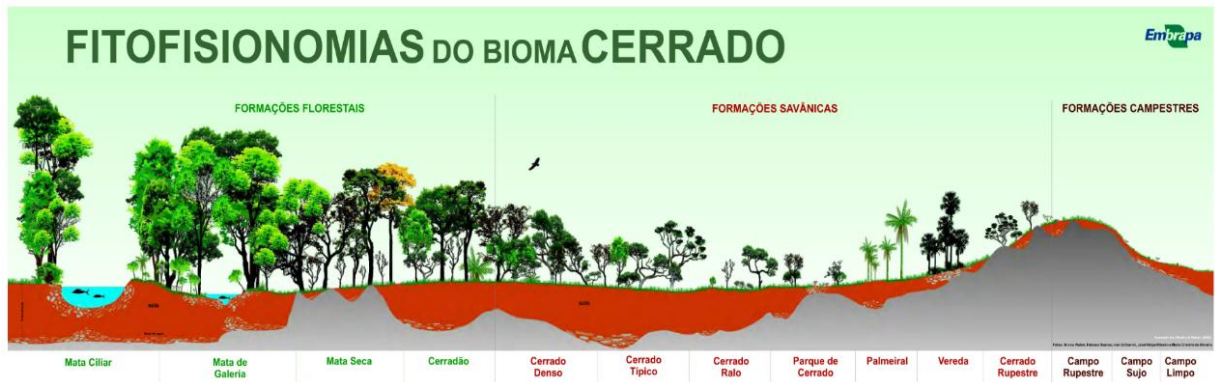
o que pode auxiliar na criação de práticas de manejo mais eficazes e economicamente viáveis para produtores rurais e gestores ambientais.

Para melhor compreensão dos desafios impostos por espécies invasoras como *A. donax* no bioma Cerrado, é necessário abordar alguns conceitos teóricos relevantes, incluindo a ecologia das invasões biológicas, os impactos específicos sobre o Cerrado e as estratégias de manejo.

1.1 Invasões Biológicas e Impactos no Cerrado

As invasões biológicas representam uma das principais ameaças à biodiversidade mundial, especialmente em regiões com alta riqueza de espécies e alto endemismo, como o Cerrado brasileiro (MYERS *et al.*, 2000). Considerado um dos hotspots de biodiversidade globais, o Cerrado abriga uma grande diversidade vegetal, contabilizando 12.829 espécies de plantas nativas, das quais 7893 são endêmicas do Brasil, e 4767 são estritamente endêmicas deste bioma, de acordo com o Flora e Funga do Brasil. O Cerrado possui uma grande diversidade de fitofisionomias (Figura 1). No entanto, o bioma tem sido alvo de intensa degradação ambiental, com grande parte de sua paisagem natural sendo substituída por áreas de cultivo, pastagens e infraestrutura urbana. Essa fragmentação e modificação do habitat deixam o Cerrado particularmente vulnerável às invasões de espécies exóticas, que se beneficiam dessas perturbações para se estabelecerem e se expandirem (VELAZCO *et al.*, 2019; ZENNI; ZILLER, 2011).

Figura 1: Representação esquemática do gradiente estrutural e do perfil ecológico das principais fitofisionomias do bioma Cerrado, evidenciando a transição contínua entre as formações campestres, savânicas e florestais.



Fonte: Portal EMBRAPA, 2025.

A fragmentação do Cerrado não apenas reduz o espaço vital das espécies nativas, mas também afeta a conectividade entre os remanescentes de vegetação, dificultando o fluxo gênico e a manutenção de populações saudáveis. Segundo dados alarmantes do Map Biomas (Figura 2), o Cerrado liderou o desmatamento no Brasil em 2023, com a supressão de 1.110.326 hectares de vegetação nativa, um aumento de 68% em relação ao ano anterior. Essa perda massiva, concentrada principalmente na região do MATOPIBA, não só diminui a área de habitat disponível, mas também cria bordas de fragmentos que facilitam a entrada de espécies exóticas invasoras. Nesse contexto, espécies invasoras conseguem competir de maneira agressiva com as plantas nativas por recursos limitados, como água, luz e nutrientes. Consequentemente, a introdução e expansão de espécies exóticas invasoras alteram a estrutura e a dinâmica dos ecossistemas locais, colocando em risco a integridade ecológica do bioma e a sobrevivência de inúmeras espécies nativas.

Figura 2: Panorama da supressão da vegetação nativa no bioma Cerrado (1985–2023): análise geoespacial do balanço de perda de cobertura vegetal e do estado de conservação regional, com destaque para a região do Matopiba.

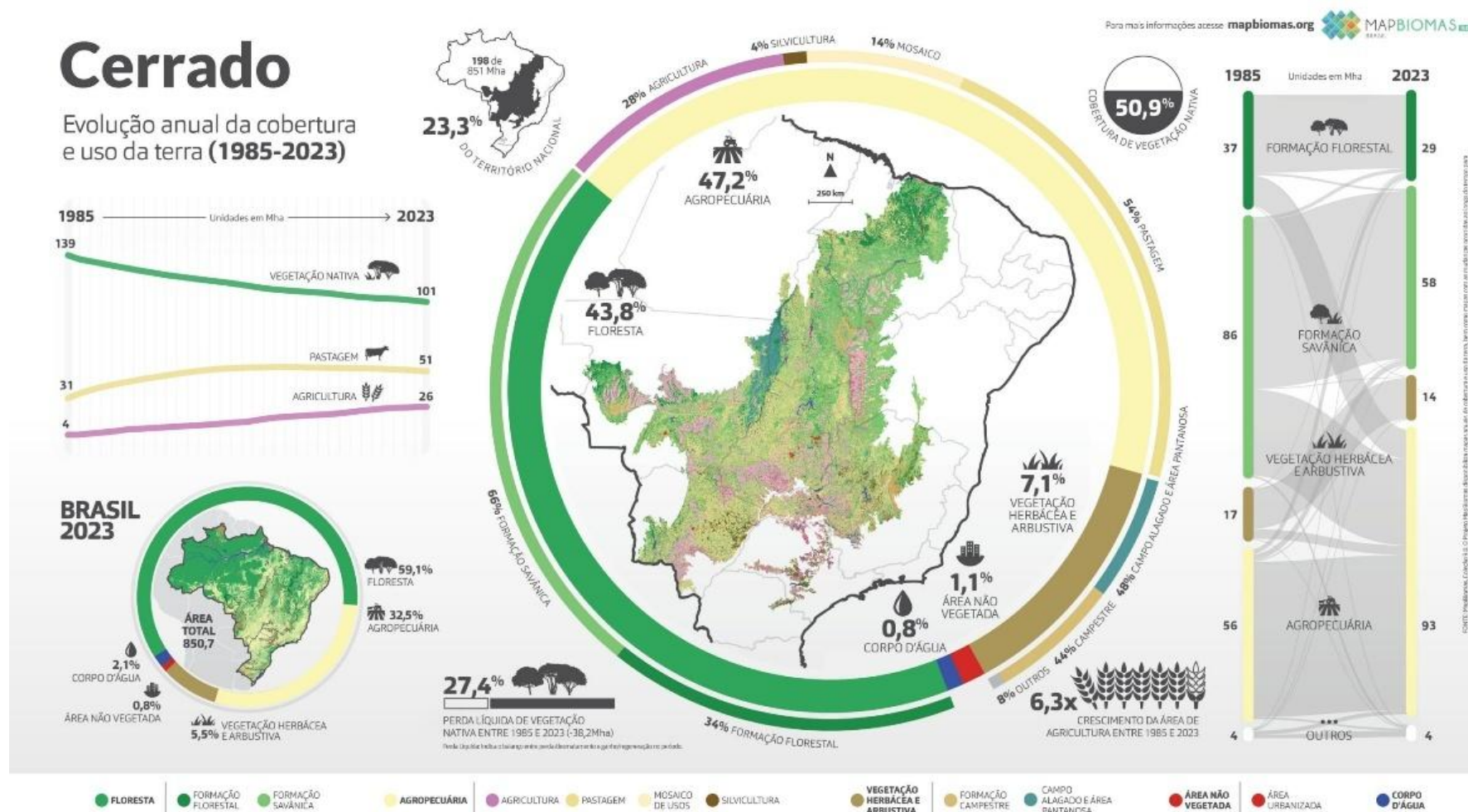


Foto: MapBiomias: <https://brasil.mapbiomas.org/infograficos/>. Acessado em 31/05/2026.

Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias de conservação e manejo voltadas para a proteção da biodiversidade do Cerrado e o controle das invasões biológicas, de modo a minimizar os danos causados ao ambiente e garantir a preservação de suas características ecológicas únicas (RIBEIRO *et al.*, 2008; VELAZCO *et al.*, 2019).

O sucesso do estabelecimento e a velocidade de expansão de *A. donax* em ecossistemas do Brasil Central estão intrinsecamente atrelados à sua plasticidade fenotípica e capacidade de ajuste fisiológico frente à marcada sazonalidade hídrica do bioma Cerrado. O Cerrado é caracterizado por duas estações bem delineadas: uma época chuvosa, onde a dinâmica de crescimento vegetal é maximizada, e uma estação seca prolongada, que impõe severas restrições biológicas devido ao decréscimo do potencial hídrico do solo e ao aumento da demanda evaporativa da atmosfera (FRANCO, 2002; BUCCI *et al.*, 2008). Para plantas invasoras perenes, a sobrevivência e a manutenção da dominância ecológica durante a estiagem dependem de tradeoffs eficientes entre a alocação de biomassa e a atividade metabólica (ZENNI; ZILLER, 2011).

Sob o estresse hídrico estacional, a arquitetura funcional de *A. donax* atua como um elemento crucial de tolerância. A literatura indica que a espécie emprega uma estratégia de captação profunda de água através de seu sistema radicular, mitigando os efeitos da seca superficial e sustentando taxas basais de hidratação e a manutenção de uma copa perene (LOPES *et al.*, 2023; NACKLEY, L.; HOUGH-SNEE, N.; KIM, S. H. 2017). Simultaneamente, a nutrição mineral exerce um papel modulador primário nesse cenário: a disponibilidade de macronutrientes essenciais, como o Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), bem como de micronutrientes, regula diretamente o investimento na maquinaria bioquímica foliar, a síntese de pigmentos fotossintéticos e a osmorregulação celular (SÁNCHEZ *et al.*, 2016; HEROD; MEDINA, 2024). Contudo, como os nutrientes no Cerrado concentram-se majoritariamente nas camadas superficiais do solo, a restrição de umidade na seca impõe uma barreira física à difusão e ao fluxo de massa desses íons até as raízes. Esse bloqueio estacional altera a composição elementar interna da planta, elevando a razão carbono/nitrogênio (C/N) e culminando em modificações estruturais, como o aumento da esclerofilia foliar (SARDANS *et al.*, 2013).

Superada a estiagem, o retorno das precipitações aciona o potencial de rebrota dessa espécie, um mecanismo ecofisiológico altamente agressivo. A rebrota rápida e

vigorosa no início do período chuvoso é alimentada pela remobilização imediata de grandes estoques de fotoassimilados e nutrientes minerais acumulados nos rizomas durante os períodos metabolicamente favoráveis (DECRUYENAERE; HOLT, 2005). Esse fluxo de recursos das estruturas subterrâneas para os meristemas apicais garante uma rápida expansão da área foliar e da biomassa epígea, conferindo a *A. donax* uma vantagem competitiva assimétrica sobre a vegetação nativa do Cerrado, que frequentemente apresenta taxas de crescimento e recuperação mais conservativas (CALAZANS *et al.*, 2023).

1.2. Ecologia e Comportamento de *A. donax*

A. donax é uma espécie exótica nativa da bacia do Mediterrâneo e do leste da Ásia, cuja introdução no Brasil remonta ao período colonial para fins de estabilização de encostas e uso artesanal (ZENNI; ZILLER, 2011). A espécie possui notáveis características biológicas e ecológicas que a tornam altamente adaptável e agressiva em ecossistemas invadidos. Sua reprodução assexuada, principalmente por meio de rizomas e fragmentos do caule, permite que a planta se espalhe rapidamente em áreas perturbadas, formando densos aglomerados que dificultam o crescimento de espécies nativas (COFFMAN; AMBROSE; RUNDEL, 2004). Essa característica contribui para que a espécie se consolide como uma espécie invasora amplamente difundida em nível global (Figura 3). Essa capacidade de reprodução vegetativa facilita a dispersão e o estabelecimento de *A. donax* em novas áreas, uma vez que fragmentos de rizomas e do caule podem regenerar plantas inteiras, mesmo após distúrbios como roçagem ou movimentação do solo.

No bioma Cerrado, esse potencial de colonização e expansão é potencializado por afinidades edáficas específicas. Embora o bioma seja classicamente caracterizado por solos ácidos, distróficos e com alta saturação por alumínio, a dinâmica de invasão de *A. donax* parece estar associada a áreas que sofreram modificações químicas em suas propriedades originais (SIMÕES *et al.*, 2013). A espécie demonstra uma preferência acentuada por solos antropizados que geralmente apresentam fertilidade superior ao padrão do Cerrado nativo. Ambientes

impactados frequentemente exibem esse perfil edáfico modificado com maiores teores de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) e baixa presença ou ausência de alumínio tóxico, atuando como verdadeiros refúgios nutricionais que facilitam o estabelecimento e o vigor vegetativo dessa invasora (SIMÕES *et al.*, 2013).

Além de sua capacidade de estabelecimento em solos antropizados, *A. donax* apresenta uma série de adaptações fisiológicas que ampliam seu potencial invasivo. Essa espécie apresenta altas taxas fotossintéticas, o que, apesar de possuir o ciclo fotossintético C₃, favorece seu rápido crescimento em condições de temperatura moderada e alta luminosidade, visto que a espécie exibe uma capacidade de saturação de luz atipicamente elevada para o metabolismo C₃. Estudos como os de Haworth *et al.* (2019) e Riggi *et al.* (2019) demonstram que ecotipos de *A. donax* podem apresentar taxas fotossintéticas elevadas, contribuindo para seu sucesso invasivo. A planta também é extremamente tolerante a condições ambientais adversas, incluindo períodos de seca e inundações, o que lhe confere uma grande plasticidade ecológica. Essa tolerância é um fator crucial para sua sobrevivência e expansão em diversas regiões do território brasileiro (Figura 4), especialmente em áreas do Cerrado e no Distrito Federal (Figura 5), onde as variações sazonais de disponibilidade de água no solo e na umidade do ar são acentuadas.

Figura 3: Distribuição geográfica global e status de invasão de *A. donax* L. pelo mundo. Os pontos delimitam as coordenadas geográficas e os registros oficiais compilados pelo Center for Agriculture and Bioscience International. Os pontos em vermelho/laranja indicam áreas onde a espécie está amplamente distribuída, estabelecida ou classificada como invasora; os pontos em amarelo indicam registros de ocorrência pontual, distribuição restrita ou status de presença incerto. Escala cartográfica global adaptada.

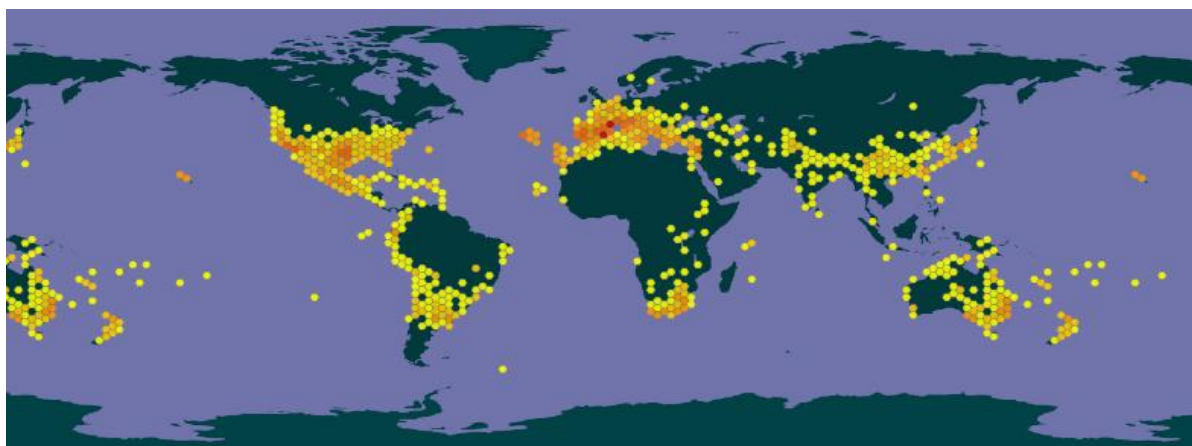
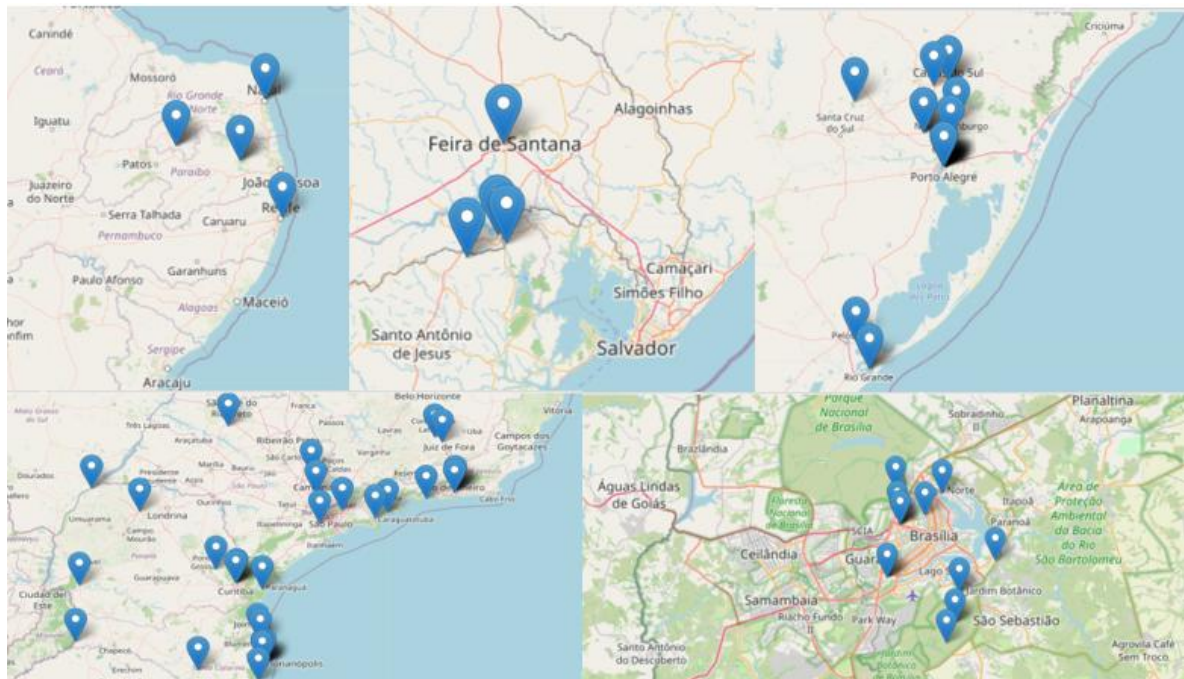


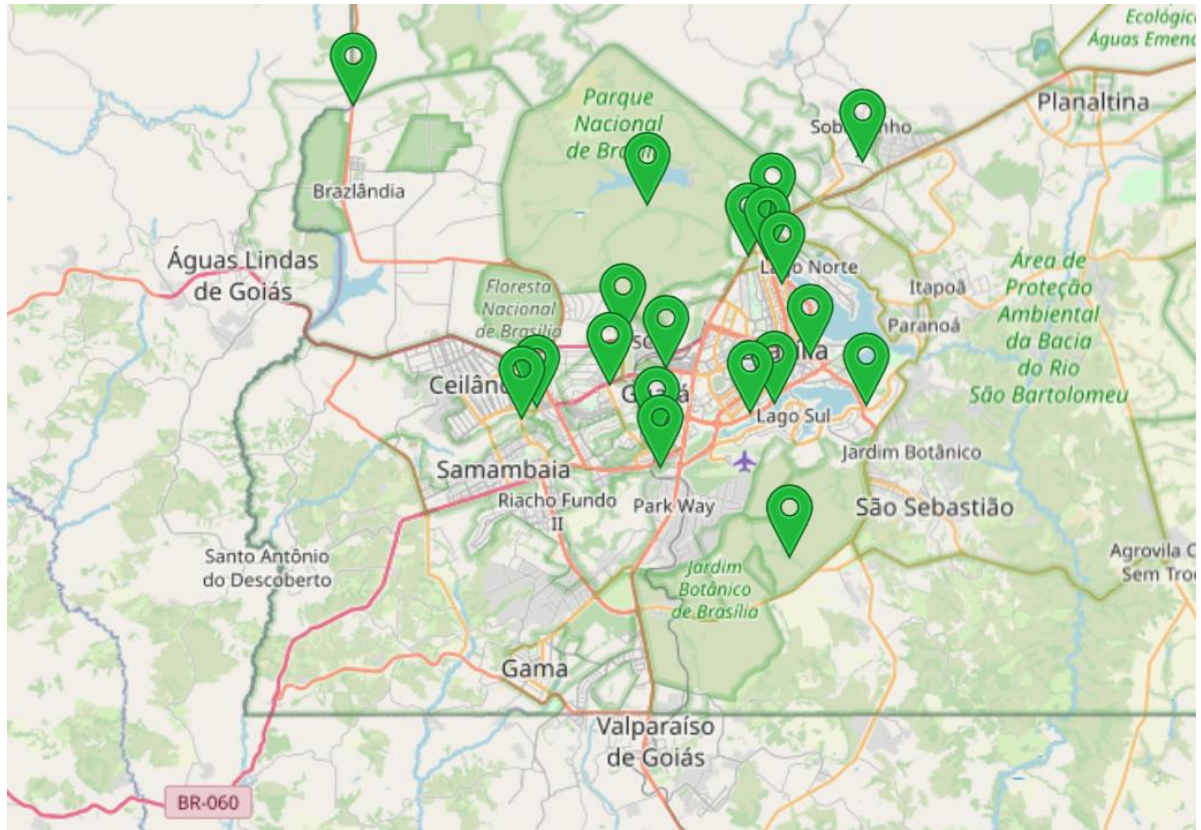
Foto: GBIF.org. OpenStreetMap contributors, © OpenMapTiles: gbif.org/occurrence/map?q=A.%20donax&occurrence_status=present.

