

RAZÕES BIOMÉTRICAS E NUTRICIONAIS DE *Crambe abyssinica* EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA

TAFAREL VICTOR COLODETTI¹, WAGNER NUNES RODRIGUES², LIMA DELEON MARTINS³, SEBASTIÃO VINÍCIUS BATISTA BRINATE⁴, BRUNO FARDIM CHRISTO⁵, SAMUEL COLA PIZETTA⁶, RODRIGO AMARO DE SALLES⁷, RENAN BAPTISTA JORDAIM⁸, EDVALDO FIALHO DOS REIS⁹, MARCELO ANTONIO TOMAZ¹⁰

¹Doutor em Produção Vegetal, Pesquisador de Desenvolvimento Científico e Regional do CNPq/FAPES, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES). tafarelcolodetti@hotmail.com.

²Doutor em Produção Vegetal, Professor do Centro Universitário UNIFACIG. wagner.nunes@sempre.unifacig.edu.br.

³Doutor em Produção Vegetal, Professor do Centro Universitário São Camilo, Pesquisador no Grupo Geotechnology Applied to Global Environment (CCAUE-UFES). limadeleon@saocamilo-es.br.

⁴Doutor em Produção Vegetal, Professor do Centro Universitário UNIFACIG. sebastiao.vinicius@sempre.unifacig.edu.br.

⁵Doutorando em Administração, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). brunochristo@hotmail.com.

⁶Doutor em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras (UFLA). scpizetta@hotmail.com.

⁷Doutorando em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa (UFV). rodrigoamarodesalles@gmail.com.

⁸Doutorando em Agronomia, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES). renan_jordaim@hotmail.com.

⁹Doutor em Engenharia Agrícola, Professor do departamento de Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da UFES (CCAUE-UFES). edreis@cca.ufes.br.

¹⁰Doutor em Fitotecnia, Professor do departamento de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da UFES (CCAUE-UFES). marcelo.tomaz@ufes.br.

RESUMO

Objetivou-se analisar as razões biométricas e nutricionais de plantas de *Crambe abyssinica* em função de diferentes níveis de adubação fosfatada e de disponibilidade hídrica no solo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação e em esquema fatorial, 4×3 , com a adubação fosfatada em quatro níveis e a disponibilidade hídrica em três níveis, em delineamento inteiramente casualizado. As parcelas experimentais foram cultivadas sob as condições dos tratamentos até o florescimento. O material vegetal foi coletado separadamente para quantificação das variáveis e o cálculo das razões biométricas e nutricionais, sendo elas: razão de massa foliar, razão de massa caulinar, razão de massa radicular, razão de área foliar, teor de P foliar, conteúdo de P foliar, conteúdo de P nos caules, conteúdo de P nas raízes, razão entre a área foliar e o conteúdo de P foliar, razão entre a massa seca de raízes e o conteúdo de P radicular, razão entre a massa seca da parte aérea e o conteúdo de P nas folhas e caules, e razão entre a massa seca total e o conteúdo total de P. O acúmulo do P é favorecido pela maior disponibilidade hídrica e níveis de fósforo, tendo efeito direto sobre a quantidade de biomassa e área foliar produzidas por massa acumulada do nutriente. A variação nas proporções de massa alocada nas folhas e raízes é maior quando o crambe foi conduzido com a menor disponibilidade hídrica. Porém, apresenta maior proporção de massa destinadas ao sistema radicular quando há maior fornecimento de fósforo, certamente para atuar como mecanismo de contorno aos efeitos do déficit hídrico.

Palavras-chave: Adubação; Irrigação; Nutrição mineral; Plantas oleaginosas.

BIOMETRIC AND NUTRITIONAL RATIOS FOR *Crambe abyssinica* AS A FUNCTION OF PHOSPHATE FERTILIZATION AND WATER AVAILABILITY

ABSTRACT

The objective was to analyze the biometric and nutritional ratios of *Crambe abyssinica* plants as a function of different levels of phosphate fertilization and soil water availability. The experiment was carried out in greenhouse and in a factorial scheme, 4×3 , with four levels of phosphate fertilization and three levels and water availability, in a completely randomized design. The experimental plots were grown under the conditions of the treatments until flowering. Plant material was separately collected to quantify the variables in order to calculate the biometric and nutritional ratios, namely: leaf mass ratio, stem mass ratio, root mass ratio, leaf area ratio, P content in leaves, P accumulation in leaves, P accumulation in stems, P accumulation in roots, ratio between leaf area and P accumulation in leaves, ratio between root dry mass and P accumulation in root, ratio between dry mass of shoots and P accumulation in leaves and stems, and ratio between total dry mass and P accumulation total. The P accumulation is favored by greater water availability and phosphorous level, having a direct effect on the amount of biomass and leaf area produced per accumulated mass of the nutrient. The variation in the proportions of mass allocated to leaves and roots was greater when crambe was conducted with the smaller water availability. However, it presents greater proportion of mass destined for the root system when there is a greater supply of phosphorous, certainly to act as a mechanism to overcome the effects of water stress.

Keywords: Adubation; Irrigation; Mineral nutrition; Oil plants.

1 INTRODUÇÃO

O crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) é uma espécie oleaginosa da família Brassicaceae, com grande potencial para a produção de biodiesel, tornando-se uma alternativa para a ampliação da matriz energética renovável (SOUZA *et al.*, 2009). Contudo, ainda são necessários mais estudos afim de fortalecer o conhecimento sobre a cultura no Brasil, para otimizar os recursos aplicados, explorar sustentavelmente os recursos naturais, ampliar a variabilidade genética e a seleção de novas variedades, entre outros (JUNGINGER *et al.*, 2006; COLODETTI *et al.*, 2012).

O crambe apresenta ciclo curto, cerca de 90 dias entre a semeadura e a colheita, podendo chegar a 1500 kg ha^{-1} de produtividade (VIECELLI *et al.*, 2017). No Brasil, o crambe tem apresentado adaptabilidade ao clima, rusticidade, precocidade, tolerância relativa a alguns estresses bióticos, sendo uma alternativa para a rotação de culturas, com cultivo totalmente mecanizado em safrinha e aproveitamento de estruturas e equipamentos utilizados em outras espécies, como os da soja, por exemplo (ROSCOE; DELMONTES, 2008).

