



Crescimento e trocas gasosas de plantas de adubação verde sob estresse hídrico

Growth and gas exchange of green manure plants under water stress

E. A. C. C. Soares¹; E. R. Guimarães¹; F. S. Silva¹; J. G. J. Costa^{1*}; L. I. Silva¹;
M. D. Ribeiro¹; S. C. D. Abreu¹; A. E. D. Sousa²

¹Programa de Pós-graduação em Agronomia Tropical, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), 69080-900, Manaus-AM, Brasil

²Departamento de Produção Animal e Vegetal (DPAV)/Laboratório de Tecnologia de Produtos Agrícolas, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), 69080-900, Manaus-AM, Brasil

*joasabido12@gmail.com

(Recebido em 16 de outubro de 2024; aceito em 24 de abril de 2025)

O estresse hídrico altera o ciclo de vida das plantas, limitando sua reprodução, produção e sobrevivência. Com isso, a busca por espécies mais tolerantes às condições ambientais adversas é fundamental para segurança ambiental, pensando na saúde do solo quanto ao uso de plantas de adubação verde. Portanto, este estudo objetivou investigar os efeitos de diferentes níveis de estresse hídrico sobre três espécies de adubação verde, com foco nas respostas fisiológicas e variáveis de crescimento. O experimento foi conduzido em casa de vegetação sob um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (3 x 3), sendo três espécies de plantas - T1 - feijão de porco (*Canavalia ensiformis*), T2 - feijão guandu (*Cajanus cajan*) e T3 - crotalária (*Crotalaria juncea*) e três níveis de capacidade de campo (50%, 65% e 80%). Foram registrados diferentes comportamentos para os adubos verdes nos diferentes regimes hídricos, com diferenças significativas verificadas nas taxas de crescimento absoluto, no acúmulo de matéria seca, condutância estomática, transpiração, fotossíntese e eficiência no uso da água. O feijão guandu foi a espécie que desempenhou a maior eficiência fotossintética em relação as outras plantas de cobertura, mesmo em condições de regime hídrico severo. Contudo, o feijão de porco foi o mais tolerante ao regime sob escassez hídrica, respondendo com a melhor eficiência no uso da água e acúmulo de matéria seca dentre os adubos verdes analisados.

Palavras-chave: estresse hídrico, trocas gasosas, fisiologia vegetal.

Water stress alters the life cycle of plants, limiting their reproduction, productivity, and survival. Therefore, the search for species that are more tolerant to adverse environmental conditions is essential for environmental safety, considering soil health when using green manure plants. Therefore, this study aimed to investigate the effects of different levels of water stress on three green manure species, focusing on physiological responses and growth variables. The experiment was conducted in a greenhouse under a completely randomized design in a factorial scheme (3 x 3), with three plant species - T1 - jack bean (*Canavalia ensiformis*), T2 - pigeon pea (*Cajanus cajan*) e T3 - crotalaria (*Crotalaria juncea*) and three field capacity levels (50%, 65% and 80%). Different behaviors were recorded for green manures in different water regimes, with significant differences observed in absolute growth rates, dry matter accumulation, stomatal conductance, transpiration, photosynthesis, and water use efficiency. Pigeon pea was the species that performed the highest photosynthetic efficiency in relation to the other cover crops, even under severe water regime conditions. However, jack bean was the most tolerant to the regime under water scarcity, responding with the best water use efficiency and dry matter accumulation among the green manures analyzed.

Keywords: water stress, gas exchange, plant physiology.

1. INTRODUÇÃO

No bioma Amazônico, entre as pressões causadas por fatores bióticos e abióticos como estiagem, doenças, pragas e o cultivo em solos inférteis, a escassez hídrica é o problema que mais limita a atividade agrícola, resultando no efeito negativo do crescimento, desenvolvimento e produção das culturas [1, 2]. Os efeitos do déficit hídrico na agricultura têm sido alvo de diversos estudos na última década, principalmente devido à maior demanda de alimentos em países de clima árido [3], ao crescimento acelerado da população mundial, além do esgotamento dos

recursos hídricos, em vista que a água desempenha um papel chave em vários processos fisiológicos e metabólicos durante o crescimento e desenvolvimento das plantas [4].

Ao longo da evolução, as plantas adaptaram mecanismos para lidar com estresses ambientais, os quais variam desde a detecção do sinal inicial do estresse, até mesmo, em última instância, a ativação de respostas em nível molecular, bioquímico, celular, metabólico e fisiológico [5, 6]. Pode-se mencionar, de acordo com a literatura, uma extensiva lista de estratégias adotadas pelas plantas como resposta ao déficit hídrico resultando em alterações no padrão de crescimento e dinâmica estrutural, tais como enrolamento de folhas, mudança na razão raiz-caule, aumento do comprimento da raiz, acúmulo de solutos compatíveis, aumento na eficiência da transpiração, redução na absorção líquida de CO₂ e consequente redução da fotossíntese líquida, regulação osmótica e hormonal, senescência retardada, entre outras [5, 7].

O estresse causado pelo déficit hídrico nas plantas é o fator abiótico com maior prevalência associado às dificuldades de crescimento das plantas [2]. Pesquisas sobre a resistência ou tolerância de plantas à deficiência hídrica, ou ainda, o desenvolvimento de variedades com maior resistência ao estresse hídrico, são essenciais para mitigar as limitações da produção agrícola face aos estresses ambientais atuais [6]. Nesse sentido, algumas pesquisas têm evidenciado que é possível alcançar a resistência adquirida das plantas ao déficit hídrico, por meio de tratamentos específicos. Dentre as conquistas recentes, pode-se citar a maior eficiência no uso da água por meio da: pulverização microbiana ectofítica na cultura do arroz [8]; aplicação foliar de quitosana no amendoim forrageiro [9]; e da aplicação de ácido húmico no solo para o cultivo de brócolis [10].