Figura 4: Registros de ocorrência de *A. donax* L. no Brasil a partir de recortes regionais detalhados. Os painéis apresentam as ampliações das unidades federativas com ocorrências catalogadas (regiões Sul, Sudeste e Distrito Federal), organizadas de forma a otimizar a visualização dos pontos amostrais e contornar a sobreposição dos dados em escala nacional.



Fonte: Adaptado de speciesLink (2026): <https://specieslink.net/search/>.

Figura 5: Mapeamento dos registros oficiais de coleta e ocorrência de *A. donax* L. no Distrito Federal. O detalhamento geoespacial apresenta a distribuição dos pontos amostrais catalogados e indexados na plataforma speciesLink, evidenciando as áreas de amostragem botânica e o histórico de documentação da espécie dentro do território da capital federal.



Fonte: Adaptado de speciesLink (2026): <https://specieslink.net/search/>.

A combinação dessas características faz de *A. donax* uma espécie invasora altamente competitiva, capaz de colonizar e dominar ecossistemas abertos e áreas perturbadas. Sua presença altera a composição e a estrutura das comunidades vegetais locais, prejudicando as plantas nativas ao competir pelos mesmos recursos, como água e nutrientes, e impactando negativamente a biodiversidade do Cerrado (MIGUEL *et al.*, 2021).

1.3. Competição e Impacto Nutricional de Espécies Invasoras no Cerrado.

A invasão de *A. donax* no Cerrado representa uma séria ameaça à biodiversidade nativa. Ao formar densas colônias, *A. donax* monopoliza recursos essenciais como nutrientes, água e espaço, impactando diretamente a sobrevivência das plantas nativas e desequilibrando a dinâmica natural do ecossistema. Essa competição, principal mecanismo de dominância da espécie, altera a estrutura e a composição do solo (FERREIRA; FRANCO, 2026). Evidências científicas também confirmam a atividade alelopática de *A. donax*, com a liberação de compostos químicos inibidores do crescimento de plantas nativas, como alcalóides e flavonóides (GIROTTTO *et al.*, 2021). Embora ainda seja necessário aprofundar as pesquisas para explorar completamente o potencial fitoquímico e o papel da alelopatia na ecologia de invasão, esses fatores combinados resultam no empobrecimento do solo, dificultando o estabelecimento de espécies nativas e comprometendo a fertilidade (SILVA, 2019).

Além disso, a invasão de *A. donax* altera significativamente o microbioma do solo, um fator crítico para a saúde ecossistêmica. Estudos científicos indicam que espécies invasoras, de modo geral, promovem alterações na composição e diversidade das comunidades microbianas, desequilibrando os ciclos biogeoquímicos de nutrientes e modificando a estrutura do solo (BUSTAMANTE *et al.*, 2012). No caso de *A. donax*, a extensa rede de rizomas e a alta produção de biomassa podem levar a mudanças drásticas na disponibilidade de nutrientes e na atividade microbiana (GIROTTTO, 2021). Esse conjunto de impactos dificulta o estabelecimento de espécies nativas, comprometendo a resiliência do ecossistema e desafiando os esforços de restauração. A alta demanda nutricional da invasora cria um ciclo de degradação que limita a recuperação e conservação das comunidades vegetais nativas, contribuindo para a perda de biodiversidade e funcionalidade do bioma.

1.4. Crescimento e Adaptação de Plantas no Cerrado

O balanço nutricional é um fator crucial para o crescimento de plantas em solos pobres como os do Cerrado, caracterizados pela baixa disponibilidade de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, e pela alta presença de óxidos de ferro e alumínio (RIBEIRO *et al.*, 2008). Esses elementos limitantes representam um

desafio significativo para a vegetação autóctone, que desenvolveu adaptações específicas para prosperar nessas condições adversas (BORGHETTI *et al.* 2023). Embora muitas invasoras sobrevivam em condições adversas, *A. donax* apresenta um desempenho superior em solos de elevada fertilidade, frequentemente associados a áreas perturbadas com acúmulo de nutrientes (QUINN; HOLT, 2007; SIMÕES *et al.*, 2013). Nessas condições de boa qualidade química, a espécie otimiza a assimilação de nutrientes para a síntese fotossintética, elevando sua eficiência no uso da água e do nitrogênio, estabelecendo-se rapidamente e superando a vegetação nativa na competição por recursos (Figura 6) (HAWORTH, *et al.*, 2019; QUINN; HOLT, 2007).

Figura 6: Acompanhamento do crescimento da *A. donax* no Cerrado, durante a estação chuvosa. Foto 1: Planta de *A. donax* em fase inicial de rebrota, 10 dias após o corte, mostrando a altura inicial da planta, cerca de 10 cm, e o surgimento de novos brotos. Foto 2: Rebrota *A. donax* 30 dias após o corte, cerca de 2 m, demonstrando o crescimento da planta em altura em relação à foto anterior. Foto 3: Rebrota de *A. donax* 63 dias após o corte, cerca de 4m, evidenciando o crescimento contínuo da planta em altura ao longo do período de acompanhamento.



Foto: própria

A análise nutricional de *A. donax* pode fornecer novas evidências e um avanço do entendimento sobre como essa espécie consegue não apenas sobreviver, mas

prosperar em áreas com aporte nutricional elevado, como as que frequentemente ocorrem em áreas antropizadas ou perturbadas no Cerrado. O balanço nutricional de *A. donax* permite avaliar como esta espécie utiliza os nutrientes disponíveis e como essa capacidade impacta diretamente nas plantas nativas, uma vez que a competição por nutrientes em locais de alta disponibilidade deve se intensificar (POLITI *et al.*, 2013). Ao explorar as estratégias de absorção e uso de nutrientes por *A. donax* será possível identificar os mecanismos fisiológicos que lhe conferem uma vantagem competitiva nesses solos modificados, assim como os impactos que essa invasão causa ao captar intensamente recursos críticos para as espécies locais (LIMA *et al.*, 2014).

1.5. Estratégias de Manejo e Controle de *Arundo donax*

O controle de *A. donax*, uma espécie invasora com alta capacidade de adaptação e rápida propagação, exige estratégias de manejo eficazes. O controle mecânico, como a remoção física e o corte, atua principalmente na parte aérea da planta para reduzir sua presença em áreas invadidas. No entanto, a alta capacidade de rebrota da espécie, a partir de seus rizomas e fragmentos do caule, limita a eficácia a longo prazo dessas práticas. O controle mecânico, por remover a parte aérea da planta, frequentemente deixa os rizomas intactos no solo. Estes rizomas desempenham um papel primordial na reprodução vegetativa da espécie, contribuindo para sua persistência no ambiente. Além disso, conforme destacado por (CALAZANS *et al.*, 2023), a dispersão de fragmentos do caule durante o controle mecânico pode resultar no surgimento de novas plantas, expandindo a infestação e dificultando ainda mais o controle. Essa fragmentação pode levar à colonização de novas áreas e alterar a composição da comunidade vegetal. A necessidade de mão de obra intensiva e os custos elevados associados ao controle mecânico também representam desafios significativos.

Diante desses desafios, o manejo integrado emerge como uma abordagem mais promissora. A combinação de diferentes técnicas, como o controle mecânico, químico e biológico, pode aumentar a eficácia do controle e minimizar os impactos

ambientais. O manejo integrado permite explorar as diferentes técnicas, otimizando os resultados. Além disso, o monitoramento contínuo das áreas tratadas é fundamental para avaliar a eficácia das estratégias de controle e ajustar as ações conforme necessário.

O manejo nutricional e cultural surge como uma estratégia complementar promissora, envolvendo ações que limitem a disponibilidade de recursos no solo ou que promovam o sombreamento biológico por meio do adensamento da vegetação nativa para restringir o crescimento vigoroso de *A. donax*. No entanto, a seleção de estratégias de restauração ecológica eficazes requer estudos detalhados, pois qualquer intervenção no habitat precisa ser cuidadosamente planejada para evitar impactos negativos nas espécies nativas e no ecossistema local (CALAZANS, *et al.*, 2023).

Dada a complexidade do controle de *A. donax*, abordagens integradas têm sido cada vez mais recomendadas. Estas combinam métodos mecânicos, biológicos e, em alguns casos, químicos, para maximizar a eficácia no combate à expansão da espécie. A integração dessas estratégias permite atacar diferentes pontos do ciclo de vida de *A. donax*, promovendo uma redução mais efetiva e sustentável de sua população em longo prazo. No entanto, a implementação de estratégias integradas exige planejamento e monitoramento contínuos para assegurar que o controle seja efetivo e que os impactos ambientais sejam minimizados (SIMÕES, *et al.*, 2013).

A escolha da estratégia de manejo deve considerar fatores locais, como a extensão da área invadida, a presença de espécies nativas e as condições ambientais, visando reduzir o impacto de *A. donax* sem prejudicar o ecossistema do Cerrado.

Em suma, a invasão de *A. donax* no Cerrado representa uma ameaça significativa à biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos desse bioma. A alta capacidade de adaptação, reprodução vegetativa eficiente e tolerância a diferentes condições ambientais tornam essa espécie invasora um desafio para a conservação da flora e fauna nativas. A compreensão dos mecanismos de invasão, das adaptações fisiológicas da espécie e dos impactos sobre os ecossistemas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo e controle.

Neste estudo, buscamos aprofundar o conhecimento sobre os requerimentos nutricionais de *A. donax* no Cerrado, com o objetivo de contribuir para o

desenvolvimento de ferramentas mais eficientes para combater a invasão e promover a recuperação dos ecossistemas degradados.

2. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A pesquisa sobre o crescimento e análise nutricional de *A. donax*, uma espécie invasora em áreas do Cerrado, é essencial para a compreensão e o manejo de um dos problemas ecológicos mais urgentes enfrentados pelo bioma. O Cerrado, reconhecido como um hotspot de biodiversidade global (MYERS, *et al.* 2000), abriga uma variedade única de espécies, mas sua flora e fauna nativas estão cada vez mais ameaçadas pela introdução de espécies exóticas invasoras, como *A. donax*. A compreensão dos padrões de crescimento e das exigências nutricionais dessa planta, assim como da velocidade do crescimento após a remoção da parte aérea em áreas de Cerrado invadidas é crucial para avaliar os danos ambientais que ela causa ao competir por recursos naturais limitados com as plantas autóctones (RIBEIRO; WALTER, 2008), e fornece informações essenciais para o desenvolvimento de estratégias de controle que protejam as espécies nativas e contribuam para a resiliência dos ecossistemas locais. Neste contexto, o estudo oferece informações valiosas para a conservação da biodiversidade no Cerrado.

Os resultados também são de grande importância para o manejo de ecossistemas. Com base nesses dados, é possível identificar práticas de manejo ambiental mais assertivas, visando conter a expansão de *A. donax* e manter o equilíbrio ecológico. Essa pesquisa pode até fomentar o desenvolvimento de técnicas inovadoras de manejo de espécies invasoras, que podem ser aplicadas a outros biomas tropicais, ampliando o alcance das soluções desenvolvidas.

Outro aspecto relevante é o potencial uso sustentável de *A. donax*. Compreender seu perfil nutricional pode abrir novas possibilidades para o aproveitamento da espécie, como na recuperação de solos degradados ou em outras aplicações que ofereçam benefícios ambientais e econômicos. Dessa forma, o estudo propicia uma abordagem mais ampla, que explora soluções sustentáveis e economicamente viáveis para lidar com a planta.

A pesquisa também traz contribuições significativas para o campo científico ao abordar uma questão global: as invasões biológicas. As invasões não apenas impactam a biodiversidade, mas também geram altos custos econômicos com controle e restauração de áreas afetadas (PIMENTEL; ZUNIGA; MORRISON, 2005). As percepções obtidas podem beneficiar não apenas o Cerrado, mas também outros ecossistemas que enfrentam desafios semelhantes, ampliando o entendimento global sobre a ecologia e o controle de espécies invasoras.

Por fim, os dados gerados oferecem uma base científica importante para orientar políticas públicas e decisões de gestão ambiental, promovendo ações informadas e eficazes para o controle de invasoras. Além de contribuir para a conservação da biodiversidade e para o manejo sustentável, os resultados também podem ajudar a reduzir custos econômicos associados à restauração de áreas impactadas e ao controle de invasoras em regiões agrícolas.

Em resumo, essa pesquisa fortalece a base de conhecimento sobre as invasões biológicas em ecossistemas tropicais, cujos resultados podem contribuir para o desenvolvimento de ferramentas práticas e científicas para a conservação, o manejo sustentável de ecossistemas e a formulação de políticas ambientais, promovendo, assim, ações integradas e duradouras para a proteção do Cerrado.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar, por meio de experimento controlado e estudos desenvolvidos no campo, o crescimento e o conteúdo nutricional das plantas de *A. donax* L. em resposta à sazonalidade climática do Cerrado e à disponibilidade de nutrientes.

3.2 Objetivos específicos

a) Conduzir experimento semicontrolado em casa de vegetação para avaliar o status nutricional de fragmentos do caule (propágulos) e sua resposta à aplicação de nutrientes.

b) Avaliar o crescimento inicial e os padrões de distribuição de nutrientes minerais das rebrotas nas duas estações climáticas preponderantes no Cerrado, chuvosa e seca.

4. HIPÓTESES

a) *A. donax* responderá à aplicação de macronutrientes (NPK) e ao meio de cultura Murashige e Skoog (MS) durante a fase vegetativa com um aumento significativo na biomassa e uma maior incorporação de nutrientes, especialmente nas folhas, por apresentarem intensa atividade metabólica.

b) O potencial de rebrota e crescimento inicial será maior na estação chuvosa, quando a disponibilidade hídrica não é um fator limitante e as temperaturas devem ser mais favoráveis para o seu estabelecimento no ambiente.

c) O desenvolvimento de um sistema radicular profundo garante à *A. donax* acesso às camadas do solo que permanecem úmidas durante a estação seca, permitindo a manutenção do crescimento e da produção de folhas ao longo de todo o ano.

d) A concentração de nutrientes nas camadas superficiais do solo do Cerrado reduz a absorção de nitrogênio durante a época seca, o que diminui a incorporação desse elemento na planta, eleva a razão carbono/nitrogênio e resulta em folhas com maior esclerofilia (maior massa foliar específica).

CAPÍTULO I

**EFEITOS DA APLICAÇÃO DE NUTRIENTES NO CRESCIMENTO,
DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA E BALANÇO NUTRICIONAL DE *A.*
*DONAX***

1. INTRODUÇÃO

A rápida disseminação de gramíneas exóticas pelas savanas neotropicais representa uma crescente ameaça à diversidade de plantas nativas e ao funcionamento dos ecossistemas (HOFFMANN; JACKSON, 2000; PIVELLO *et al.*, 1999; ZENNI; ZILLER, 2011). Segundo a Global Invasive Species Database (GISD, 2025), essas invasões perturbam processos ecológicos essenciais, como regimes de fogo, ciclagem de nutrientes e dinâmica da comunidade vegetal. Entre as gramíneas perenes com alto potencial invasor no Brasil Central, destaca-se a *A. donax*. Reconhecida como uma das 100 piores espécies invasoras do mundo (LOWE *et al.*, 2000), sua disseminação tem se intensificado nas últimas duas décadas, principalmente devido à falta de medidas de controle eficazes (CALAZANS, *et al.*, 2023; JIMÉNES-RUÍZ *et al.*, 2021).

Esta espécie se reproduz assexuadamente por rizomas e fragmentos de caule, colonizando rapidamente áreas abertas e roçadas mecanicamente (CALAZANS, 2020; SIMÕES, 2014). Essa reprodução eficaz, aliada a altas taxas fotossintéticas, uso eficiente de água e resistência à seca e inundação, permite a rápida expansão da espécie (MELO *et al.*, 2023; MIGUEL *et al.*, 2021; SÁNCHEZ *et al.*, 2016).

A invasibilidade e o sucesso ecológico desta espécie em áreas do Cerrado dependem da sua habilidade em utilizar os recursos disponíveis, sendo a nutrição um dos fatores primários que regulam o investimento na maquinaria bioquímica de fixação de carbono (ZENNI; ZILLER, 2011; ZILLER, 2015). Historicamente, os solos do Cerrado são caracterizados pela elevada acidez e reduzida disponibilidade de nutrientes, especialmente o fósforo (HARIDASAN, 2008; RIBEIRO *et al.*, 2008), o que atua como um filtro ambiental rigoroso para o estabelecimento de muitas espécies exóticas. Contudo, *A. donax* demonstra uma plasticidade notável, formando densos aglomerados especialmente em áreas degradadas pela ação antropogênica, onde a deposição de resíduos ou o escoamento superficial de fertilizantes altera a fertilidade original do solo (SIMÕES *et al.* 2014; FERREIRA; FRANCO, 2026).