A escassez de fósforo (P) é apontada como a maior limitação aos cultivos em solos tropicais (AMARAL *et al.*, 2012; MARTINS *et al.*, 2013). No entanto, frente aos cenários de mudanças climáticas, um dos grandes desafios do futuro será a manutenção dos níveis de água

no solo associada à nutrição mineral adequada (SIGUEIRA *et al.*, 2010). Nesse contexto, estudos de plantas em condições hídricas e nutricionais limitantes se destacam na formação do conhecimento e na tomada de decisão sobre as necessidades dos cultivos. A deficiência de P pode levar ao acúmulo de amido nos cloroplastos, diminuir o transporte de carboidratos e a atividade das enzimas dependentes de fosforilação, em especial aquelas envolvidas no processo de absorção ativa de nutrientes (MARSCHNER, 2012).

Muitas espécies vegetais apresentam capacidades distintas em tolerar o déficit hídrico para manter a atividade metabólica, mesmo em condições de evolução da restrição hídrica (LAWN; LIKOSWE, 2008). No entanto, essas estratégias para contornar o déficit hídrico e manter a planta viva, afetam, frequentemente, a capacidade produtiva (BLUM, 2005). Essas considerações justificam a necessidade em conhecer a capacidade de crescimento e produção das plantas em condições variadas de disponibilidade hídrica no solo, tendo em vista que as espécies podem suportar de forma diferenciada determinadas faixas de água disponível no solo (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

A análise de crescimento de plantas e sua relação com o estado nutricional é uma ferramenta importante na evolução do conhecimento a respeito da resistência das plantas a condições adversas de solo e clima (limitação hídrica ou nutricional), assim como a resposta a condições favoráveis. Nesse contexto, objetivou-se analisar as razões biométricas e nutricionais de plantas de *Crambe abyssinica* em função de diferentes níveis de adubação fosfatada e de disponibilidade hídrica no solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES), no município de Alegre-ES, a uma altitude de 136 m e com coordenadas geográficas de 20°45'02" S e 41°29'17" W.

As sementes de crambe (*Crambe abyssinica* Hochst), cultivar FMS Brilhante, foram fornecidas pela Fundação MS e cultivadas em vasos plásticos com capacidade para 14 dm³. Foi realizado o semeio de cinco sementes por vaso e, após a emergência, realizou-se o desbaste deixando apenas uma planta por vaso.

O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo e coletado a uma profundidade de 10 a 30 cm. O mesmo foi analisado quimicamente, apresentando baixo teor de fósforo (5,96 mg dm⁻³), confirmando ser um solo viável para estudos com níveis de adubação fosfatada.

O experimento foi conduzido em esquema fatorial, 4×3 , com a adubação fosfatada em quatro níveis e a disponibilidade hídrica em três níveis, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Cada parcela experimental foi constituída de uma planta por vaso.

Os quatro níveis de adubação com fósforo (P_2O_5) foram estabelecidos de modo a fornecer 20%, 60%, 100% e 130% da recomendação para ensaios em ambientes controlados e restritos (NOVAIS *et al.*, 1991), correspondendo, respectivamente, a 0,06; 0,18; 0,30 e 0,39 g de P_2O_5 por quilograma de solo (todos os vasos foram padronizados com 12 kg de solo). Essa adubação com P foi realizada em dose única, previamente à semeadura e incorporada ao solo. A adubação com N e K_2O seguiu o nível de 100% da recomendação segundo Novais *et al.* (1991), porém, distribuída em três parcelas, realizadas aos 15, 25 e 35 dias após a semeadura.

Para o fator disponibilidade hídrica, adotou-se o referencial de 80% de água disponível no solo (AD) como padrão de irrigação para o crambe, conforme confirmado na literatura (COLODETTI *et al.*, 2015; 2018; 2021). Os níveis de AD estudados foram 80%, 50% e 25%, realizando-se a irrigação quando a umidade do solo atingia os níveis correspondentes de cada tratamento, retornando a umidade ao nível referencial. As plantas foram mantidas nessas condições dos 15 aos 45 dias após a emergência, através do monitoramento diário do peso dos vasos.

Anteriormente à implementação do experimento, foi realizada a análise físico-hídrica do solo para obtenção dos parâmetros necessários à determinação das lâminas de irrigação, de acordo com a metodologia descrita por Bernardo *et al.* (2008). A análise físico-hídrica foi realizada de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997) (Tabela 1).

Tabela 1 – Atributos físico-hídricos do solo utilizado como substrato

Análise Granulométrica			Ds	Dp	PT	CC	PMP
Areia	Silte	Argila					
----- % -----			----- kg dm-3 -----		m-3 m-3	----- % -----	
49,10	5,30	45,60	1,10	2,71	0,592	28,80	13,57

Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partícula; PT = porosidade total; CC = percentual de umidade do solo na capacidade de campo (tensão de 0,01 Mpa); PMP = percentual de umidade do solo no ponto de murcha permanente (tensão de 1,5 Mpa). Fonte: os autores.

O experimento foi conduzido ao longo de 45 dias de cultivo, o que permitiu abranger as fases de emergência, plântula, crescimento vegetativo e finalizar no início do estágio fenológico de florescimento.

Ao final do experimento, as plantas foram coletadas para mensuração das seguintes características: área foliar da planta (AF; cm²), mensurada com o integrador de área foliar (Area Meter LiCor LI3100C); massa seca de folhas (MSF; g), caules (MSC; g) e raízes (MSR; g), por meio da secagem do material vegetal em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C ±2 °C, até atingir massa constante e pesados em balança eletrônica de precisão (0,0001 g); e os teores de fósforo nas folhas (TPF, g kg⁻¹), caules (TPC, g kg⁻¹) e raízes (TPR, g kg⁻¹), de acordo com a metodologia para análises químicas de teores de nutrientes proposta por Silva (1999). Com base no levantamento dessas informações, foi possível estabelecer as relações biométricas e nutricionais, conforme descritas nas Equações de 1 a 11:

$$RMF (\%) = \frac{MSF}{(MSF + MSC + MSR)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

RMF é a razão de massa foliar (%), MSF é a massa seca de folhas (g), MSC a massa seca de caules (g) e MSR a massa seca de raízes (g).

$$RMC (\%) = \frac{MSC}{(MSF + MSC + MSR)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

RMC é a razão de massa caulinar (%), MSF é a massa seca de folhas (g), MSC a massa seca de caules (g) e MSR a massa seca de raízes (g).