Outras pesquisas têm indicado que algumas leguminosas apresentam mecanismos fisiológicos mais adaptados para tolerar o déficit hídrico, revigorando-se mais rapidamente os seus processos fisiológicos após uma retomada da irrigação [11]. Essa melhoria na eficiência do uso da água pelas leguminosas pode estar ligada ao acúmulo de matéria seca pelo menor consumo de água devido ao fechamento dos estômatos e menor taxa de transpiração [12]. Nesse contexto, pesquisas recentes vêm comprovando que algumas espécies de plantas utilizadas no plantio agrícola para produção de biomassa e enriquecimento do solo (adubos verdes), possuem potencial de tolerar ao déficit hídrico, além de contribuírem positivamente para maior eficiência do uso da água e produtividade da cultura principal, conservando e mantendo o equilíbrio hídrico entre as rotações das culturas, além de promover melhorias físico-químicas e biológicas do solo [13-17].

Atualmente, o uso de adubos verdes para promover melhorias no solo e cultura principal está bem documentado. Entretanto, grandes esforços têm sido feitos para descobrir se os adubos verdes, após incorporação ao solo, adicionam ganhos de resistência ao déficit hídrico à cultura comercial. Um registro recente mostrou que o resíduo de ervilhaca mitigou a resposta do girassol ao déficit hídrico no estágio vegetativo, mas não no estágio pós-floração [18]. Contudo, são necessários estudos primários para identificar quais espécies de adubos verdes são tolerantes à seca, quais mecanismos fisiológicos ou metabólicos utilizam para alcançar essa tolerância, como maximizam sua eficiência no uso da água, suas regulações osmóticas e trocas gasosas, entre outros fatores. O entendimento dos mecanismos adaptativos envolvidos durante o crescimento dos adubos verdes em resposta ao déficit hídrico nos mostrará novas percepções sobre como as culturas principais podem alcançar uma resistência adquirida.

Deste modo, o estudo da resistência de plantas de adubação verde à deficiência hídrica, frente ao seu tempo de cultivo, sua aceitabilidade por pequenos e médios agricultores e dos benefícios promovidos ao solo, torna-se uma opção promissora para esclarecer as características das plantas submetidas a diferentes níveis de déficit hídrico e os mecanismos de sobrevivência e adaptação adotados por elas. Portanto, este estudo objetivou investigar os efeitos de diferentes níveis de estresse hídrico sobre três espécies de adubação verde, com foco nas respostas fisiológicas e variáveis de crescimento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo e do solo

O experimento foi realizado em casa de vegetação, localizada na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas, campus de Manaus, entre setembro e outubro de 2023. As plantas foram cultivadas em vasos dentro de ambiente semicontrolado, em que fatores como sombrite e irrigação foram mantidos constantes. Durante o dia, a temperatura média registrada foi de 31°C com umidade relativa do ar a 80%.

O solo utilizado para semeadura foi coletado em área de mata nativa em condição preservada. O solo amostrado passou por secagem à sombra, seguido de destorroamento e homogeneização manual e, por fim, foi peneirado em malha de abertura de 2,0 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar [19], a qual é requisito na análise de fertilidade do solo. Em seguida, uma amostra em triplicata foi levada para laboratório onde foram realizadas as análises de textura e fertilidade do solo. A partir dos resultados analíticos, foram calculados a capacidade de troca catiônica e saturação por bases (Tabela 1), para posterior cálculo da necessidade de calagem e adubação do solo.

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do solo de estudo, Manaus, AM.

pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	T	V	MO	Argila	Silte	Areia
H ₂ O	mg.dm ⁻³			cmolc.dm ⁻³				%		g.kg ⁻¹		
4,2	4,4	9,0	0,3	0,1	2,2	10,6	11,0	3,7	53,7	600,0	60,0	340,0

pH em H₂O 1:2,5; P e K: extraídos por Mehlich-1; Ca, Mg e Al: extraídos por KCl; H+Al: extraído por acetato de cálcio; T: capacidade de troca catiônica; V: porcentagem de saturação por bases; MO: matéria orgânica, determinada via digestão úmida.

2.2 Condução do experimento

Em casa de vegetação, o experimento foi instalando alocando o solo em 27 vasos de polietileno com capacidade para 2,0 dm³ em que cada vaso constituiu uma unidade experimental. A dose de calcário aplicada foi de 5,32 t ha⁻¹ (5,32 g.dm⁻³), para se atingir uma faixa de pH e porcentagem de saturação por bases ideal (6,5 e 70%, respectivamente). O calcário utilizado foi dolomítico, com PRNT = 91%, óxido de Ca = 32%, óxido de Mg = 15%, PN = 94,5%.

Para a adubação, foram aplicados 454 mg dm⁻³ de N da fonte de ureia (44 % de N), 401 mg dm⁻³ de K₂O da fonte de KCl (60% de K₂O), 11.585 mg dm⁻³ de P₂O₅ da fonte superfosfato simples (20% P₂O₅ e 10% de Ca²⁺) e 89 mg dm⁻³ de FTE BR12 (9% de Zn, 1,8% de B, 0,8% de Cu, 2,1% de Mn e 0,1% de Mo) [20].

Após o tempo de incubação foram semeadas três espécies de adubo verde, em que cada espécie constituiu um tratamento. As espécies escolhidas são mais utilizadas em pesquisas e já são cultivadas por alguns produtores na região amazônica como planta de cobertura, sendo elas a crotalária (*Crotalaria juncea*), feijão guandu (*Cajanus cajan*) e feijão de porco (*Canavalia ensiformis*). Foram semeadas 3 sementes/vaso na profundidade de 0,5 a 1,0 cm do solo, com a finalidade de garantir o stand mínimo de plantas por unidade experimental. Dois desbastes foram feitos nas unidades experimentais, o primeiro desbaste foi executado aos dez dias após a semeadura e o segundo após o estabelecimento das plantas, deixando-se apenas uma única planta por vaso.

Para definir o teor de água em relação à capacidade de campo (CC) para cada tratamento, um teste de retenção de água pelo solo no vaso foi analisado previamente à semeadura. O solo apresentou uma capacidade de campo de 60% (511,2 ml de água / dm³ de solo). Com isso, três níveis de capacidade campo foram estabelecidos, 50% da CC (C1), 65% (C2), e 80% (C3). As unidades experimentais com cada nível de CC foram pesadas em balança analítica para possibilitar uma rega diária mantendo o mesmo teor de água por CC em cada tratamento ao longo do experimento, mesmo após o estabelecimento total das plantas, levando-se em conta as perdas de água por evaporação e transpiração. Entre outros tratos fitossanitários, destacam-se o monitoramento de pragas e doenças e controle manual de plantas daninhas.

