

ISADORA RODRIGUES MEDINA

**LIMITAÇÕES FOTOSSINTÉTICAS, PARTIÇÃO DE CARBONO
E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SOJA
CONTRASTANTES QUANTO À EFICIÊNCIA NO USO DE
FÓSFORO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Gusmão Pereira

**FLORESTAL – MINAS GERAIS
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Florestal

T

M4911
2020

Medina, Isadora Rodrigues, 1994-
**Limitações fotossintéticas, partição de carbono e
produtividade de cultivares de soja contrastantes quanto à
eficiência no uso de fósforo.** / Isadora Rodrigues Medina. - Florestal,
MG, 2020.
53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.
Orientador: Eduardo Gusmão Pereira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa -
Campus Florestal.
Inclui bibliografia.

1. Eficiência de carboxilção. 2. Exportação de trioses-P. 3.
Deficiência de fósforo. 4. Soja. I. Universidade Federal de Viçosa.
Instituto de Ciências Agrárias. Mestrado em Manejo e Conservação de
Ecossistemas Naturais e Agrários. II. Título.

CDD 23 633.34

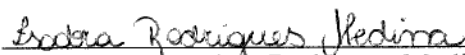
ISADORA RODRIGUES MEDINA

**LIMITAÇÕES FOTOSSINTÉTICAS, PARTIÇÃO DE CARBONO
E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SOJA
CONTRASTANTES QUANTO À EFICIÊNCIA NO USO DE
FÓSFORO**

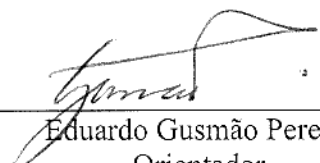
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 10 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Isadora Rodrigues Medina
Autora



Eduardo Gusmão Pereira
Orientador

À pequena Lia,
Sua chegada renovou minha fé, me fez acreditar na realização de sonhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde para realizar mais esta etapa e por colocar pessoas importantes em minha vida que tornaram esta caminhada mais leve.

À minha mãe e ao meu pai, sempre estiveram presentes em minha memória. São meus maiores exemplos de dedicação ao trabalho e amor.

Ao Marcos, por tanto amor e paciência, por entender minha ausência e ainda sim me incentivar. Te amo!

Aos meus irmãos, Ítalo, Isabela e Ibraim, vocês me inspiram e me dão forças para não desistir.

À querida Camila por me aconselhar e acolher tão bem!

Aos meus amados sobrinhos e afilhados, Livia, Kauan, Leonardo, Lia, Maria Antônia, José Arthur e João Otávio, o sorriso de vocês me aliviam em todos os momentos de tensão. Obrigada por fazerem tanto por mim, sem mesmo saber!

Aos meus sogros e cunhados, por todos os momentos descontraídos, pela amizade e carinho.

Aos colegas do LASP, por todas as contribuições nas reuniões de grupo. Em especial agradeço ao Guilherme e a Letícia, as ajudas de vocês foram essenciais para a realização dos experimentos.

À Rosiane Siqueira, por não medir esforços para me ajudar a resolver tantos problemas. Você é dez!

À Debora Durães (Laboratório de solos UFV/CAF), Sídian, Alexandre e Fernanda (Laboratório de química UFV/CAF), Eduardo (Laboratório de Bioquímica-Bioagro UFV) por me auxiliarem nas análises em seus laboratórios.

Aos eletricitistas do *Campus* Florestal, por estarem sempre prontos para arrumar o motor da casa de vegetação.

Às minhas amigas, Gislene, Poliana, Marina, Lídia e Iany, por celebrarem comigo cada momento.

À Camilla Rios, que além da amizade foi paciente e solícita para me ensinar as análises no laboratório e organização de planilhas.

À Anna Elisa e à Barbara, minhas irmãs de coração, obrigada por dividirem comigo todos os momentos de angústia e felicidade. Nossos cafés, sempre regados a muita risada, recarregaram minha energia para as batalhas do cotidiano. Levarei vocês no coração para sempre!

Ao prof. Dr. Eduardo Gusmão, que confiou no meu trabalho e me proporcionou grande crescimento pessoal e profissional. Obrigada por tanta dedicação e paciência, suas contribuições foram imprescindíveis para a realização deste trabalho! Obrigada mil vezes!!!!

À UFV- *Campus* Florestal, ao Instituto de Ciências Agrárias e ao programa de pós-graduação MCENA, por permitirem e auxiliarem na execução deste trabalho.

Agradeço também à CAPES pela concessão das bolsas e auxílios financeiros.

Sou muito grata a todos que contribuíram para que eu realizasse esse sonho!

BIOGRAFIA

Isadora Rodrigues Medina, nascida em Pará de Minas - Minas Gerais, no dia 03 de junho de 1994, filha de Gilberto Moreira Medina e Isaura Rodrigues da Silva Medina. No ano de 2011, concluiu o ensino médio pelo Colégio Berlaar Sagrado Coração de Maria, em Pará de Minas - MG. Em janeiro de 2018, formou-se no curso de Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa – *Campus Florestal*. Em março do mesmo ano, iniciou os estudos no mestrado *stricto sensu* em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários (MCENA), na mesma universidade.

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.” John Ruskin

RESUMO

MEDINA, Isadora Rodrigues. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Limitações fotossintéticas, partição de carbono e produtividade de cultivares de soja contrastantes quanto à eficiência no uso de fósforo.** Orientador: Eduardo Gusmão Pereira.

A deficiência de fósforo (P) é um dos estressores mais limitantes nos solos do Cerrado, reduzindo o crescimento e desenvolvimento da soja. O objetivo do trabalho foi elucidar como diferentes doses P alteram a fotossíntese, bem como seus efeitos na partição de carbono e a produção dos grãos em dois cultivares de soja contrastantes quanto à eficiência fotossintética no uso de fósforo (PPUE). Portanto, foi realizado um experimento em casa de vegetação em esquema fatorial 4x2, com 5 blocos. Dois cultivares, UFVS80B10 e TMG7063, foram submetidas a doses crescentes de fósforo (0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM) em soluções nutritivas de Hoagland. O cultivar TMG7063 apresentou maior PPUE, pois absorveu menor quantidade de P mas o utilizou de forma eficiente na fotossíntese, obtendo maiores valores de A , g_s , V_{cmax} , J , TPU que o cultivar UFVS80B10. O déficit de fósforo passou a causar danos ao PSII quando as plantas estavam próximas do estágio R6, como observado pela redução nos valores de F_v/F_m e nos índices de clorofila. Em ambos cultivares houve redução nas variáveis ETR, F_v/F_m , clorofila total, ϕ_{PSII} , V_{cmax} , J , TPU , pelo menor conteúdo de P nos tecidos das plantas submetidas a déficit de P. Na dose de 0,1mM a TPU foi responsável por regular a regeneração da RuBP e a atividade da rubisco. Além disso, a menor TPU proporcionou a formação de amido no cultivar TMG7063, que foi degradado nos estádios de maior demanda de fotoassimilados. Os cultivares foram eficientes na dissipação da energia não fotoquímica, de forma que houve aumento dos valores de NPQ e ϕ_{NPQ} , mas não houve alteração nos valores de ϕ_{NO} . O cultivar UFVS80B10 apresentou maior absorção de P, que refletiu em maiores conteúdos de amido e açúcares nas folhas, caules e raízes, ocasionando maior ganho de biomassa, entretanto com menor produção de grãos do que o cultivar TMG7063.

Palavras-chave: *Glycyne max*. Eficiência de carboxilação. Fluorescência da clorofila *a*. Deficiência de fósforo. Exportação de trioses-P.

ABSTRACT

MEDINA, Isadora Rodrigues. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Photosynthetic limitations, carbon partition and productivity of contrasting soybean cultivars in terms of efficiency in the use of phosphorus.** Adviser: Eduardo Gusmão Pereira.

Phosphorus (P) deficiency is one of the most limiting stressors in Cerrado soils, reducing soybean growth and development. The aim of the work was to elucidate how different P doses alter photosynthesis, as well as their effects on carbon partition and grain production in two contrasting soybean cultivars in terms of photosynthetic efficiency in the use of phosphorus (PPUE). Therefore, an experiment was carried out in a greenhouse in a 4x2 factorial scheme, with 5 blocks. Two cultivars, UFVS80B10 and TMG7063, were subjected to increasing doses of phosphorus (0.01mM, 0.1mM, 0.5mM and 1mM) in Hoagland nutrient solutions. The TMG7063 cultivar showed higher PPUE, as it absorbed less P but used it efficiently in photosynthesis, obtaining higher values of A , g_s , V_{cmax} , J , TPU than the cultivar UFVS80B10. The phosphorus deficit started to damage the PSII when the plants were close to the R6 stage, as observed by the reduction in the values of F_v / F_m and chlorophyll indexes. In both cultivars there was a reduction in the variables ETR, F_v / F_m , total chlorophyll, ϕ_{PSII} , V_{cmax} , J , TPU , due to the lower P content in the tissues of plants subjected to P. deficit. In the 0.1mM dose TPU was responsible for regulating the regeneration of RuBP and the activity of rubisco. In addition, the lower TPU provided the formation of starch in the cultivar TMG7063, which was degraded in the stages of greatest demand for photoassimilates. The cultivars were efficient in dissipating non-photochemical energy, so that there was an increase in the values of NPQ and ϕ_{NPQ} , but there was no change in the values of ϕ_{NO} . The cultivar UFVS80B10 showed higher absorption of P, which reflected in higher starch and sugar content in leaves, stems and roots, causing greater biomass gain, however with less grain production than cultivar TMG7063.

Keywords: *Glycine max*. Carboxylation efficiency. Chlorophyll a fluorescence. Phosphorus deficiency. Export of P-trioses.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A = taxa fotossintética
- AFE = Área foliar específica
- C_i/C_a = razão entre a concentração interna e externa de CO₂ no mesófilo
- CO₂ = gás carbônico
- E = transpiração
- ETR = taxa de transporte de elétrons
- F = fluorescência em *steadystate*
- F_0 = fluorescência inicial
- F_m' = fluorescência máxima do tecido vegetal iluminado
- F_m = fluorescência máxima
- PSII = fotossistema II
- F_v/F_m = eficiência quântica máxima do PSII
- g_s = condutância estomática
- IA = absorvância foliar
- MS = massa seca
- MSF = massa seca foliar
- MSC = massa seca do caule
- MSR = massa seca da raiz
- MSG = massa seca dos grãos
- MSV = massa seca da vagem
- MST = massa seca total
- AD = amido
- AR = açúcares redutores
- ANR = açúcares não redutores
- AST = açúcares solúveis totais
- CC = comprimento do caule
- DC = diâmetro do caule
- V_{max} = velocidade de carboxilação
- J = taxa de transporte de elétrons
- TPU = exportação de triose fosfato
- NPQ = coeficiente de dissipação não fotoquímico
- P = fósforo
- PAR = radiação fotossinteticamente ativa
- pH = potencial hidrogeniônico
- PPUE = eficiência fotossintética no uso do fósforo
- ϕ_{PSII} = rendimento quântico efetivo do PSII
- ϕ_{NO} = rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII
- ϕ_{NPQ} = rendimento quântico de dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	12
2 - MATERIAIS E MÉTODOS	15
3 - RESULTADOS	20
4- DISCUSSÕES	35
5- CONCLUSÕES	40
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
7- MATERIAIS SUPLEMENTARES	45

1- INTRODUÇÃO

A produção de soja no Brasil se concentra no Cerrado, com destaque para o estado de Mato Grosso. Em seguida aparecem os estados do Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais (EMBRAPA, 2019). Atualmente o Brasil possui aproximadamente 36 milhões de hectares de áreas cultivadas com a leguminosa (EMBRAPA, 2019), com previsão de aumento de 9,54 milhões de hectares nos próximos 10 anos (MAPA, 2019). Entretanto, os solos do Cerrado se caracterizam por serem fortemente intemperizados, ácidos e com baixos teores de fósforo (P) disponível, tornando a fosfatagem uma prática essencial para obter melhores rendimentos agrícolas. Em 2017 foram consumidos 12 milhões de toneladas de fosfato inorgânico (Pi) e a previsão é que este requerimento aumente com a expansão das áreas exploradas (IPNI, 2019).

O fósforo está presente em moléculas de inúmeros componentes do metabolismo (açúcares fosfato, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas), principalmente no ATP. Portanto, a deficiência de fósforo causa redução do metabolismo fotossintético, pela sua grande demanda por energia e importância para formação dos intermediários fosforilados do ciclo de Calvin-Benson. Para ocorrer uma fotossíntese ideal, é necessária uma concentração equilibrada de Pi nos cloroplastos e citosol (Usuda & Edwards, 1982). Essa concentração ideal pode ser mantida pelo transporte de Pi do vacúolo e pela alteração na taxa de síntese de sacarose (Foyer & Spencer, 1986).

Durante a fotossíntese, o carbono é fixado através do ciclo de Calvin-Benson no cloroplasto e depois é exportado ao citosol como triose-P, através do transportador antiporte TP/Pi. A triose-P é convertida em sacarose no citosol, liberando Pi, que pode permitir mais exportação de triose-P do cloroplasto, pela troca de Pi e trioses. Sob condições de déficit de P, pode haver restrição da síntese de sacarose no citosol, devido à baixa disponibilidade de Pi, causando diminuição da exportação de triose-P do cloroplasto, de forma que mais trioses-P seja retido no estroma para conversão em amido (Rychter & Rao, 2005).

Com a menor importação de Pi do citosol para os cloroplastos, haverá redução do pool de Pi para a atividade da ATP sintase, ocorrendo menor formação de ATP. A

redução da atividade ATP sintase pode causar diminuição da taxa de transporte de elétrons (Fredeen, Raab, Rao, & Terry, 1990) na cadeia transportadora, que conseqüentemente, também reduzirá a formação de NADPH. Com isso, as etapas do ciclo de Calvin-Benson que precisam destas moléculas ficarão comprometidas (Brooks et al., 1988), como a ativação das enzimas rubisco, sedoheptulose-1,7-bifosfatase e frutose-1,6-bifosfatase.

Além da redução de ATP e NADPH, a alteração das fontes de carbono para síntese de amido também acarretará menor formação de metabólitos fosforilados, incluindo RuBP, PGA, FBP, F6P, G6P. Portanto, em períodos maiores de privação ao fosfato, a inibição da fotossíntese passa a ser em grande parte devido a limitação na capacidade de regeneração de RuBP (Brooks, 1986; Rao, et al 1989). Quando a fotossíntese é limitada pela capacidade de regenerar RuBP, a atividade da rubisco é regulada de forma a equilibrar com a taxa de regeneração de RuBP, e vice-versa (Campbell & Sage, 2006). É importante salientar que os fatores interagem e uma mudança em qualquer um resultará em mudança na atividade dos outros (Servaites, et al 1991).