$$RMR (\%) = \frac{MSR}{(MSF + MSC + MSR)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

RMR é a razão de massa radicular (%), MSF é a massa seca de folhas (g), MSC a massa seca de caules (g) e MSR a massa seca de raízes (g).

$$RAF (cm^2 g^{-1}) = \frac{AF}{(MSF + MSC + MSR)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

RAF é a razão de área foliar (cm² g⁻¹), AF é a área foliar (cm²), MSF é a massa seca de folhas (g), MSC a massa seca de caules (g) e MSR a massa seca de raízes (g).

$$CPF (mg) = TPF .MSF$$

Equação 5

Onde:

CPF é o conteúdo de fósforo nas folhas (mg), TPF é o teor de fósforo nas folhas (g kg⁻¹) e MSF é a massa seca de folhas (g).

$$CPC (mg) = TPC .MSC$$

Equação 6

Onde:

CPC é o conteúdo de fósforo nos caules (mg), TPC é o teor de fósforo nos caules (g kg⁻¹) e MSC é a massa seca de caules (g).

$$CPR (mg) = TPR .MSR$$

Equação 7

Onde:

CPR é o conteúdo de fósforo nas raízes (mg), TPR é o teor de fósforo nas raízes (g kg⁻¹) e MSR é a massa seca de raízes (g).

$$AFP (cm^2 mg^{-1}) = \frac{AF}{CPF}$$

Equação 8

Onde:

AFP é a razão entre a área foliar e o conteúdo de fósforo foliar (cm² mg⁻¹), AF é a área foliar da planta (cm²) e CPF o conteúdo de fósforo nas folhas (mg).

$$MRP (g mg^{-1}) = \frac{MSR}{CPR}$$

Equação 9

Onde:

MRP é a razão entre a massa seca de raízes e o conteúdo de fósforo radicular (g mg⁻¹), MSR é a massa seca de raízes (g) e CPR é o conteúdo de fósforo nas raízes (mg).

$$MPAP (g mg^{-1}) = \frac{MSF + MSC}{CPF + CPC}$$

Equação 10

Onde:

MPAP é a razão entre a massa seca da parte aérea e o conteúdo de fósforo na parte aérea (g mg⁻¹), MSF é a massa seca de folhas (g), MSC é a massa seca de caules (g), CPF é o conteúdo de fósforo nas folhas (mg) e CPC é o conteúdo de fósforo nos caules (mg).

$$MTP (g\ mg^{-1}) = \frac{MSF + MSC + MSR}{CPF + CPC + CPR}$$

Equação 11

Onde:

MTP é a razão entre a massa seca total e o conteúdo de fósforo total da planta ($g\ mg^{-1}$), MSF é a massa seca de folhas (g), MSC é a massa seca de caules (g), MSR é a massa seca de raízes (g), CPF é o conteúdo de fósforo nas folhas (mg), CPC é o conteúdo de fósforo nos caules (mg) e CPR é o conteúdo de fósforo nas raízes (mg).

Os dados foram submetidos à análise de variância (5% de probabilidade) e, na presença de efeito significativo para as fontes de variação, empregou-se o teste de Tukey para comparação das médias em função da disponibilidade hídrica e análise de regressão para o estudo das médias em função dos níveis de fósforo no solo (ambos a 5% de probabilidade). Os modelos de regressão foram selecionados com base na significância dos coeficientes angulares e nos valores dos coeficientes de determinação (R^2). A análise foi realizada utilizando o software estatístico “Sisvar” (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS

Houve interação significativa entre os fatores estudados para todas as variáveis analisadas ($p \leq 0,05$). Houve maior investimento em alocação de massa foliar (RMF) e de razão de área foliar (RAF) em função de maior disponibilidade hídrica no solo, principalmente com os níveis intermediários de adubação com fósforo (0,18 e 0,30 $g\ kg^{-1}$). No entanto, não houve modificação nas proporções de massa alocada nos caules (RMC), com exceção do observado para o nível de 0,06 $g\ kg^{-1}$ de P. Em contrapartida, parece haver uma maior destinação de biomassa alocada nas raízes (RMR) em função do menor nível de água disponível no solo (AD), associado com o aumento da suplementação com P. Essa constatação não se sustentou quando foi empregado o menor nível de adubação com P, visto que as maiores disponibilidades hídricas favoreceram maiores valores de RMR (Tabela 2).

Ao analisar a Tabela 3, notou-se que a disponibilidade hídrica alterou a concentração foliar de P (TPF), bem como os conteúdos desse nutriente nas folhas (CPF), caules (CPC) e raízes (CPR). No geral, os maiores TPF foram encontrados com os maiores níveis de água disponível e adubação com fósforo no solo, com exceção do nível de 0,18 $g\ kg^{-1}$ de P, onde não foram observadas diferenças significativas. Para o conteúdo de P, não houve diferenças no CPF e no CPC em função dos níveis de água no solo e para a adubação com 0,06 $g\ kg^{-1}$ de P. No entanto, na medida em que as doses de fósforo aumentaram, percebeu-se maior diferenciação entre os níveis de disponibilidade hídrica, onde as maiores médias de CPF e CPC foram obtidas

no nível de 80% de AD. Para o CPR, as maiores médias também foram encontradas com 80% de AD em todos os níveis de fósforo no solo, com exceção apenas para a adubação com 0,30 g kg⁻¹.

Tabela 2 – Razão de massa foliar (RMF), razão de massa caulinar (RMC), razão de massa radicular (RMR) e razão de área foliar (RAF) de plantas de crambe em função da disponibilidade hídrica e níveis de suplementação com fósforo no solo

Variável	Disponibilidade hídrica	Nível de P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹ de solo)			
		0,06	0,18	0,30	0,39
RMF (%)	80%	48,1 ab	52,5 a	47,9 a	44,8 a
	50%	45,6 b	51,6 a	47,7 a	41,2 b
	25%	50,6 a	47,8 b	44,0 b	40,1 b
RMC (%)	80%	41,1 b	36,9 a	39,5 a	39,0 a
	50%	44,4 a	34,1 a	36,5 a	40,7 a
	25%	43,2 ab	36,9 a	37,4 a	39,2 a
RMR (%)	80%	10,8 a	10,6 b	12,6 c	16,2 c
	50%	10,0 a	14,3 a	15,8 b	18,1 b
	25%	6,2 b	15,3 a	18,6 a	20,7 a
RAF (cm ² g ⁻¹)	80%	159,0 a	181,1 a	181,7 a	137,9 a
	50%	141,7 b	165,0 b	161,7 b	134,2 a
	25%	156,3 a	165,1 b	147,2 c	119,9 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Fonte: os autores.