2.3 Delineamento e avaliação experimental

O ensaio foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos consistiram em uma combinação fatorial 3 x 3, sendo três espécies de plantas: T1 (feijão de porco), T2 (feijão guandu) e T3 (crotalária); e três níveis de capacidade de campo: C1(50%), C2 (65%) e C3 (80%), em que cada tratamento foi composto por três repetições, totalizando 27 parcelas.

Conforme a visualização da emergência das sementes em cada tratamento, a avaliação do crescimento das plantas iniciou-se aos dez dias após a semeadura (DAS). A partir deste marco, semanalmente foram coletados dados sobre o número de folhas (NF) para construção da curva de crescimento das plantas. As avaliações relacionadas às variáveis de crescimento, relações alométricas e aos aspectos fotossintéticos foram realizadas aos 45 DAS. Um sensor digital Acclima Sensor Reader foi usado para registrar a temperatura e umidade do solo *in situ* diariamente. As leituras foram tomadas a 5 cm abaixo da superfície do solo usando sonda (Acclima SDI-12 sensor reader).

Ao final do experimento, inicialmente foram coletados os dados referentes à altura das plantas (ALT), diâmetro do caule (DC) e comprimento da raiz (CR). A altura foi mensurada desde a base do caule até a inserção da última folha expandida com o auxílio de trena (medida com uma trena, do colo da planta que corresponde a 2 cm após a raiz à extremidade final da última folha). O diâmetro foi medido na altura do colo das plantas no estágio de plântulas com auxílio do paquímetro digital. O comprimento da raiz foi obtido após a lavagem cuidadosa das raízes com água corrente para retirada do solo e resíduos.

Em seguida, as plantas foram seccionadas em folhas, caule e raiz, e então colocadas em sacos de papel para secarem até atingir massa constante numa estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de 70°C. Após secagem, foram determinados os parâmetros iniciais para a avaliação do crescimento dos adubos verdes: massa seca radicular (MSR, em gramas), massa seca da parte aérea (MSPA, em gramas) e, massa seca total (MST, em gramas), com uso de balança de analítica.

A seguir, os dados extraídos da fitomassa seca, juntamente com a ALT, DC e CR, foram utilizados para calcular os seguintes parâmetros: Taxa de Crescimento Absoluto (TCA) subdividida por altura (TCA altura, cm dia⁻¹), por diâmetro (TCA diâmetro, mm dia⁻¹), e por folha (TCA folha, folha dia⁻¹), obtidas a partir da razão entre a variação da matéria seca de 2 amostras medidas em 2 intervalos de tempo; e Taxa de Crescimento Relativo (TCR), subdividida por altura (TCR altura, cm cm⁻¹ dia⁻¹), por diâmetro (TCR diâmetro, mm mm⁻¹ dia⁻¹), e por folha (TCR folha, folha folha⁻¹ dia⁻¹), obtidas pelo incremento na massa da matéria seca num determinado intervalo de tempo [21]. Com os dados da massa seca total e da quantidade de água total utilizadas nas plantas foi calculada a eficiência do uso da água (EUA, g L⁻¹).

As determinações das variáveis relacionadas às trocas gasosas foram realizadas com analisador de gás a infravermelho (IRGA) portátil, de sistema aberto, modelo LI-COR 6800. Os dados foram coletados, entre 7:00 e 13:00 horas, em folhas completamente expandidas e em bom estado fitossanitário. O aparelho foi ajustado com uma densidade de fluxo de fótons saturante (PPFD) de 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, fluxo de CO₂ de 400 $\mu\text{mol s}^{-1}$, temperatura de 31° C e vapor de H₂O com 50 mmol mol⁻¹ [22]. Os parâmetros medidos foram: fotossíntese (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , mol H₂O m⁻² s⁻¹), transpiração (E , mmol H₂O m⁻² s⁻¹) e razão da concentração interna de CO₂ pela concentração de CO₂ da atmosfera (C_i/C_a , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

2.4 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade e homogeneidade de variâncias [23]. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias das variáveis dependentes foram submetidas ao teste de Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas no programa computacional SISVAR [24]. Para melhor apresentação dos resultados foram confeccionados gráficos usando o software estatístico SigmaPlot 12.1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de condução do experimento, a temperatura média do solo foi de 31°C, a temperatura mínima foi de 27°C e a temperatura máxima foi de 40°C (Figura 1A). De modo geral, os resultados dos tratamentos foram consistentes com os regimes hídricos impostos, no qual os níveis de 65% e 80% da CC ocasionaram em temperaturas do solo com médias estatisticamente iguais. Em relação a umidade do solo, com exceção do nível 50% da CC aplicado ao feijão guandu (FG), nenhum dos demais adubos verdes apresentaram variação significativa em função dos regimes hídricos aplicados (Figura 1B). Sabendo-se que os adubos verdes eram regados diariamente no mesmo dia e horário, entende-se que a umidade do solo se mantém constante e, provavelmente, não mostra maiores variações em detrimento das espécies utilizadas em ambiente semicontrolado.

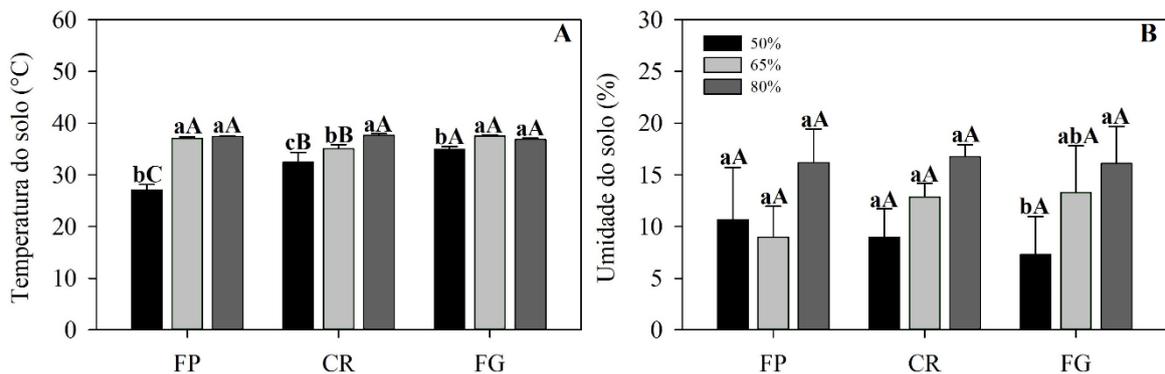


Figura 1. Temperatura e umidade do solo para os adubos verdes – FP (feijão de porco), CR (crotalária) e FG (feijão guandu), cultivados em casa de vegetação sob diferentes níveis de capacidade de campo.

Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre os níveis de regime hídrico para a mesma espécie estudada. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre as espécies estudadas para a mesma capacidade de campo.

O consumo de água ao longo do experimento variou, de modo geral, em função da temperatura incidente, a qual dita a taxa de transpiração dos adubos verdes conforme o seu número de folhas (Figura 2). Até os 14 DAS, observou-se que as espécies de adubos consomem água de modo similar. Entretanto, a partir dos 15 DAS, o FG foi o adubo verde que mais consumiu água até o fim do experimento, com valores de até 350 ml dia⁻¹ de água consumida. Esse aspecto consumista do FG pôde ser constatado também pelos parâmetros fisiológicos analisados (Figura 5).

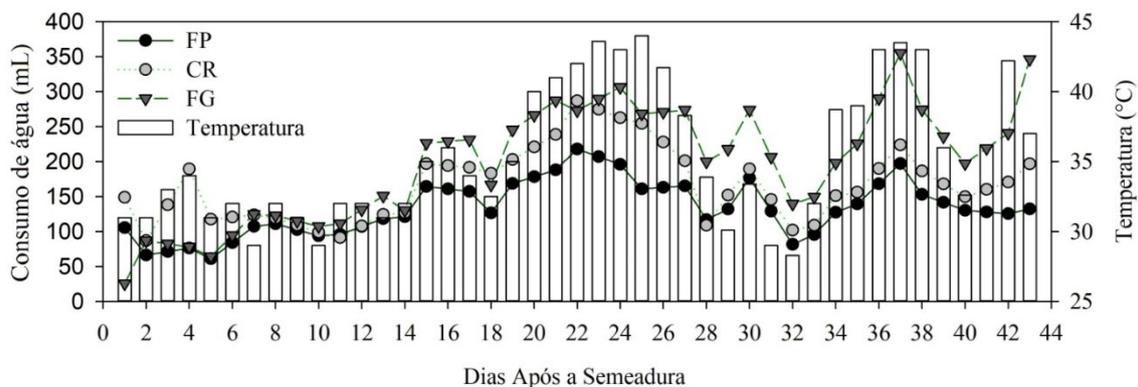


Figura 2. Percentual perda de água de plantas de coberturas cultivadas sob diferentes regimes hídricos, avaliadas 44 dias após a semeadura.

Observou-se respostas contrastantes para as variáveis de taxa de crescimento em altura, diâmetro caulinar e número de folhas entre os diferentes adubos verdes utilizados no estudo. O crescimento em altura mais veloz foi observado para o FP, no crescimento em diâmetro foi o FG e, finalmente, o maior número de folhas foi registrado pela CR (Figura 3). Essas diferenças observadas estão mais relacionadas às características evolutivas de cada espécie [25], fazendo com que o crescimento de cada espécie responda de forma diferente não só em função das suas características morfológicas e anatômicas, mas também da intensidade e duração do estresse hídrico e clima [26, 27]. Outro ponto a se considerar é que o Feijão de porco e guandu apresentaram um crescimento inicial lento em comparação com a Crotalaria, mas é devido às suas características morfológicas pelo fato que eles possuem folhas largas enquanto a CR folhas finas. Contudo, o Feijão de porco e guandu mostram as maiores taxas de crescimento absoluta e relativa em altura, respectivamente (Figura 3), evidenciando que o acúmulo de nutrientes é fator governante na taxa de crescimento após o estabelecimento total da planta. Ragozo et al. (2006) [28] também mencionam o acúmulo de nutrientes e consequente produção de biomassa como fatores que afetam tanto quanto a época, fertilização e tipo de manejo no crescimento das plantas.

Ao avaliar o crescimento dentro de cada espécie estudada, evidencia-se o efeito do déficit hídrico no crescimento das plantas (Figura 3). De maneira geral, taxa de crescimento absoluto e relativo para altura, o diâmetro caulinar e o número de folhas e foram menores para o tratamento com déficit hídrico severo (50% da CC), contudo os maiores crescimentos foram observados no tratamento com 80% da capacidade de campo. Durante os estágios iniciais de crescimento vegetativo a maioria das culturas são menos sensíveis ao déficit hídrico, contudo, quando duradouro, o déficit causa mudanças nas características fisiológicas [29], ocasionando na queda de flores [30], na diminuição do número de vagens e o aborto de sementes nas vagens [31], na produção de brotos e de folhas menores, além da redução do comprimento dos frutos [32].