A. donax responde fortemente à suplementação adicional de nutrientes. Como ocorre com muitas espécies invasoras de alto desempenho, *A. donax* apresenta uma produção de biomassa significativamente maior em resposta ao aumento da

disponibilidade de nitrogênio (NACLEY *et al.*, 2017; QUINN; HOLT, 2007; THO *et al.*, 2017). Estudos indicam que plantas submetidas à adição de nitrogênio e fósforo apresentam incremento significativo de biomassa e uma maior relação parte aérea:raiz e caule:folha, sinalizando que a oferta de recursos favorece a alocação para o crescimento vertical e aumenta a competitividade por luz (HEROD; MARTINA, 2024). Adicionalmente, a aplicação conjunta de N, P e K tem demonstrado efeitos sinérgicos que potencializam não apenas o crescimento, mas também a resiliência da planta a estresses abióticos, consolidando sua dominância em áreas eutrofizadas (D'ANTONIO; VITOUSEK, 1992; POUDEL, *et al.*, 2025). Além disso, *A. donax* absorve e armazena nutrientes em níveis que excedem suas necessidades metabólicas imediatas, estocando-os em seus rizomas, garantindo a rebrota e a manutenção da biomassa mesmo em períodos de escassez subsequente ou após distúrbios (LAMBERT *et al.*, 2014). Com isso, essa dominância é amplificada por um feedback positivo com o fogo: a elevada biomassa da espécie aumenta a intensidade dos incêndios, eliminando competidores nativos e favorecendo a rebrota célere dos seus rizomas (D'ANTONIO; VITOUSEK, 1992).

O entendimento das exigências nutricionais de *A. donax* é fundamental para elaborar estratégias de manejo que contenham sua dispersão em ambientes urbanos. Em fragmentos urbanos de Cerrado, onde o aporte de nutrientes antropogênicos favorece espécies invasoras, esse controle é vital para mitigar perdas de biodiversidade e preservar a funcionalidade dos ecossistemas nativos. Por outro lado, a espécie é considerada uma cultura com alto potencial bioenergético devido à sua elevada produtividade de biomassa em diferentes condições edáficas (CALAZANS *et al.*, 2023; POUDEL *et al.*, 2025). Nesse sentido, o elevado Uso Eficiente de Nutrientes (NUE) da *A. donax* destaca-se como um traço funcional ambivalente: enquanto confere uma vantagem competitiva sobre a flora nativa mesmo em solos com alta disponibilidade de recursos, também reduz os custos de produção e a necessidade de insumos externos em plantios dedicados à bioenergia (CEOTTO *et al.*, 2021; COSENTINO, *et al.*, 2014). Essa alta eficiência permite que a espécie mantenha uma produtividade elevada mesmo sob condições de baixa disponibilidade hídrica e nutricional, consolidando seu potencial como biomassa energética de baixo impacto financeiro (CEOTTO *et al.*, 2021; COSENTINO, *et al.*, 2014).

Informações sobre os padrões de crescimento e as respostas de absorção de nutrientes à disponibilidade de recursos são, portanto, essenciais para assegurar o

desenvolvimento de práticas de manejo mais eficazes e economicamente viáveis na utilização desta espécie como matéria-prima para bioenergia (CALAZANS, *et al.*, 2023). Neste contexto, esse capítulo teve como objetivo avaliar como diferentes regimes nutricionais modulam a capacidade fotossintética, respiração foliar, crescimento e a distribuição de biomassa e nutrientes em *A. donax*. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando propágulos obtidos a partir de fragmentos de caule.

Dessa forma, as hipóteses testadas foram:

a) *A. donax* responde à aplicação de macronutrientes (NPK) e ao meio de cultura Murashige e Skoog (MS) durante a fase vegetativa com um aumento significativo na biomassa epígea e maior incorporação de minerais nas folhas devido à sua intensa atividade metabólica.

2. METODOLOGIA

2.1 Experimento em Casa de Vegetação

Os segmentos de caule com raízes de no mínimo 2 cm foram transferidos gradativamente para a casa de vegetação e transplantados para vasos de 3 L. O substrato utilizado consistiu em uma mistura de substrato comercial Bioplant e solo de subsuperfície do Cerrado, na proporção de 2:1 (v/v). O componente comercial Bioplant tem na sua composição turfa de Sphagnum, fibra de coco, casca de pinheiro e de arroz, vermiculita; NPK e micronutrientes; pH 6,0–6,5. Essa carga nutricional residual do substrato comercial serviu como aporte basal uniforme para o estabelecimento inicial de todos os propágulos, antecedendo a aplicação dos tratamentos específicos.

O transplante dos propágulos ocorreu entre o 13º e o 30º dia após o início do experimento, conforme as raízes atingiam o comprimento mínimo estabelecido de 2 cm. Essa janela temporal decorreu do enraizamento heterogêneo natural da espécie.

Para homogeneizar o material experimental e anular qualquer efeito do histórico cronológico de transplante, todas as plantas foram mantidas em casa de vegetação para aclimação por um período de 30 dias após o transplante do último indivíduo. Passado esse intervalo de estabilização, as plantas foram completamente aleatorizadas nas bancadas, submetidas à biometria inicial (medição de altura e contagem do número de folhas) e, a partir deste marco, deu-se início ao experimento de fertilização, que teve a duração de 63 dias. O passo a passo detalhado do procedimento experimental é ilustrado na Figura 7.

Para a caracterização do ambiente de cultivo, o monitoramento microclimático focou nas variáveis de temperatura e intensidade luminosa ao longo dos 63 dias de experimento. A temperatura foi registrada duas vezes por semana ($n=18$) por meio de um termômetro de máxima e mínima, modelo capela (Incoterm, Modelo 10407-02), instalado na lateral das bancadas na casa de vegetação e reiniciado após cada leitura. Durante o período experimental, registrou-se temperatura mínima média de $11,8 \pm 0,51$ °C e máxima de $39,1 \pm 1,14$ °C (média $\pm$ erro padrão).

A intensidade luminosa foi aferida uma vez por semana ($n=9$) utilizando o sensor integrado de um smartphone Samsung S20 FE, operado por meio do software PPFD Meter - Grow Light Meter (Home Studio Inc., disponível na Google Play Store, acessado em janeiro de 2025). Para assegurar a precisão dos dados, foi realizado um protocolo de calibração comparando as leituras do smartphone com um Medidor de Quantum PAR (Marca Apogee Instruments, Modelo MQ-200), confirmando-se que a variação entre os dispositivos era mínima e que o sensor do celular apresentava alta acurácia para os fins deste estudo.

As medições de luz foram realizadas semanalmente, totalizando nove aferições ao longo dos 63 dias de experimento. O monitoramento ocorreu em dois ambientes: externo, a pleno sol, e interno, no interior da casa de vegetação. No ambiente interno, as leituras foram efetuadas à altura do dossel das plantas, em três pontos distintos das bancadas experimentais, assegurando a representatividade da radiação incidente sobre as unidades experimentais. A densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) externa média foi de $1391,9 \pm 84,4$ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (média $\pm$ erro padrão), enquanto a interna foi de $189,2 \pm 38,9$ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, resultando em uma transmitância média de 13,6% (aproximadamente 86% de sombreamento). Todas as medições foram padronizadas para ocorrerem entre 10h e 12h, visando minimizar interferências da variação do ângulo zenital do sol.

Figura 7: Fluxograma Metodológico do Experimento de Crescimento de *A. donax* Submetida a Diferentes Regimes Nutricionais em Casa de Vegetação.



2.2 Caracterização do Substrato

Antes do início do experimento, o substrato foi submetido à análise laboratorial seguindo as metodologias da EMBRAPA para caracterização química e física. Os resultados revelaram um substrato com elevado índice de fertilidade e equilíbrio nutricional, conforme a tabela 1.

Tabela 1: Caracterização físico-química do substrato final (Bioplante e subsolo 2:1) utilizados no Experimento Casa de Vegetação e do subsolo do Cerrado (EEB).

Atributo Químico	Unidade	Substrato (Bioplante + Subsolo do Cerrado 2:1)	Subsolo do Cerrado (EEB)
		Valor Encontrado	Valor Encontrado
pH (CaCl ₂)	-	5,5	5,2
Cálcio (Ca)	cmol _c /dm ³	8	1,5
Magnésio (Mg)	cmol _c /dm ³	2,3	0,5
Ca + Mg	cmol _c /dm ³	10,3	2,0
Alumínio (Al)	cmol _c /dm	0	0,00
Acidez Potencial (H + Al)	cmol _c /dm ³	2,8	1,3
CTC (T)	cmol _c /dm ³	13,6	3,50
Fósforo (P - Mehlich I)	mg/dm ³	60	2,0
Potássio (K)	mg/dm ³	210	64
Sódio (Na)	mg/dm ³	2	1
Enxofre (S)	mg/dm ³	20	6
Boro (B)	mg/dm ³	0,22	0,16
Cobre (Cu)	mg/dm ³	1,5	0,6
Ferro (Fe)	mg/dm ³	128	30
Manganês (Mn)	mg/dm ³	33	5
Zinco (Zn)	mg/dm ³	5	0,9
Matéria Orgânica	g/kg	28	14,0
N	%	0,14	0,14
Al (M) Saturação por	%	0	0
Bases (V) Saturação por	%	80	62
Ca/Mg	.	3,5	3,0
Ca/CTC	%	58,8	42,9
Mg/CTC	%	16,9	14,3

(H+Al)/CTC	%	3,9	37,1
K/CTC	%	0,14	4,7

A escolha de um substrato com elevada fertilidade inicial ($V = 80\%$) foi deliberada, visando simular as condições de áreas antropizadas e margens de corpos d'água onde a espécie comumente se estabelece. O objetivo foi testar a resposta da *A. donax* a um aporte extra de nutrientes (consumo de luxo) em cenários de alta disponibilidade mineral, avaliando assim o seu potencial máximo de crescimento.

2.3 Delineamento Experimental e Tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o fatorial 2×2 , inteiramente casualizado (DIC), com dez repetições para cada tratamento. Foram avaliados dois fatores com dois níveis cada:

Fator I: Fertilizante Mineral Solúvel (NPK)

- ❖ Nível 1: Sem aplicação de NPK (0)
- ❖ Nível 2: Com aplicação de NPK (1)

Fator II: Solução Nutritiva de Meio de Cultura (MS)

- ❖ Nível 1: Sem aplicação de MS (0)
- ❖ Nível 2: Com aplicação de MS (1)

A combinação desses fatores e seus respectivos níveis estabeleceu um arranjo fatorial que resultou em quatro tratamentos experimentais, detalhados na Tabela 2.

Tabela 2: Delineamento experimental e descrição dos tratamentos nutricionais aplicados a *A. donax* L. em casa de vegetação.

Tratamento	Fator I: NPK	Fator II: Solução MS	Descrição
Controle (C)	Ausente	Ausente	Substrato sem adição de nutrientes.
Meio MS	Ausente	Presente	Aplicação da Solução Nutritiva MS (Meio Murashige e Skoog).
NPK	Presente	Ausente	Aplicação de Fertilizante Mineral NPK.
NPK + MS	Presente	Presente	Combinação da aplicação de NPK e Solução Nutritiva MS.

Para o tratamento Meio MS, utilizou-se a Solução Nutritiva MS (Meio Murashige e Skoog), cuja composição detalhada de macro e micronutrientes, vitaminas e outros componentes está descrita na Tabela 3. A inclusão deste meio justifica-se por sua formulação quimicamente definida e altamente enriquecida, permitindo avaliar a plasticidade ecológica e as estratégias fisiológicas de alocação de biomassa de *A. donax* sob um aporte nutricional completo. O uso do Meio MS visa, especificamente, testar o comportamento da espécie diante de um pulso de micronutrientes e vitaminas essenciais, bem como identificar possíveis efeitos sinérgicos ou moduladores na absorção e uso dos macronutrientes básicos.

Tabela 3: Composição de macro e micronutrientes, vitaminas e outros componentes presentes no Meio MS 5519 (MS 5519, Sigma-Aldrich®), com suas respectivas concentrações em mg/L.

Componente	Concentração/un	Componente	Concentração/un
Nitrato de Amônio	1.650,0mg/L	myo-Inositol	100,0 mg/L
Ácido Bórico	6,20 mg/L	Ácido Nicotínico	0,50 mg/L
Cloreto de Cálcio (Anidro)	332,20 mg/L	Iodeto de Potássio	830 µg/L
Cloreto de Cobalto Hexahidratado	25 µg/L	Nitrato de Potássio	1.900,0 mg/L
Sulfato de Cobre Pentahidratado	25 µg/L	Fosfato Monobásico de Potássio	170,0 mg/L
EDTA Dissódico Dihidratado	37,26 mg/L	Cloridrato de Piridoxina	0,50 mg/L
Sulfato Ferroso Heptahidratado	27,80 mg/L	Molibdato de Sódio Dihidratado	25 µg/L
Glicina	2,0 mg/L	Cloridrato de Tiamina	0,10 mg/L
Sulfato de Magnésio (Anidro)	180,70 mg/L	Sulfato de Zinco Heptahidratado	8,60 mg/L
Sulfato de Manganês Monohidratado	16,90 mg/L		

Para o suprimento mineral nos tratamentos NPK e NPK + MS, utilizou-se o fertilizante comercial granular (Marca Vitaplan). Este insumo foi submetido à análise laboratorial para a determinação dos teores reais de macronutrientes e micronutrientes, visando maior precisão no balanço nutricional do experimento. Os teores encontrados de Nitrogênio (N), Fósforo (P_2O_5) e Potássio (K_2O), bem como de micronutrientes e suas respectivas frações de solubilidade, estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização química do fertilizante mineral sólido empregado no experimento: teores de macro e micronutrientes.

Componente	Símbolo	Teor (%)
Nitrogênio (total)	N	19,5%
Fósforo	P_2O_5 (CNA+H ₂ O)	8,8%
Potássio	K ₂ O	13,6%
Cobre (total)	Cu	0,01%
Ferro (total)	Fe	0,59%
Manganês (total)	Mn	0,03%
Zinco (total)	Zn	0,01%
Boro (total)	B	0,01%
Cobalto (total)	Co	0,01%

2.4 Protocolo de Aplicação dos Tratamentos Nutricionais

As plantas foram mantidas em fase de aclimação e estabelecimento no substrato por trinta dias. Concluída essa etapa, iniciou-se a aplicação dos tratamentos nutricionais, momento em que as plantas já se encontravam fixadas ao substrato e com emissão de folhas. Portanto, em estágio de autossuficiência autotrófica e com aparato fotossintético plenamente funcional para o suporte ao crescimento (Figura 7).

Solução Nutritiva MS: A solução foi preparada utilizando-se o meio basal Murashige & Skoog (MS 5519, Sigma-Aldrich®) na concentração de 4,4 g/L (8,8 g dissolvidos em 2 litros de água Milli-Q®) com o pH ajustado para 5,7. A solução foi aplicada a cada 7 dias, na dosagem de 100 ml por vaso.

Fertilizante NPK: Aplicação semanal de 100 ml de solução aquosa de fertilizante mineral por vaso (preparada de forma a fornecer o equivalente a 1 g do fertilizante granular por planta; composição detalhada na Tabela 4).

Fertilizante NPK+MS: Aplicação semanal de 200 ml de calda total por vaso, divididos em duas aplicações sequenciais imediatas: 100 ml da solução de meio de cultura MS (4,4 g/L) seguidos de 100 ml da solução aquosa de NPK (1 g/vaso).

Controle: Sem adição de nutrientes.

Para subsidiar a interpretação das respostas fisiológicas e correlacionar os efeitos isolados ou sinérgicos dos tratamentos, destaca-se que as cargas de macronutrientes diferiram substancialmente em magnitude e composição entre as fontes utilizadas. A aplicação semanal de 1 g de fertilizante NPK forneceu um aporte massivo e concentrado de macronutrientes primários, correspondendo a 195 mg de Nitrogênio total (N), 88 mg de Fósforo (P_2O_5) e 136 mg de Potássio (K_2O) por vaso. Em contrapartida, a dosagem semanal de 100 ml de Meio MS forneceu uma carga significativamente mais baixa de macronutrientes — aproximadamente 38,4 mg de Nitrogênio total (fornecido via NO_3^- e NH_4^+), Fósforo 3,9 mg e 44,2 Potássio (K^+) —, porém introduziu no sistema uma matriz quimicamente balanceada de micronutrientes essenciais em forma disponível (como Ferro quelatado via Fe-EDTA, Manganês, Zinco, Boro e Cobre) e vitaminas. Dessa forma, o tratamento NPK caracterizou-se por um suprimento concentrado de macronutrientes, enquanto o tratamento Meio MS atuou como um aporte moderado associado a um balanço completo de microelementos, servindo essa distinção quantitativa como base analítica para as discussões sobre a eficiência de uso de recursos e estratégias de alocação de biomassa em *A. donax*.

As plantas foram irrigadas a cada 2 dias. O volume de água adicionado em cada irrigação foi ajustado de acordo com a capacidade de retenção de água do substrato, previamente determinada através de pesagens do substrato. Essa prática garantiu que as plantas estivessem sempre hidratadas, sem o risco de encharcamento ou dessecação.

2.5 Duração do Experimento e Avaliações

O experimento teve duração total de 63 dias após o início dos tratamentos, com avaliações do crescimento da parte aérea, número de folhas e perfilhos e sobrevivência realizadas a cada 7 dias. O crescimento em comprimento da parte aérea foi mensurado em todos os perfilhos de cada planta, da base ao ápice, utilizando uma trena com precisão de 0,5 mm.

Ao final do experimento (63 dias), a taxa de sobrevivência em todas as unidades amostrais foi de 100%. Todas as plantas (10 por tratamento) foram submetidas à amostragem destrutiva para quantificação da biomassa e coleta de parâmetros morfológicos. Foi feito o registro do comprimento de todos os perfilhos, contagem do número total de perfilhos e folhas, visando posterior cálculo da área foliar. A determinação da área foliar total foi realizada por meio do método gravimétrico a partir de discos foliares de área conhecida. Para cada unidade amostral, foram extraídos discos foliares utilizando-se um vazador metálico com 10mm de diâmetro. Os discos e o restante das lâminas foliares da respectiva planta foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até atingirem massa constante e pesados separadamente em balança analítica. A área foliar total de cada indivíduo foi calculada correlacionando-se proporcionalmente a massa seca total das folhas com a razão entre a massa seca e a área dos discos. O material vegetal foi segmentado e separado por estrutura: raízes, caules (perfilhos) e folhas. As raízes foram lavadas cuidadosamente em água corrente para completa remoção dos resíduos do substrato.

Cada fração obtida foi acondicionada em sacos de papel kraft identificados e encaminhada para secagem em estufa de ventilação forçada, a 70 °C, durante 72 horas. Após esse período, a massa individual das estruturas foi determinada em balança analítica com precisão de quatro casas decimais (0,0001 g), permitindo o cálculo da massa seca de cada componente da biomassa total. Além disso, os seguintes atributos foram calculados:

Área foliar específica (AFE): $AFE = \text{área foliar} / \text{massa seca foliar}$.

Razão de área foliar (RAF), conforme (HOFFMANN; FRANCO, 2003).

$RAF = \text{Área foliar total} / \text{Massa seca total da planta}$.

2.6 Análise Nutricional do Material Vegetal

O procedimento para determinação da composição nutricional iniciou-se com a seleção aleatória de três das 10 plantas por tratamento que foram coletadas no final do experimento. As raízes, caules e folhas de cada planta foram analisadas individualmente, garantindo que as amostras representassem as concentrações de nutrientes em cada planta. O material seco das três plantas selecionadas foi pulverizado em moinho de bolas para garantir a máxima homogeneidade e uma granulometria fina, indispensável para a precisão da análise química. Subamostras de 5 gramas do material seco e homogeneizado de cada parte da planta (Folhas, caules e raízes) foram então enviadas ao Laboratório Terra Análises, localizado em Goiânia, Goiás, para determinar as concentrações de macro e micronutrientes nas amostras.