Tabela 3 – Teor de fósforo foliar (TPF), conteúdo de fósforo nas folhas (CPF), conteúdo de fósforo nos caules (CPC) e conteúdo de fósforo nas raízes (CPR) de plantas de crambe em função da disponibilidade hídrica e níveis de suplementação com fósforo no solo

Variável	Disponibilidade hídrica	Nível de P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹ de solo)			
		0,06	0,18	0,30	0,39
TPF (g kg ⁻¹)	80%	3,14 b	4,84 a	6,56 a	9,99 a
	50%	4,13 a	5,42 a	6,29 ab	9,26 a
	25%	3,20 b	4,94 a	5,62 b	7,45 b
CPF (mg)	80%	15,55 a	35,54 a	51,16 a	89,54 a
	50%	16,70 a	25,89 b	40,50 b	54,79 b
	25%	11,99 a	20,65 b	31,96 c	37,83 c
CPC (mg)	80%	11,32 a	21,67 a	31,07 a	46,95 a
	50%	11,70 a	12,39 b	19,79 b	33,59 b
	25%	9,85 a	12,81 b	17,80 b	24,68 c
CPR (mg)	80%	2,79 a	4,93 a	8,73 a	17,09 a
	50%	1,54 b	3,83 b	8,50 a	12,26 b
	25%	0,80 b	3,71 b	9,19 a	12,65 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Fonte: os autores.

A variação na disponibilidade hídrica do solo não afetou significativamente a capacidade de formação de área foliar por unidade de P contida na biomassa foliar (AFP), nem a quantidade de biomassa radicular produzida por unidade de P nas raízes (MRP), quando se realizou a adubação fosfatada com 0,30 e 0,39 g kg⁻¹. Nas menores doses de fósforo (0,06 e

0,18 g kg⁻¹), os níveis de 50% e 80% de AD ocasionaram as menores médias para o AFP e MRP, respectivamente. Para a produção de massa seca da parte aérea (MPAP) e total (MTP) por unidade de P, não houve efeito significativo dos níveis de AD na dose de 0,18 g kg⁻¹. No geral, o nível de 25% de AD favoreceu maiores médias de MPAP e MTP nos demais níveis de adubação com fósforo (Tabela 4).

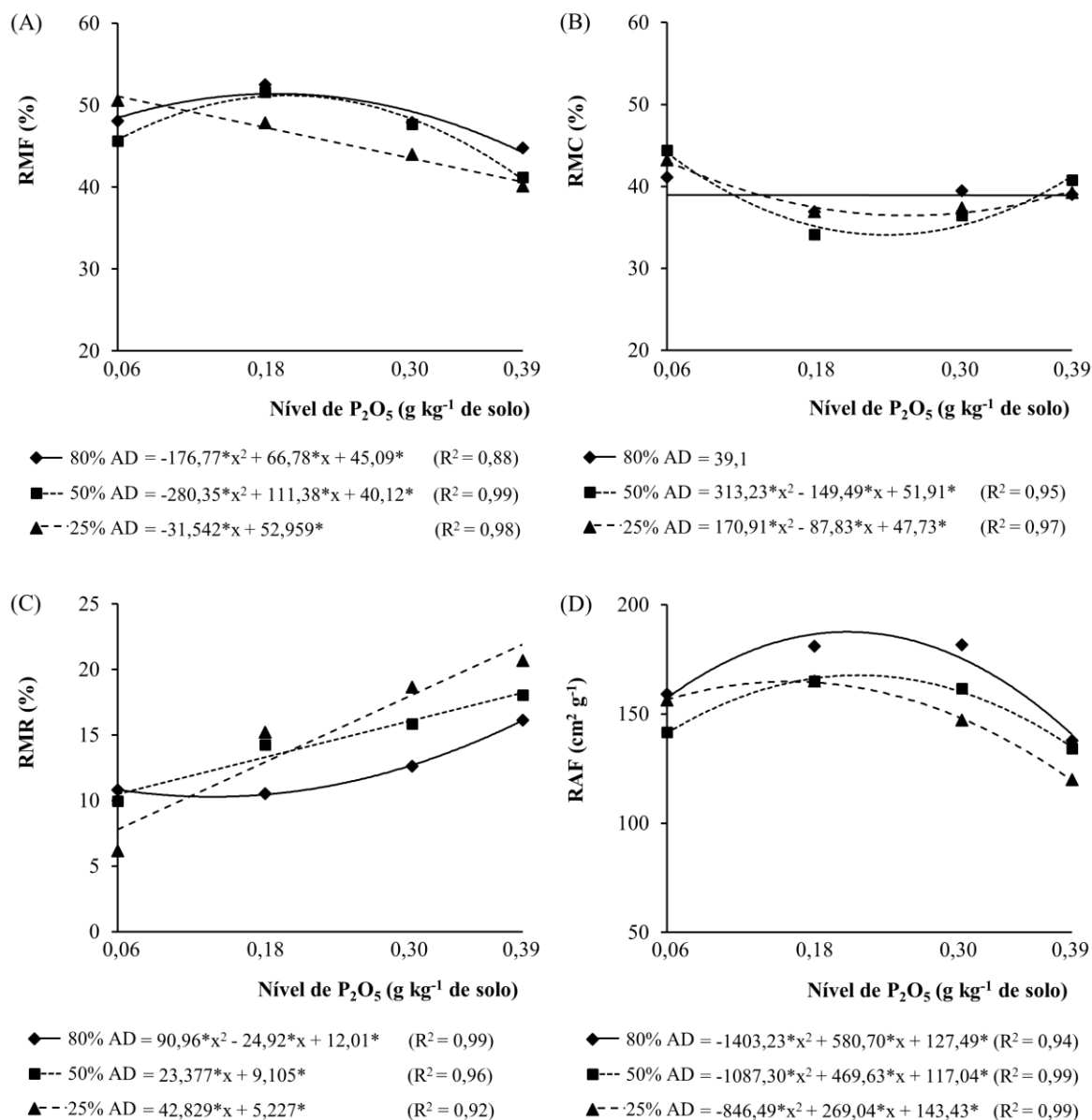
Tabela 4 – Razão entre a área foliar e o conteúdo de P das folhas (AFP), razão entre a massa seca de raízes e o conteúdo de P radicular (MRP), razão entre a massa seca da parte aérea e o conteúdo de P nas folhas e caules (MPAP) e razão entre a massa seca total e o conteúdo total de P (MTP) de plantas de crambe em função da disponibilidade hídrica e níveis de suplementação com fósforo no solo