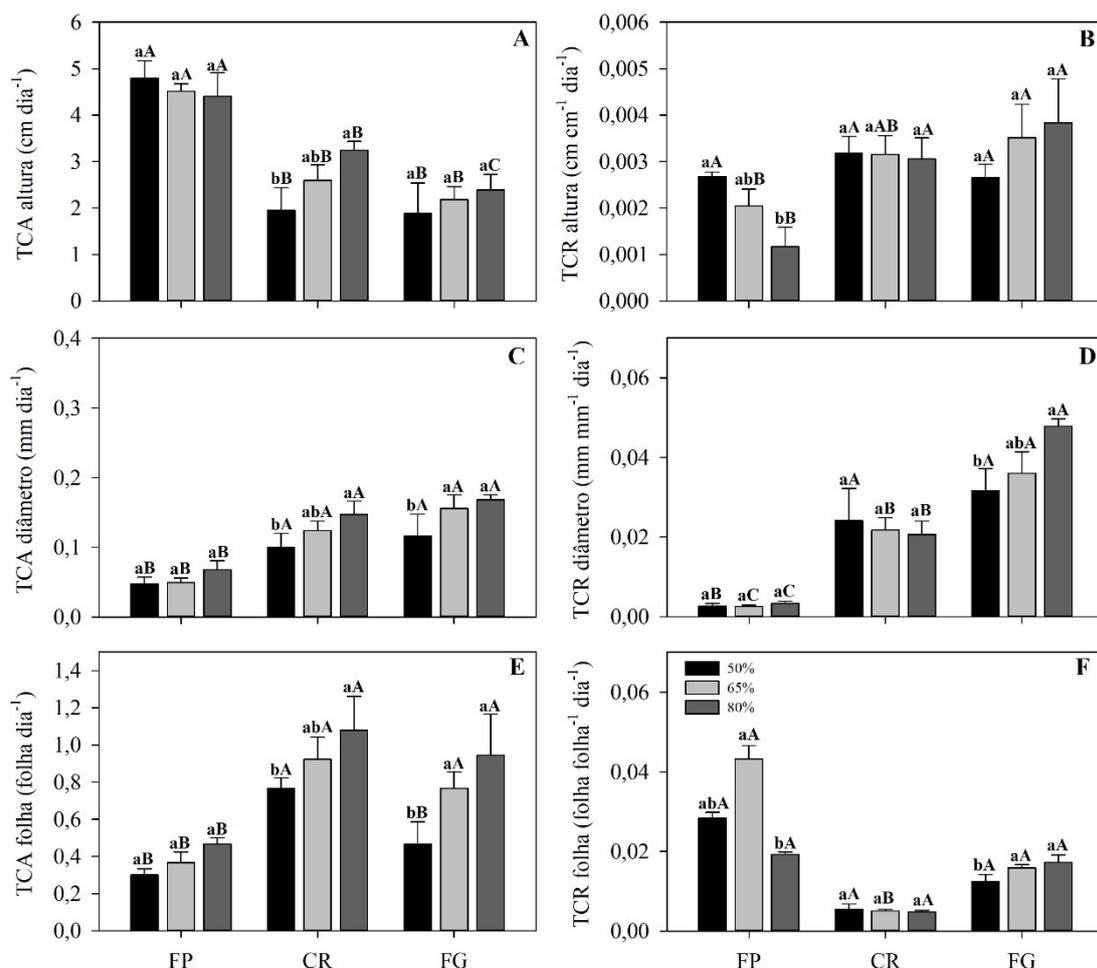


Figura 3. Taxa de crescimento absoluto e relativo para os adubos verdes – FP (feijão de porco), CR (crotalária) e FG (feijão guandu), cultivados em casa de vegetação sob diferentes níveis de capacidade de campo. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre os níveis de regime hídrico para a mesma espécie estudada. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre as espécies estudadas para a mesma capacidade de campo.

Quanto à matéria seca acumulada, observou-se que o FP apresentou médias superiores em comparação com o FG e CR, com médias de 23,73 g para a massa seca da parte aérea (MSPA), 2,83 g para a massa seca da raiz (MSR), e de 26,57 g para a massa seca total (MST), quando supridas com água à 80% da CC (Figura 4). Da mesma forma, o FP sob regimes hídricos de 65% e 50% da CC também mostrou maiores médias de MSPA em relação às outras espécies testadas, com médias de 15,73 g e 12,03 g, respectivamente. Esses resultados foram ainda mais evidentes quando expostas ao estresse hídrico de 50%. Esse melhor desempenho do FP pode ser atribuído, dentre outros fatores, à sua maior EUA, a qual foi de 2,01 g L⁻¹ (Figura 5). O FP exerceu a maior eficiência no uso da água (EUA) dentre as 3 espécies, com média estatisticamente superior em relação às demais na condição de 80% da CC.

Nesse âmbito, Ferreira et al. (2018) [33] destacam a importância de plantas de cobertura apresentarem um crescimento rápido e alta produção de matéria seca. Santos e Carlesso (1998) [34] complementam essa ideia, destacando que as respostas das plantas ao déficit hídrico são influenciadas pela intensidade do estresse e pela variabilidade genética de cada espécie. Isso se manifesta na redução da área foliar, menor condutância estomática, senescência e abscisão das folhas [35].

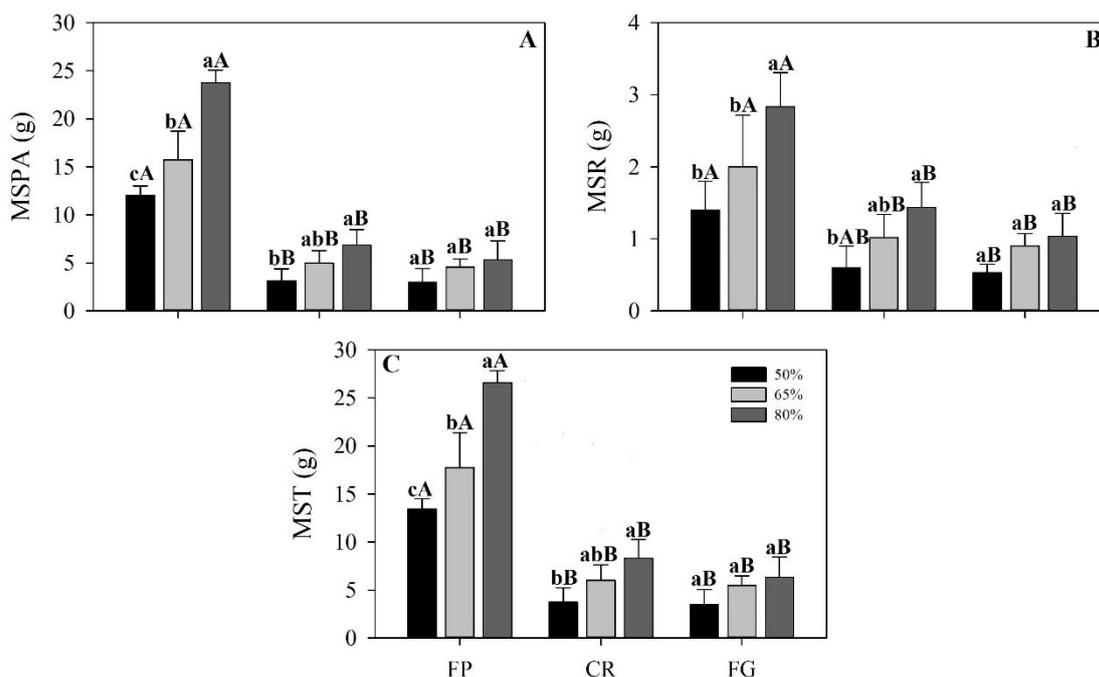


Figura 4. Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca das raízes (MSR), massa seca total (MST) para os adubos verdes – FP (feijão de porco), CR (crotalária) e FG (feijão guandu), cultivados em casa de vegetação sob diferentes níveis de capacidade de campo. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre os níveis de regime hídrico para a mesma espécie estudada. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre as espécies estudadas para a mesma capacidade de campo.