A análise química objetivou quantificar os seguintes elementos: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu) e Zinco (Zn). Para a extração do Nitrogênio Total, utilizou-se a digestão sulfúrica seguida pela destilação e titulação pelo método de Kjeldahl. Para a extração dos demais elementos, utilizou-se o método de digestão nítrico-perclórica, conforme metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). As concentrações de Fósforo (P) foram determinadas pela formação de complexo fósforomolibdico de cor azul, obtido após redução do molibdato com ácido ascórbico, com determinação por espectrofotometria UV-Vis (EMBRAPA, 2017). O Potássio (K) foi quantificado por fotometria de chama, enquanto o Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e os micronutrientes catiônicos — Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu) e Zinco (Zn) — foram determinados por espectrometria de absorção atômica. No caso específico do Cálcio e Magnésio, adicionou-se solução de lantânio às amostras para a supressão de interferências de fosfatos e alumínio.

3. RESULTADOS

3.1 Crescimento Vegetativo e Perfilhamento

A suplementação nutricional exerceu influência significativa no desenvolvimento vegetativo das plantas, evidenciando o papel da fertilização no crescimento inicial. Quanto ao Comprimento do Perfilho Dominante, a fertilização mineral influenciou significativamente essa variável, com o fator NPK apresentando impacto no comprimento do caule ($p = 0,0397$; Figura 8, A). De acordo com o teste de Tukey, os tratamentos que receberam adubação nitrogenada (NPK e NPK+MS) apresentaram médias superiores ao controle, contudo, não foram observadas diferenças estatísticas entre si. Isso indica que a adição isolada de NPK foi suficiente para promover o crescimento vertical, não havendo ganho adicional significativo com a suplementação do meio MS para esta variável específica.

Em relação ao Número Total de Perfilhos (NTP), a análise de variância (ANOVA) revelou um efeito principal estatisticamente significativo para o fator NPK ($p = 0,027$; Figura 8, B), enquanto o fator MS e a interação NPK x MS não exerceram influências significativas ($p > 0,05$). De acordo com o teste de médias (Tukey; Figura 8, B), o fornecimento de macronutrientes via NPK isolado foi o tratamento que efetivamente promoveu o maior perfilhamento em comparação ao grupo controle ($p = 0,039$), demonstrando que a disponibilidade de N, P e K atua como o principal gatilho fisiológico para a ativação de gemas basais no *A. donax*.

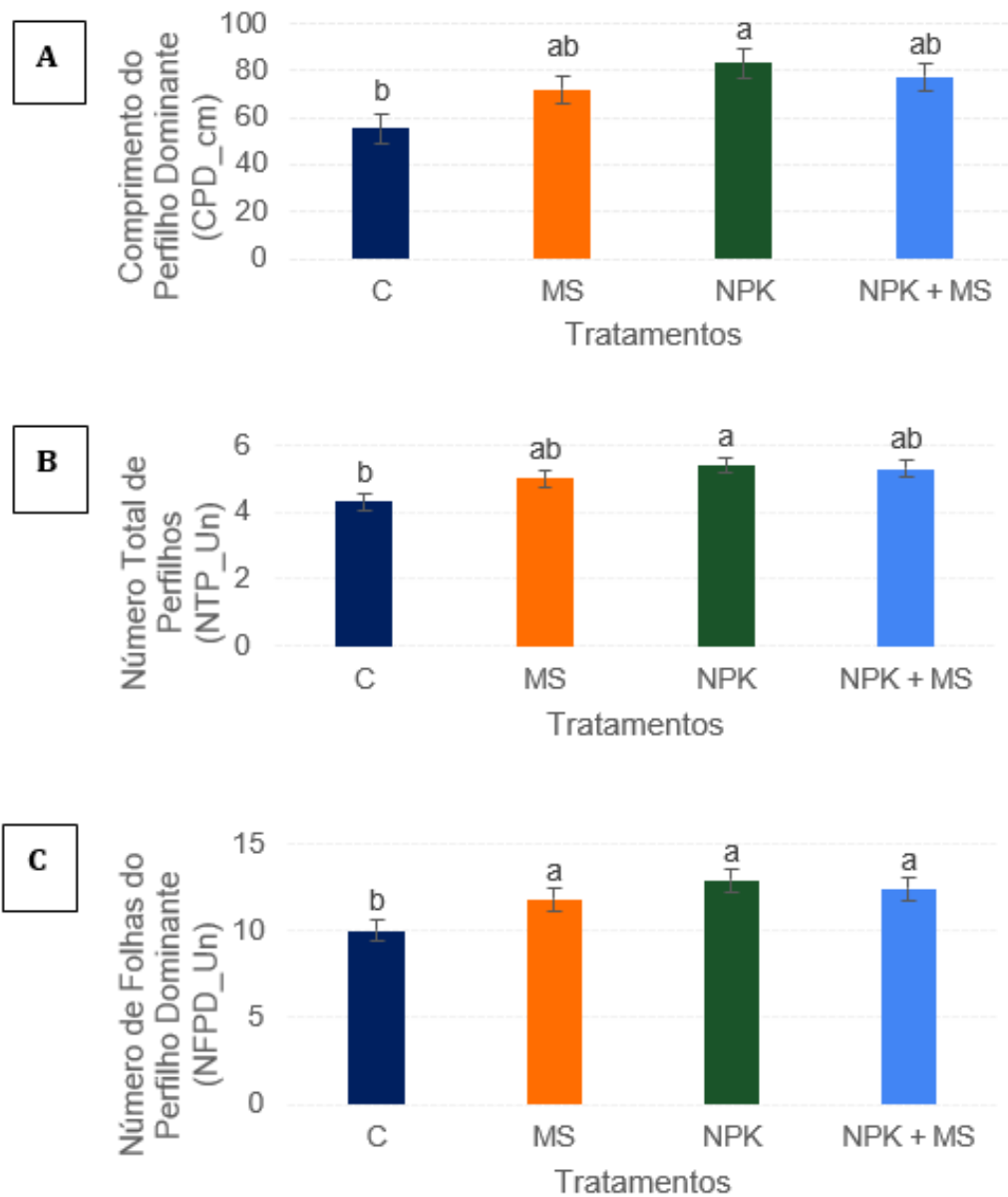
No que diz respeito ao Número Total de Folhas do Perfilho Dominante (NFPD), este foi significativamente influenciado pelos fatores NPK, MS e pela interação entre ambos ($p = 0,0400$; Figura 8, C). A análise de médias revelou que a adição de fertilizante mineral (NPK), tanto de forma isolada quanto combinada ao meio MS, promoveu um aumento expressivo no NFPD em relação ao grupo controle. Embora o tratamento NPK+MS tenha apresentado a maior média absoluta de folhas, não houve diferença estatística em relação ao tratamento NPK isolado, indicando que a adubação mineral básica já é suficiente para atingir o patamar superior de desenvolvimento foliar da espécie.

Essa proeminência da adubação via NPK sobre o meio MS, mesmo com este último contendo micronutrientes e vitaminas, decorre da magnitude de aporte de macronutrientes essenciais. Enquanto o tratamento mineral comercial forneceu

macronutrientes em níveis expressivos de macroescala via formulação centesimal (como a porcentagem de N, P e K), o meio MS (Murashige & Skoog) atua em uma escala milimolar (expressa em mg/L), sendo formulado primordialmente para o suporte celular em laboratório. Portanto, a carga absoluta de N, P e K disponível no tratamento mineral superou o limite requerido pela planta, tornando o gasto extra do meio MS desnecessário para essas variáveis de crescimento.

Os resultados consolidados do crescimento linear e dos parâmetros de perfilhamento aos 63 dias (Figura 8, A), evidenciam a superioridade dos tratamentos fertilizados em relação ao controle. Embora os tratamentos MS e NPK+MS tenham apresentado valores numéricos elevados, a ausência de diferenciação estatística para esses grupos sugere que o incremento no número de colmos é dependente primordialmente da adubação mineral, sem ganho adicional significativo pela suplementação com o meio MS para esta variável.

Figura 8: Parâmetros de crescimento e desenvolvimento de *A. donax* L. aos 63 dias após o transplântio sob diferentes tratamentos nutricionais. (A) Comprimento do Perfilho Dominante (CPD); (B) Número Total de Perfilhos (NTP); (C) Número de Folhas do Perfilho Dominante (NFPD). As barras representam a média de 10 repetições e as barras verticais representam o erro padrão da média. Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada variável, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



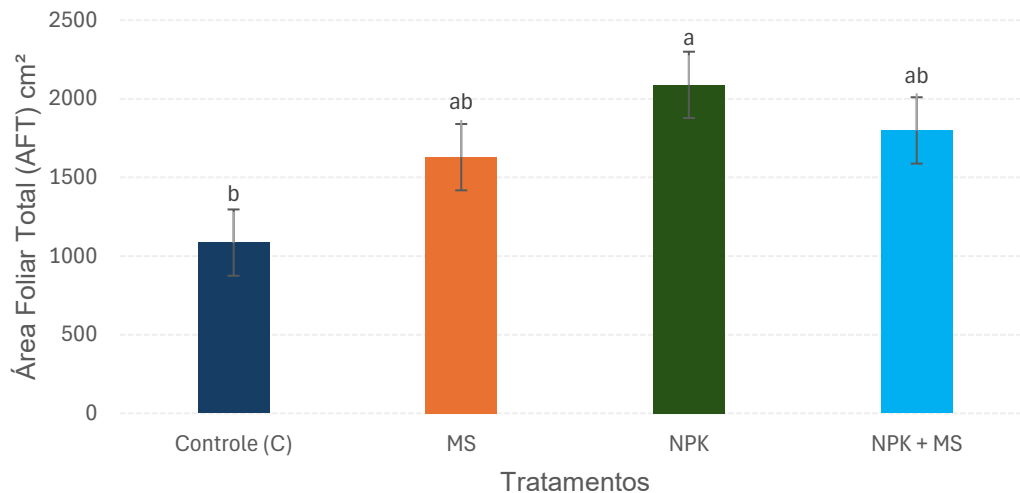
3.2 Dinâmica da Área Foliar

A Área Foliar Total (AFT) foi analisada por meio da ANOVA Aligned Rank Transform (ART), técnica aplicada devido à natureza da distribuição dos dados. A análise revelou que a expansão da superfície fotossintética foi significativamente influenciada pela nutrição, com o fator NPK apresentando um efeito principal altamente significativo ($p = 0,0012$). Além disso, a interação entre os fatores (NPK x MS) foi estatisticamente significativa ($p = 0,0023$; Tabela Suplementar 1). O desdobramento da interação, por meio de testes de contrastes sobre postos (Tabela Suplementar 2), demonstrou que o tratamento NPK isolado promoveu o incremento mais expressivo na área foliar em relação ao Controle (Figura 9). A significância da interação indica que a resposta da planta ao fertilizante mineral é modulada pela presença do meio MS. Contudo, a aplicação conjunta (MS + NPK) não resultou em ganho adicional de área foliar, apresentando ao contrário, uma tendência de decréscimo. Esse comportamento indica que a adubação mineral via NPK foi o fator determinante preponderante para a expansão foliar do *A. donax*.

Em relação à Área Foliar Específica (AFE), a ANOVA Aligned Rank Transform (ART) indicou que não houve efeito principal significativo dos fatores NPK ou MS sobre a AFE. De forma similar, a interação entre os fatores (NPK x MS) não apresentou significância estatística ($p > 0,05$; Tabela Suplementar 1). O teste de contrastes sobre postos não detectou diferenças significativas entre quaisquer dos quatro tratamentos avaliados (Tabela Suplementar 2), indicando que a disponibilidade de nutrientes não alterou a área foliar específica das folhas no período avaliado.

Quanto à Razão de Área Foliar (RAF), a análise de variância indicou que não houve efeitos principais significativos dos fatores isolados (NPK e MS) sobre a RAF. Embora tenha sido observada uma interação estatística entre os fatores ($p = 0,0139$; Tabela Suplementar 1), a magnitude das variações não foi suficiente para que o teste de médias discriminasse grupos distintos (Tabela Suplementar 2). Dessa forma, observa-se que, nas condições deste experimento, a Razão de Área Foliar do *A. donax* tendeu à estabilidade, não sendo expressivamente alterada pelos diferentes tratamentos nutricionais avaliados.

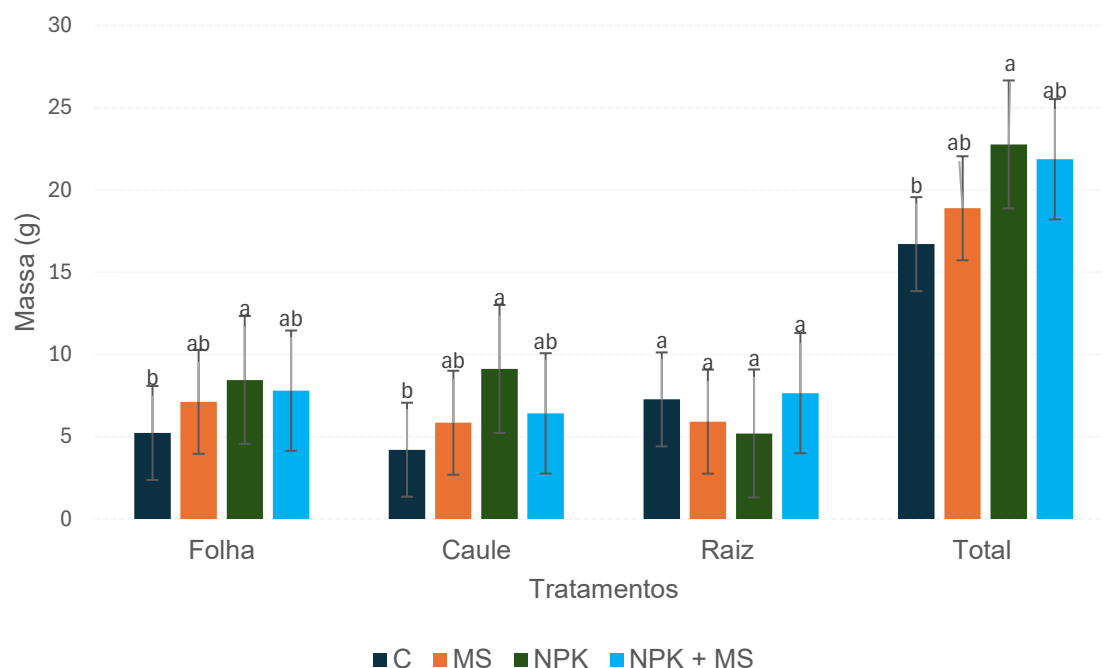
Figura 9: Área Foliar Total (AFT) de *A. donax* L. aos 63 dias sob diferentes tratamentos nutricionais. As barras representam a média de 10 repetições e as linhas verticais o erro padrão da média. Dados analisados via ANOVA Aligned Rank Transform (ART); médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Transformação de Postos Alinhados para Contrastes (*Aligned Rank Transform for Contrasts* — ART-C) ($p < 0,05$).



3.3 Acúmulo e Partição de Biomassa

Os dados obtidos concentraram-se na avaliação dos efeitos dos tratamentos NPK (fertilizante mineral), MS (Meio Murashige & Skoog) e da interação NPK+MS sobre as variáveis de Biomassa Total, Biomassa da Folha, Biomassa do Caule e Biomassa da Raiz. A Figura 10 ilustra a partição da biomassa total entre os órgãos, evidenciando que o investimento energético decorrente da fertilização foi direcionado prioritariamente para o incremento da parte aérea, alterando a proporção de alocação de biomassa sem reduzir o peso absoluto do sistema radicular.

Figura 10: Partição de biomassa seca (g) de *A. donax* L. aos 63 dias após o transplantio sob diferentes tratamentos nutricionais. As cores representam a contribuição relativa de cada órgão (raiz, caule e folha) na composição da barra empilhada da biomassa total. Médias da biomassa total seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As frações correspondentes à biomassa radicular não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$).



No que diz respeito à massa seca foliar a análise revelou efeito altamente significativo para o fator NPK ($p < 0,001$) e significativo para a interação MS+NPK ($p = 0,001$; Tabela Suplementar 1), sendo que todos os tratamentos suplementados apresentaram biomassa foliar significativamente superior ao grupo Controle (Tabela Suplementar 2; Figura 10).

Em relação à Biomassa do Caule, apenas o NPK exerceu influência estatisticamente significativa ($p = 0,0021$; Tabela Suplementar 1), e o teste de comparações múltiplas indicou que apenas o grupo NPK apresentou resultado significativamente superior ao Controle (Tabela Suplementar 2; Figura 10). Por outro lado, a Biomassa da Raiz não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos avaliados; na ANOVA, nenhum dos fatores ou a interação mostrou efeito estatístico relevante ($p > 0,05$; Tabela Suplementar 1), o que foi confirmado pelo teste de Tukey (Figura 10; Tabela Suplementar 2).

Quanto à massa seca total, a suplementação nutricional teve impacto significativo; segundo a ANOVA, o fator NPK foi estatisticamente relevante ($p = 0,0069$; Tabela Suplementar 1) e o teste de Tukey indicou superioridade do tratamento NPK em relação ao Controle (Figura 10; Tabela Suplementar 2).

4. COMPOSIÇÃO MINERAL E ALOCAÇÃO DE NUTRIENTES

A análise nutricional revelou que a suplementação combinada (NPK + MS) foi a mais eficaz para elevar as concentrações foliares de Nitrogênio (N), atingindo 27,0 mg/g nas folhas, o que representa um aumento expressivo em relação ao controle (Tabela 5). Esse incremento no teor resultou, consequentemente, no maior estoque absoluto de N foliar (por componente foliar; Tabela 6), confirmando a sinergia entre a fertilização mineral e o meio MS. Quanto aos micronutrientes, essa mesma combinação promoveu as maiores concentrações de Manganês (Mn) no tecido foliar e no colmo (Tabela 5). Em termos de estoque total, o tratamento NPK + MS potencializou o acúmulo de Mn, sendo esse reflexo da alta concentração alcançada nas folhas, que atingiu 0,14 mg/g (Tabela 5), valor superior ao dos demais tratamentos. Já a concentração de Potássio (K) no colmo, o uso isolado do meio MS promoveu um incremento significativo (Tabela 5).

Os estoques de N, K, Mg e Mn nas folhas foram significativamente afetados pelos tratamentos de fertilização (Tabela 6). O fator NPK foi o principal motor para o acúmulo do estoque de Nitrogênio (Tabela 6 e Tabela Suplementar 3), enquanto o fator MS apresentou uma tendência de resposta na concentração deste nutriente (Tabela Suplementar 3; $p = 0,065$). Os maiores estoques de K foram obtidos nos tratamentos NPK e NPK + MS (Tabela 6). Para a concentração de Magnésio (Mg), observou-se uma interação significativa entre os fatores (Tabela Suplementar 3; $p = 0,04$), com reflexo nos estoques acumulados (Tabela 6), evidenciando uma tendência ao decréscimo na aplicação conjunta (MS + NPK). Os tratamentos NPK e NPK+MS resultaram, de forma isolada ou combinada, em um acúmulo expressivo no estoque de Mn nas folhas (Tabela 6), impulsionado pelo forte efeito isolado do fator NPK observado na folha (Tabela Suplementar 3; $p < 0,001$).

O colmo, por sua vez, atuou predominantemente como órgão de transporte e armazenamento intermediário. Diferentemente das folhas, a concentração de N nesta estrutura não foi influenciada significativamente pelos tratamentos (Tabela Suplementar 3; $p > 0,05$). No entanto, o fator MS foi determinante para o incremento das concentrações de Potássio e Magnésio no colmo (Tabela Suplementar 3), o que refletiu de maneira positiva nos valores absolutos de seus respectivos estoques (Tabela 6). Adicionalmente, conforme observado na Tabela 6, os estoques desses nutrientes no colmo também demonstram uma resposta expressiva ao suprimento de NPK, impulsionada pelo aumento da biomassa total promovido por este fator. A interação NPK + MS favoreceu significativamente a concentração de Enxofre (S) no colmo (Tabela 4), sendo este o nutriente com a resposta mais distinta à combinação dos fertilizantes. Para o Zinco (Zn), embora a análise de variância tenha indicado uma interação significativa para a concentração no colmo (Tabela Suplementar 3), com o teor sendo estimulado pelo tratamento MS em comparação ao controle (Tabela 5), essa oscilação pontual no tecido do colmo não se refletiu em alterações estatisticamente significativas sobre os estoques de Zinco acumulado neste órgão ou planta (Tabela 6).