Variável	Disponibilidade hídrica	Nível de P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹ de solo)			
		0,06	0,18	0,30	0,39
AFP (cm ² mg ⁻¹)	80%	105,52 a	71,64 a	58,19 a	30,91 a
	50%	76,13 b	59,22 b	54,04 a	35,31 a
	25%	97,08 a	70,04 a	59,66 a	40,53 a
MRP (g mg ⁻¹)	80%	0,40 b	0,30 b	0,24 a	0,19 a
	50%	0,58 a	0,35 a	0,25 a	0,21 a
	25%	0,58 a	0,36 a	0,26 a	0,21 a
MPAP (g mg ⁻¹)	80%	0,34 a	0,22 a	0,17 b	0,12 b
	50%	0,28 b	0,21 a	0,19 ab	0,13 b
	25%	0,32 a	0,22 a	0,21 a	0,16 a
MTP (g mg ⁻¹)	80%	0,35 a	0,22 a	0,18 b	0,13 b
	50%	0,30 b	0,22 a	0,20 b	0,14 b
	25%	0,33 a	0,24 a	0,22 a	0,17 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Fonte: os autores.

Pela análise de regressão, observou-se os maiores investimentos em massa foliar (RMF) nos níveis de 0,19 e 0,20 g kg⁻¹ de adubação com P, quando as plantas de crambe foram supridas com 80% e 50% de AD, respectivamente. Já para o nível de 25% de AD, houve diminuição linear da RMF na medida em que se aumentou as doses de fósforo no solo (Figura 1A). Para a RMC, não houve alteração significativa em função dos níveis de fósforo com irrigação em 80% da AD. Em contrapartida, as menores RMC ocorreram nos níveis de 0,24 e 0,26 g kg⁻¹ de P, com o fornecimento de 50% e 25% de AD, respectivamente (Figura 1B). Além disso, foi possível notar incrementos na proporção de massa alocada nas raízes (RMR) com o aumento no suprimento de fósforo no solo, para todos os manejos hídricos estudados (Figura 1C). Ao analisar a área foliar formada por unidade de massa seca da planta (RAF), notou-se que os maiores valores foram obtidos nas doses de fósforo de 0,21 g kg⁻¹, 0,22 g kg⁻¹ e 0,16 g kg⁻¹, para os níveis de 80%, 50% e 25% de AD, respectivamente (Figura 1D).

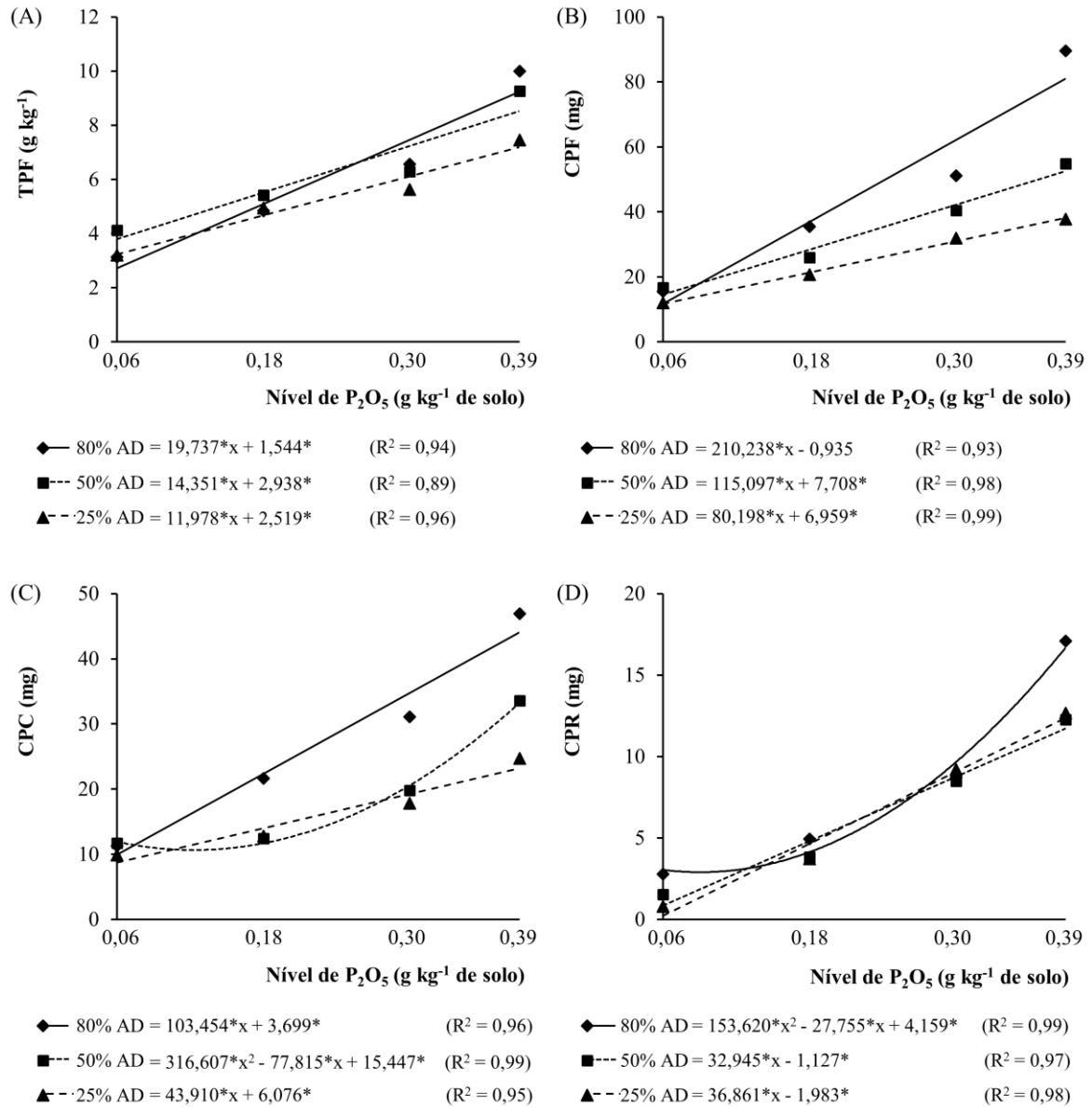
Figura 1 – Análise de regressão para a razão de massa foliar (A), razão de massa caulinar (B), razão de massa radicular (C) e razão de área foliar (D) de plantas de crambe em função dos níveis de adubação com fósforo, para cada nível de disponibilidade hídrica no solo (AD)



*coeficiente da regressão significativo a 5% de probabilidade. Fonte: os autores.