Os resultados obtidos, em relação ao acúmulo de biomassa (Figura 4), estão alinhados com outras pesquisas sobre o uso dessas espécies na adubação verde. Lima Filho et al. (2023) [36] encontraram uma maior produtividade de biomassa seca para o FP (4,34 t/ha de MSPA) em comparação com o FG (1,66 t/ha de MSPA) e a CR (1,13 t/ha de MSPA). No entanto, a análise da sensibilidade ao estresse hídrico revelou que o FP é a espécie mais afetada, com redução significativa na produção de MST quando submetida a regimes de estresse hídrico de 50% e 65%.

A CR, por sua vez, apresentou redução na produção de biomassa total (3,73 g) quando submetida ao regime de 50% da CC, corroborando com estudos anteriores [37, 38]. Essa resposta adversa ao déficit hídrico foi associada à diminuição na produção e translocação de fotoassimilados para novas áreas de crescimento, visto que a sua TCR foliar foi a menor dentre as espécies (Figura 3). O FG não exibiu diferença significativa no acúmulo de massa seca em condições de estresse hídrico, indicando uma resistência relativa à escassez de água. Em suma, apesar do FP apresentar a maior produção de biomassa, sua sensibilidade ao estresse hídrico deve ser considerada ao escolher a espécie para implantação. O FG e a CR emergem como opções mais resilientes em condições de falta de água.

Dentre os parâmetros fisiológicos, a fotossíntese (A) foi diretamente afetada pelos regimes hídricos impostos. Sob a ausência do déficit hídrico (80% CC), o FG foi a espécie com maior taxa fotossintética dentre as espécies, com média estatisticamente superior ($24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), seguida da CR ($14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e FP ($5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), respectivamente (Figura 5). Convém destacar que, de forma isolada, a CR e o FP não mostraram variação estatística para os 3 regimes hídricos aplicados. Para essas espécies, este resultado demonstra a sua capacidade de manter sua produção de fotoassimilados mesmo sob escassez hídrica, tolerando ambientes mais secos. Por outro lado, a escassez hídrica no FG acarretou num rápido declínio da eficiência fotossintética. No mesmo sentido, o FG em nível de 80% da CC foi o regime hídrico que levou a

uma maior condutância estomática (g_s) dentre os regimes ($0,5 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e também dentre as espécies para o mesmo regime.

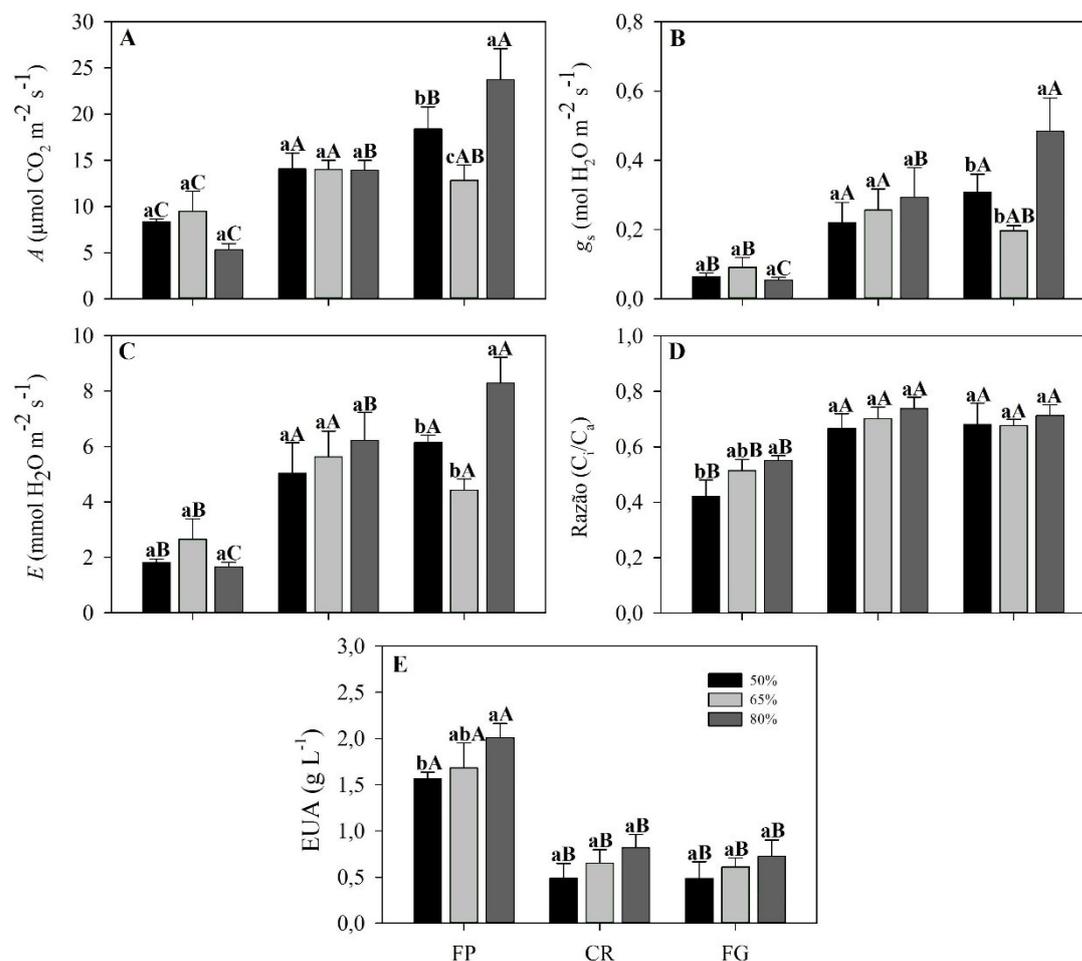


Figura 5. Fotossíntese (A), condutância estomática (g_s), Transpiração (E), Razão (C_i/C_a) e eficiência no uso da água (EUA) para os adubos verdes – FP (feijão de porco), CR (crotalária) e FG (feijão guandu), cultivados em casa de vegetação sob diferentes níveis de capacidade de campo. Letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre os níveis de regime hídrico para a mesma espécie estudada. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), entre as espécies estudadas para a mesma capacidade de campo.