No sistema radicular, a raiz consolidou-se como o principal órgão de retenção de Ferro (Fe), atingindo uma concentração de 4,14 mg/g no grupo controle (Tabela 5). Um ponto de destaque foi a influência do fator MS na concentração de Cálcio (Ca) radicular (Tabela Suplementar 3), que apresentou uma média de 4,33 mg/g (Tabela 5) e resultou em um estoque de 30,7 mg/planta de Ca nas raízes (Tabela 6). A concentração radicular dos outros elementos e os respectivos estoques não foram afetados pelos tratamentos nutricionais (Tabela Suplementar 3 e Tabela 6).

Nas plantas-controle (não fertilizadas), a maior alocação de N, Ca e Mg ocorreu nas folhas, seguidas pelas raízes (Tabela 6). A alocação de P foi equivalente entre ambos os órgãos, ao passo que o K acumulou-se preferencialmente nas raízes, seguidas pelas folhas. Quanto aos micronutrientes, o sistema radicular foi o principal órgão de acúmulo, retendo, com base nos dados de estoque total (Tabela 6), aproximadamente 93% de Fe, 53% de Cu e 45% de Mn. Proporcionalmente, a fertilização aumentou o estoque de nutrientes nas folhas. Em comparação ao controle, a aplicação de NPK elevou os teores de todos os macro e micronutrientes avaliados, exceto o S, que não apresentou variação. O meio MS também promoveu efeito positivo na maioria dos nutrientes, com exceção do Ca. Contudo, a aplicação

simultânea de MS e NPK resultou em menor eficiência no acúmulo foliar para a maioria dos nutrientes, indicando um efeito antagônico na interação entre os tratamentos.

Tabela 5: Teores de macronutrientes e micronutrientes (mg/g) em diferentes órgãos de *A. donax* L. sob diferentes tratamentos nutricionais aos 63 dias. Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna, dentro de cada órgão (Folha, Caule ou Raiz), diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para um mesmo órgão, a ausência de letras indica efeito não significativo dos tratamentos sobre o elemento ($p > 0,05$).

Órgão	Trat.	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
FOLHA	C	12,3 b	1,87	23,6 b	4,8	1,60 b	3,87	0,01	0,55	0,05 b	0,02
	MS	19,7 ab	1,67	25,7 ab	4,67	2,10 ab	3,57	0,01	0,47	0,04 b	0,02
	NPK	20,7 ab	1,47	27,7 a	5,13	2,30 a	3,63	0,01	0,54	0,10 a	0,03
	NPK+MS	27,0 a	1,47	26,7 ab	4,1	1,73 b	2,97	0,01	0,45	0,14 a	0,02
CAULE	C	9,33	1,47	16,4 b	2	1,00 b	1,73 b	0,01	0,12	0,02 b	0,03 b
	MS	9,67	1,33	20,7 a	2,27	1,50 a	1,87 b	0,01	0,16	0,02 b	0,04 a
	NPK	10,3	1,07	19,2 ab	2,17	1,37 ab	1,60 b	0,01	0,15	0,05 ab	0,03 b
	NPK+MS	13	0,93	19,6 ab	2,27	1,53 a	2,63 a	0,01	0,22	0,08 a	0,04 a
RAIZ	C	6,67	1,07	15,5	2,47 b	0,67	0,9	0,01	4,14	0,03	0,01
	MS	10,7	0,87	9,2	4,33 a	1,33	1	0,01	3,21	0,03	0,02
	NPK	9,33	0,87	12	3,23 ab	0,93	1,9	0,01	4,11	0,04	0,02
	NPK+MS	10,7	1,2	14,1	4,30 a	1,33	1,07	0,01	4,2	0,05	0,01

Tabela 6: Conteúdo total acumulado (estoque) de macro e micronutrientes (g) nos diferentes órgãos e no total da planta de *A. donax* L. submetida a diferentes regimes de adubação aos 63 dias.

Estrutura	Trat.	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
FOLHA	C	66,1 b	9,56	127,7 b	25,2	8,56 b	20,7	0,04	2,98	0,26 b	0,09
	MS	141,5 ab	12,8	194,4 ab	34,6	15,8 ab	26,5	0,06	3,36	0,30 b	0,16
	NPK	165,5 ab	11,8	227,4 a	41,6	18,9 a	29,8	0,07	4,31	0,79 a	0,22
	NPK+MS	240,7 a	13,4	236,6 a	35,2	15,1 ab	26,8	0,08	4,12	1,13 a	0,18
CAULE	C	40,9	6,41	71,6 b	8,74	4,36 b	7,55 b	0,03	0,55	0,10	0,11
	MS	44,4	6,15	95,3 a	10,4	6,94 a	8,72 b	0,05	0,73	0,09	0,16
	NPK	57,9	6,00	108,3 a	11,9	7,59 a	8,84 b	0,05	0,81	0,25	0,18
	NPK+MS	84,1	6,02	119,6 a	13,8	9,24 a	15,2 a	0,06	1,41	0,49	0,24
RAIZ	C	56,6	9,55	169,6	21,9 b	6,18	7,72	0,08	44,7	0,30	0,12
	MS	73,7	6,05	65,6	30,7 a	9,47	7,26	0,07	24,0	0,23	0,14
	NPK	66,1	6,53	85,4	25,0 ab	7,39	15,3	0,07	31,3	0,28	0,15
	NPK+MS	71,7	8,80	94,9	29,5 a	9,16	7,34	0,07	30,3	0,37	0,10
TOTAL (Planta)	C	163,6 b	25,52	368,9 b	55,84	19,10 b	35,97	0,15	48,23	0,66	0,32
	MS	259,6 ab	24,98	355,3 b	75,70	32,21 a	42,48	0,18	28,09	0,62	0,46
	NPK	289,5 ab	24,33	421,1 ab	78,50	33,88 a	53,94	0,19	36,42	1,32	0,55
	NPK+MS	396,5 a	28,22	451,1 a	78,50	33,50 a	49,34	0,21	35,83	1,99	0,52

Legenda: Trat.: Tratamentos; C: Controle; MS: Meio nutritivo Murashige & Skoog; NPK: Adubação mineral comercial (N-P-K). Elementos químicos: N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S: Enxofre; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco.

Notas: 1. Os valores representam a média (n=3) do acúmulo por órgão e por planta.

2. Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna, dentro de cada órgão (Folha, Caule ou Raiz), diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3. Para um mesmo órgão, a ausência de letras indica efeito não significativo dos tratamentos sobre o elemento ($p > 0,05$). 4. Os valores da linha "TOTAL" representam a soma das médias dos estoques dos órgãos; para estes valores consolidados, não foi aplicada análise estatística de comparação de médias.

5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no experimento em casa de vegetação revelam que a *A. donax* possui uma estratégia de crescimento nitidamente "oportunista", caracterizada pela rápida conversão de recursos externos em biomassa aérea. A suplementação com NPK atuou como o principal motor desse desenvolvimento, promovendo aumentos significativos na biomassa total, foliar e do caule ($p < 0,01$; Tabela Suplementar 1). No entanto, a ausência de resposta estatística na biomassa radicular indica um desequilíbrio deliberado na alocação de carbono: sob alta disponibilidade de nutrientes, a espécie prioriza a expansão da sua estrutura de transporte e fotossíntese em detrimento do sistema radicular. Esta plasticidade fenotípica (PIGLIUCCI, 2001) corrobora as dinâmicas de partição observadas em gramíneas invasoras do Cerrado, as quais exibem traços funcionais que maximizam a captura de recursos acima do solo no curto prazo para dominar o dossel. Esse comportamento contrasta fortemente com o de espécies nativas do Cerrado, as quais evoluíram sob severa limitação de fósforo e nitrogênio e tendem a apresentar baixa responsividade à fertilização, priorizando o investimento em sistemas radiculares profundos para estocagem e sobrevivência, mantendo concentrações teciduais de nutrientes mais conservativas mesmo sob pulsos de fertilidade (BUSTAMANTE *et al.*, 2012). O massivo investimento na parte aérea observado em *A. donax* sob altos níveis de nutrientes está molecularmente associado à sinalização por citocininas. Esse hormônio vegetal atua como um regulador central do desenvolvimento caulinar e da dominância apical, mediando as respostas de plasticidade morfológica face à abundância nitrogenada no meio e coordenando a razão parte aérea/raiz (SAKAKIBARA, 2006; WERNER *et al.*, 2010).

Esta alocação preferencial para a parte aérea é sustentada por uma dinâmica nutricional altamente eficiente. A interação significativa entre NPK e MS para a concentração de Enxofre (S) no colmo ($p = 0,018$; Tabela Suplementar 3) sugere um sinergismo metabólico onde a presença de micronutrientes otimiza a assimilação dos macronutrientes. O enxofre, como constituinte essencial dos aminoácidos cisteína e metionina, é indispensável para a síntese proteica e para a formação de pontes dissulfeto que garantem a estabilidade estrutural em gramíneas de grande porte

(HAWKESFORD, 2000). Desse modo, o colmo de *A. donax* atua de forma dual: como suporte mecânico para o crescimento vertical vigoroso e como um reservatório intermediário de compostos nitrogenados e sulfurados assimilados, prontos para serem translocados para as folhas em expansão.

Simultaneamente, a influência determinante do fator MS nas concentrações de Potássio (K) e Magnésio (Mg) no colmo ($p = 0,039$ e $p = 0,0005$, respectivamente; Tabelas 5 e Suplementar 3) reforça a existência de uma estratégia de estocagem caulinar de curto prazo. Embora as folhas representem o principal sítio de demanda de Mg para a síntese de clorofila e ativação da enzima RuBisCO, o acúmulo desse elemento e do K no colmo funciona como uma reserva osmótica e bioquímica móvel (MARSCHNER, 2012). O potássio atua na regulação do turgor celular necessário para o alongamento dos entrenós do colmo, enquanto o magnésio excedente estocado previne limitações fisiológicas prematuras durante as fases de expansão foliar acelerada, uma característica metabólica típica de espécies com alta taxa de crescimento relativo (RGR) (LAMBERS *et al.*, 2008). Essa elevada capacidade de absorção e acúmulo de nitrogênio e fósforo na fitomassa, associada à rápida produção de biomassa, assemelha-se ao desempenho amplamente documentado de *A. donax* em macrófitas de sistemas de fitorremediação (leitos cultivados de fluxo subsuperficial). Nesses ambientes, a eficiência extrema da espécie na extração de macronutrientes é explorada para a despoluição de águas residuárias devido ao seu perfil hiperacumulador e alta taxa de evapotranspiração (FIORENTINO *et al.*, 2013; LAMBERS; CHAPIN; PONS, 2008). Adicionalmente, a elevada retenção de Ferro (Fe) nas raízes (4,14 mg/g), independentemente do nível de fertilização mineral, aponta para um mecanismo de exclusão ou imobilização radicular que pode ser vital em solos do Cerrado, naturalmente ricos em óxido de ferro. Espécies tolerantes comumente retêm o Fe excedente nos tecidos corticais da raiz na forma de ferritina ou complexado a ácidos orgânicos no vacúolo, evitando que o transporte livre de íons ferro para a parte aérea induza o estresse oxidativo via reação de Fenton (RAVET *et al.*, 2009; CONNORTON *et al.*, 2017). Esta capacidade de reter metais na raiz, aliada à homeostase observada para a concentração de Zinco (Zn) no caule sob interação NPK + MS ($p = 0,031$; Tabela Suplementar 3), demonstra que *A. donax* consegue gerir finamente o aporte de micronutrientes para evitar a toxicidade, enquanto canaliza de forma livre e prioritária os macronutrientes para a dominância aérea.

Em suma, a integração dos dados morfológicos e nutricionais confirma que a agressividade invasiva de *A. donax* advém de um acoplamento eficiente entre a plasticidade de absorção radicular e uma arquitetura que prioriza a competição por luz, conferindo-lhe uma vantagem competitiva crucial para superar a vegetação nativa em ambientes que sofram flutuações ou pulsos no aporte de nutrientes (FERREIRA; FRANCO, 2026).

CAPÍTULO II

CRESCIMENTO, POTENCIAL DE REBROTA E ANÁLISE FISIOLÓGICA DE *A. DONAX* SOB A SAZONALIDADE HÍDRICA DO CERRADO

1. INTRODUÇÃO

O sucesso de uma espécie invasora como *A. donax* no bioma Cerrado é determinado pela sua capacidade de rebrota e crescimento em um ambiente caracterizado pela forte sazonalidade hídrica (RIGGI *et al.*, 2019). Esta dominância deve ser sustentada por uma elevada plasticidade fenotípica, que permitiria à planta ajustar o seu desenvolvimento mesmo em populações com baixa diversidade genética, facilitando a ocupação agressiva de zonas úmidas (MARTIN *et al.*, 2023) e ambientes que sofreram perturbação antrópica (KULL, 2018). De acordo com este autor, as atividades humanas no Antropoceno não apenas facilitam o transporte de propágulos, mas alteram os mecanismos de invasão, criando nichos que espécies plásticas como a *A. donax* exploram com eficiência. *A. donax* forma densos aglomerados especialmente em áreas degradadas pela ação antropogênica, onde a deposição de resíduos ou o escoamento superficial de fertilizantes altera a fertilidade original do solo (MONTEIRO; TEIXEIRA; MOREIRA, 2015).

A. donax tem invadido progressivamente o Cerrado nas últimas décadas. Atualmente, a espécie está difundida no bioma (LOPES *et al.*, 2023), ocorrendo com frequência em fragmentos de Cerrado degradados em áreas urbanas, aterros, depósitos de entulhos e canteiros de obras (SIMÕES *et al.* 2013; CALAZANS *et al.* 2023). Em áreas mais elevadas do Cerrado no Planalto Central, o contraste entre a estação chuvosa durante a primavera e o verão, caracterizada pela abundância de água e nutrientes, e a estação seca durante o outono e o inverno, definida pelo déficit hídrico e por temperaturas mais baixas durante o período noturno, impõe desafios fisiológicos e morfológicos distintos à planta. Compreender como a espécie alterna seu desempenho de crescimento entre esses dois extremos é essencial para inferir seu potencial de dispersão e impacto ecológico na região. Neste contexto, o presente capítulo avaliou o potencial de rebrota e o acúmulo de biomassa de *A. donax* em condições de campo, contrastando seu desempenho entre as estações chuvosa e seca do Cerrado. O objetivo foi identificar como a sazonalidade hídrica influencia a capacidade de rebrota e crescimento da espécie após o corte. Esses dados foram integrados a análises nutricionais para compreender sua estratégia de invasão e sua resposta à roçagem, principal técnica utilizada para o controle desta espécie em áreas

urbanas (CALAZANS *et al.*, 2023; JIMÉNEZ-RUIZ *et al.*, 2021; NACKLEY *et al.*, 2017). Tais estudos reforçam que o manejo por roçagem deve considerar a alta capacidade de rebrota da espécie.

Para gramíneas rizomatosas, a rapidez da rebrota é dependente da eficiência na translocação de reservas de carbono e macronutrientes dos órgãos subterrâneos para a parte aérea. Nesse processo, a remobilização de carboidratos não estruturais (CNE) armazenados nos rizomas é fundamental, pois garante o suprimento energético e de carbono necessários aos novos perfilhos nos dias iniciais de rebrota. Uma vez que a planta direciona esses assimilados prioritariamente para a síntese de tecidos foliares logo após a desfolha, o vigor do crescimento inicial reflete diretamente a capacidade de mobilização dessas reservas internas (ZUFFO; AGUILERA, 2021).

A hipótese testada neste estudo fundamenta-se na premissa de que o potencial de rebrota e o crescimento inicial da espécie são favorecidos durante a estação chuvosa, período em que a disponibilidade hídrica e as temperaturas mais elevadas otimizam o estabelecimento e o crescimento. Paralelamente, assume-se que o desenvolvimento de um sistema radicular profundo e rizomas robustos nesta espécie (JIMÉNEZ-RUIZ *et al.*, 2021; POMPEIANO *et al.*, 2017) permitiria o acesso a camadas úmidas do solo e manutenção do potencial de rebrota mesmo na estação seca. Entretanto, a redução da atividade microbiana e do transporte de nutrientes por fluxo de massa no solo durante a estiagem sugere uma possível limitação na absorção de nitrogênio e outros minerais (SARDANS *et al.*, 2013). Embora a dinâmica nutricional interna não tenha sido o objeto direto de mensuração neste estudo, a literatura correlaciona essa menor disponibilidade de minerais ao reforço de características esclerófilas (SARDANS *et al.*, 2013). No presente trabalho, tal ajuste estratégico é investigado por meio da análise da Área Foliar Específica (SLA), uma vez que um baixo SLA (ou, inversamente, uma maior razão massa/área foliar) é uma estratégia fundamental para a conservação de recursos e redução da perda hídrica em ambientes áridos (NAVARRO; HIDALGO-TRIANA, 2021).

1.1 Objetivo e Local de Estudo

Os estudos de campo foram conduzidos em área de aproximadamente 1.000m² de Cerrado antropizado, próxima a estruturas prediais no campus da Universidade de Brasília (UnB, (15°45'43"S 47°52'12"W) conforme figura 11. O objetivo principal desta etapa foi identificar o impacto da seca na capacidade de rebrota desta espécie a partir da avaliação do crescimento e do acúmulo de biomassa após o corte manual da parte aérea em dois períodos de disponibilidade hídrica contrastantes, a estação chuvosa e a estação seca.

Figura 11: Aspecto geral da área de estudo (aproximadamente 1.000 m²) com presença de adensamentos de *A. donax* L. em área de Cerrado antropizado no campus da Universidade de Brasília (UnB).



1.2 Abordagem Experimental para avaliação do Efeito da Sazonalidade (Estação Chuvosa vs. Estação Seca)

Para investigar a resposta da rebrota e o acúmulo de biomassa de *A. donax* sob diferentes regimes hídricos sazonais, foram conduzidos dois experimentos de campo independentes, com delineamentos idênticos, variando-se a época do ano: a Estação Chuvosa e a Estação Seca.

Para cada período experimental, foram selecionadas cinco touceiras distintas, totalizando 10 unidades experimentais independentes ao longo do estudo. Essa estratégia foi adotada para evitar o efeito residual e o estresse acumulado de desfolhas sucessivas na mesma planta, garantindo que a capacidade de rebrota observada em cada estação fosse uma resposta direta às condições climáticas vigentes.

Devido à natureza clonal da espécie e à robustez de seus rizomas, que se expandem de forma contígua dificultando a distinção individual, a seleção das touceiras foi baseada em critérios visuais de padronização. Foram escolhidas plantas que apresentavam estágio de desenvolvimento, diâmetro e circunferência de touceira semelhantes no momento do corte inicial. As unidades experimentais foram estabelecidas em uma área de solo homogêneo, distantes 5 metros entre si para garantir a independência das amostras, ocupando o mesmo nicho ambiental e condições edafoclimáticas em ambos os experimentos. Dessa forma, assegurou-se que as variações no crescimento fossem decorrentes da sazonalidade hídrica e não de diferenças estruturais prévias ou variações na fertilidade do solo.

O primeiro experimento, referente à Estação Chuvosa, compreendeu 63 dias (20/10 a 24/12/2024), com precipitação acumulada de 673,2 mm (INMET), no início da estação chuvosa do Distrito Federal. De maneira idêntica, o experimento da estação seca foi conduzido iniciando-se em 02 de junho de 2025, após 39 dias sem chuva, e terminando em 04 de agosto de 2025 (63 dias). Não houve ocorrência de chuvas durante este segundo ciclo, caracterizando o período como sendo de forte restrição hídrica.