A redução da condutância estomática e aumento da resistência mesofílica também é proposta por alguns autores por reduzir a fixação de carbono, reduzindo a difusão de CO₂ até a rubisco, influenciando sua atividade carboxilase/oxigenase (Jacob et al 1991; Singh, et al 2019). No entanto, os resultados ainda são divergentes, Singh e colaboradores em 2016, não observaram redução da *gs* e *gm* na soja com deficiência de P.

Sob condição de deficiência de P, as plantas apresentam alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, que podem resultar na aclimatação a esta condição. A redução do rendimento fotossintético pode levar a captação excessiva de energia no PSII, que precisará ser dissipada, evitando danos ao centro de reação. As plantas podem apresentar estratégias que resultam na redução da pressão de excitação nos fotossistemas, como o aumento na dissipação na forma de calor pelo ciclo das xantofilas, redução na razão clorofila/carotenoides e conseqüentemente redução da fração de luz absorvida pelo PSII (Singh & Reddy, 2015; Jiao et al., 2017).

As plantas também apresentam mecanismos que permitem maximizar a absorção, conservação, reciclagem e remobilização do P interno (Veneklaas et al.,

2012). Chu et al. (2018) e Fernandez & Rubio (2015) observaram aumento da razão raiz:parte aérea das plantas de soja como estratégia de aquisição de P. A raiz é o órgão de principal investimento para melhorar a absorção do nutriente. Há uma redução do crescimento da raiz principal e investimento em crescimento lateral para explorar camadas mais superficiais do solo, onde há maior concentração de fósforo. Além disso, as plantas também podem investir na excreção de substâncias para aumentar a solubilização do fósforo (Ham et al, 2018).

Devido a importância do fósforo no metabolismo das plantas, a adubação fosfatada é indispensável. Entretanto, é preciso lembrar que, no caso da soja, enquanto o N pode ser fornecido para as plantas através da fixação biológica e o K é abundante na maioria dos solos (Marschner, 2012), o Pi é obtido quase que exclusivamente de fontes não renováveis (Kauwenbergh, 2010). Algumas previsões mais otimistas indicam que fontes Pi podem ser esgotadas, ou extremamente reduzidas em menos de 400 anos e os custos de obtenção podem aumentar (Kauwenbergh, 2010).

Portanto, uma das alternativas para solução desses problemas é desenvolver cultivares com maior eficiência do uso de P, pois assim produziriam mais grãos por unidade de P absorvida pela planta, reduzindo a quantidade de fertilizante fosfatados aplicados nas culturas, contribuindo, portanto, na conservação das reservas globais e no aumento da produção nas áreas já exploradas (Veneklaas et al., 2012). A eficiência no uso do P pode ser caracterizada pela capacidade da planta em utilizar o P absorvido em seu metabolismo (Teixeira et al., 2011), seja na fotossíntese (Hidaka & Kitayama, 2013) ou produção de parte aérea, raiz e frutos (Teixeira et al., 2011).

Cultivares de soja, possuem diferentes níveis de sensibilidade a deficiência de P e conseqüentemente, podem apresentar diferenças na eficiência no uso do fósforo. Haq & Mallarino (2005) determinaram que diferentes formas e quantidade de adubos com N, P, K, S, B, Fe e Zn, afetam muitos processos fisiológicos que, alteram a concentrações de óleo e proteína de grãos de soja em diferentes cultivares. Por isso, foram escolhidos cultivares destinadas a diferentes explorações (fonte proteica e extração de óleo) para elucidar como a deficiência de fósforo afeta a fotossíntese.

Até onde se sabe, existem vários trabalhos que abordam as respostas da soja sob déficit de fósforo (Chu et al., 2018; Fernandez et al., 2015; Jin et al., 2006; Fredeen et al., 1990), mas apenas Singh et al., 2019 relacionou PPUE com as fases fotoquímicas

e bioquímicas da fotossíntese, entretanto não abordou a influência na partição de carboidratos.

Perante o exposto, espera-se que as plantas de soja com maior PPUE apresentem melhor eficiência na velocidade de carboxilação da rubisco, uso de trioses-P e mecanismos fotoprotetores, de forma que não afete o acúmulo de carboidratos e a produção sob déficit de P. Assim, o objetivo do trabalho foi elucidar como diferentes doses de P limitam a fotossíntese, bem como seus efeitos na partição de carbono e biomassa sobre a produção de grãos em dois cultivares de soja contrastantes quanto à PPUE.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Cultivares de soja e condições iniciais de crescimento

Foram utilizadas dois cultivares de soja, a UFVS80B10 e a TMG7063IPRO, destinadas a produção de proteína e óleo respectivamente. Ambas possuem ciclo de aproximadamente 115 dias, alta exigência de fertilidade quando recomendadas para a região do Cerrado. A cultivar UFVS80B10 possui crescimento semideterminado e a TMG7063 possui crescimento indeterminado.

As sementes foram germinadas em papel Germiteste, pH neutro, umidecidas com água deionizada, mantidas em câmaras BOD, com temperatura de 25 °C, com fotoperíodo de 12 horas. A temperatura e umidade médias na casa de vegetação foram 26,4°C e 40,5%, respectivamente.

O transplantio ocorreu oito dias após a germinação, classificada VE por Fehr et al (1977), quando as plântulas apresentavam radículas desenvolvidas, mas cotilédones ainda fechados (Tabela1). Estas foram mantidas em solução nutritiva de Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950) a 50% da força iônica durante todo estágio VC. Foi fixado uma planta em cada tampa dos vasos, na altura do coleto, com ajuda de uma espuma, deixando as raízes imersas em 5L de solução. A oxigenação das raízes foi realizada com ar comprimido, na vazão de 80L/h, durante 10 minutos, 12 vezes ao dia. A partir de VC, a solução foi preparada a 100% da força total e trocada semanalmente. Os vasos foram completados com água deionizada diariamente e o pH era aferido a

cada dois dias, ajustado em aproximadamente 5,5, com auxílio de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH).

Tabela 1: Relação dos estádios de desenvolvimento da soja com os DET de exposição aos tratamentos ao longo do experimento.

Estádio	Dias de exposição aos tratamentos (DET)	Denominação do estágio fenológico
VE*	0	Emergência
VC	9	Cotilédone
V1	14	Primeiro nó
V2	19	Segundo nó
V3	24	Terceiro nó
V4	29	Quarto nó
V5	34	Quinto nó
V6	37	Sexto nó
R1	40	Início do florescimento
R2	45	Florescimento pleno
R3	47	Início da formação da vagem
R4	52	Vagem completamente desenvolvida
R5	55	Início do enchimento do grão
R7	73	Início da maturação
R8	92	Maturação plena

*Durante o crescimento inicial na BOD, as plântulas foram umedecidas apenas com H₂O

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em blocos casualizados, com cinco repetições, em esquema fatorial 4x2, sendo o primeiro nível referente a doses de fósforo fornecidas na solução nutritiva (0,01 mM, 0,1mM, 0,5 mM, 1 mM) e o segundo nível referente aos cultivares (UFVS80B10 e TMG7063). O tratamento controle

correspondeu à dose recomendada de 1mM (Tabela 2).

A normalidade dos dados foi testada pelo programa estatístico R (versão 3.5.1) e em seguida foram submetidos à análise de regressão, pelo programa SigmaPlot 14.0. Para atender os pressupostos da ANOVA, os dados de Ci/Ca foram transformados para \sqrt{X} e os dados de AD, AR, AST, ANR foram transformados para $\log X$.

Os dados coletados ao longo do tempo foram analisados em cada data de avaliação utilizando o pacote carData no programa estatístico R (versão 3.5.1).

Foi realizado também a análise de correlação entre todos os dados, no programa estatístico R (versão 3.6.3). Os parâmetros que não apresentaram correlações significativas foram excluídos da planilha.

Tabela 2: Reagentes P.A. utilizados para preparação das soluções estoques dos nutrientes com suas molaridades e concentrações à 100% da força iônica.

Nutrientes/Tratamentos	0,01 mM P	0,1 mM P	0,5 mM P	1 mM P**
NH ₄ NO ₃ (1M)	1 mL/L	1 mL/L	1 mL/L	-
KNO ₃ (1M)	5 mL/L	5 mL/L	5 mL/L	6 mL/L
Ca (NO ₃) ₂ (1M)	4 mL/L	4 mL/L	4 mL/L	4 mL/L
MgSO ₄ (1M)	2 mL/L	2 mL/L	2 mL/L	2 mL/L
Micronutrientes* (1M)	1 mL/L	1 mL/L	1 mL/L	1 mL/L
Fe-EDTA (1M)	1 mL/L	1 mL/L	1 mL/L	1 mL/L
KH ₂ PO ₄ (1M)	0,01 mL/L	0,1 mL/L	0,5 mL/L	-
K ₂ SO ₄ (1M)	0,495 mL/L	0,45 mL/L	0,25 mL/L	-
NH ₄ H ₂ PO ₄ (1M)	-	-	-	1 mL/L

* H₃BO₃, MnCl₂.4H₂O, ZnSO₄.7H₂O, CuSO₄.5H₂O, MoO₃.

** Concentração recomendada pela solução de Hoagland.

2.3 Variáveis avaliadas

2.3.1 Metabolismo fotossintético

Entre os estádios V2 e R7 (entre 18° e 82° DET) foram realizadas medições periódicas (aproximadamente a cada cinco dias) de fluorescência da clorofila *a* com o fluorômetro de pulso modulado Mini-PAM (Heinz Walz, Effeltrich, Germany). As medições foram realizadas no folíolo central da terceira folha totalmente expandida a partir do ápice. Na antemanhã foram realizadas as medições da fluorescência mínima (F₀) e fluorescência máxima (F_m). Os valores obtidos foram utilizados para a

determinação da eficiência quântica máxima do fotossistema II ($F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$) (Genty et al., 1989). Após a determinação de F_v/F_m , o tecido vegetal foi exposto por 30 segundos à radiação fotossinteticamente ativa (PAR) com intensidade de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e, em seguida, aplicou-se um pulso de luz saturante. Com este processo foram determinadas as variáveis: F – fluorescência em *steadystate*, antes do pulso de luz saturante; F_m' – fluorescência máxima do tecido vegetal iluminado; e calculadas as variáveis $\phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F)/F_m'$ – rendimento quântico efetivo do PSII no tecido vegetal iluminado; $\phi_{\text{NPQ}} = F/F_m' - F/F_m$ – rendimento quântico de dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII (Genty et al., 1996); $\phi_{\text{NO}} = F/F_m$ – rendimento quântico de dissipação não-regulada de energia não fotoquímica do PSII (Genty et al., 1996); e $\text{NPQ} = F_m - F_m'/F_m'$ - coeficiente de dissipação não fotoquímico (Bilger e Björkman, 1990); $\text{ETR} = 0,5 \times IA \times \phi_{\text{PSII}} \times \text{PAR}$ – taxa de transporte de elétrons, em que 0,5 é a proporção de fótons destinado aos dois fotossistemas (Melis et al., 1987) e IA é a absorvância foliar estimada em 0,84.

Os índices de clorofila a , b , razão entre clorofila a/b e clorofila total foram avaliados simultaneamente com as medições de fluorescência, utilizando o medidor portátil de clorofila ClorofiLOG (Falker, Brasil). Três medições foram realizadas em cada folíolo central nas mesmas folhas utilizadas para as medições de fluorescência da clorofila a .

No 56° DET quando as plantas estavam no estágio de enchimento dos grãos (R5), foram realizadas medições de trocas gasosas, na terceira folha totalmente expandida, com o auxílio do IRGA (Infrared gas analyzer) modelo LI-6400XT (Licor Inc., Lincoln, Nebraska, EUA). Foram obtidas as variáveis: taxa fotossintética líquida (A); condutância estomática (g_s); transpiração (E) e razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a). A concentração de CO_2 na câmara foi mantida em $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$, irradiância de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatura de 28°C e umidade de 60%.

As curvas de saturação de CO_2 (A/C_i) foram realizadas após o 57° DET, quando as plantas ainda estavam no estágio R5, nos folíolos centrais da terceira folha totalmente expandida. As medições foram realizadas em diferentes níveis de CO_2 (400, 300, 200, 100, 50, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200 e $1300 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$). O tempo mínimo para a estabilização das leituras em cada concentração foi de 60 segundos e máximo de 120 segundos. Os dados obtidos nas curvas foram utilizados

para cálculo da velocidade de carboxilação da rubisco ($V_{\text{cmáx}}$), transporte de elétrons (J), exportação de trioses fosfato (TPU) (Sharkey et al (2007)).

2.3.2 Quantificação de fósforo nos tecidos

A quantificação de P foi realizada em amostras secas (0,15g) de cada órgão. Uma folha de cada repetição foi coletada no 56° DET (estádio R5), os caules e raízes coletados no 92° DET (estádio R8). A metodologia utilizada foi da Embrapa (1997) com algumas modificações. A mistura digestora era composta de sulfato de cobre e sulfato de sódio na proporção de 1:10 e 3 mL de ácido sulfúrico concentrado. A solução coquetel continha molibdato de amônio e ácido ascórbico.

A eficiência no uso do fósforo foi calculada com os dados da taxa fotossintética por unidade de massa foliar (A_{massa}) e o teor de fósforo nas folhas.

2.3.3. Análise de carboidratos

Os carboidratos (amido, açúcares solúveis totais e açúcares redutores) foram determinados em folhas coletadas no 82° DET (estádio R7), raízes e caules coletados no 92° DET (estádio R8). Amostras de 0,5g dos materiais vegetais secos e moídos, foram homogeneizadas em almofariz com 5 ml de álcool etílico a 80%, em ebulição, para a realização da extração, este processo foi realizado duas vezes.

O pellet foi utilizado para a determinação de amido segundo Hodge et al (1962) e o sobrenadante provindo da extração foi utilizado para a quantificação de açúcares redutores segundo Miller (1972) e açúcares solúveis totais segundo Dubois (1956).

2.3.4 Rendimento proteico dos grãos

A determinação de proteína nos grãos foi realizada utilizando-se amostras de 0,15g, seguindo o método de Kjeldahl, que se baseia na quantificação do nitrogênio total e em seguida, o transforma para teor de proteína. Para o cálculo da conversão de nitrogênio em proteínas, foi utilizado o fator 6,25 (IAL, 2005). O rendimento proteico (g/MSGrãos) foi obtido pelo produto do teor de proteínas (g/g) e a produção de grãos de cada planta (g).