Ao analisar o teor foliar de P (TPF) e os conteúdos de P nas folhas (CPF), caules (CPC) e raízes (CPR), notou-se incrementos no teor (Figura 2A) e nos conteúdos (Figura 2B, 2C e 2D) de P nas partes da planta na medida em que os níveis de adubação com esse elemento aumentaram, de modo geral, para todos os níveis de disponibilidade hídrica estudados.

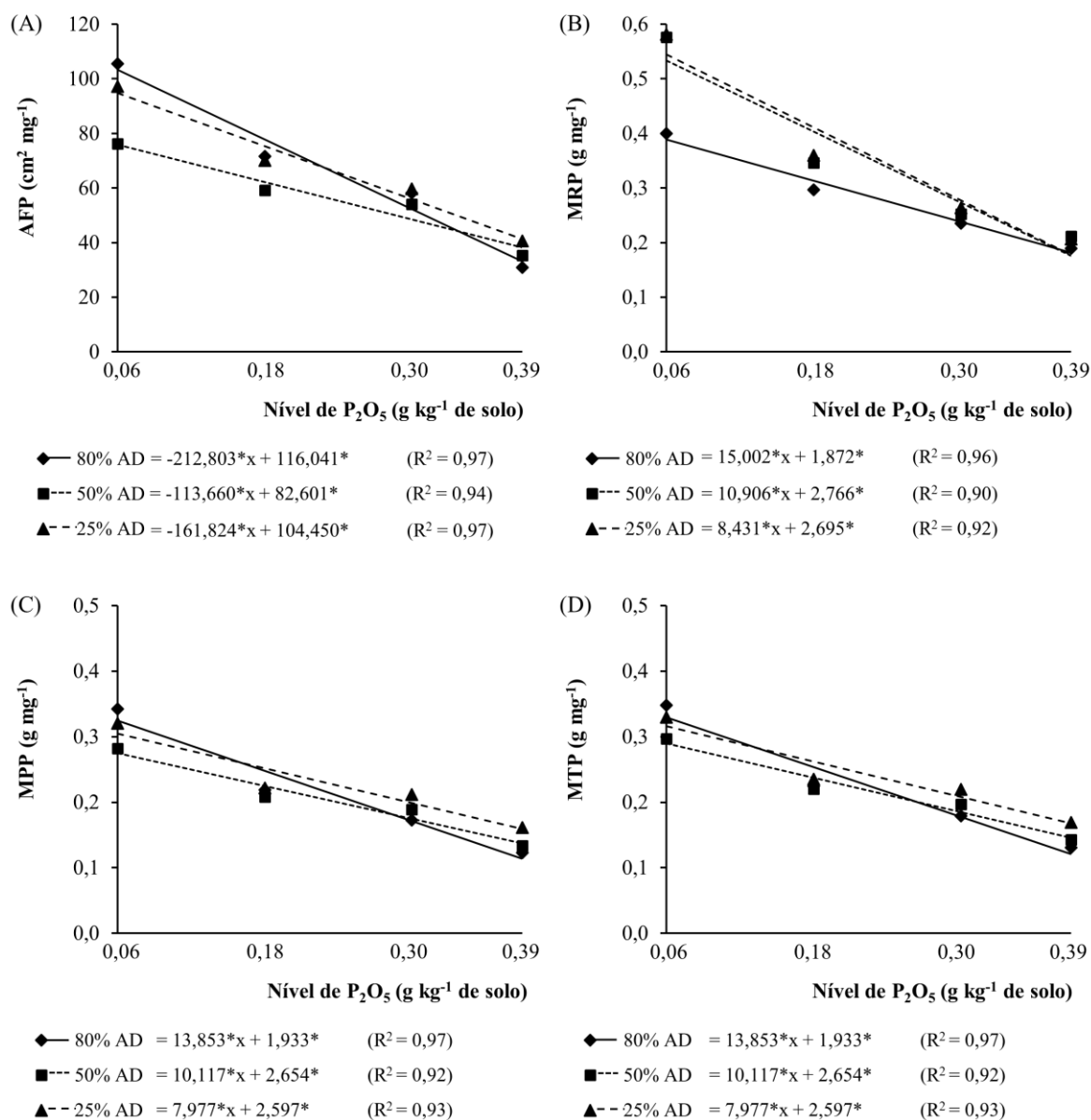
Figura 2 – Análise de regressão para o teor de P nas folhas (A), conteúdo de P nas folhas (B), conteúdo de P nos caules (C) e conteúdo de P nas raízes (D) de plantas de crambe em função dos níveis de adubação com fósforo, para cada nível de disponibilidade hídrica no solo (AD)



*coeficiente da regressão significativo a 5% de probabilidade. Fonte: os autores.

Ao analisar a capacidade de utilização do P para a formação de área foliar e para a produção de biomassa seca nas diferentes partes das plantas (Figura 3), notou-se diminuição linear na medida em que se aumentou os níveis de adubação com P, para todos os parâmetros analisados (AFP, MRP, MPAP e MTP) e todos os níveis de disponibilidade hídrica aplicados no estudo.