2. PROTOCOLO DE MONITORAMENTO E COLETA (COMUM A AMBOS EXPERIMENTOS).

Durante o período de 63 dias em ambas as estações, a rebrota e o crescimento das touceiras foram monitorados. Foram realizados registros semanais das seguintes variáveis morfológicas:

Comprimento da Parte Aérea: foi mensurado desde o nível do solo até o ápice da planta. Ressalta-se que, durante todo o período de avaliação, não foi observado o perfilhamento múltiplo (emissão de vários eixos caulinares a partir da base ou rizoma), mantendo-se o desenvolvimento de uma haste única. Portanto, as medidas de crescimento e biomassa referem-se estritamente a este eixo principal.

Número de Folhas: Realizou-se a contagem manual do número total de folhas fotossinteticamente ativas (verdes) por haste. Foram consideradas apenas as folhas completamente expandidas, com a lígula visível, para garantir a padronização entre as amostras.

Diâmetro da Base do Caule: foi mensurado ao nível do colo da planta (base do eixo caulinar junto ao solo), utilizando-se um paquímetro digital (precisão de 0,01 mm). Esta variável foi monitorada para quantificar o investimento em biomassa estrutural e o vigor da rebrota ao longo do experimento.

Ao final de cada experimento, a parte aérea das plantas rebrotadas foi colhida para determinação da massa seca e da concentração de macro e micronutrientes. Simultaneamente, também coletou-se uma amostra do rizoma para a determinação da concentração de macro e micronutrientes. O material coletado foi separado em folhas, caule e rizoma. A área foliar total foi determinada por meio de biometria não-destrutiva, medindo-se o comprimento e a largura máxima de cada folha com o auxílio de uma fita métrica graduada. Os valores obtidos foram multiplicados pelo fator de correção de 0,70 para a obtenção da área foliar real, permitindo o posterior cálculo da Área Foliar Específica (AFE) e da Razão de Área Foliar (RAF). Em seguida o material foi seco em estufa a 70 °C por 72 horas. As folhas e o caule foram pesados em balança de precisão (0,001 g) para determinação da massa seca. O material seco foi pulverizado em moinho de bolas e enviado para análise em laboratório comercial, seguindo os métodos estabelecidos no Manual de Análises Químicas para Avaliação e Fertilidade do Solo (CESAR *et al.*, 2009) conforme descrito no capítulo 1.

Para a caracterização ambiental das áreas de ocorrência da espécie, foram coletadas amostras de solo no Centro de Recuperação de Áreas Degradadas (CRAD) em dois períodos (2024 e 2026), representando os locais de coleta das plantas para os experimentos de campo. Adicionalmente, realizou-se a coleta no Parque Estação

Biológica (PQEB), área de invasão consolidada, e em Águas Lindas de Goiás, como referência de solo de Cerrado preservado. As amostras de solo foram coletadas de forma composta, com o auxílio de uma pá, na profundidade de 0 a 20 cm, nos seguintes pontos:

Área de Experimento (CRAD/UnB): Local de coleta das plantas e execução do experimento, sob as coordenadas geográficas -15,771430, -47,867241.

Área Controle CRAD (CRAD/UnB): Ponto distante 5 metros do local do experimento, caracterizado pela ausência de *A. donax*, sob as coordenadas -15,771773, -47,867331.

Área de Invasão Consolidada (PQEB): Localizada no Parque Estação Biológica (PQEB), com presença estabelecida da espécie, sob as coordenadas -15,732092, -47,910507.

Cerrado Preservado (Águas Lindas de Goiás): Área de referência de solo preservado em Goiás, sob as coordenadas -15,7582432, -48,2595662.

Em cada local selecionado, foram retiradas 3 subamostras que, após homogeneização, formaram uma amostra representativa de cada ambiente, visando comparar as condições edáficas das áreas invadidas com os ambientes nativos e preservados.

3. RESULTADOS

Caracterização química do Solo

As análises químicas revelaram que a *A. donax* ocupa preferencialmente solos antropizados com fertilidade superior ao padrão do Cerrado nativo. Os solos das áreas de invasão (Centro de Recuperação de Áreas Degradadas – CRAD/UnB e PQEB - Parque Estação Biológica) apresentaram pH (CaCl₂) entre 4,7 e 6,0 e saturação por bases (V%) de até 90% (Tabela 7), valores que indicam menor acidez e alta disponibilidade nutricional, com baixa presença ou ausência de alumínio tóxico. Embora ocorra variação nos valores de Ca, Mg e K, estes permanecem mais altos do que no solo de Cerrado preservado.

Em contraste, o solo da área preservada (Águas Lindas de Goiás) apresentou pH mais ácido (4,2) e menor saturação por bases (16%), evidenciando que a espécie se estabelece em nichos onde houve alteração química do solo (antropização). Os teores de fósforo (4,0 mg/dm³) e matéria orgânica (27 g/kg) no CRAD/UnB confirmam a fertilidade superior no local do experimento. Note-se que, apesar de variações locais nos outros elementos na área do experimento, a oferta nutricional básica foi mantida, garantindo que as diferenças de crescimento observadas entre as estações sejam atribuídas primordialmente à disponibilidade hídrica.

Tabela 7: Caracterização química dos solos em áreas de invasão de *A. donax* L. (Centro de Recuperação de Áreas Degradadas – CRAD e Parque Estação Biológica – PQEB) e em área de Cerrado preservado (Águas Lindas - GO).

SOLO	Crad 2024	Crad 2026	PQEB	Águas Lindas GO
Atributo Químico	Unidade	Valor Encontrado	Valor Encontrado	Valor Encontrado
pH (CaCl ₂)	Um	6	4,7	5,4
Cálcio (Ca)	cmolc/dm ³	7,5	1,0	2,4
Magnésio (Mg)	cmolc/dm ³	2,2	0,3	0,7
Ca + Mg	cmolc/dm ³	9,7	1,3	3,1
Alumínio (Al)	cmolc/dm ³	0	0,10	0,00
Acidez Potencial (H + Al)	cmolc/dm ³	1,1	2,2	1,8
CTC (T)	cmolc/dm ³	11	3,80	5,30
Fósforo (P - Mehlich I)	mg/dm ³	4	1,2	1,2
Potássio (K)	mg/dm ³	84	102	142
Sódio (Na)	mg/dm ³	1	1	2
Enxofre (S)	mg/dm ³	8	7	5
Boro (B)	mg/dm ³	0,19	0,25	0,19
Cobre (Cu)	mg/dm ³	0,6	1,1	1,1
Ferro (Fe)	mg/dm ³	52	65	33
Manganês (Mn)	mg/dm ³	29	10	45
Zinco (Zn)	mg/dm ³	2,7	0,8	4,0
Matéria Orgânica	g/kg	27	20,0	20,0
Nitrogênio (N)	%	0,14	0,10	0,10
Saturação por Al (M)	%	0	6	0

Saturação por Bases (V)	%	90	41	65	16
Ca/Mg	.	3,4	3,3	3,4	2,0
Ca/CTC	%	68,2	26,3	45,3	6,9
Mg/CTC	%	20	7,9	13,2	3,4
(H+Al)/CTC	%	10	57,9	34,0	82,8
K/CTC	%	0,14	6,9	6,8	5,5

3.1 Crescimento Morfométrico e Dinâmica de Perfilhamento

Embora o rizoma de *A. donax* apresente a característica biológica de produzir múltiplos perfilhos, para a execução deste experimento selecionou-se apenas uma planta (haste única) por unidade experimental (Figura 12) para este estudo. Observou-se que, após o corte desse eixo principal, não houve a emissão de novos perfilhos durante o período de avaliação, independentemente da sazonalidade. A rebrota limitou-se a uma única haste por planta, cujo crescimento diferiu significativamente entre as estações. O incremento foi 14 vezes superior durante o período chuvoso (Tabela 8). A análise da circunferência da base do caule também revelou uma diferença altamente significativa. A média na Estação Chuvosa ($7,34 \pm 0,5$ cm) foi o triplo da registrada na Estação Seca ($2,30 \pm 0,3$ cm).

Figura 12: Unidade experimental de *A. donax* L. sob condições de campo: (A) Padrão da planta selecionada no momento do corte inicial, exibindo a homogeneidade de diâmetro e altura adotada como critério de seleção; (B) Aspecto da mesma unidade após o período de rebrota, evidenciando o desenvolvimento da haste única a partir do rizoma.



Tabela 8: Parâmetros morfométricos, distribuição de biomassa e índices de área foliar de *A. donax* após 63 dias de rebrota nas estações chuvosa e seca. AFT corresponde à área foliar total, AFE à área foliar específica e RAF, à razão de área foliar. Dados expressos em termos de média $\pm$ erro padrão (M $\pm$ EP), n= 5 plantas.

Categoria	Variável	Estação Chuvosa (M $\pm$ EP)	Estação Seca (M $\pm$ EP)	Valor p (Welch)
Crescimento	Altura da Haste (cm)	428,8 $\pm$ 11,5	29,8 $\pm$ 3,9	< 0,001*
	Número de Folhas	26,4 $\pm$ 1,4	9,2 $\pm$ 1,2	< 0,001*
	Circunferência (cm)	7,34 $\pm$ 0,5	2,30 $\pm$ 0,3	< 0,001*
Biomassa (g)	Caule	132,97 $\pm$ 10,2	5,55 $\pm$ 0,82	< 0,001*
	Folha	46,12 $\pm$ 3,21	8,51 $\pm$ 0,93	< 0,001*
	Parte aérea	179,09 $\pm$ 11,6	14,06 $\pm$ 1,7	< 0,001*
Área Foliar	AFT (cm ²)	6279,2 $\pm$ 415,1	198,9 $\pm$ 22,1	< 0,001*
	AFE (cm ² /g)	136,1 $\pm$ 9,1	23,3 $\pm$ 2,8	< 0,001*
	RAF (cm ² /g)	35,0 $\pm$ 2,1	14,1 $\pm$ 1,3	< 0,001*

* Diferença significativa pelo teste t de Welch ($p < 0,05$).

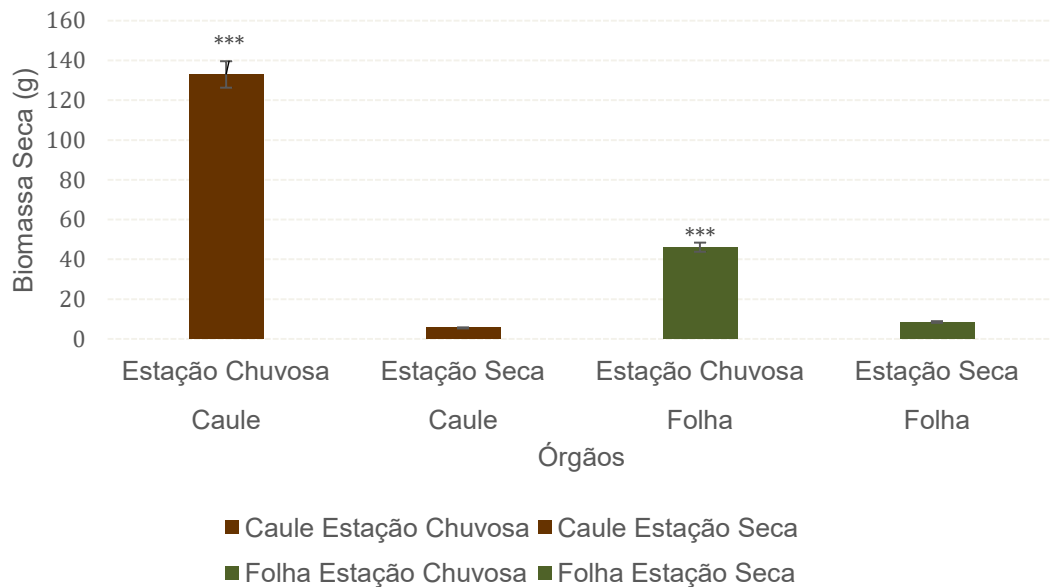
Quanto ao aparato foliar, a comparação entre as estações revelou uma diferença altamente significativa no número de folhas emitidas. A média na Estação Chuvosa (26,4 $\pm$ 1,4) foi expressivamente superior à observada na Estação Seca (9,2 $\pm$ 1,2), refletindo a limitação da expansão do aparato fotossintético sob restrição hídrica. Tais resultados corroboram a elevada plasticidade fenotípica de *A. donax* e sua capacidade de alocar recursos rapidamente para o desenvolvimento da parte aérea em condições favoráveis.

3.2 Acúmulo e Distribuição de Fitomassa Seca

Os resultados da determinação da fitomassa seca demonstram uma diferença acentuada entre as estações, confirmando o padrão observado nas variáveis morfométricas. Durante o período de 63 dias de rebrota, as plantas na estação chuvosa acumularam na parte aérea, uma média de $179,09 \pm 11,6$ g de biomassa seca, valor drasticamente superior aos $14,06 \pm 1,7$ g registrados na Estação Seca. Essa variação evidencia que a produção de biomassa no período chuvoso foi aproximadamente 12,7 vezes maior, o que reflete uma forte restrição no investimento de recursos para a rebrota da parte aérea durante a estiagem (Tabela 8).

A análise da distribuição de fitomassa revela estratégias adaptativas distintas. Na Estação Chuvosa, a maior parte da biomassa aérea foi destinada à estrutura do caule ($132,97 \pm 10,2$ g), representando 74,2% do total. Em contrapartida, na estação seca, observou-se uma inversão na prioridade de alocação: a biomassa foliar ($8,51 \pm 0,93$ g) foi superior à do caule ($5,55 \pm 0,82$ g), conforme a Figura 13.

Figura 13: Acúmulo de fitomassa seca (g) em caule e folhas de *A. donax* submetida a corte da parte aérea. Dados obtidos após 63 dias de rebrota durante as estações chuvosa e seca em área de Cerrado antropizado. As barras representam a média $\pm$ erro padrão (n=5). Asteriscos (***) indicam diferença estatística significativa entre as estações para cada órgão pelo teste t de Welch ($p < 0,001$).



3.3 Dinâmica e Ajustes da Área Foliar

Os resultados de Área Foliar Total (AFT), Área Foliar Específica (AFE) e Razão de Área Foliar (RAF) acompanham as mudanças observadas na biomassa e confirmam a influência crítica do regime hídrico (Tabela 8 e Tabela Suplementar 4). A AFT na estação chuvosa foi aproximadamente 31,5 vezes maior do que na estação seca. Esta redução drástica, acompanhada pelo número restrito de folhas produzidas na estação seca, é uma estratégia fundamental para mitigar a perda hídrica por transpiração.

Além da redução na área do limbo foliar e no número de folhas, a espécie apresentou ajustes qualitativos na estrutura foliar. Na estação chuvosa, a AFE elevada indica a produção de folhas mais finas e expandidas. Em contrapartida, a baixa AFE na estação seca revela o desenvolvimento de folhas com maior densidade de tecidos (esclerofilia).

Essa mudança estratégica é reforçada pela Razão de Área Foliar (RAF), que foi 2,5 vezes maior na Estação Chuvosa. Enquanto em condições favoráveis a *A. donax* prioriza o investimento em superfície fotossintética, a redução da RAF na seca sugere um deslocamento de recursos para tecidos de reserva ou proteção, priorizando a sobrevivência em detrimento do crescimento rápido.

Do ponto de vista prático, essa dinâmica estacional da RAF e o comportamento da espécie trazem implicações cruciais para o desenho de estratégias de controle de *A. donax* no Cerrado. Uma vez que o corte isolado no período chuvoso tende a estimular uma rebrota vigorosa devido às condições ambientais ideais, propõe-se um modelo de manejo integrado baseado na exaustão crônica das reservas subterrâneas. Esse manejo deve ser iniciado no final da estação chuvosa, seguido por cortes recorrentes ao longo da estação seca. Como a espécie apresenta crescimento reduzido e menor taxa de expansão foliar durante a estiagem, os cortes sucessivos nesse período crítico forçam a planta a translocar continuamente os recursos armazenados nos rizomas para a reconstrução da parte aérea. Sem o suporte hídrico e metabólico para restabelecer seus estoques energéticos via fotossíntese, esse fluxo contínuo de carbono em direção à parte aérea promove o esgotamento progressivo

das estruturas de reserva subterrâneas, fragilizando o potencial de rebrota da invasora no ciclo subsequente

3.4 Composição Nutricional e Alocação de Nutrientes sob Sazonalidade

A análise dos teores minerais revelou respostas contrastantes entre as estruturas de *A. donax* em função da sazonalidade hídrica (Tabela 9). Utilizou-se o teste t de Welch para comparar as médias, o que permitiu identificar estratégias distintas de manutenção da homeostase nutricional entre as estações seca e chuvosa.

Tabela 9: Teores médios ($\pm$ Erro Padrão) de macro e micronutrientes em diferentes estruturas de *A. donax* nas estações Chuvosa e Seca no Cerrado.

Nutriente	Estrutura	Estação	Estação Seca	Valor p (Welch)
		Chuvosa		
Macronutrientes (mg/g)				
Nitrogênio (N)	Folha	26,20 ± 3,45	30,20 ± 4,12	0,095
	Caule	7,60 ± 1,12	13,00 ± 2,05	0,041*
	Rizoma	7,20 ± 0,85	10,40 ± 1,20	0,013*
Fósforo (P)	Folha	1,32 ± 0,18	1,24 ± 0,15	0,699
	Caule	0,56 ± 0,08	0,96 ± 0,14	0,096
	Rizoma	1,10 ± 0,15	1,40 ± 0,18	0,38
Potássio (K)	Folha	19,76 ± 2,45	16,53 ± 2,10	0,327
	Caule	14,04 ± 1,88	19,28 ± 2,34	0,039*
	Rizoma	16,40 ± 2,10	14,80 ± 1,85	0,551
Cálcio (Ca)	Folha	5,62 ± 0,75	4,10 ± 0,55	0,182
	Caule	1,06 ± 0,15	1,88 ± 0,31	0,038*
	Rizoma	2,10 ± 0,32	3,10 ± 0,45	0,042*
Magnésio (Mg)	Folha	3,24 ± 0,45	2,16 ± 0,28	0,007*
	Caule	0,46 ± 0,08	1,53 ± 0,22	0,011*
	Rizoma	1,40 ± 0,18	1,60 ± 0,22	0,45
Enxofre (S)	Folha	1,12 ± 0,16	0,89 ± 0,11	0,082
	Caule	0,86 ± 0,12	2,63 ± 0,38	0,009*

	Rizoma	1,80 ± 0,25	2,10 ± 0,30	0,412
Micronutrientes (mg/g)				
Ferro (Fe)	Folha	0,223 ± 0,031	0,319 ± 0,045	0,366
	Caule	0,209 ± 0,028	0,440 ± 0,052	0,018*
Manganês (Mn)	Rizoma	0,185 ± 0,025	0,310 ± 0,042	0,025*
	Folha	0,014 ± 0,002	0,037 ± 0,018	0,024*
	Caule	0,005 ± 0,001	0,080 ± 0,011	< 0,001*
Cobre (Cu)	Rizoma	0,012 ± 0,002	0,065 ± 0,008	< 0,001*
	Folha	0,008 ± 0,001	0,010 ± 0,001	0,076
	Caule	0,007 ± 0,001	0,010 ± 0,001	0,007*
Zinco (Zn)	Rizoma	0,007 ± 0,001	0,010 ± 0,001	0,076
	Folha	0,027 ± 0,004	0,020 ± 0,003	0,152
	Caule	0,011 ± 0,002	0,040 ± 0,006	0,007*
	Rizoma	0,022 ± 0,003	0,027 ± 0,004	0,35

* Médias seguidas de asterisco na mesma linha indicam diferença significativa pelo teste t de Welch ($p < 0,05$).

No caule, observou-se o impacto mais generalizado da sazonalidade: todos os macronutrientes, com exceção do fósforo, apresentaram concentrações significativamente maiores na estação seca. Esse mesmo padrão ocorreu para todos os micronutrientes avaliados (Fe, Mn, Cu e Zn).