2.4.8 Avaliações morfológicas

No 56° DET, quando as plantas ainda estavam no estágio R5, foram retirados dois trifólios de cada planta. Após a digitalização das folhas, foi calculado a área foliar com ajuda do programa ImageJ. Os mesmos trifólios foram secos em estufa de circulação de ar forçada por 72 h à 65°C e posteriormente pesados para o cálculo da biomassa seca. Com tais dados foi calculado a LMA, que é a razão entre massa seca de folhas por unidade de área foliar (g cm^{-2}).

No fim do estágio R8 (maturação plena) (Fehr & Caviness, 1977) foi determinado o comprimento e diâmetro do caule com auxílio de uma fita métrica graduada em centímetro (cm) e de um paquímetro manual em milímetros (mm), respectivamente. Em seguida as plantas foram seccionadas em raiz, grão, vagem, folha e caule, colocados em sacos de papel separadamente, levados à estufa de circulação de ar forçada por 72 h à 65°C e posteriormente utilizados para a obtenção da massa seca (g).

3- RESULTADOS

Somente a partir do 64° DET (entre o estágio R5-R7), as plantas do cultivar TMG7063 submetidas as doses de 0,01 mM e 0,1 mM apresentaram redução dos valores de clorofila total (Fig. 1A), clorofila *a*, clorofila *b* (Fig. S1). A partir do 37° DET (estádio V6) as plantas submetidas a dose de 0,01 mM do cultivar UFVS80B10 apresentaram menores valores de clorofila total (Fig. 1B), clorofila *a*, clorofila *b* e aumento na razão clorofila *a/b* (Fig. S1) comparada a mesma dose no cultivar TMG7063 (Fig. 1A).

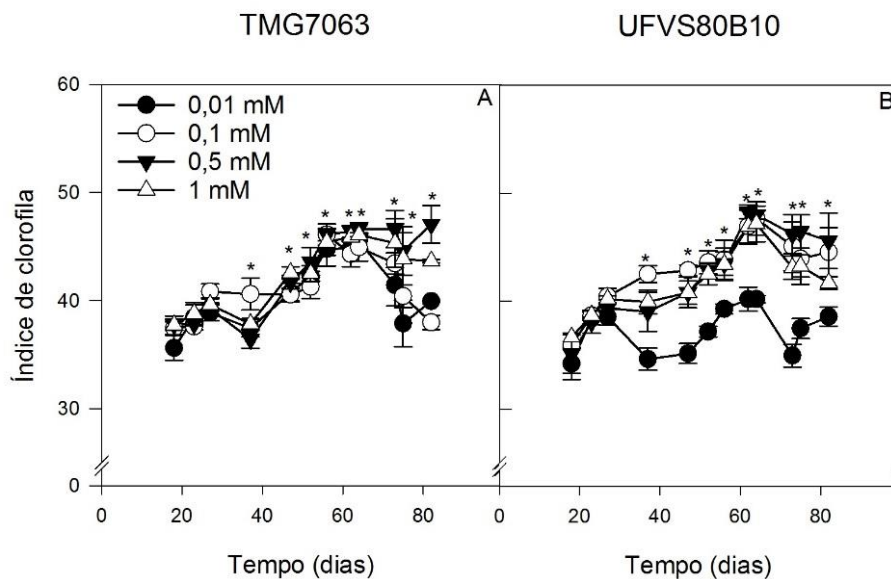


Figura 1: Índice de clorofila total, dos cultivares TMG7063 (A) e UFVS80B10 (B) ao longo do tempo de exposição às doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados são médias \pm erro padrão. Os asteriscos representam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Quando submetidas as maiores doses de fósforo (0,5 mM e 1 mM) as plantas de ambos cultivares não apresentaram diferenças significativas na eficiência quântica máxima do PSII (Fig. 2A e 2B) e na fluorescência inicial (Fig. 2C e 2D) ao longo do tempo. O déficit de fósforo nas doses de 0,01 mM e 0,1 mM, reduziu os valores de F_v/F_m a partir do 64° DET (estádio R5-R7) e 73° DET (estádio R7), respectivamente, em ambos cultivares (Fig. 2A,2B).

Nenhum cultivar exposto as diferentes doses de fósforo apresentou diferença ($p < 0,05$) na fluorescência inicial até o estágio V6 (37° DET) (Fig. 2C e 2D). Nos 47°, 52°, 56° DET (estádio R3-R5) o cultivar UFVS80B10 apresentou maior F_0 que o cultivar TMG7063 na dose de 0,01 mM. A partir do 62° DET (estádio R5-R7), as plantas de ambos os cultivares submetidos as menores doses de P apresentaram aumento em F_0 , sendo este incremento maior no cultivar TMG7063 ao final do ciclo.

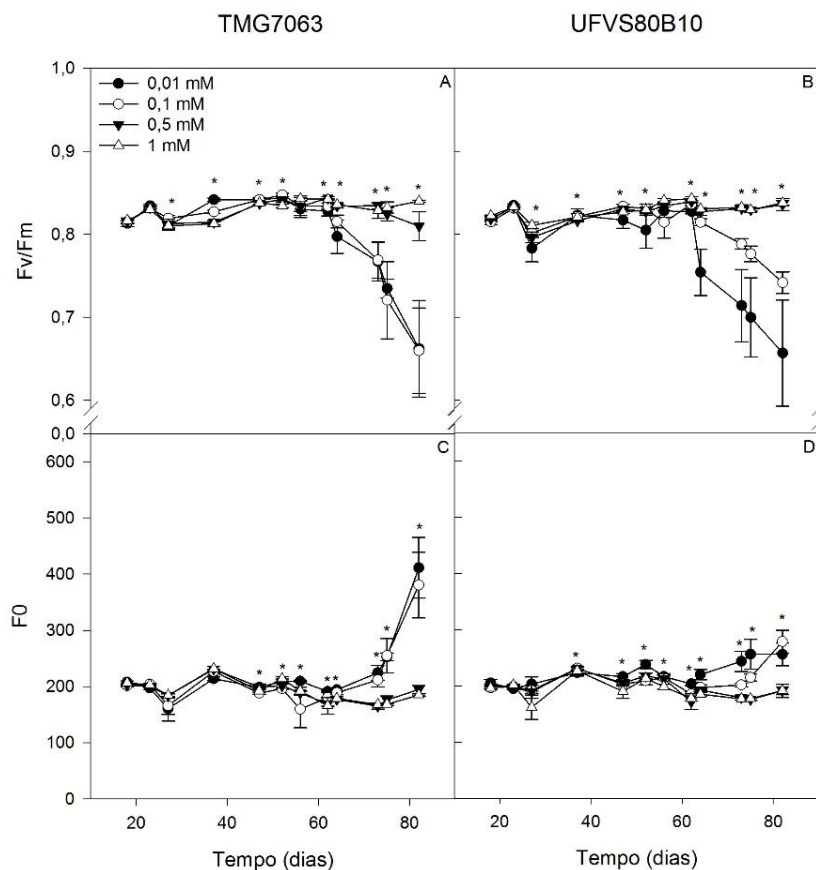


Figura 2: Eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm; A e B) e fluorescência inicial (F0; C e D) dos cultivares TMG7063 (A e C) e UFVS80B10 (B e D), ao longo do tempo de exposição às doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados são médias \pm erro padrão. Os asteriscos representam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

O cultivar TMG7063 apresentou maiores valores de ϕ_{PSII} do que o UFVS80B10 nas doses de 1 mM, 0,5 mM e 0,1 mM, com menores valores nas plantas submetidas a dose de 0,01mM (Fig. 3A). Os valores de ϕ_{NPQ} , ϕ_{NO} (Fig. 3B e C), NPQ (Fig. 4B) não diferiram em função dos cultivares. As plantas cultivadas na dose de 0,01 mM de P apresentaram o maior ϕ_{NPQ} e NPQ, seguido daquelas cultivadas na dose de 0,1 mM. O cultivar UFVS80B10 apresentou maiores valores de ϕ_{NO} na dose de 0,5 mM, que diferiu apenas das menores doses de fósforo, enquanto que os valores de ϕ_{NO} do cultivar TMG7063 não foram alterados pelas diferentes doses de P (Fig.3C). Assim como o ϕ_{PSII} , as plantas dos dois cultivares submetidas a dose 0,01 mM apresentaram a menor taxa de transporte de elétrons (ETR), não só no estágio R5 (Fig. 3A, 4A) como

ao longo de todo o ciclo (Fig. S2 e S3). Somente a partir do 73° DET (estádio R7), as plantas cultivadas com 0,1 mM de P apresentaram um decréscimo dos valores de ϕ_{PSII} e ETR (Fig. S2 e S3).

Os valores de ϕ_{PSII} se correlacionaram significativamente ($p < 0.05$) com os valores de massa seca da vagem ($r = 0,4674$), do grão ($r = 0,4514$) e total ($r = 0,4698$), entretanto apresentou correlação negativa com o coeficiente de dissipação não fotoquímica ($r = -0,4706$).

Já os valores de ϕ_{NPQ} se correlacionou negativamente com a massa seca dos grãos ($r = -0,5010$) e total ($r = -0,4662$).

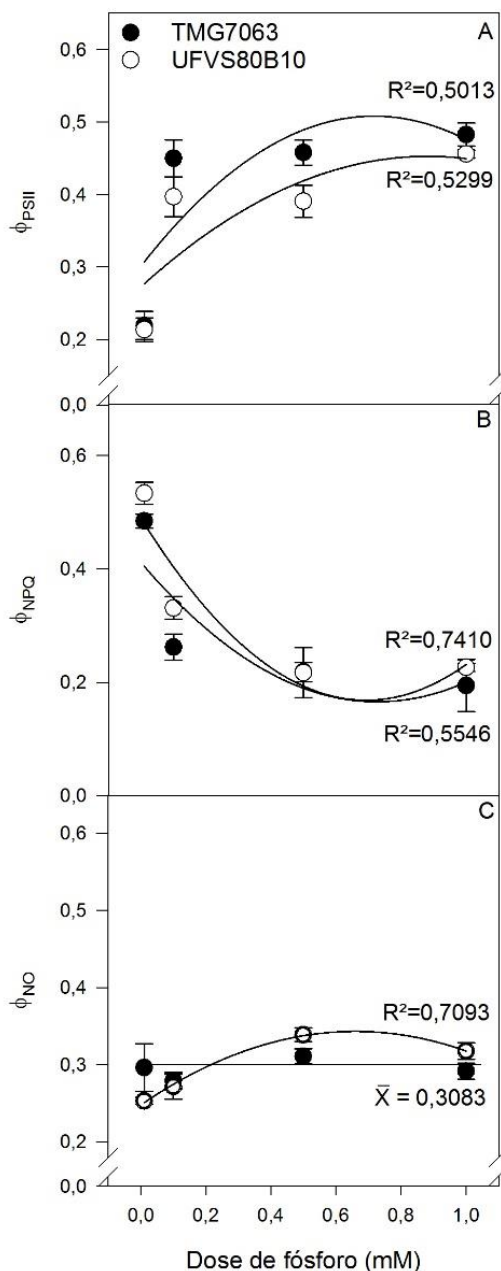


Figura 3: Rendimento quântico efetivo do PSII (ϕ_{PSII} , A), rendimento quântico de dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII (ϕ_{NPQ} , B), rendimento quântico de dissipação não regulada de energia não fotoquímica do PSII (ϕ_{NO} , C), dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estádio R5, expostas a doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

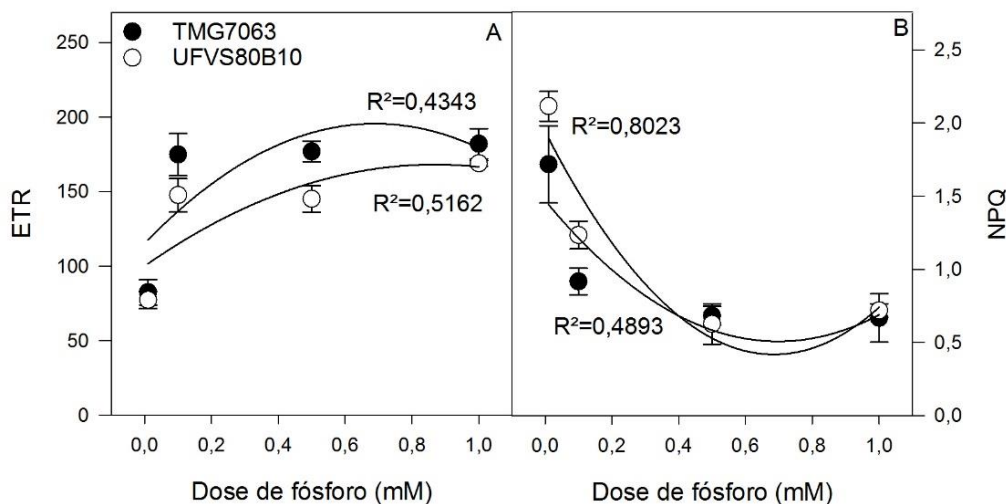


Figura4: Taxa de transporte de elétrons (ETR, A), coeficiente de dissipação não fotoquímica (NPQ, B), dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R5, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

As plantas de ambos os cultivares expostas ao tratamento com 0,01 mM de P apresentaram menores valores de A, seguido pelas plantas expostas a 0,1 mM. Os valores de fotossíntese das plantas submetidas as doses de 0,5 mM e 1 mM não apresentaram diferença significativa entre si (Fig. 5A). O cultivar TMG7063 apresentou maiores valores de A e g_s que o cultivar UFVS80B10 em todas as doses de P (Fig. 5A e B). O déficit de P não resultou em decréscimo significativo na g_s (Fig. 5B). O cultivar UFVS80B10 não apresentou diferenças nos valores de E entre as doses de P (Fig. 5C). Já o cultivar TMG7063 apresentou redução nos valores de E na menor dose de P (Fig. 5C).

Foi observado decréscimo na razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) no cultivar UFVS80B10 cultivadas com as maiores doses de P na solução. O cultivar TMG7063 não apresentou diferença entre os valores de C_i/C_a nas doses de P (Fig. 5D).

A fotossíntese apresentou correlação negativa com ϕ_{NPQ} ($r=-0,5429$), positiva com massa seca do grão ($r=0,5661$) e massa seca da vagem ($r=0,4592$).