Similarmente ao ocorrido com a A , a g_s da CR e do FP não variou estatisticamente para os regimes hídricos testados isoladamente por espécie. Em contraste, o FP foi a espécie que apresentou as menores g_s e transpiração (E) sob 80% da CC ($0,05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $1,8 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente). Nota-se que essas características fisiológicas são mecanismos para tolerar ao estresse. Provavelmente, essas respostas observadas tratam-se de ajustes osmóticos para manter a turgescência foliar e, conseqüentemente, a produção de biomassa. Esses ajustes garantem a produção de novas folhas e podem beneficiar até mesmo a densidade e profundidade das raízes ao longo da escassez hídrica, podendo até completar todo seu ciclo vital antes que os tecidos atinjam a deficiência hídrica [1].

Como consequência da baixa g_s , o FP foi a espécie que apresentou a menor razão C_i/C_a em todos os regimes avaliados e, conseqüentemente, exibindo a melhor eficiência no uso da água (EUA) dentre os adubos (Figura 5). Essa eficiência no uso da água do FP não diferiu sob os regimes hídricos de 80% e 65% da CC, e foi inferior a nível de 50% da CC. Este resultado é provável que tenha ocorrido devido à limitação das trocas de CO_2 , como pode-se notar pela menor

taxa fotossintética. Gao et al. (2022) [39] explicitam que a escassez hídrica leva ao fechamento estomático, reduzindo a condutância do mesófilo, limitando assim a absorção de CO₂ e a transpiração.

Contudo, nota-se que tanto o FP como a CR utilizaram mecanismos para tolerar o estresse induzido, mostrando o acúmulo de maior matéria seca, seja em parte aérea ou em raiz, e desempenhando a melhor EUA. Deste modo, o FP, seguido da CR, tornam-se uma opção como planta de cobertura para ambientes mais secos e quentes, corroborando com o entendimento de López (2012) [40], o qual descreve o comportamento edafoclimático do FP.

Por outro lado, a CR e FG desempenharam resultados similares e inferiores de EUA, sem diferenças estatísticas entre as duas espécies e entre quaisquer níveis de CC analisados. Em contraste com o FP, o FG mesmo sob os regimes hídricos de 50% CC não reduziu sua gs ao mesmo nível de regulação que o FP, desempenhando as altas taxas fotossintéticas e transpiratórias observadas em comparação aos demais adubos. Como consequência, houve uma ineficiência no uso da água, e assim, o FG proporcionou os resultados mais inferiores quanto ao acúmulo de matéria seca.

4. CONCLUSÃO

O regime hídrico severo afetou significativamente os parâmetros morfológicos avaliados, desde a germinação, emergência e até os estádios fenológicos de todas as espécies avaliadas.

O feijão de porco apresentou maior sensibilidade ao estresse hídrico, com a melhor eficiência no uso da água dentre os adubos verdes, reduzindo a produção de biomassa tanto em 50% quanto em 65% da capacidade de campo do solo.

O feijão guandu desempenhou a maior eficiência fotossintética em relação as outras plantas de cobertura, mesmo em condições de regime hídrico severo.

A Crotalaria apresentou elevada taxa de crescimento foliar e maior resistência fotossintética nas três capacidades de campo.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Amazonas (FAPEAM), à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Campos AJM, Santos SM, Nacarath IRFF. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. *Res Soc Dev.* 2021;10(15):1-7. doi: 10.33448/rsd-v10i15.23155
2. Wahab A, Abdi G, Saleem MH, Ali B, Ullah S, Shah W, et al. Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: A comprehensive review. *Plants.* 2022;11(13):1620. doi: 10.3390/plants11131620
3. Elshamly AM, Nassar SM. Impacts of cobalt and zinc on improving peanuts nutrient uptake, yield and irrigation water use efficiency under different irrigation levels. *Sci Rep.* 2024;14(1):7188. doi: 10.1038/s41598-024-56898-2
4. O'Connell E. Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change. *Water Resour Manag.* 2017;31:2965-84. doi: 10.1007/s11269-017-1734-2
5. Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, et al. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants.* 2021;10(2):259. doi: 10.3390/plants10020259
6. Wang L, Chang C. Stomatal improvement for crop stress resistance. *J Exp Bot.* 2024;75(7):1823-33. doi: 10.1093/jxb/erad477