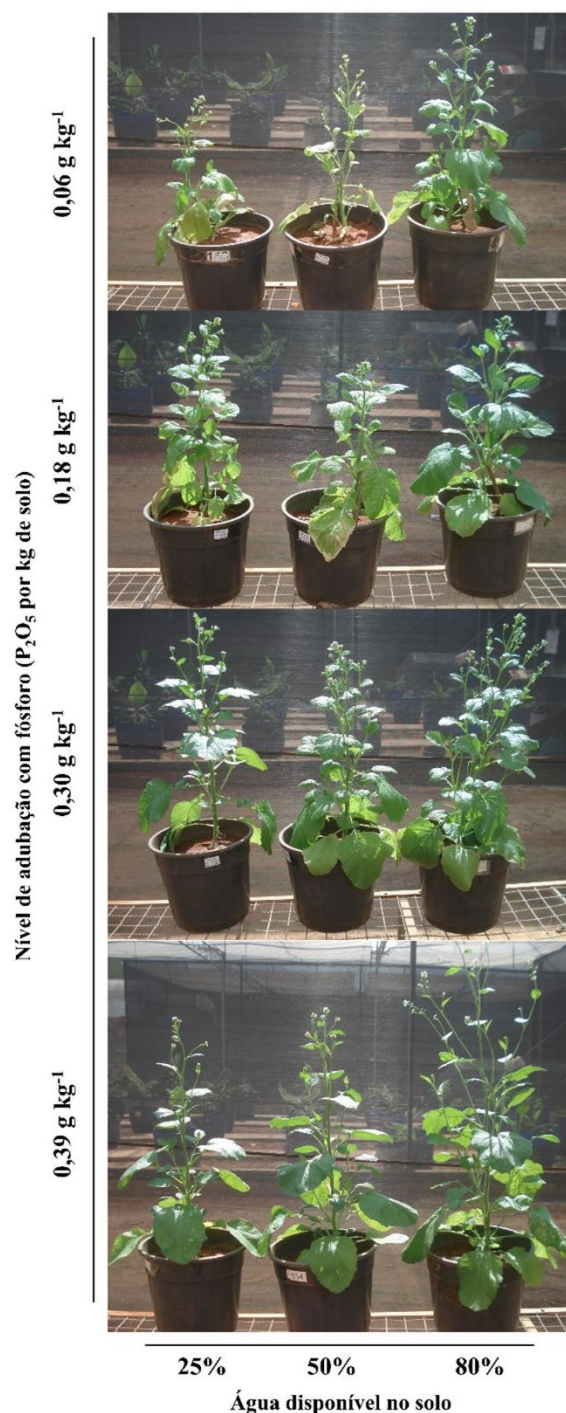
Figura 3 – Análise de regressão para a razão entre a área foliar e o conteúdo de P das folhas (A), razão entre a massa seca de raízes e o conteúdo de P radicular (B), razão entre a massa seca da parte aérea e o conteúdo de P nas folhas e caules (C) e razão entre a massa seca total e o conteúdo total de P (D) de plantas de crambe em função dos níveis de adubação com fósforo, para cada nível de disponibilidade hídrica no solo (AD)



*coeficiente da regressão significativo a 5% de probabilidade. Fonte: os autores.

Na Figura 4 é possível notar, visualmente, como a interação entre os níveis de adubação com fósforo e as porcentagens de água disponível no solo interferiram no crescimento e na capacidade de emissão de inflorescências nas plantas de crambe, visto que o experimento foi conduzido até a fase de florescimento.

Figura 4 – Aspectos visuais de plantas de *Crambe abyssinica*, aos 45 dias após a semeadura, cultivadas com diferentes níveis de disponibilidade hídrica e adubação fosfatada



Fonte: os autores.

Notadamente, as plantas conduzidas com maiores suplementações hídricas (80% de AD) apresentaram crescimento vegetativo mais vigoroso e maior emissão de flores (racimo), com potencial de maiores produtividades. Além disso, é válido ressaltar o deterioramento do

vigor das plantas de crambe nas condições de menor disponibilidade hídrica (sobretudo no nível de 25% de AD) e doses de fósforo (principalmente no nível de 0,06 g kg⁻¹) (Figura 4).

4 DISCUSSÃO

Com base nos resultados obtidos foi possível perceber maior investimento da biomassa total para o enfolhamento das plantas de crambe (massa e área foliar), sobretudo na condição de maior disponibilidade hídrica e com o aumento da adubação fosfatada. No entanto, parece haver maior investimento em massa radicular quando o suprimento de água foi menor (25% de AD) associada a maior disponibilidade de fósforo no solo. Porém, o aumento na disponibilidade hídrica favoreceu a razão de massa radicular quando houve limitação da adubação, justificando a importância da umidade do solo para a difusão e consequente absorção do fósforo pelas plantas (COSTA *et al.*, 2006). Dessa forma, é possível inferir que a restrição hídrica foi mais limitante ao desenvolvimento do crambe do que a adubação com fósforo.

Um maior investimento em sistema radicular é considerado uma estratégia de tolerância ao déficit hídrico, pois proporciona à planta maior capacidade de suportar tal condição de estresse pela exploração de um maior volume do solo (MAGALHÃES FILHO *et al.*, 2008; MARSCHNER, 2012; TAIZ *et al.*, 2017). Esses resultados também já foram verificados em plantas de crambe conduzidas com diferentes níveis de suplementação hídrica ao longo das fases fenológicas e com adubação padrão (COLODETTI *et al.*, 2018).

Nesse mesmo contexto, notou-se maior aproveitamento do fósforo em maiores níveis de adubação e água disponível no solo, tanto em teor foliar quanto em conteúdos nas partes vegetativas da planta. O fósforo é o elemento mais limitante para o crescimento inicial de plantas de crambe, podendo causar limitação de até 96% com a ausência de fornecimento desse nutriente (COLODETTI *et al.*, 2013). Há relatos de que o crescimento vegetativo e a eficiência nutricional de plantas de crambe podem ser favorecidos pela interação entre a adubação fosfatada e níveis de disponibilidade hídrica no solo, onde maiores aproveitamentos desse nutriente são obtidos com suplementação hídrica adequada (COLODETTI *et al.*, 2015; 2021). Além disso, sabe-se que níveis de disponibilidade hídrica menores que 45% ocasionaram decréscimos nas taxas de crescimento de plantas de crambe, independentemente da fase fenológica, sendo necessários níveis de 63% de água disponível para se obter os maiores índices de colheita (COLODETTI *et al.*, 2018).

Tendo em vista o maior crescimento e acúmulo de P com a maior disponibilidade hídrica, parece haver aumento na quantidade desse nutriente no tecido radicular, sobretudo em menores doses de fósforo (causando a diminuição da MRP), assim como o observado para a

parte aérea com maiores doses de fósforo (causando a diminuição da MPAP) (Tabela 4). Essa condição leva a um menor exaurimento das plantas devido à maior disponibilidade do nutriente nos tecidos, enquanto são mais exigidas nas condições de menor disponibilidade hídrica.