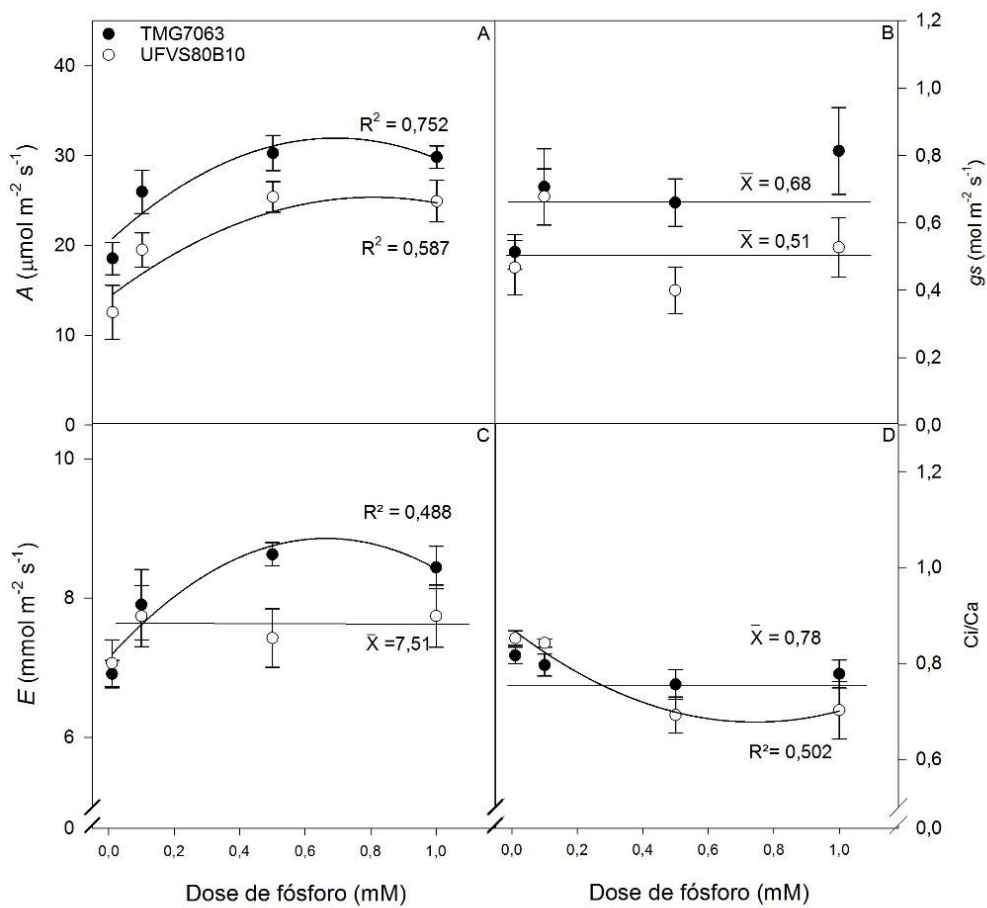


Figura 5: Fotossíntese (A, A), condutância estomática (g_s , B), transpiração (E, C) e razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (Ci/Ca, D) dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R5, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. \bar{X} representa a média da variável resposta que não se adequou a algum modelo. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

Ambos os cultivares apresentaram incremento nos valores de V_{cmax} , J , TPU , com o aumento da dose de fósforo até 0,5 mM. (Fig.6, 6B, 6C). O cultivar TMG7063 apresentou resultados de V_{cmax} , J e TPU superior aos apresentados pelo cultivar UFVS80B10 em todas as doses de fósforo (Fig. 6A, 6B, 6C).

Os valores de TPU apresentaram correlação positiva significativa com a fotossíntese ($r=0,4730$).

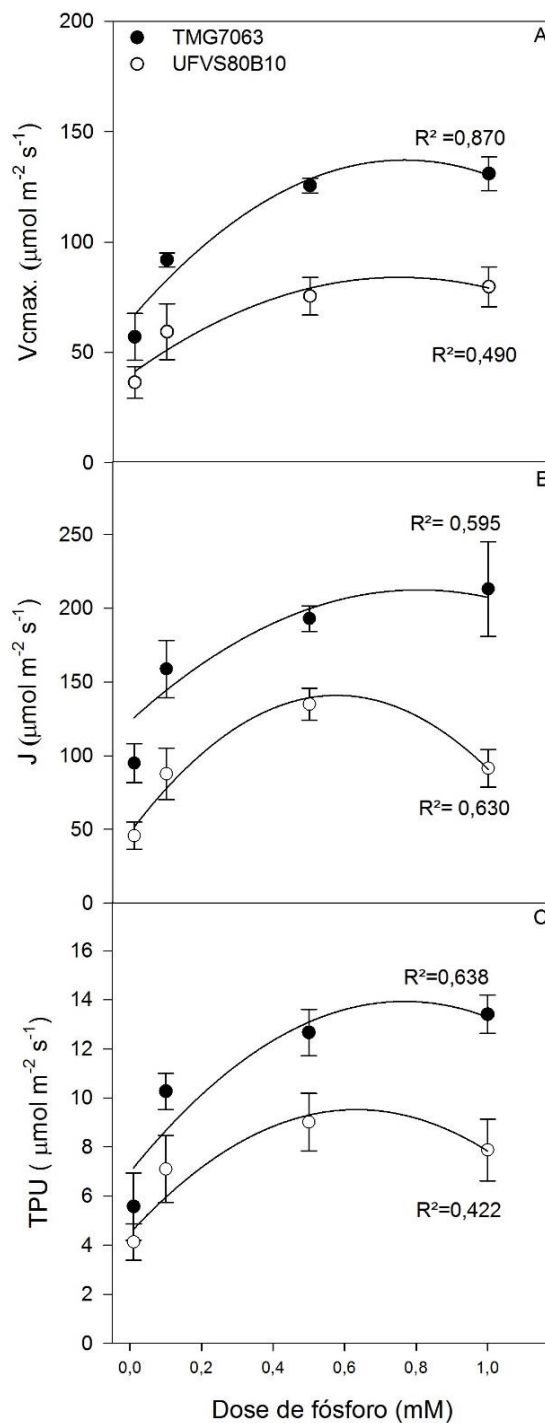


Figura 6: A velocidade de carboxilação da rubisco (V_{cmax} , A), o transporte de elétrons (J , B) e a exportação de trioses fosfato (TPU, C) dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R5, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

O incremento de fósforo na solução nutritiva resultou em aumento linear no conteúdo de P na parte aérea (folhas e caules) das plantas de ambos cultivares (Fig. 7A e 7B), entretanto com maiores valores no cultivar UFVS80B10 em relação à TMG7063 (Fig. 7A e 7B). Na raiz, houve aumento significativo no conteúdo de P até a dose de 0,5 mM para ambos cultivares.

Os conteúdos de fósforo nos tecidos correlacionaram entre si, sendo os coeficientes $r=0,9052$ e $r=0,8175$ referente a interação da folha com o caule e raiz, respectivamente. O coeficiente de correlação do conteúdo de P entre a raiz e o caule foi de $r=0,7053$.

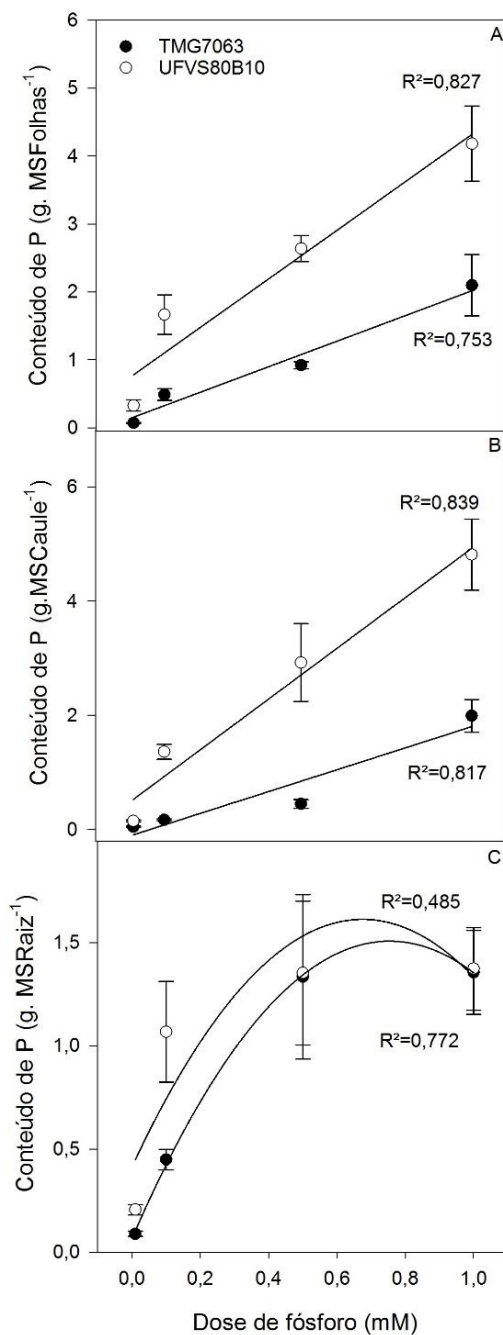


Figura 7: Conteúdo de fósforo nas folhas (A), caule (B), raiz (C) dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

A maior dose de P (1mM) resultou nos menores valores de eficiência fotossintética no uso do fósforo (PPUE) em ambos cultivares. O cultivar TMG7063 apresentou maior PPUE do que o cultivar UFVS80B10.

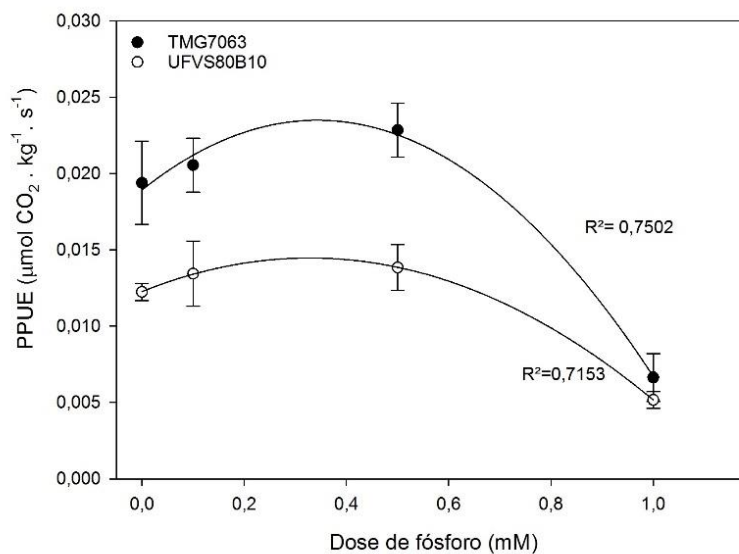


Figura 8: Eficiência no uso do fósforo dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R5, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1Mm de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

O aumento de P até a dose de 0,5 mM ocasionou maior acúmulo de AST (Fig. 9B, D) que AD (Fig. 9A, C) e maior ANR que AR (Fig. S4), nas folhas (Fig. A, B) e nos caules (Fig. C, D) de ambos cultivares. O cultivar TMG7063 apresentou acúmulo linear AD nas raízes (Fig. 9E), sendo maior que o acúmulo de AST (Fig. 9F). Entretanto, o cultivar UFVS80B10 apresentou aumento de AD até a dose de 0,5mM sem apresentar diferença nos valores de AST.

O cultivar UFVS80B10 apresentou maiores conteúdos de AD e AST (Fig. 9) em relação ao cultivar TMG7063, bem como de ANR e AR (Fig. S4), em todas as doses de P, exceto nas raízes (Fig. 9E).

O conteúdo de AST foliar se correlacionou significativamente com os valores de ANR foliar ($r=0,8117$). Os valores de AST e ANR radicular também se correlacionaram ($r=0,6211$).

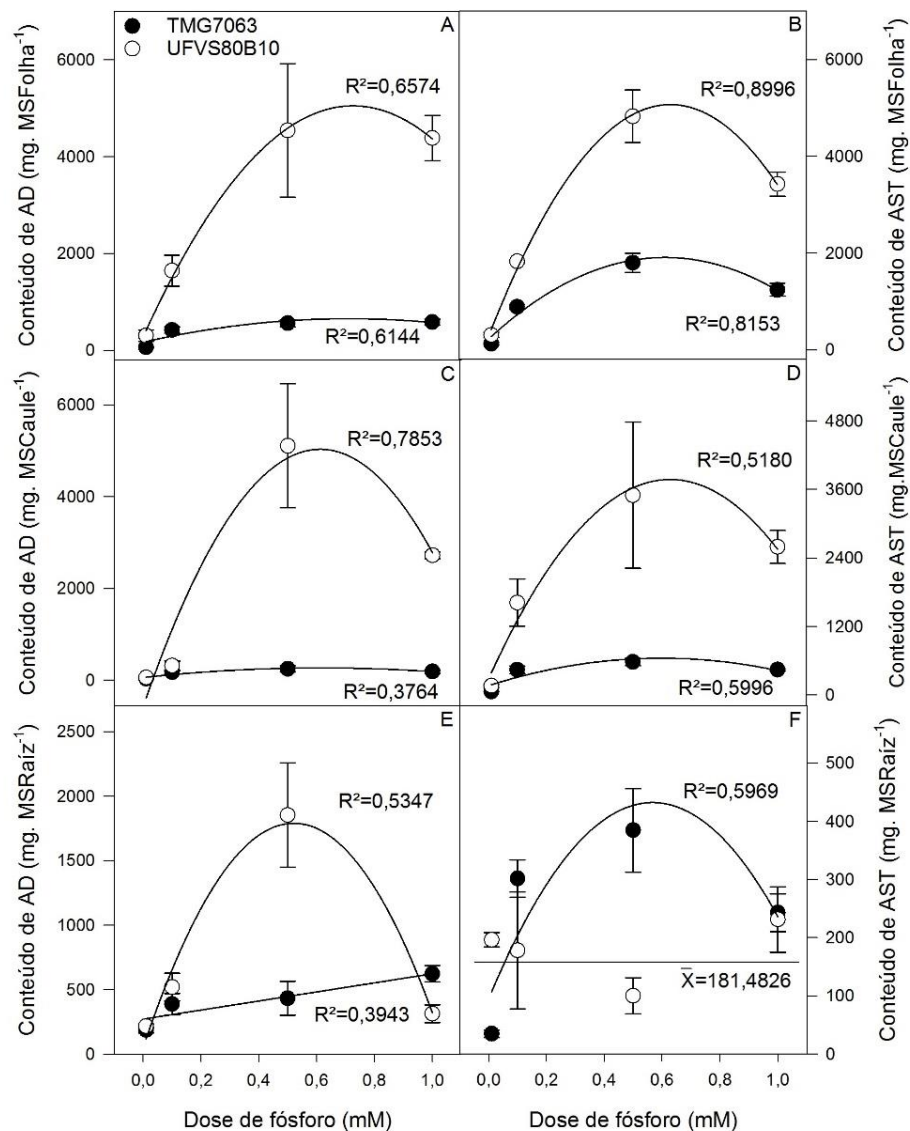


Figura 9: Conteúdo de amido (AD; A,C,E) e açúcares solúveis totais (AST; B,D,F) na folha (A e B) no estágio R7, no caule (C e D), na raiz (E e F) no estágio R8, dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados são as médias \pm erro padrão. \bar{X} representa a média da variável resposta que não se adequou a algum modelo. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

Em ambos cultivares as plantas submetidas às menores doses de P (0,01mM e 0,1mM) apresentaram os menores ganhos em MST, MSG, MSV (Fig. 10A, 10E, 10F). A MSF, MSC e MSR (Fig. 10B, 10C, 10D) foram menores nas plantas expostas à dose de 0,01mM e maior naquelas das doses de 0,1, 0,5 e 1 mM, independentemente do cultivar. O cultivar UFVS80B10 apresentou maiores ganhos de MST, MSF, MSC,

MSR que o cultivar TMG7063, entretanto, o maior ganho em MSG (Fig. 10F) foi do cultivar TMG7063. A massa seca das vagens (Fig.10E) não foi diferente entre os cultivares.