7. Flexas J, Galmés J, Ribas-Carbó M, Medrano H. The effects of drought in plant respiration. In: Lambers H, Ribas-Carbo M, editors. *Advances in photosynthesis and respiration 18. Plant respiration: from cell to ecosystem*. Dordrecht (NL): Kluwer Academic Publishers; 2005. p. 85-94.
8. Janaki P, Alagesan A, Ejilane J, Nithila S, Balasubramaniam P, Santhy P. Effect of soil and crop management practices on sodicity stress alleviation and rice productivity under water scarce condition. *J Appl Nat Sc*. 2021;13(4):1238-48. doi: 10.31018/jans.v13i4.2930
9. Mohammed KA, Hussein HM, Elshamly AM. Monitoring plant responses in field-grown peanuts exposed to exogenously applied chitosan under full and limited irrigation levels. *Sci Rep*. 2024;14(1):6244. doi: 10.1038/s41598-024-56573-6
10. Ibrahim EA, Ebrahim NE, Mohamed GZ. Mitigation of water stress in broccoli by soil application of humic acid. *Sci Rep*. 2024;14(1):2765. doi: 10.1038/s41598-024-53012-4
11. Tenopala J, González FJ, Barrera E. Physiological responses of the green manure, *Vicia sativa*, to drought. *Bot Sci*. 2012;90(3):305-11. doi: 10.17129/botsci.392
12. Fahad S, Bajwa AA, Nazir U, Anjum SA, Farooq A, Zohaib A, et al. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Front Plant Sci*. 2017;8:1147. doi: 10.3389/fpls.2017.01147
13. Zhang D, Yao P, Na Z, Cao W, Zhang S, Li Y, et al. Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach. *Sci Rep*. 2016;6(1):26856. doi: 10.1038/srep26856
14. Karyoti A, Bartzialis D, Sakellariou-Makrantonaki M, Danalatos N. Effects of irrigation and green manure on corn (*Zea mays* L.) biomass and grain yield. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2018;18(3):820-32. doi: 10.4067/S0718-95162018005002401
15. Javaid MM, Florentine SK, Ashraf M, Mahmood A, Sattar A, Wasaya A, et al. Photosynthetic activity and water use efficiency of *Salvia verbenaca* L. under elevated CO₂ and water-deficit conditions. *J Agron Crop Sci*. 2022;208(4):536-51. doi: 10.1111/jac.12613
16. Liang Q, Zhang T, Liu Z, Gao W, Cheng Y, Feng H. Effects of different green manure crops on soil water, nitrogen, and yield: preliminary results in an apple orchard on the Loess Plateau, China. *Agron*. 2023;13(8):1-14. doi: 10.3390/agronomy13082009
17. Sarkar R, Northup BK. Simulating water stress in sorghum-sudangrass forage system with different nitrogen sources and tillage practices. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2023;23(4):5759-80. doi: 10.1007/s42729-023-01438-6
18. Souques L, Alletto L, Blanchet N, Casadebaig P, Langlade NB. Cover crop residues mitigate impacts of water deficit on sunflower during vegetative growth with varietal differences, but not during seed development. *Eur J Agron*. 2024;155:127139. doi: 10.1016/j.eja.2024.127139
19. Teixeira PC, Donagema GK, Ademir F, Teixeira WG. *Manual de métodos de análise de solo*. 3ª ed. Brasília (BR): Embrapa; 2017.
20. Malavolta E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo (BR): Agronômica Ceres; 1980.
21. Peixoto C, Cruz T, Peixoto MFSP. Análise quantitativa do crescimento de plantas: conceitos e prática. *Encicl Biosfera*. 2011;7(13):51-76.
22. Santos Junior UM, Gonçalves JFC, Feldpausch TR. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical species planted in degraded areas in central Amazonia. *For Ecol Manag*. 2006;226(1-3):299-309. doi: 10.1016/j.foreco.2006.01.042
23. Shapiro SS, Wilk MB. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 1965;52(3/4):591-611. doi: 10.2307/2333709
24. Ferreira DF. Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs: Sisvar. *Braz J Biom*. 2019;37(4):529-35. doi: 10.28951/rbb.v37i4.450
25. Xu J, Yuan Y, Xu Y, Zhang G, Guo X, Wu F, et al. Identification of candidate genes for drought tolerance by whole-genome resequencing in maize. *BMC Plant Biol*. 2014;14:83. doi: 10.1186/1471-2229-14-83
26. Killi D, Bussotti F, Raschi A, Haworth M. Adaptation to high temperature mitigates the impact of water deficit during combined heat and drought stress in C3 sunflower and C4 maize varieties with contrasting drought tolerance. *Physiol Plant*. 2016;159(2):130-47. doi: 10.1111/ppl.12490
27. Nadeem M, Li J, Wang M, Shah L, Lu S, Wang X, et al. Unraveling field crops sensitivity to heat stress: Mechanisms, approaches, and future prospects. *Agron*. 2018;8:128. doi: 10.3390/agronomy8070128
28. Ragozo CRA, Leonel S, Crocci AJ. Adubação verde em pomar cítrico. *Rev Bras Frutic*. 2006;28(1):69-72. doi: 10.1590/s0100-29452006000100020
29. Nemeskéri E, Helyes L. Physiological responses of selected vegetable crop species to water stress. *Agron*. 2019;9(8):447. doi: 10.3390/agronomy9080447

30. Fang X, Turner NC, Yan G, Li F, Siddique KHM. Flower numbers, pod production, pollen viability, and pistil function are reduced and flower and pod abortion increased in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought. *J Exp Bot.* 2010;61(2):335-45. doi: 10.1093/jxb/erp307
31. Sehgal A, Sita K, Siddique KHM, Kumar R, Oliver MJ. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Front Plant Sci.* 2018;9:1705. doi: 10.3389/fpls.2018.01705
32. Durigon A, Evers J, Metselaar K, Lier QDJV. Water stress permanently alters shoot architecture in common bean plants. *Agron.* 2019;9(3):160. doi: 10.3390/agronomy9030160
33. Ferreira ACDB, Borin ALDC, Bogiani JC, Lamas FM. Suppressive effects on weeds and dry matter yields of cover crops. *Pesqui Agropecu Bras.* 2018;53(5):566-74. doi: 10.1590/S0100-204X2018000500005
34. Santos RF, Carlesso R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Rev Bras Eng Agríc Ambient.* 1998;2(3):287-94. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p287-294
35. Taiz L, Zeiger E, Moller IM, Murphy A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal.* 6ª ed. Porto Alegre (RS): Artmed; 2017.
36. Lima Filho OF, Ambrosano EJ, Wutke EB, Rossi F, Carlos AP. *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil - Fundamentos e Prática.* 2ª ed. Brasília (BR): EMBRAPA; 2023.
37. Larcher W. *Ecofisiologia vegetal.* Tradução: Prado CHBA. São Carlos (BR): Ed. Rima; 2006.
38. Nogueira, RJMC, Albuquerque MB, Silva EC. Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga. In: Nogueira RJMC, Araújo EL, Willadino LG, Cavalcante UMT, editores. *Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas.* Recife (BR): UFRPE; 2005. p. 22-31.
39. Gao H, Bai N, Zhang Y, Zhang XH, Zhang YJ, Wang L, et al. Drought stress alters gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzyme activities in *Glycyrrhiza uralensis* in the Hexi Corridor, China. *Russ J Plant Physiol.* 2022;69(6):123. doi: 10.1134/S102144372206005X
40. López RES. *Canavalia ensiformis* (L) DC (Fabaceae). *Rev Fitos.* 2012;7(3):146-51. doi: 10.32712/2446-4775.2012.149