Em relação ao rizoma, a espécie demonstrou uma notável capacidade de manutenção de reservas. As concentrações de P, K, Mg e S permaneceram estáveis entre as estações. Entretanto, observou-se um aumento significativo nos teores de N ($10,40 \pm 1,20$ mg/g) e Ca ($3,10 \pm 0,45$ mg/g) durante a estação seca ($p=0,013$ e $p=0,042$, respectivamente). Entre os micronutrientes, o rizoma também apresentou elevações expressivas de ferro e manganês no período de estiagem ($p < 0,025$). Os menores valores de N, Ca, Mn e Fe observados nesta estrutura durante a estação chuvosa sugerem que parte dessas reservas foi remobilizada para suprir as necessidades da rebrota vigorosa iniciada com o retorno das chuvas.

Nas folhas, a planta apresentou um comportamento mais conservativo. Para a maioria dos macronutrientes (N, P, K, Ca e S), as concentrações foliares não sofreram variações significativas entre as estações, indicando que o sistema radicular e as reservas do rizoma foram suficientes para manter o suprimento nutricional do aparato fotossintético, mesmo com o grande acúmulo de fitomassa foliar na chuva. No entanto, houve exceções importantes: o magnésio (Mg) apresentou uma redução significativa na estação seca ($2,16 \pm 0,28$ mg/g; $p=0,007$), enquanto o micronutriente manganês (Mn) seguiu a tendência inversa, com teores mais elevados no período seco.

O aumento da concentração de Mn nas folhas durante a seca sugere que a planta prioriza a manutenção deste elemento no aparato fotossintético. O Mn desempenha um papel fundamental como cofator enzimático no complexo de fotólise da água do fotossistema II (PSII), de modo que seu acúmulo pode constituir uma estratégia para mitigar os danos ou manter a eficiência mínima da fotossíntese sob estresse hídrico (TAIZ *et al.*, 2017). Por outro lado, a menor disponibilidade foliar de Mg na época seca aponta para uma redução na eficiência dos processos fotossintéticos e bioenergéticos da planta. O Mg, além de constituir o núcleo da molécula de clorofila, é essencial para a ativação da Rubisco e para o metabolismo energético via formação do complexo Mg-ATP (TAIZ *et al.*, 2017).

Em suma, a alocação de nutrientes em *A. donax* não ocorre de forma homogênea. Enquanto as folhas apresentam um efeito de concentração mineral, devido a maior atividade metabólica, o rizoma funciona como um reservatório estratégico. Essa dinâmica demonstra a alta plasticidade da espécie em remobilizar recursos para garantir a persistência sob severo estresse hídrico.

3.5 Dinâmica de Acúmulo e Estoque de Nutrientes na Parte Aérea

A análise do conteúdo total (estoque) de nutrientes na parte aérea revelou uma diferença drástica na capacidade de estocagem de recursos entre as estações, sendo um reflexo direto da maior produção de matéria seca na estação chuvosa. Observou-se que a disponibilidade hídrica potencializou significativamente o acúmulo absoluto da maioria dos macronutrientes na parte aérea. Enquanto na estação seca as plantas

apresentaram estoques reduzidos devido à fitomassa limitada, na estação chuvosa o crescimento vigoroso da parte aérea resultou em um incremento de 6,8 vezes nos estoques de nitrogênio e de 10,7 vezes nos de potássio na parte aérea (Tabela 10).

Tabela 10: Conteúdo total médio (estoque) de macro e micronutrientes (mg) acumulados na parte aérea (folhas e caules) de *A. donax* L. após 63 dias de rebrota nas estações chuvosa e seca no Cerrado.

Nutriente	Estação Chuvosa (mg)	Estação Seca (mg)	Valor p (Welch)
Macronutrientes			
Nitrogênio (N)	2222,49 ± 157,7	326,41 ± 44,5	< 0,001*
Fósforo (P)	110,81 ± 12,4	12,65 ± 2,1	< 0,001*
Potássio (K)	2778,32 ± 210,7	259,03 ± 38,3	< 0,001*
Cálcio (Ca)	394,36 ± 45,2	52,81 ± 8,9	< 0,001*
Magnésio (Mg)	210,61 ± 22,8	26,95 ± 4,5	< 0,001*
Enxofre (S)	165,82 ± 18,3	22,18 ± 3,6	< 0,001*
Micronutrientes			
Cobre (Cu)	1,18 ± 0,15	0,14 ± 0,02	< 0,001*
Ferro (Fe)	38,07 ± 3,97	5,15 ± 0,80	< 0,001*
Manganês (Mn)	1,31 ± 0,15	1,65 ± 0,21	0,042*
Zinco (Zn)	2,71 ± 0,33	0,39 ± 0,05	< 0,001*

Médias seguidas de asterisco na mesma linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Essa forte acumulação de nutrientes móveis e estruturais nas folhas durante a chuva, como o Magnésio (Mg) e o Enxofre (S) — que apresentaram estoques de 1,8 a 2 vezes maiores que na seca —, está diretamente relacionada à maior taxa de transpiração e atividade metabólica. A maior disponibilidade hídrica neste período intensifica o fluxo de massa no solo, impulsionando o transporte por convecção dos minerais dissolvidos até a superfície radicular. Esse cenário, associado à forte demanda transpiratória, facilita o transporte xilemático e a incorporação desses elementos nos tecidos fotossinteticamente ativos. A redução severa nos estoques durante a estiagem explica a baixa taxa de rebrota e o crescimento estagnado: o estoque de Nitrogênio foliar, por exemplo, declinou de 1211,91 mg na chuva para apenas 254,26 mg na seca (Tabela suplementar 5A), mesmo que a concentração por grama de tecido tenha se mantido elevada no período de estiagem.

Este conjunto de dados confirma a alta plasticidade da *A. donax*: no período chuvoso, a espécie investe em fitomassa aérea para ocupação de espaço, enquanto no período seco, prioriza mecanismos de resiliência e manutenção da homeostase interna. O aumento significativo do teor de K no caule durante a seca ($19,28 \pm 2,34$ mg/g; $p=0,039$) reforça a mobilização desse elemento para tecidos de suporte e reserva.

A planta também mantém a viabilidade do aparato fotossintético através do acúmulo de Manganês (Mn), cujo estoque absoluto na parte aérea foi superior na estação chuvosa (1,23 mg) em comparação à seca (0,59 mg) (Tabela Suplementar 5B). Em contrapartida, o Magnésio (Mg) foliar sofreu redução significativa na estação seca ($2,16 \pm 0,28$ mg/g; $p=0,007$), indicando que a planta prioriza a proteção enzimática contra estresse oxidativo (via Mn) em detrimento da manutenção de altos níveis de clorofila e do metabolismo energético durante o período de restrição hídrica. Essa dinâmica, integrada à remobilização de reservas do rizoma, assegura a sobrevivência da espécie até o retorno das condições hídricas favoráveis.

4 DISCUSSÃO

4.1. Seletividade de Habitat e Antropização do Solo

As análises indicam que a *A. donax* não se estabelece de forma aleatória no bioma Cerrado, demonstrando uma clara associação com sítios antropizados de fertilidade superior. Enquanto o solo do Cerrado preservado apresentou a acidez e a baixa saturação por bases (16%) típicas do bioma, as áreas de invasão revelaram um cenário de alta disponibilidade nutricional, com V% de até 90%. Coletas adicionais de solo em outras áreas invadidas por *A. donax* são necessárias para confirmar estes resultados.

Essa discrepância sugere que a espécie atua como uma invasora oportunista de nichos eutróficos (FERREIRA; FRANCO, 2026; LANNES, 2024). A menor acidez

e a ausência de alumínio tóxico nas áreas de invasão eliminam as barreiras químicas que normalmente restringiriam o crescimento de espécies exóticas no Cerrado nativo. Portanto, a antropização atua como um facilitador crítico, permitindo que a espécie expresse seu máximo potencial de desenvolvimento em áreas onde o equilíbrio químico original do solo foi rompido.

4.2. Plasticidade Fenotípica e Estratégias de Alocação de Biomassa

A variação na produção de biomassa — 12,7 vezes maior na estação chuvosa — confirma a elevada plasticidade fenotípica da espécie em resposta à sazonalidade hídrica. Na estação chuvosa, o investimento prioritário no caule (74,2%) visa a ocupação rápida do espaço vertical e a competição por luz.

Contudo, sob estresse hídrico, a planta reduz drasticamente o investimento em tecidos de sustentação para priorizar a sobrevivência das unidades fotossintéticas. Este ajuste na partição de biomassa é uma estratégia que visa minimizar os custos metabólicos de manutenção de grandes estruturas vegetativas durante a estiagem (NACKLEY *et al.*, 2017; SARDANS *et al.*, 2013). Esse comportamento corrobora a capacidade da espécie de ajustar seu desenvolvimento morfológico para garantir a persistência em ambientes com alta sazonalidade hídrica (COFFMAN *et al.*, 2010).

4.3. Ajustes Morfológicos e Resistência à Seca

A redução drástica da Área Foliar Total (AFT) em 31,5 vezes na seca constitui a primeira linha de defesa para mitigar a perda hídrica. Paralelamente, a queda na Área Foliar Específica (AFE) revela o desenvolvimento de folhas com maior densidade de tecidos, processo conhecido como esclerofilia (PIGLIUCCI, 2001).

De acordo com Coffman *et al.* (2010), essa adaptação aumenta a resistência mecânica e reduz a transpiração não-estomática, garantindo a sobrevivência sob a alta demanda evaporativa do ar. Ao produzir folhas menores e mais densas na seca,

a planta sacrifica as taxas de crescimento rápido em favor da integridade hidráulica, demonstrando uma transição eficiente entre o modo de "expansão" e o de "resistência" (COFFMAN; AMBROSE; RUNDEL, 2010; LANNES, 2024).

4.4. Homeostase Nutricional e o Papel Protetor dos Micronutrientes

Um resultado central deste estudo foi o comportamento diferencial dos micronutrientes em resposta à sazonalidade. Enquanto o Manganês (Mn) apresentou aumento nas concentrações em todos os órgãos durante a seca, o Ferro (Fe) exibiu um acúmulo significativo especificamente no caule ($0,440 \pm 0,052$ mg/g) e no rizoma ($0,310 \pm 0,042$ mg/g), não apresentando variação estatística nas folhas ($p > 0,05$). Este fenômeno sugere que, para o Ferro, ocorre um estoque estratégico nos tecidos de sustentação e reserva, enquanto para o Mn, o aumento generalizado indica um efeito de concentração mineral decorrente da interrupção do crescimento estrutural e do alongamento dos colmos sob restrição hídrica.

De acordo com Sardans *et al.* (2013), esse ajuste fisiológico é fundamental para sustentar o metabolismo basal e combater o estresse oxidativo. O Mn atua como cofator essencial para a enzima superóxido dismutase (Mn-SOD), que neutraliza espécies reativas de oxigênio geradas pela combinação de alta radiação e déficit hídrico (SARDANS *et al.*, 2013; NACKLEY *et al.*, 2017).

Nesse cenário, o rizoma consolida-se como o órgão central de resiliência. A remobilização de Nitrogênio e Cálcio do rizoma para a parte aérea na época chuvosa explica o vigoroso potencial de rebrota, permitindo que a espécie recupere sua dominância no nicho imediatamente após o corte mecânico, que tem sido apontado como um método de controle de baixa eficiência isolada devido à rápida capacidade de regeneração da espécie (MILTON, 2004; COFFMAN *et al.*, 2010).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste capítulo demonstram que a *A. donax* possui uma alta plasticidade fenotípica, ajustando seu crescimento e alocação de biomassa conforme a disponibilidade hídrica. Enquanto a estação chuvosa favorece a expansão da área foliar e o crescimento estrutural (caule), a estação seca induz a produção de folhas mais densas (baixa AFE) e o investimento em mecanismos de ajuste osmótico e proteção antioxidante, evidenciados pela manutenção de teores elevados de Potássio (K) e pelo acúmulo absoluto de Manganês (Mn). Esses dados confirmam que o período de maior agressividade invasiva e risco de dispersão ocorre na estação chuvosa, momento em que intervenções de controle por corte podem ser menos eficazes devido ao alto vigor de rebrota.

A integração dos dados de crescimento com a análise nutricional revela a grande capacidade da *A. donax* no Cerrado de absorver nutrientes do solo e utilizá-los para um rápido crescimento vegetativo durante a estação chuvosa, a partir de um "pulso" de recursos. Essa estratégia de crescimento acelerado assemelha-se ao comportamento de culturas comerciais de alta eficiência fotossintética, como o milho e a cana-de-açúcar, que demandam alta absorção de N e K para sustentar o vigor vegetativo (COSENTINO *et al.*, 2016). Diferente das gramíneas nativas do Cerrado, que apresentam um metabolismo mais conservador e adaptado a solos de baixa fertilidade (LANNES, 2024), a *A. donax* demonstra uma agressividade na captura de recursos que permite superar a produtividade das espécies locais quando o fator hídrico e a fertilidade do solo (antropização) não são limitantes.

Na estação chuvosa, a planta utiliza o fluxo hídrico para converter Nitrogênio e Potássio em expansão de área foliar (AFT). A baixa taxa de crescimento das rebrotas observada na seca indica que, sem a disponibilidade hídrica para mobilizar recursos químicos do solo e remobilizar reservas do rizoma de forma eficiente para a expansão celular, a planta prioriza a integridade hidráulica em detrimento da ocupação de espaço.

6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os resultados desta pesquisa demonstram que a *A. donax* possui uma elevada plasticidade fenotípica, adaptando sua estratégia de crescimento conforme a disponibilidade de recursos (PIGLIUCCI, 2001). No Cerrado, a espécie comporta-se como uma invasora oportunista: durante a estação chuvosa ou sob condições de solo antropizado (eutrófico), exibe um crescimento explosivo e alta eficiência metabólica. Na estação seca, a planta transita para um estado de persistência, protegendo seu aparato fotossintético e mantendo estoques estratégicos de micronutrientes como Ferro (Fe) e Manganês (Mn) no caule e rizoma.

Essa capacidade de alternar entre 'expansão agressiva' e 'resistência' explica seu sucesso invasivo, sugerindo que as estratégias de manejo devem ser intensificadas antes do início das chuvas ou no auge da seca, quando a planta está metabolicamente mais vulnerável e suas reservas subterrâneas são cruciais para a sobrevivência (GRIME, 1977). Conclui-se que a espécie possui um elevado teto de resposta biológica; a antropização dos solos do Cerrado atua como um facilitador crítico, removendo barreiras químicas (acidez e alumínio) e permitindo que a *A. donax* expresse seu potencial máximo como invasora. Portanto, o controle em solos antropizados exige uma abordagem que considere a alta eficiência nutricional e a capacidade de rebrota sustentada pelo rizoma como os principais desafios para a erradicação da espécie no campo.

7 REFERÊNCIAS

- BARBIZAN SÜHS, R.; ZILLER, S. R.; DECHOUM, M. Is the use of drones cost effective and efficient in detecting invasive alien trees? A case study from a subtropical coastal ecosystem. **Biological Invasions**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 777-791, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10530-023-03190-5>. Acesso em: 2 jan. 2026.
- BES, K. et al. Extraction and characterization of lignin from the pre treatment of biomass for 2nd generation ethanol production. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 55–60, jan./fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019156352>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- BORGHETTI, F. et al. Fitogeografia das savanas sul-americanas. **Heringeriana**, Brasília, v. 17, e918014, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17648/heringeriana.v17i1.918014>. Acesso em: 16 ago. 2025.
- BUCCI, S. J. *et al.* Processes isolating water use from seasonal changes in climate in tropical savanna trees. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v. 169, n. 4, p. 557-569, maio 2008.
- BUSTAMANTE, M. M. C. et al. Effects of nutrient additions on plant biomass and diversity of the herbaceous subshrub layer of a Brazilian savanna (Cerrado). **Plant Ecology**, [s. l.], v. 213, n. 5, p. 795–808, maio 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0042-4>. Acesso em: 16 fev. 2026.
- CALAZANS JÚNIOR, E. R. **Propagação vegetativa e respostas ao estresse hídrico de *Arundo donax* L.** 2020. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
- CALAZANS, E.** *et al.* Mechanical control inadvertently increases risk of alien plant invasion: influence of stem fragmentation and inundation regimes on *Arundo donax* regeneration in Neotropical savanna. **Australian Journal of Botany**, [s. l.], v. 71, n.

5, p. 223–230, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/BT22139>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CEOTTO, E. et al. Biomass and methane yield of giant reed (*Arundo donax* L.) as affected by single and double annual harvest. **GCB Bioenergy**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 393–407, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12790>. Acesso em: 18 dez. 2025.

CESAR, H. M. S. et al. **Manual de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 145 p. (Embrapa Solos. Documentos, 114).

COFFMAN, G. C.; AMBROSE, R. F.; RUNDEL, P. W. Invasion of *Arundo donax* in river ecosystems of Mediterranean climates: causes, impacts and management strategies. In: **Proceedings of the 10th MEDECOS Conference**, Rhodes, Greece, p. 1-8, 2004.

COFFMAN, G. C.; AMBROSE, R. F.; RUNDEL, P. W. Plasticity in shoot morphology and water relations of *Arundo donax* (giant reed) under variable water stress. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v. 171, n. 4, p. 399-408, maio 2010.

CONNORTON, J. M. et al. Vacuolar iron storage and transfer in plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, e1649, p. 1-12, out. 2017.

COSENTINO, S. L. et al. Response of giant reed (*Arundo donax* L.) to nitrogen fertilization and soil water availability in semiarid Mediterranean environment. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 60, p. 22–32, ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.07.003>. Acesso em: 30 jul. 2025.

COSENTINO, S. L. et al. Nitrogen economy and intensive management of *Arundo donax* L. as a perennial bioenergy crop under Mediterranean conditions. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 80, p. 195-205, fev. 2016.

DECRUYENAERE, J. G.; HOLT, J. S. Ramet demography of a clonal invader, *Arundo donax* (Poaceae), in Southern California. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 277, n. 1/2, p. 41–52, nov. 2005.

D'ANTONIO, C. M.; VITOUSEK, P. M. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. **Annual Review of Ecology and Systematics**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 63-87, nov. 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.23.110192.000431>. Acesso em: 20 set. 2024.

DOS SANTOS, A. *et al.* Reaproveitamento biotecnológico de biomassa invasora: Uso de *Arundo donax* L. como substrato lignocelulósico para o cultivo de cogumelos comestíveis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 30, n. 2, p. 112-121, mar. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

FERREIRA, L. S.; FRANCO, A. C. Impactos da invasão por *Arundo donax* L. sobre a comunidade vegetal e propriedades edáficas no Cerrado sentido restrito. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 40, e20250112, p. 1-14, jan. 2026.

FIORENTINO, N. *et al.* Giant reed (*Arundo donax* L.) for wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands in the Mediterranean Basin. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 61, part A, p. 306-314, dez. 2013.

FRANCO, A. C. Ecofisiologia de espécies lenhosas do Cerrado. *In*: BARBOSA, A. J. (org.). **Estatística vital de uma massa de vegetação**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2002. p. 113-145.

GIROTTI, L. *et al.* Phytotoxicity and allelopathic potential of extracts from rhizomes and leaves of *Arundo donax*, an invasive grass in neotropical savannas. **Journal of Plant Ecology**, Oxford, v. 14, n. 5, p. 892-905, out. 2021.

GLOBAL INVASIVE SPECIES DATABASE (GISD). Species profile: *Arundo donax*. Auckland: IUCN SSC Invasive Species Specialist Group, 2025. Disponível em: <https://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=112>. Acesso em: 2 jun. 2025.

GRIME, J. P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. **The American Naturalist**, Chicago, v. 111, n. 982, p. 1169-1194, nov./dez. 1977.