O ganho de biomassa entre todas as partes das plantas se correlacionaram. Os valores de MSF apresentaram correlação com MSC ($r=0,9412$), MSR ($r=0,8383$), MSV ($r=0,7728$), MSG ($r=0,5553$), MST ($r=0,9351$). A massa seca do caule também se correlacionou significativamente entre os demais tecidos, sendo os coeficientes $r=0,8040$, $r=0,7661$, $r=0,5461$, $r=0,9161$ referentes interação com a MSR, MSV, MSG, MST, respectivamente. A MSR correlacionou com a MSV ($r=0,8024$), MSG ($r=0,6294$), MST ($r=0,8668$), AD foliar ($r=0,4431$). A MSV também se correlacionou com MSG ($r=0,9258$) e MST ($r=0,8668$). A MSG apresentou correlação com MST ($r=0,8022$), AD foliar ($r=0,5504$), e também ANR foliar ($r=0,4778$).

As plantas de ambos cultivares aumentaram os valores de LMA até a dose de 0,5 mM. O cultivar UFVS80B10 apresentou maior LMA que o cultivar TMG7063, exceto na dose de 0,01mM (Fig. S5).

Foi observado acréscimo no CC e DC do cultivar TMG7063 com o aumento da dose de fósforo. Entretanto, o cultivar UFVS80B10 apresentou um incremento em DC e CC até a dose de 0,5 mM e 0,1 mM de P, respectivamente. Os CC e DC foram maiores no cultivar UFVS80B10 (Fig. S6A, S6B).

Houve decréscimo na razão raiz/parte aérea, em ambos cultivares, à medida que se aumentou a dose de fósforo na solução (Fig. S7).

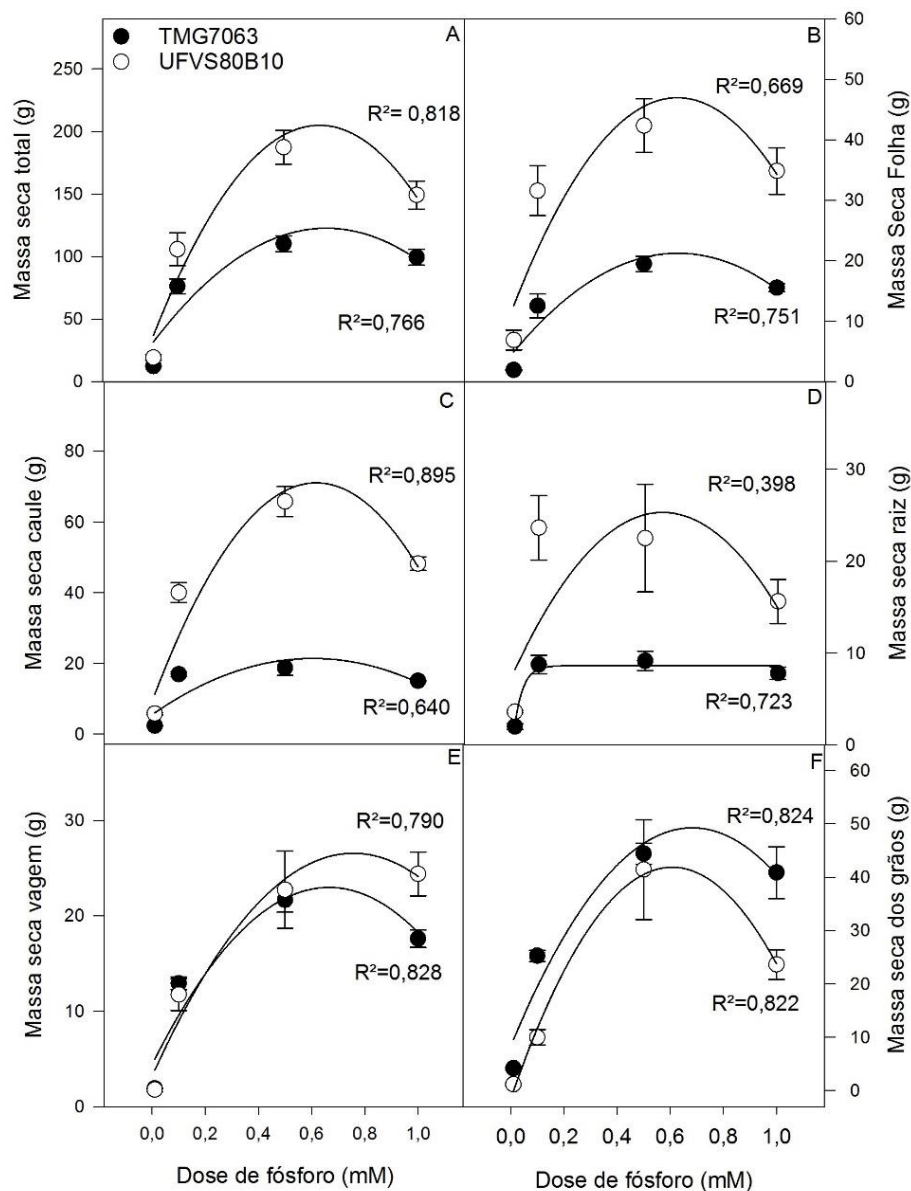


Figura 10: Massa seca total (A), massa seca da folha (B), massa seca do caule (C), massa seca da raiz (D), massa seca da vagem (E), massa seca dos grãos (F), dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R8, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

Os cultivares aumentaram o rendimento proteico nos grãos com o aumento de fósforo na solução até a dose de 0,5mM e diminuíram na dose de 1mM (Fig. 11). O cultivar TMG7063 apresentou maiores valores de rendimento proteico que o UFVS80B10, exceto na dose de 0,5mM onde foram semelhantes. Ao analisar o teor

de proteína em porcentagem (Fig S8), não se observa diferença entre as doses de fósforo e nem entre os cultivares.

O conteúdo de proteínas nos grãos se correlacionou (Fig. 12) positivamente com o rendimento quântico efetivo do PSII ($r=0,7421$), matéria seca das vagens ($r=0,4991$), grãos ($r=0,5766$) e total ($r=0,4526$). Porém, se correlacionou negativamente com o rendimento quântico de dissipação regulada de energia não fotoquímica do PSII ($r=-0,5083$) e coeficiente de dissipação não fotoquímico ($r=-0,5800$).

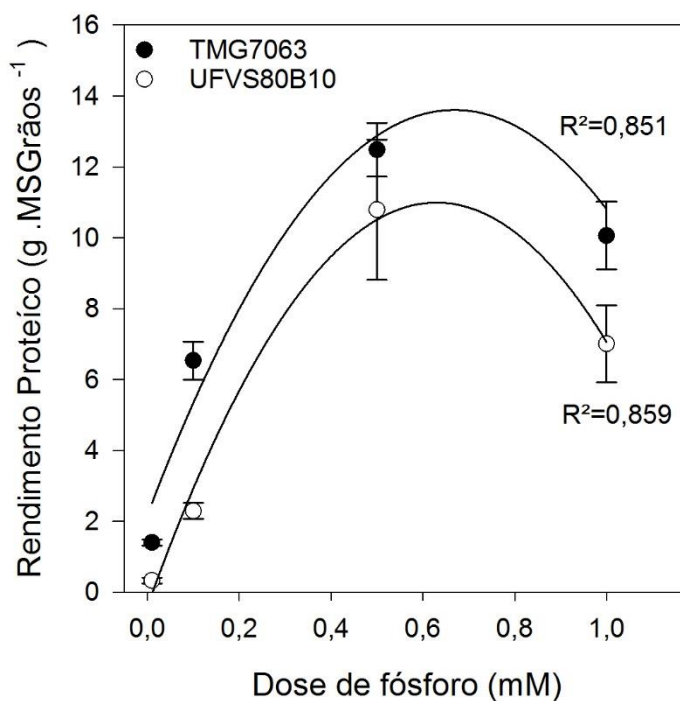


Figura 11: Rendimento proteico nos grãos dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM, no estágio R8. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram na tabela S9.

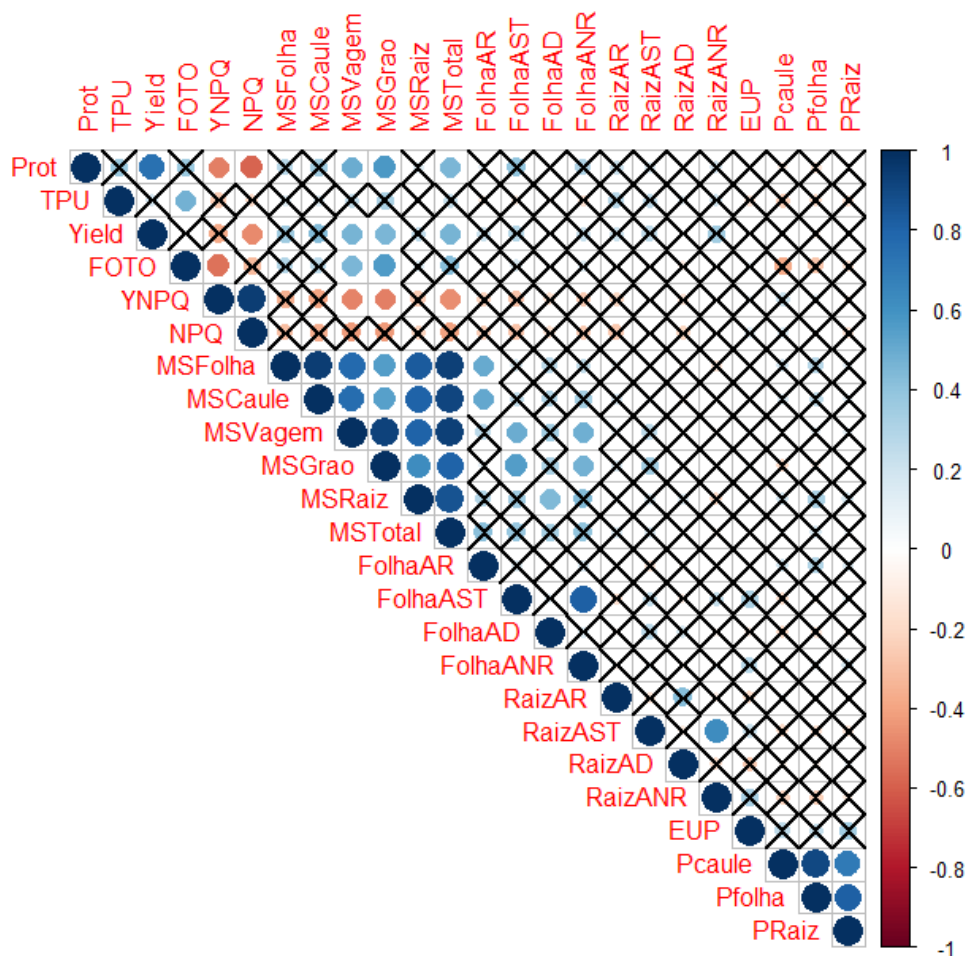


Figura 12: Triângulo de correlação entre os parâmetros avaliados. Círculo azul significa correlação positiva, círculo vermelho correlação negativa. Quanto maior o círculo e mais intensa a cor, maior o coeficiente de correlação. O “X” nos quadrantes, significa correlação não significativa ($p > 0,05$).

4- DISCUSSÃO

O crescimento das plantas está relacionado a absorção e uso de Pi no funcionamento da fotossíntese (Thuynsma et al., 2016). A soja, é uma cultura sensível a deficiência de P e a diferença entre as PPUE das cultivares se deram pelas limitações bioquímicas fotossintéticas. A maior eficiência no uso do fósforo apresentada pelo cultivar TMG7063 se deu por sua maior capacidade de carboxilação, regeneração da RuBP e exportação de trioses-P, mesmo absorvendo e translocando menores quantidades de fósforo que o UFVS80B10 em todas as doses de fósforo.

Como a deficiência de P reduz a quantidade de Pi na folha (Campbell & Sage, 2006), podem ser esperadas limitações de *TPU* em plantas sob déficit de P. A limitação na utilização de triose-P para síntese de sacarose, resulta em uma diminuição do Pi e um aumento na relação 3-fosfoglicerato / Pi nos cloroplastos, que induz a atividade da ADP-glicose pirofosforilase (AGPase), favorecendo a síntese de amido (MacNeill et al., 2017). Nesse caso, limitações no metabolismo da triose-P, podem retardar a reciclagem do Pi e a regeneração de RuBP (MacNeill et al., 2017). A redução na regeneração de RuBP com baixo P pode ser resultado de uma maior utilização de açúcar-fosfatos dos cloroplastos na biossíntese de amido (Fredeen et al.1990). Provavelmente a partição de carbono a favor do amido, observado em TMG7063, pode ter ocasionado redução da fotossíntese por inibição pelo produto final e isto foi essencial para manter a produção e a qualidade dos grãos. Os vacúolos das células da cultivar UFVS80B10, podem ter contribuído para manter a homeostase de Pi no citosol, por isso não foi observado diferença nos valores de amido e açúcares não redutores.

Nas menores doses de P, a redução nos valores de V_{cmax} e J pode ser consequência do decréscimo no estado de ativação e na quantidade de rubisco (Sharkey, 1985) em função da limitação de *TPU* ao longo do tempo (Yang et al., 2016). A redução na quantidade da rubisco já foi relatada em outros trabalhos com a finalidade de equilibrar a capacidade de regeneração da RuBP, quando as plantas estão sob déficit de P (Campbell & Sage, 2006). A ativação da rubisco pela rubisco ativase (RCA) requer a hidrólise de ATP (Parry et al., 2008), portanto com menor produção de energia sob déficit de P, a ativação da rubisco pode ser menor. Outra limitação potencial à regeneração da RuBP é a menor atividade das enzimas do ciclo de Calvin que também dependem de ATP, como 3-fosfoglicerato cinase, NADP-gliceraldeído-3-fosfato desidrogenase, sedoheptulose-1,7-bifosfato fosfatase e ribulose-5-fosfato cinase (Rao et al., 1989; Fredeen et al., 1990).