Vale ressaltar o comportamento da AFP, MPAP e MTP no nível de 80% de AD, onde foi possível constatar as diminuições mais acentuadas (valores mais negativos para os coeficientes angulares das regressões) na medida em que houve aumento nas doses de fósforo. Isso demonstra que as plantas de crambe, nessa condição, dispuseram de maiores quantidades de P em seus tecidos para formação de uma unidade de área foliar ou de massa seca de parte aérea e total, o que assegura menor exaurimento das reservas, possibilidade de maiores investimentos em crescimento e em produção. A disponibilidade de fósforo para o uso eficiente é essencial ao desenvolvimento e produção de plantas oleaginosas como o crambe, tendo em vista a capacidade expressiva de resposta à adubação com esse elemento (ROGÉRIO *et al.*, 2012; COLODETTI *et al.*, 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo da adubação fosfatada e da disponibilidade hídrica são capazes de modular as razões biométricas e nutricionais de plantas de *Crambe abyssinica*.

O acúmulo do fósforo em plantas de crambe é favorecido pela maior disponibilidade hídrica e dose crescentes de fósforo, tendo efeito direto sobre a quantidade de biomassa e área foliar produzidas por massa acumulada do nutriente.

A variação nas proporções de massa alocadas nas folhas e raízes é maior quando o crambe foi conduzido com a menor disponibilidade hídrica. Porém, apresenta maiores quantidades de massa destinadas ao sistema radicular quando há maior fornecimento de P, certamente para atuar como mecanismo de contorno aos efeitos do déficit hídrico.

É possível identificar situações que permitam explorar a eficiência de uso do fósforo através da seleção de combinações de manejo, seja por garantir uma maior eficiência de uso ou uma maior disponibilidade de nutriente de em tecidos de reserva, assegurando um menor exaurimento nutricional.

6 AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES) pelo fornecimento das instalações e equipamentos necessários para realização do estudo. Ao CNPq e à FAPES pela concessão da bolsa de Desenvolvimento Científico Regional do primeiro autor.

7 REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. F. T.; MARTINS, L. D.; LAVIOLA, B. G.; CHRISTO, L. F.; TOMAZ, M. A.; RODRIGUES, W. N. A differential response of physic nut genotypes regarding phosphorus absorption and utilization is evidenced by a comprehensive nutrition efficiency analysis. **Journal of Agricultural Science**, v.4, p.164-173, 2012.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 625p.
- BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? **Australian Journal of Agricultural Research**, v.56, p.1159-1168, 2005.
- CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa: UFV, 2012. 240p.
- COLODETTI, T. V.; MARTINS, L. D.; RODRIGUES, W. N.; BRINATE, S. V. B.; TOMAZ, M. A. Crambe: aspectos gerais da produção agrícola. **Enciclopédia biosfera**, v.8, p.258-269, 2012.
- COLODETTI, T. V.; RODRIGUES, R. R.; RODRIGUES, W. N.; MARTINS, L. D.; BRINATE, S. V. B.; PIZETTA, S. C.; REIS, E. F.; TOMAZ, M. A. Rational management of water availability along the phenological stages of *Crambe abyssinica* Hochst. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, p.350-356, 2018.
- COLODETTI, T. V.; TOMAZ, M. A.; RODRIGUES, R. R.; RODRIGUES, W. N.; MARTINS, L. D.; BRINATE, S. V. B.; REIS, E. F.; AMARAL, J. F. T. Can nutritional aspects of *Crambe abyssinica* be modulated by phosphorus supply and water availability? **Idesia**, v.39, p.7-16, 2021.
- COLODETTI, T. V.; TOMAZ, M. A.; RODRIGUES, W. N.; REIS, E. F.; PIZETTA, S. C.; BRINATE, S. V. B.; CHRISTO, L. F.; MARTINS, L. D.; AMARAL, J. F. T. Phosphorus fertilization and water management as prevalent factors in the growth of *Crambe abyssinica*. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, v.15, p.581-587, 2015.
- COLODETTI, T. V.; RODRIGUES, W. N.; CHRISTO, L. F.; MARTINS, L. D.; TOMAZ, M. A. Perda de biomassa causada pela deficiência de macronutrientes em *Crambe abyssinica*. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, p.2027-2038, 2013.
- COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.828-835, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: MAA, 1997. 212p.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A Computer statistical Analysis System. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

- JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; ROSILLO-CALLE, F.; WOOD, J. The growing role of biofuels - opportunities, challenges and pitfalls. **International Sugar Journal**, v.108, p.618-629, 2006.
- LAWN, R. J.; LIKOSWE, A. A. Genotypic differences in leaf area maintenance contribute to differences in recovery from water stress in soybean. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.59, p.1075-1085, 2008.
- MAGALHÃES FILHO, J. R.; AMARAL, L. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira Valência sobre dois tipos de porta-enxertos. **Bragantia**, v.67, p.75-82, 2008.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651p.
- MARTINS, L. D.; LOPES, J. C.; LAVIOLA, B. G.; COLODETTI, T. V.; RODRIGUES, W. N. Selection of genotypes of *Jatropha curcas* L. for aluminium tolerance using the solution-paper method. **Idesia**, v.31, p.81-86, 2013.
- NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA-SAE, 1991. p.189-254.
- ROGÉRIO, F.; SANTOS, J. I.; SILVA, T. R. B.; MIGLIAVACCA, R. A.; GOUVEIA, B.; BARBOSA, M. C. Effect of phosphorus doses in the development of crambe culture. **Bioscience Journal**, v.28, p.251-255, 2012.
- ROSCOE, R.; DELMONTES, A. M. A. **Crambe é nova opção para biodiesel**: Agrianual 2009. São Paulo: Instituto FNP, 2008. p.40-41.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solo, 1999. 370p.
- SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M. F.; COSTA, A. C.; WOZNIAK, M. A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GIS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, p.311-320, 2010.
- SOUZA, A. D. V.; FÁVARO, S. P.; ÍTAVO, L. C.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-mansão, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1328-1335, 2009.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.
- VIECELLI, C. A.; TOMASI, G. A.; SANTOS, A. C. C.; AGUIAR, C.; PRIMIERI, C.; BLEIL JUNIOR, H. G.; ANDRADE, M. A.; VIANA, O. H. Produtividade do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) em diferentes adubações, época de semeadura e densidade de plantas. **Varia Scientia Agrárias**, v.4, p.69-78, 2017.