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 20, n. 3, p. 183-195, 2008.

HAWKESFORD, M. J. Plant responses to sulphur deficiency and the genetic manipulation of sulphate transporters. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 123-133, ago. 2000.

HAWORTH, M. *et al.* Allocation of biomass and photosynthetic performance of *Arundo donax* ecotypes under drought and salinity stress. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, p. 1-15, out. 2019.

HEROD, J. J.; MEDINA, R. A. Ecological impacts and management strategies for *Arundo donax* in riparian ecosystems. **Biological Invasions**, Dordrecht, v. 26, n. 4, p. 1145-1162, abr. 2024.

HEROD, J.; MARTINA, J. Influence of light, nutrients, and soil moisture on the growth and resource allocation of *Arundo donax*. **Weed Research**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 54–64, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/wre.12606>. Acesso em: 2 mai. 2026.

HERRERA VALE, A. **Panorama das plantas invasoras em áreas naturais do Brasil**: origem, espécies e biomas invadidos. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas - Ecologia e Biodiversidade) – Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

HOFFMANN, W. A.; JACKSON, R. B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 1593-1602, maio 2000. Disponível em: <https://jacksonlab.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj20871/files/media/file/jclim00.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2024.

HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C. Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 91, n. 3, p. 475–484, jun. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00777.x>. Acesso em: 12 dez. 2024.

ITA, R. E. *et al.* Utilization of Giant Reed (*Arundo donax* L.) for green composite production and eco-friendly construction materials. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 184, p. 881-892, maio 2018.

JIMÉNEZ-RUIZ, A. *et al.* Global distribution and invasion risk of *Arundo donax* L. under climate change scenarios. **Biological Invasions**, Dordrecht, v. 23, n. 4, p. 1145-1160, abr. 2021.

KULL, Christian A. Critical Invasion Science: Weeds, Pests, and Aliens. *In*: LAVE, R.; BIERMANN, C.; LANE, S. N. (ed.). **The Palgrave Handbook of Critical Physical Geography**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 249-272.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant physiological ecology**. 2. ed. New York: Springer, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>. Acesso em: 12 dez. 2025.

LAMBERT, A. M. *et al.* Nutrient storage and allocation strategies in the invasive giant reed (*Arundo donax* L.) across a gradient of environmental disturbance. **Environmental Management**, New York, v. 53, n. 4, p. 782-794, abr. 2014.

LAMBERT, A. M.; DUDLEY, T. L.; ROBBINS, J. Nutrient enrichment and soil conditions drive productivity in the large statured invasive grass *Arundo donax*.

Aquatic Botany, [s. l.], v. 112, p. 16–22, jan. 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.07.004>. Acesso em: 30 jun. 2024.

LANNES, A. C. *et al.* Soil nutrient availability and exotic plant invasions in the Brazilian Cerrado: the role of anthropogenic disturbances. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 495, n. 1, p. 115-128, jan. 2024.

LIMA, C. M. *et al.* Absorção de nutrientes e eficiência fotossintética na produção de biomassa de *Arundo donax* L. sob fertilização manejada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 12, p. 1243-1251, dez. 2014.

LOPES, A. *et al.* Predicting the range expansion of invasive alien grasses under climate change in the Neotropics. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 128–135, abr./jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.02.005>. Acesso em: 22 jan. 2024.

LOWE, S. *et al.* **100 of the World's Worst Invasive Alien Species**: a selection from the Global Invasive Species Database. Auckland: Invasive Species Specialist Group (ISSG/SSC/IUCN), 2000. Disponível em: <http://www.issg.org/booklet.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Edited by Petra Marschner. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.

MARTIN, M. *et al.* Genetic and phenotypic variation of *Phragmites australis* (common reed) under environmental stressors. **Botany Letters**, [s. l.], v. 170, n. 2, p. 215-228, 2023.

MELO, M. A. *et al.* Mechanical control inadvertently increases risk of alien plant invasion: influence of stem fragmentation and inundation regimes on *Arundo onax*. **Biological Invasions**, Dordrecht, v. 25, n. 8, p. 2415-2429, ago. 2023.

MIGUEL, A. *et al.* Ecophysiological traits contributing to the high photosynthetic capacity and efficiency of the invasive giant reed (*Arundo donax* L.). **Photosynthetica**, Prague, v. 59, n. 2, p. 302-314, jun. 2021.

MILTON, S. J. Grasses as invasive alien plants in South Africa. **South African Journal of Science**, Pretoria, v. 100, n. 1, p. 69-75, jan. 2004.

MONTEIRO, A.; TEIXEIRA, G.; MOREIRA, J. F. Parâmetros morfoanatômicos foliares de *Arundo donax* e eficácia do glifosato. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 38, n. 2, p. 131-138, 2015.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, fev. 2000. DOI <https://doi.org/10.1038/35002501>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/35002501>. Acesso em: 3 ago. 2024.

NACKLEY, L.; HOUGH-SNEE, N.; KIM, S. H. Competitive traits of the invasive grass *Arundo donax* are enhanced by carbon dioxide and nitrogen enrichment. **Weed Research**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 67–71, Apr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/wre.12239>. Acesso em: 18 dez. 2024.

NAVARRO, T.; HIDALGO-TRIANA, N. Variations in Leaf Traits Modulate Plant Vegetative and Reproductive Phenological Sequencing Across Arid Mediterranean Shrublands. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 12, art. 708367, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.708367>. Acesso em: 22 nov. 2024.

PASTORE, M. *et al.* **Plantas exóticas invasoras na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba, Santo André, SP**: guia de campo. São Paulo: Instituto de Botânica, 2012.

PIGLIUCCI, M. Phenotypic Plasticity. *In: Evolutionary Ecology*. Oxford: Oxford University Press, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195131543.003.0009>. Acesso em: 22 jun. 2025.

PIMENTEL, D.; ZUNIGA, R.; MORRISON, D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 52, n. 3, p. 273-288, fev. 2005.

PIVELLO, V. R.; SHIDA, C. N.; MEIRELES, S. T. Alien grasses in Brazilian savannas: a threat to the biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. 1281-1294, 1999.

POMPEIANO, A. et al. Growth and physiological response of *Arundo donax* L. to controlled drought stress and recovery. **Plant Biosystems**, [s. l.], v. 151, n. 5, p. 906–914, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/11263504.2016.1249427>. Acesso em: 2 set. 2024.

POUDEL, A. et al. Forthcoming risk of invasive species *Arundo donax*: global invasion driven by climate change. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 13, art. 1631747, p. 1-13, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fevo.2025.1631747>. Acesso em: 10 jun. 2025.

QUINN, L. D.; HOLT, J. S. Seed development and germination characteristics of *Arundo donax* (Poaceae) in southern California. **Madroño**, Berkeley, v. 54, n. 1, p. 24-31, jan. 2007.

RAVET, K. et al. Ferritins as pivotal elements of iron homeostasis and defense against oxidative stress in plants. **Plant Signaling & Behavior**, Philadelphia, v. 4, n. 4, p. 275-278, abr. 2009.

RIBEIRO, J. F.; MACHADO, B.; WALTER, T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. *In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. de (ed.). Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. p. 151-212.

RIGGI, E. et al. Open field experiment for the evaluation of *Arundo donax* ecotypes ecophysiology and yield as affected by soil water content. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 140, art. 111630, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111630>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SAKAKIBARA, H. Cytokinins: activity, biosynthesis, and translocation. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 57, p. 431-449, jun. 2006.

SÁNCHEZ, E. et al. Ecophysiological responses of invasive grasses under fluctuating water tables and drought. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 124, p. 45-56, abr. 2016.

SARDANS, J. et al. Field-simulated droughts affect elemental leaf stoichiometry in Mediterranean forests and shrublands. **Acta Oecologica**, [s. l.], v. 50, p. 20–31, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.04.002>. Acesso em: 20 mai. 2025.

SILVA, L. G. L. da. **Efeito alelopático e fitoquímica do rizoma e das folhas de *Arundo donax* L. (Poaceae)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SILVA, T. S. **Influência de compostos secundários e alelopatia na degradação de propriedades edáficas por macrófitas invasoras**. 2019. 142 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SIMÕES, K. C. C. **Impacto ambiental e estratégias de manejo da espécie invasora *Arundo donax* L. (cana-do-reino) no Distrito Federal, Brasil**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TORMEN, L. G. A.; TORMEN, N. **Qual a diferença entre plantas C3 e C4.**

Elevagro, 2023. Disponível em: <https://elevagro.com/conteudos/materiais-tecnicos/qual-a-diferenca-entre-plantas-c3-e-c4>. Acesso em: 27 ago. 2024.

THO, B. T. *et al.* Biomass production and nutrient accumulation of giant reed (*Arundo donax* L.) under different nitrogen application rates. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 105, p. 340-352, out. 2017.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Aspectos do Cerrado**: clima. São Paulo: IB/USP, 2023. Disponível em: http://ecologia.ib.usp.br/cerrado/aspectos_clima.htm. Acesso em: 2 set. 2025.

VELAZCO, S. J. E. *et al.* A dark scenario for Cerrado plant species: effects of future climate, land use and protected areas ineffectiveness. **Diversity and Distributions**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 660–673, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ddi.12886>. Acesso em: 30 jun. 2024.

WERNER, T. *et al.* Root-mediated cytokinin production is a major determinant of shoot size, performance and leaf senescence in Arabidopsis. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 438-449, mar. 2010.

ZENNI, R. D.; ZILLER, S. R. An overview of invasive plants in Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 431-446, set. 2011.

ZILLER, S. R. Invasive alien plants in Brazil: a review. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 4, p. 1183–1199, 2015.

ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G. **Agronomia**: avanços e perspectivas: Volume II. Nova Xavantina: Pantanal Editora, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.46420/9786581460051>. Acesso em: 30 jul. 2024.

APÊNDICE A

Tabela Suplementar 1: Resumo da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de biomassa e dinâmica foliar de *A. donax* L. aos 63 dias.

Grupo de Variável	Variável	Fator de Variação	GL	Valor F	Valor p	Sig.
BIOMASSA	B. Total	NPK	1	8,188	0,006	**
		MS	1	0,164	0,687	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	0,946	0,337	Ns
	B. Folha ¹	NPK	1	17,591	<0,001	***
		MS	1	1,423	0,24	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	11,989	0,001	**
	B. Caule	NPK	1	10,892	0,002	**
		MS	1	0,002	0,969	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	2,757	0,105	Ns
	B. Raiz	NPK	1	1,064	0,309	Ns
		MS	1	0,001	0,97	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	0,36	0,552	Ns
ÁREA FOLIAR	AFT ²	NPK	1	11,245	0,0012	**
		MS	1	2,11	0,152	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	10,87	0,0023	**
	AFE ²	NPK	1	0,854	0,361	Ns
		MS	1	1,022	0,318	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	1,147	0,29	Ns
	RAF	NPK	1	2,45	0,125	Ns
		MS	1	1,98	0,167	Ns
		Interação (NPKxMS)	1	6,58	0,0139	*

Legenda: GL: Graus de Liberdade; F: Valor da estatística de teste; p: Probabilidade de erro (p-valor). Os pressupostos de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Le-vene) foram atendidos para a maioria das variáveis ($p > 0,05$).

¹ Analisada via ART-ANOVA devido à heterocedasticidade ($p=0,008$).

² Variáveis analisadas via ART-ANOVA devido à natureza da distribuição dos dados.

Tabela Suplementar 2: Médias ($\pm$ erro padrão) das variáveis de biomassa e dinâmica foliar de *A. donax* L. sob diferentes tratamentos nutricionais aos 63 dias.

Tratamento	B. Total (g)	B. Folha (g)	B. Caule (g)	B. Raiz (g)	AFT (cm ²) ¹	AFE (cm ² /g) ¹	RAF (cm ² /g) ¹
Controle (C)	17,00 $\pm$ 1,51 b	5,40 $\pm$ 0,23 b	4,49 $\pm$ 0,22 b	7,03 $\pm$ 1,27 a	504,3 $\pm$ 25,1 b	93,4 $\pm$ 4,2 a	29,6 $\pm$ 1,8 a
MS	19,20 $\pm$ 1,51 ab	7,69 $\pm$ 0,45 a	5,11 $\pm$ 0,36 ab	6,30 $\pm$ 1,27 a	751,2 $\pm$ 48,2 ab	97,7 $\pm$ 5,1 a	39,1 $\pm$ 2,5 a
NPK	23,00 $\pm$ 1,51 a	9,06 $\pm$ 0,46 a	6,39 $\pm$ 0,39 a	7,53 $\pm$ 1,17 a	903,4 $\pm$ 52,4 a	99,7 $\pm$ 4,8 a	39,2 $\pm$ 3,1 a
NPK + MS	22,20 $\pm$ 1,51 ab	8,17 $\pm$ 0,71 a	5,74 $\pm$ 0,49 ab	8,18 $\pm$ 0,83 a	884,5 $\pm$ 65,1 a	108,2 $\pm$ 6,2 a	39,8 $\pm$ 2,9 a

Legenda: Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna diferem entre si pelo teste de Tukey (para dados com distribuição normal) ou pelo método ART-C (Aligned Rank Transform for Contrasts) para as variáveis analisadas via ART-ANOVA ($p < 0,05$). Biomassa Total (B. Total); Biomassa da Folha (B. Folha); Biomassa do Caule (B. Caule); Biomassa da Raiz (B. Raiz); Área Foliar Total (AFT); Área Foliar Específica (AFE); Razão de Área Foliar (RAF).

Tabela Suplementar 3: Resumo da Análise de Variância (ANOVA) para as concentrações de macro e micronutrientes nos órgãos de *A. donax* L. aos 63 dias.

Órgão	Fator	N (p)	P (p)	K (p)	Ca (p)	Mg (p)	S (p)	Cu (p)	Fe (p)	Mn (p)	Zn (p)
FOLHA	NPK	0,022	0,335	0,015	0,51	0,088	0,412	0,654	0,542	<0,001	0,112
	MS	0,065	0,118	0,125	0,442	0,072	0,385	0,812	0,487	0,221	0,453
	Inter.	0,154	0,224	0,331	0,187	0,04	0,122	0,721	0,336	0,005	0,221
CAULE	NPK	0,28	0,452	0,088	0,312	0,115	0,092	0,551	0,411	0,118	0,085
	MS	0,311	0,387	0,039	0,285	0,0005	0,115	0,442	0,225	0,332	0,142
	Inter.	0,442	0,115	0,112	0,441	0,221	0,018	0,318	0,187	0,441	0,031
RAIZ	NPK	0,381	0,442	0,118	0,065	0,305	0,221	0,441	0,552	0,651	0,771
	MS	0,115	0,331	0,092	0,038	0,118	0,335	0,512	0,112	0,542	0,332
	Inter.	0,221	0,098	0,321	0,112	0,442	0,441	0,221	0,445	0,331	0,118

Nota: Os valores em negrito indicam significância estatística ($p < 0,05$). Inter.: Interação NPK x MS.

APÊNDICE B

Tabela Suplementar 4: Parâmetros de biomassa e índices morfológicos de *A. donax* L. sob sazonalidade em condições de campo.

Variável	Est. Chuvosa (Média ± EP)	Est. Seca (Média ± EP)	t (Welch)	p-valor
Biomassa Caule (g)	132,97 ± 8,39	5,55 ± 0,82	15,12	< 0,001 ***
Biomassa Folha (g)	46,12 ± 3,21	8,51 ± 0,93	11,45	< 0,001 ***
Biomassa Total (g)	179,10 ± 12,40	14,06 ± 1,52	13,24	< 0,001 ***
AFT (cm ²)	6279,2 ± 415,1	198,9 ± 22,1	14,63	< 0,001 ***
AFE (cm ² /g)	136,1 ± 9,12	23,3 ± 2,84	12,18	< 0,001 ***
RAF (cm ² /g)	35,0 ± 2,10	14,1 ± 1,30	8,42	< 0,001 ***

Valores expressos em Média ± Erro Padrão (n=5). As comparações entre as estações Chuvosa e Seca foram realizadas pelo teste t de Welch (63 dias de rebrota).

Tabela Suplementar 5A: Partição do estoque total (conteúdo acumulado) de macronutrientes nos diferentes órgãos da parte aérea de *A. donax* L. sob condições de campo nas estações chuvosa e seca.

Macronutrientes

Órgão	Elemento	Chuvosa (mg)	Seca (mg)
Folha	Nitrogênio (N)	1211,91 ± 74,50	254,26 ± 38,80
Caule	Nitrogênio (N)	995,86 ± 33,77	49,80 ± 6,54
Parte Aérea	Nitrogênio (N)	2207,78 ± 77,61	304,06 ± 44,78
Folha	Fósforo (P)	60,10 ± 4,96	10,44 ± 1,76
Caule	Fósforo (P)	73,40 ± 8,80	4,82 ± 0,33
Parte Aérea	Fósforo (P)	133,50 ± 7,83	15,26 ± 1,71
Folha	Potássio (K)	913,78 ± 58,35	238,70 ± 37,98
Caule	Potássio (K)	1852,31 ± 117,12	104,00 ± 13,87
Parte Aérea	Potássio (K)	2766,10 ± 160,79	342,70 ± 49,15
Folha	Cálcio (Ca)	248,04 ± 20,60	56,51 ± 9,77
Caule	Cálcio (Ca)	139,10 ± 12,45	9,72 ± 0,79
Parte Aérea	Cálcio (Ca)	387,14 ± 31,24	66,23 ± 10,39
Folha	Magnésio (Mg)	148,39 ± 8,99	18,14 ± 2,56
Caule	Magnésio (Mg)	99,60 ± 3,52	5,60 ± 0,12
Parte Aérea	Magnésio (Mg)	248,00 ± 11,11	23,74 ± 2,67
Folha	Enxofre (S)	258,06 ± 34,94	66,98 ± 11,40
Caule	Enxofre (S)	108,45 ± 22,49	13,64 ± 2,57
Parte Aérea	Enxofre (S)	366,52 ± 35,55	80,62 ± 10,65

Nota: Valores expressos em miligramas por planta (mg/planta⁻¹), representados pela Média ± Erro Padrão (n = 5). Parte Aérea representa o estoque total acumulado obtido pela soma matemática dos tecidos vegetais (folhas + caules) de cada indivíduo.

Tabela Suplementar 5B: Partição do estoque total (conteúdo acumulado) de micronutrientes nos diferentes órgãos da parte aérea de *A. donax* L. sob condições de campo nas estações chuvosa e seca.

Micronutriente

Órgão	Elemento	Chuvosa (mg)	Seca (mg)
Folha	Ferro (Fe)	10,34 ± 1,11	2,32 ± 0,26
Caule	Ferro (Fe)	27,20 ± 3,84	0,79 ± 0,16
Parte Aérea	Ferro (Fe)	37,54 ± 4,63	3,11 ± 0,21
Folha	Zinco (Zn)	1,24 ± 0,16	0,23 ± 0,05
Caule	Zinco (Zn)	1,50 ± 0,16	0,16 ± 0,03
Parte Aérea	Zinco (Zn)	2,74 ± 0,19	0,40 ± 0,08
Folha	Cobre (Cu)	0,37 ± 0,06	0,08 ± 0,00
Caule	Cobre (Cu)	0,97 ± 0,14	0,04 ± 0,00
Parte Aérea	Cobre (Cu)	1,34 ± 0,20	0,13 ± 0,01
Folha	Manganês (Mn)	0,64 ± 0,13	0,32 ± 0,08
Caule	Manganês (Mn)	0,59 ± 0,04	0,26 ± 0,17
Parte Aérea	Manganês (Mn)	1,23 ± 0,13	0,59 ± 0,24

Nota: Valores expressos em miligramas por planta (mg/planta⁻¹), representados pela Média ± Erro Padrão (n = 5). Parte Aérea representa o estoque total acumulado obtido pela soma matemática dos tecidos vegetais (folhas + caules) de cada indivíduo.