A redução na atividade da ATP sintase pode ter reduzido a ETR, aumentando os valores de NPQ e ϕ_{NPQ} . O aumento do valor de NPQ, demonstra uma característica importante para o desempenho dos cultivares de soja sob déficit de fósforo. A dissipação do excesso de energia pode estar relacionada com o ciclo das xantofilas, que é ativado quando há acidificação do lume. A violaxantina ao ser convertida em zeaxantina é capaz de dissipar o excesso de energia, que protege os fotossistemas de

superexcitação e possíveis danos (Pereira et al., 2013). Os valores de ϕ_{NPQ} corroboram com resultados do coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ) e possuem correlação positiva entre si. Em contrapartida, como não houve diferença no ϕ_{NO} , no estágio R5, evidencia que os cultivares foram eficientes na dissipação de energia não fotoquímica, de forma a não causar danos ao PSII, como observado pelos valores de Fv/Fm no início do estágio R5. Como os processos de ϕ_{NPQ} , ϕ_{NO} e ϕ_{PSII} são competitivos entre si, o incremento nos valores de ϕ_{NPQ} ao longo do tempo, resultou em redução nos valores de ϕ_{NO} e ϕ_{PSII} nas plantas sob déficit de P. Isto significa que maior parte da energia absorvida foi dissipada do que utilizada no processo fotossintético.

A fotoinibição ao final do ciclo pode ser comprovado pela redução nos valores de Fv/Fm e aumento de F0 e ϕ_{NO} nas plantas expostas as menores doses de P, indicando redução na capacidade de transferência de energia do complexo antena para os centros de reações. Os maiores valores de F0 e menor ϕ_{NPQ} do cultivar TMG7063 em relação ao UFVS80B10, evidenciam estratégias diferentes entre os cultivares, pois o cultivar UFVS80B10 apresentou redução no índice de clorofila desde o estágio V6, quando o Fv/Fm ainda não havia sido afetado, o que resulta na redução da quantidade de luz coletada pelo complexo antena. O aumento em F0 pode estar relacionado à inativação do centro de reação do PSII em plantas submetidas a estresses severos (Papageorgiou e Govindjee, 2004).

Em ambos cultivares estudadas, UFVS80B10 e TMG7063, o déficit de fósforo submetido pelas doses de 0,01mM e 0,1 mM passou a causar efeitos severos às plantas próximo ao estágio R6, conforme os dados de Fv/Fm, índice de clorofila, aumento de F0. Desde então a demanda por fósforo aumentou e para não comprometer a formação das sementes, o cultivar TMG7063, passou a degradar o amido que foi armazenado ao longo do ciclo. Por isso, a partir do estágio R7, foi observado aumento de AST em relação ao AD das plantas submetidas as doses de 0,1mM, 0,5mM e 1 mM de P. A dose de 0,01 mM foi extremamente prejudicial para a fotossíntese de ambos cultivares, de forma que não produziu quantidade de carboidratos suficientes para serem estocados e usados nos estádios de maiores demandas de fotoassimilados. Ativação da degradação do amido sob estresse abiótico parece ser uma resposta comum entre plantas (Thalman & Santelia, 2017). As plantas sob estresse durante o enchimento de grãos podem aumentar a degradação da fonte de amido nos tecidos vegetativos para

ser usado para completar o desenvolvimento das sementes (MacNeill et al., 2017). O acúmulo de amido também pode fornecer osmoprotetores quando as plantas estão sob estresse abiótico, como seca, alta salinidade e altas temperaturas (Thalman & Santelia, 2017). Os maiores valores de ANR em relação ao AR, indica elevados teores de sacarose, considerando também a degradação do amido.

Uma vez gerada, a sacarose foliar pode ser translocada para os tecidos drenos. Elevado teor de sacarose no floema funciona como um sinal para indução de expressão gênica relacionada ao déficit por fosfato (Hammond & White, 2008). Portanto, o aumento de ANR apresentado no caule e o aumento de amido nas raízes, pode ser consequência da translocação da sacarose via floema para as raízes, onde foi armazenada como amido. Embora o mecanismo seja diferente entre espécies, acredita-se que a translocação ocorra através do modelo de fluxo de massa (Pang et al., 2018). Esta ideia pode ser aceita no nosso trabalho uma vez que a menor dose de fósforo resultou em menor transpiração, o que pode ter levado ao menor acúmulo de P na parte aérea das plantas e consequentemente ocasionou menor produção de carboidratos.

A redução da transpiração, não foi relacionada com alterações significativas na g_s , mas pode estar ligada ao aumento da resistência mesofílica sob restrição severa de fósforo. Segundo Singh et al., (2019), a redução da condutância mesofílica pode restringir a difusão de CO_2 até o sítios de carboxilação, que está diretamente relacionado com a queda nos valores de V_{cmax} na menor dose de P. Portanto, o aumento da relação C_i/C_a não foi devido ao aumento da difusão de CO_2 mas provavelmente pela redução da capacidade de carboxilação da rubisco. O resultado observado pela LMA corrobora com a hipótese de limitação mesofílica e foi semelhante ao encontrado por Chu et al., (2018). As folhas de soja desenvolvidas sob déficit de P geralmente são menores e mais grossas, com menos cloroplastos e pilhas de grana mais finas em comparação com aquelas em folhas de plantas com adequado suprimento de P (Chu et al., 2018). Jacob & Lawlor (1991) também submetem a soja a déficit de P e encontraram que os fatores mesofílicos eram mais limitantes à fotossíntese do que os estomáticos. No trabalho de Singh et al. (2013) a limitação mesofílica foi 58% maior do que a limitação estomática sob estresse de P_i no algodão.

A deficiência de P leva a um aumento na alocação de carboidratos às raízes (An-cheng, Assan, & Xing-hua, 2006), o que pode explicar o aumento da razão

raiz/parte aérea, em função do aumento do acúmulo de AD. Esta é uma estratégia de muitas plantas sob de limitação de P, como feijão (Nielsen et al., 2001), algodão (Singh et al., 2013) e outros cultivares de soja (Chu et al., 2018). As plantas se aclimatam à deficiência nutricional alocando mais recursos nos órgãos envolvidos para adquiri-los, o que influencia diretamente na biomassa dos mesmos (Thuynsma et al., 2016).

Os maiores conteúdos de carboidratos no cultivar UFVS80B10 está diretamente relacionado seu maior conteúdo de P em todos os tecidos, evidenciando sua eficiente absorção de fósforo. Já o cultivar TMG7063 foi mais eficiente na utilização do P, pois absorveu menos fósforo mas alcançou maiores taxas fotossintéticas. A eficiência na utilização do P interno é geralmente mais baixa em plantas com alta eficiência de aquisição de P como resultado de maiores concentrações de P no tecido (Rose et al., 2016). O cultivar UFVS80B10 investiu o fosforo absorvido em carboidratos para o crescimento vegetativo, por isso apresentou maiores comprimentos e diâmetros do caule, MST, MSF, MSC, MSR. Já o cultivar TMG7063 investiu em produção de grãos.

A concentração de proteínas nas sementes é herdada como característica quantitativa e também influenciada por fatores ambientais (Haq & Mallarino, 2005). A adubação fosfatada tem menor influência sobre a produção de proteína nos grãos, do que a adubação nitrogenada (Jin, 2007). O fósforo estimula o crescimento da planta aumentando a fixação simbiótica de nitrogênio, através do desenvolvimento e o funcionamento dos nódulos. Como foi fornecido nitrato na solução nutritiva, as plantas não apresentaram formação de nódulos, mas a adubação nitrogenada provavelmente foi suficiente para manter os níveis de N adequados para a formação das proteínas, por isso não foi observado diferença na porcentagem de proteínas em ambos cultivares nas diferentes doses de P. Entretanto, o rendimento proteico foi reduzido sob déficit de P porque acompanhou a baixa produção de grãos das plantas nas menores doses de fósforo.

5- CONCLUSÕES

O cultivar TMG7063 foi mais eficiente na utilização do fósforo na fotossíntese, demonstrando maiores valores de V_{cmax} , J , TPU com menor quantidade de P nos tecidos. Nas menores doses de P, a redução nos valores de V_{cmax} e J pode ser consequência da limitação de TPU ao longo do tempo, resultando em decréscimo na regeneração de RuBP e na menor atividade carboxilase da rubisco. Adicionalmente, a condutância mesofilica pode ter reduzido a quantidade de CO_2 até os sítios de carboxilação.

O déficit de P provavelmente afetou a atividade do translocador de triose-P/Pi do cloroplasto sob redução de TP e favoreceu a síntese de amido no cultivar TMG7063, causando inibição da fotossíntese pelo produto final. O cultivar UFVS80B10 teve sua fotossíntese reduzida pelo metabolismo energético resultante da menor produção de ATP sob déficit de P.

Sob déficit de P, a redução da ATPase reduziu a ETR, ocasionando uma acidificação no lume, aumentando os valores de NPQ e ϕ_{NPQ} . Com isso, houve redução do rendimento quântico efetivo do PSII. Em ambos cultivares estudadas, o déficit de fósforo passou a causar danos ao PSII quando as plantas estavam entre os estágios R5 e R7, como observado pela redução nos valores de Fv/Fm e nos índices de clorofila.

Pode-se concluir que plantas de soja que absorvam menores quantidades de P da solução do solo, mas que o usem eficiente na fotossíntese possivelmente poderão ser selecionadas em estratégias de melhoramento, usando como indicadores as variáveis de Fv/Fm , V_{cmax} , J , TPU .

Na cultura da soja, doses de fósforo superiores à 0,5 mM não apresenta acréscimos na produção. Portanto, pode-se pensar que a prática de superfosfatagem na soja não é recomendada.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

An-cheng, L. U. O., Assan, M. J. H., & Xing-hua, W. E. I. (2006). Effect of Phosphorus Deficiency on Leaf Photosynthesis and Carbohydrates Partitioning

- in Two Rice Genotypes with Contrasting Low Phosphorus Susceptibility. *Rice Science*, 13(4), 283–290.
- Brooks, A. (1986). Effects of Phosphorus Nutrition on Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase Activation, Photosynthetic Quantum Yield and Amounts of Some Calvin-Cycle Metabolites in Spinach Leaves. *Functional Plant Biology*, 13(2), 221. <https://doi.org/10.1071/pp9860221>
- Brooks, A., Woo, K. C., & Wong, S. C. (1988). Effects of phosphorus nutrition on the response of photosynthesis to CO₂ and O₂, activation of ribulose bisphosphate carboxylase and amounts of ribulose bisphosphate and 3-phosphoglycerate in spinach leaves. *Photosynthesis Research*, 15(2), 133–141. <https://doi.org/10.1007/BF00035257>
- Campbell, C. D., & Sage, R. F. (2006). Interactions between the effects of atmospheric CO₂ content and P nutrition on photosynthesis in white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant, Cell and Environment*, 29(5), 844–853. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01464.x>
- Cathcart, J. B. (1980). World phosphate reserves and resources. *The Role of Phosphorus in Agriculture*, (theroleofphosph), 1–18. [https://doi.org/ISBN 978-9-88999-167-3](https://doi.org/ISBN%20978-9-88999-167-3)
- Chu, S., Li, H., Zhang, X., Yu, K., Chao, M., Han, S., & Zhang, D. (2018). Physiological and proteomics analyses reveal low-phosphorus stress affected the regulation of photosynthesis in soybean. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(6). <https://doi.org/10.3390/ijms19061688>
- Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). Stages of Soybean Development. *Special Report*, 80(March), 11.
- Fernandez, M. C., & Rubio, G. (2015). Root morphological traits related to phosphorus-uptake efficiency of soybean, sunflower, and maize. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(5), 807–815. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500155>
- Foyer, C., & Spencer, C. (1986). The relationship between phosphate status and photosynthesis in leaves Effects on intraceHular orthophosphate distribution, photosynthesis and assimilate partitioning. In *Planta* (Vol. 167). Springer-Verlag.
- Fredeen, A. L., Raab, T. K., Rao, I. M., & Terry, N. (1990). Plmata in Glycine m a x (L .) Merr . *Planta*, 17, 71–74.

- Genty, B., Briantais, J.-M., & Baker, N. R. (n.d.). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. In *BBA - General Subjects* (Vol. 990).
[https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)
- Ham, B. K., Chen, J., Yan, Y., & Lucas, W. J. (2018). Insights into plant phosphate sensing and signaling. *Current Opinion in Biotechnology*, *49*, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.07.005>
- Hammond, J. P., & White, P. J. (2008). Sucrose transport in the phloem: Integrating root responses to phosphorus starvation. *Journal of Experimental Botany*, *59*(1), 93–109. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm221>
- Haq, M. U., & Mallarino, A. P. (2005). *Response of Soybean Grain Oil and Protein Concentrations to Foliar and Soil Fertilization*. 918, 910–918.
<https://doi.org/10.2134/agronj2004.0215>
- Hidaka, A., & Kitayama, K. (2013). Relationship between photosynthetic phosphorus-use efficiency and foliar phosphorus fractions in tropical tree species. *Ecology and Evolution*, *3*(15), 4872–4880.
<https://doi.org/10.1002/ece3.861>
- Jacob, J., & Lawlor, D. W. (1991). *Stomatal and Mesophyll Limitations of Photosynthesis in Phosphate Deficient Sunflower, Maize and Wheat Plants*. *42*(241), 1003–1011.
- Jiao, Y., Ouyang, H. L., Jiang, Y. J., Kong, X. Z., He, W., Liu, W. X., ... Xu, F. L. (2017). Effects of phosphorus stress on the photosynthetic and physiological characteristics of *Chlorella vulgaris* based on chlorophyll fluorescence and flow cytometric analysis. *Ecological Indicators*, *78*, 131–141.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.010>
- Jin, J. (2007). *Interaction Between Phosphorus Nutrition and Drought on Grain Yield, and Assimilation of Phosphorus and Nitrogen in Two Soybean Cultivars Differing in Protein Concentration in Grains*. (May 2013), 1433–1449.
- Jin, J., Wang, G., Liu, X., Pan, X., Herbert, S. J., & Tang, C. (2006). Interaction Between Phosphorus Nutrition and Drought on Grain Yield, and Assimilation of Phosphorus and Nitrogen in Two Soybean Cultivars Differing in Protein Concentration in Grains. *Journal of Plant Nutrition*, *29*(8), 1433–1449.
<https://doi.org/10.1080/01904160600837089>
- MacNeill, G. J., Mehrpouyan, S., Minow, M. A. A., Patterson, J. A., Tetlow, I. J., &

- Emes, M. J. (2017). Starch as a source, starch as a sink: The bifunctional role of starch in carbon allocation. *Journal of Experimental Botany*, 68(16), 4433–4453. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx291>
- Ministério da Agricultura, P. e A. (2019). *Projeções de Longo Prazo*. Retrieved from <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2018-2019-2028-2029/view>
- Moller, M. R. F., Viégas, I. de J. M., Matos, A. de O., & Parry, M. M. (1997). *Análises de Tecido Vegetal: Manual de Laboratório*.
- Nielsen, K. L., Eshel, A., & Lynch, J. P. (2001). The effect of phosphorus availability on the carbon economy of contrasting common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 52(355), 329–339. <https://doi.org/10.1093/jxb/52.355.329>
- Pang, J., Zhao, H., Bansal, R., Bohuon, E., Lambers, H., Ryan, M. H., & Siddique, K. H. M. (2018). Leaf transpiration plays a role in phosphorus acquisition among a large set of chickpea genotypes. *Plant Cell and Environment*, 41(9), 2069–2079. <https://doi.org/10.1111/pce.13139>
- Parry, M. A. J., Keys, A. J., Madgwick, P. J., Carmo-Silva, A. E., & Andralojc, P. J. (2008). Rubisco regulation: A role for inhibitors. *Journal of Experimental Botany*, 59(7), 1569–1580. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern084>
- Pereira, E. G., Oliva, M. A., Rosado-Souza, L., Mendes, G. C., Colares, D. S., Stopato, C. H., & Almeida, A. M. (2013). Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. *Plant Science*, 201–202(1), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.12.003>
- Rao, I. M., Arulanantham, A. R., & Terry, N. (1989). Leaf phosphate status, photosynthesis and carbon partitioning in sugar beet: II. diurnal changes in sugar phosphates, adenylates, and nicotinamide nucleotides. *Plant Physiology*, 90(3), 820–826. <https://doi.org/10.1104/pp.90.3.820>
- Rose, T. J., Mori, A., Julia, C. C., & Wissuwa, M. (2016). Screening for internal phosphorus utilisation efficiency: comparison of genotypes at equal shoot P content is critical. *Plant and Soil*, 401(1–2), 79–91. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2565-7>
- Servaites, J. C., Shieh, W.-J., & Geiger, D. R. (1991). Regulation of Photosynthetic Carbon Reduction Cycle by Ribulose Bisphosphate and Phosphoglyceric Acid1.

- In *Plant Physiol* (Vol. 97). Retrieved from www.plantphysiol.org
- Sharkey, T. D. (1985). *02-Insensitive Photosynthesis in C3 Plants* . 71–75.
- Sharkey, T. D., Bernacchi, C. J., Farquhar, G. D., & Singsaas, E. L. (2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. *Plant, Cell and Environment*, *30*(9), 1035–1040. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01710.x>
- Singh, S. K., Badgajar, G. B., Reddy, V. R., Fleisher, D. H., & Timlin, D. J. (2013). Effect of Phosphorus Nutrition on Growth and Physiology of Cotton Under Ambient and Elevated Carbon Dioxide. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *199*(6), 436–448. <https://doi.org/10.1111/jac.12033>
- Singh, S. K., & Reddy, V. R. (2015). Response of carbon assimilation and chlorophyll fluorescence to soybean leaf phosphorus across CO₂: Alternative electron sink, nutrient efficiency and critical concentration. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *151*, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.08.021>
- Singh, S. K., & Reddy, V. R. (2016). Methods of mesophyll conductance estimation: Its impact on key biochemical parameters and photosynthetic limitations in phosphorus-stressed soybean across CO₂. *Physiologia Plantarum*, *157*(2), 234–254. <https://doi.org/10.1111/ppl.12415>
- Singh, S. K., Reddy, V. R., Fleisher, D. H., & Timlin, D. J. (2019). Interactive effects of temperature and phosphorus nutrition on soybean: Leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and nutrient efficiency. *Photosynthetica*, *57*(1), 248–257. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.036>
- Teixeira, J. F., Herminia, A. I., Prieto, E., Ii, M., Galvêas, B., Iii, L., ... Cruz, D. (2011). (No Title). *abr*, 621–629.
- Thalman, M., & Santelia, D. (2017). Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. *New Phytologist*, *214*(3), 943–951. <https://doi.org/10.1111/nph.14491>
- Thuynsma, R., Kleinert, A., Kossmann, J., Valentine, A. J., & Hills, P. N. (2016). The effects of limiting phosphate on photosynthesis and growth of *Lotus japonicus*. *South African Journal of Botany*, *104*, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.001>
- Usuda, H., & Edwards, G. E. (1982). Influence of Varying CO₂ and Orthophosphate Concentrations on Rates of Photosynthesis, and Synthesis of Glycolate and

Dihydroxyacetone Phosphate by Wheat Chloroplasts . In *Plant Physiol* (Vol. 69).

Veneklaas, E. J., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P. M., Lovelock, C. E., Plaxton, W. C., ... Raven, J. A. (2012). Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist*, 195(2), 306–320. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>

Yang, J. T., Preiser, A. L., Li, Z., Weise, S. E., & Sharkey, T. D. (2016). Triose phosphate use limitation of photosynthesis: short-term and long-term effects. *Planta*, 243(3), 687–698. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2436-8>

7. MATERIAIS SUPLEMENTARES

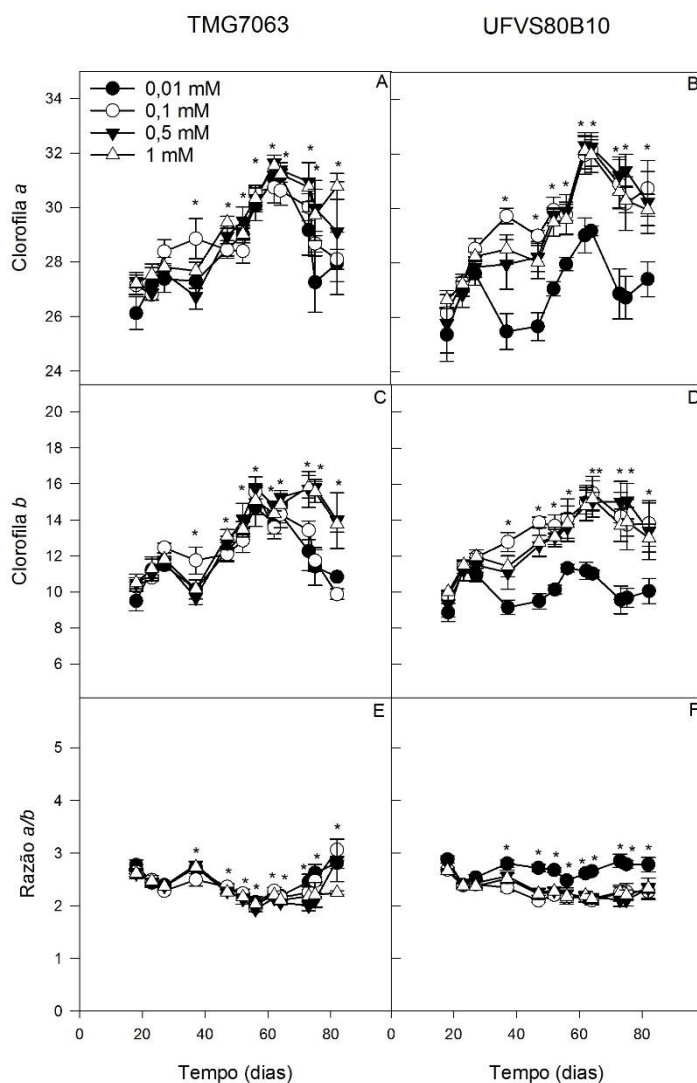


Figura S1- Clorofila *a* (A, B), clorofila *b* (C, D), razão *a/b* (E, F) dos cultivares TMG7063 (A, C, E) e UFVS80B10 (B, D, F) nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva ao longo do tempo. Os símbolos representam as médias \pm erro padrão. Os asteriscos representam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

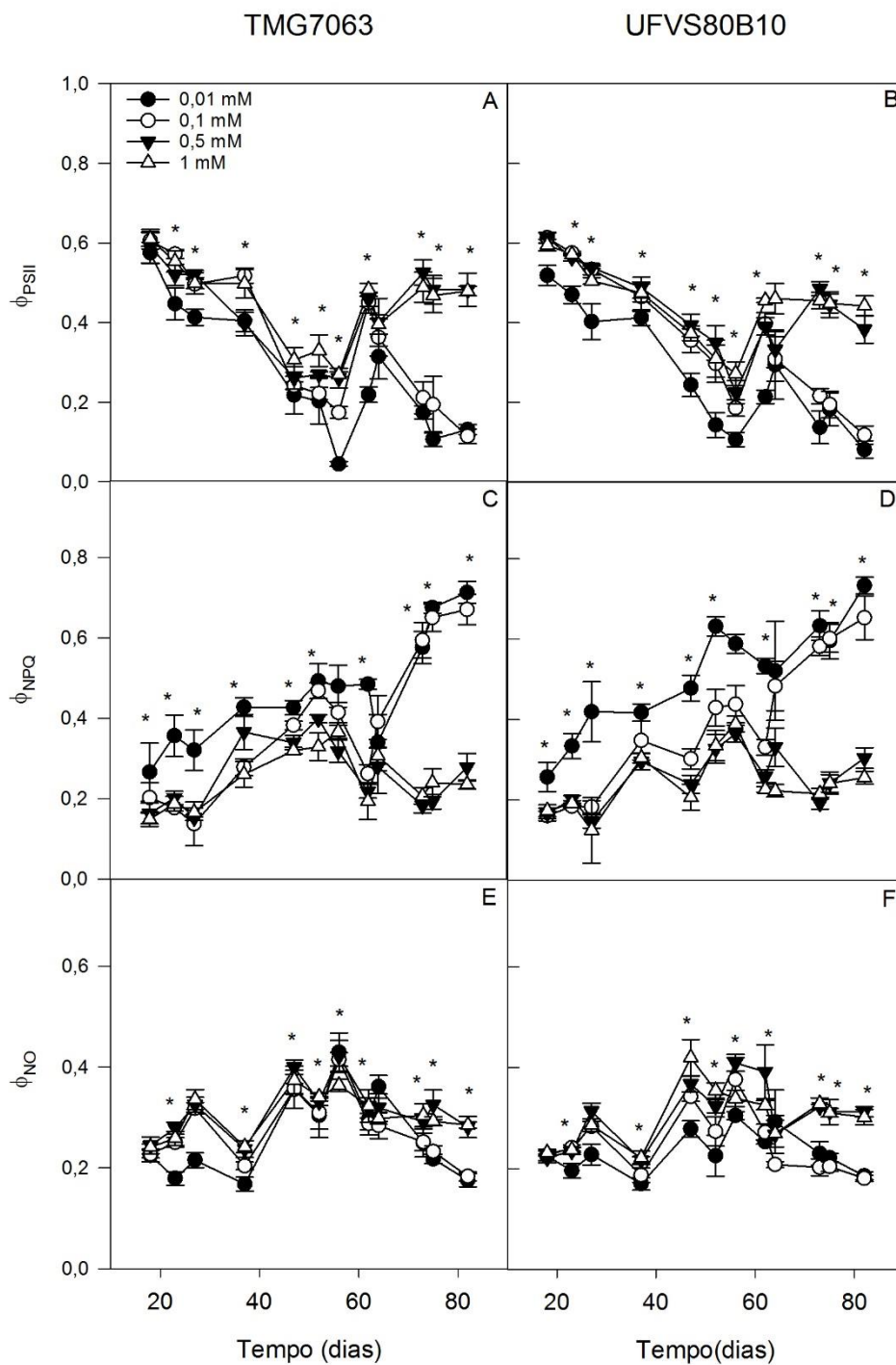


Figura S2- Rendimento quântico efetivo do PSII (ϕ_{PSII} ; A, B), rendimento quântico de dissipação não regulada da energia não fotoquímica (ϕ_{NO} ; C, D), rendimento quântico de dissipação regulada da energia não fotoquímica (ϕ_{NPQ} ; E, F) dos cultivares TMG7063 (A, C, E) e UFVS80B10 (B, D, F) nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva ao longo do tempo. Os símbolos representam as médias \pm erro padrão. Os asteriscos representam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

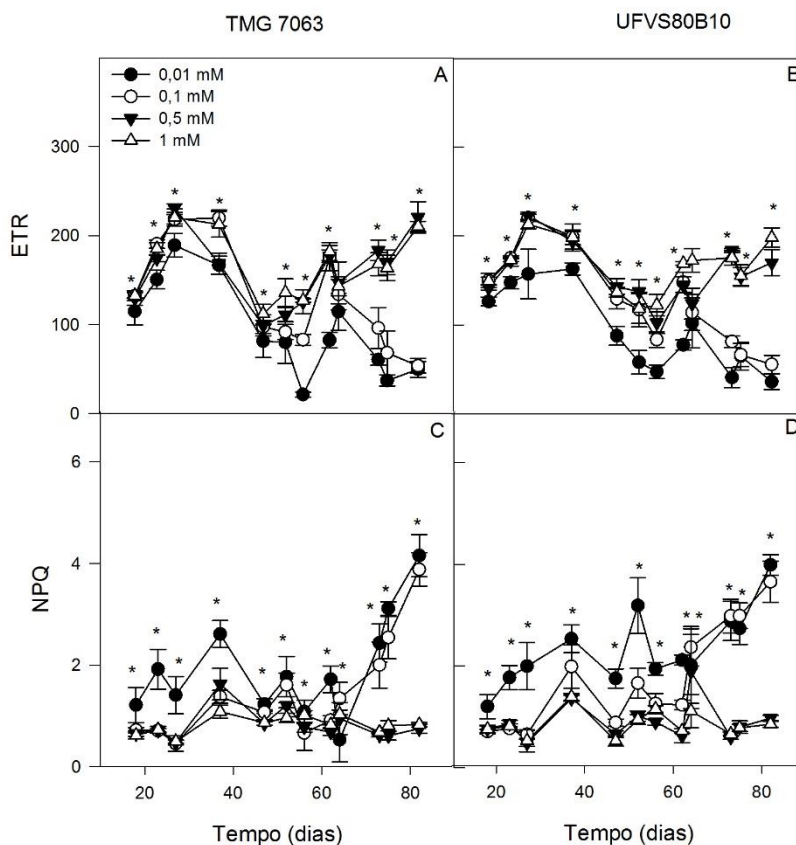


Figura S3- Taxa de transporte de elétrons (ETR; A, B) e coeficiente de dissipação não fotoquímica (NPQ; C, D) dos cultivares TMG7063 (A, C) e UFVS80B10 (B, D) nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva ao longo do tempo. Os símbolos representam as médias \pm erro padrão. Os asteriscos representam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

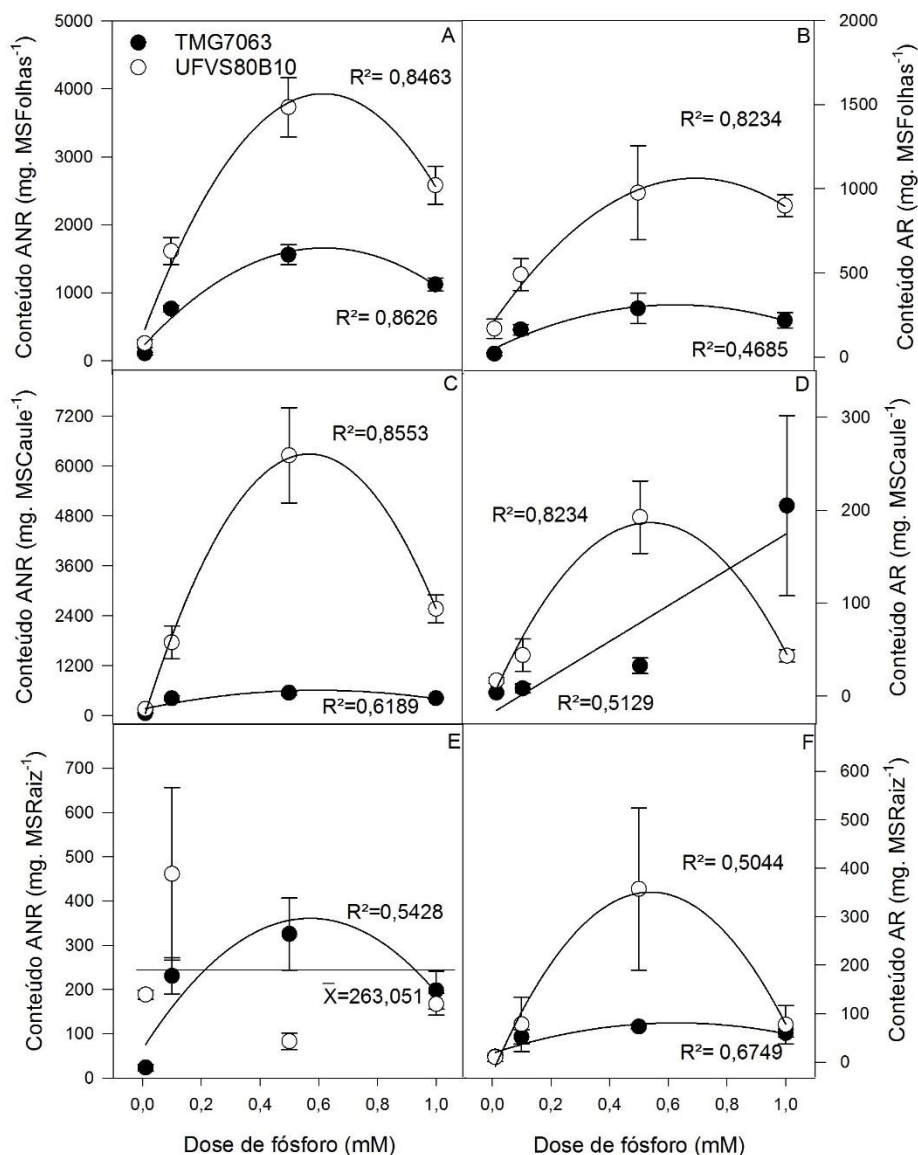


Figura S4: Conteúdo de açúcares redutores e açúcares não redutores na folha (AR, ANR; A e B), no caule (C e D), na raiz (E e F) dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R8, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. \bar{X} representa a média da variável resposta que não se adequou a algum modelo. As equações das regressões se encontram no quadro S9.

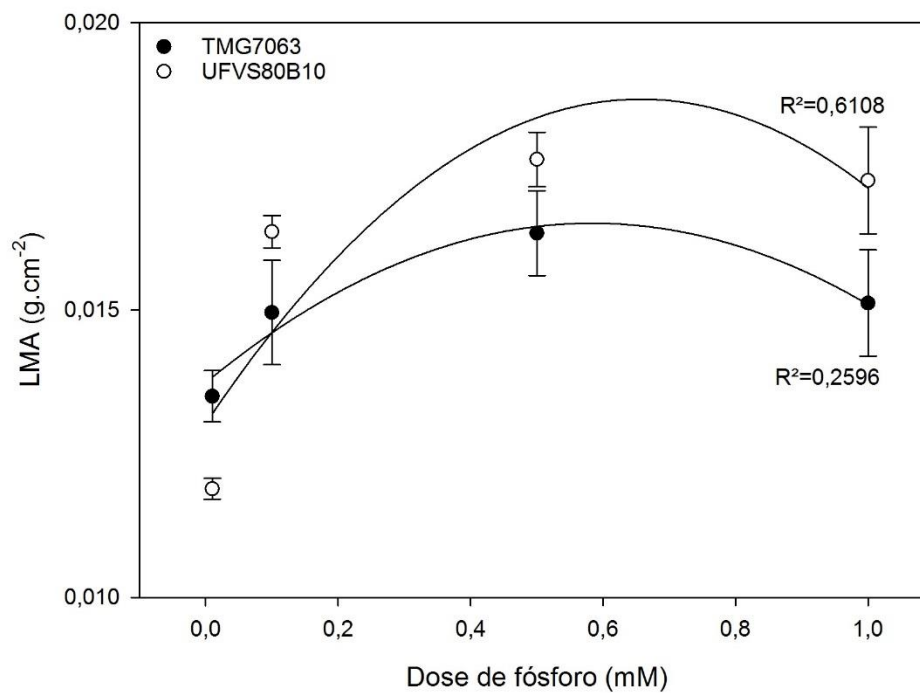


Figura S5: Massa de folha por área (LMA), dos cultivares UFVS80B10 e TMG7063 no estádio R5, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram no quadro S9.

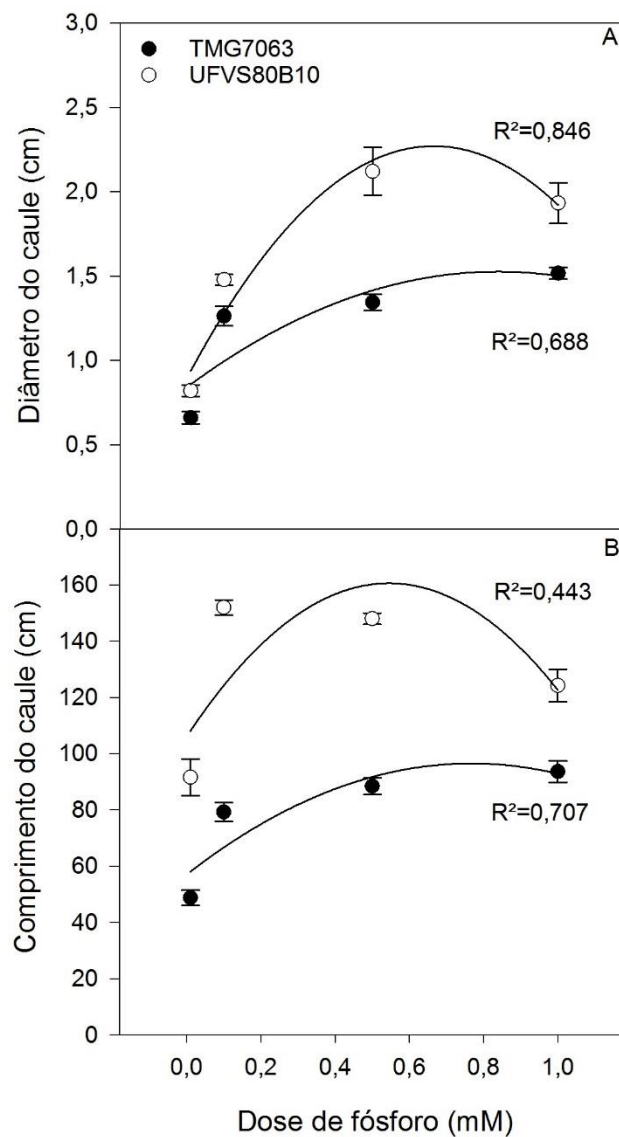


Figura S6: Diâmetro do caule (A) e comprimento do caule (B) dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R8, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. As equações das regressões se encontram no quadro S9.

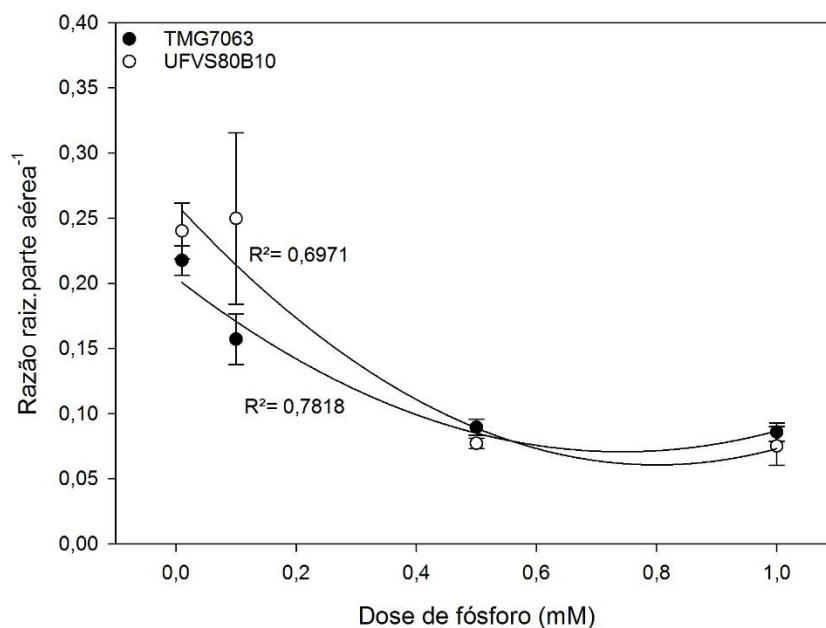


Figura S7- Razão raiz/parte aérea dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R8, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. As equações das regressões se encontram no quadro S9.

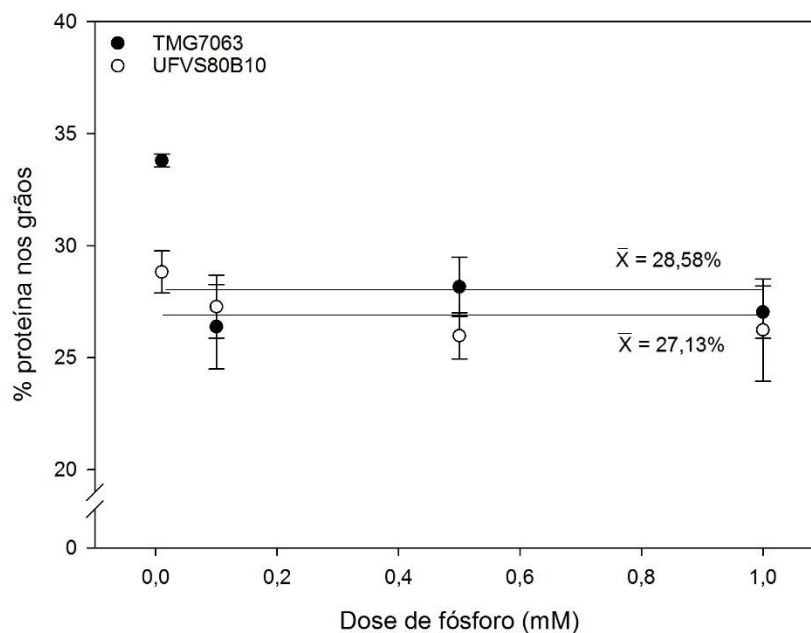


Figura S8- Porcentagem de proteína nos grãos dos cultivares TMG7063 e UFVS80B10 no estágio R8, nas doses de 0,01mM, 0,1mM, 0,5mM e 1mM de P em solução nutritiva. Os dados representam as médias \pm erro padrão. \bar{X} representa a médias da variável resposta que não se adequou a algum modelo.

Quadro S9 - Equações e coeficiente de determinação das regressões dos cultivares UFVS80B10 e TMG7063.

Figura	Gráfico	Cultivar	Equações	R ²
3	A	TMG7063	$\hat{Y} = 0,3015^{**} + 0,5768^* x - 0,4023^* x^2$	0,501
3	B	TMG7063	$\hat{Y} = 0,4113^{**} - 0,6754^{**} x + 0,4647^* x^2$	0,554
3	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,2730^{**} + 0,4077^* x - 0,2310^{ns} x^2$	0,529
3	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,4891^{**} - 0,9255^{**} x + 0,6681^{**} x^2$	0,741
3	C	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,2480^{**} + 0,2887^{**} x - 0,2188^{**} x^2$	0,709
4	A	TMG7063	$\hat{Y} = 115,3371^{**} + 232,6858^* x - 168,7331^{ns} x^2$	0,434
4	B	TMG7063	$\hat{Y} = 1,4698^{**} - 2,7588^{**} x + 1,9783^* x^2$	0,489
4	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 100,1385^{**} + 156,6809^* x - 90,2584^{ns} x^2$	0,516
4	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 1,9400^{**} - 4,4415^{**} x + 3,2422^{**} x^2$	0,802
5	A	TMG7063	$\hat{Y} = 20,4536^{**} + 33,2122^{**} x - 24,0250^{**} x^2$	0,752
5	C	TMG7063	$\hat{Y} = 7,1377^{**} + 5,1682^* x - 3,8910^{ns} x^2$	0,488
5	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 13,7489^{**} + 39,0635^{**} x - 28,0538^{**} x^2$	0,587
5	D	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,8720^{**} - 0,5233^{**} x - 0,3522^{ns} x^2$	0,502
6	A	TMG7063	$\hat{Y} = 65,2757^{**} + 188,1786^{**} x - 123,1636^{**} x^2$	0,870
6	B	TMG7063	$\hat{Y} = 123,6587^{**} + 220,30^* x - 136,7232^{ns} x^2$	0,595
6	C	TMG7063	$\hat{Y} = 6,9756^{**} + 18,1342^{**} x - 11,8174^{**} x^2$	0,638
6	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 40,1864^{**} + 116,7967^* x - 77,8342^{ns} x^2$	0,490
6	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 48,3013^{**} + 321,4182^{**} x - 279,0269^{**} x^2$	0,630
6	C	UFVS80B10	$\hat{Y} = 4,4892^{**} + 15,9014^{**} x - 12,5580^{**} x^2$	0,422
7	A	TMG7063	$\hat{Y} = 0,1392^{ns} + 1,8797^{**} x$	0,753
7	B	TMG7063	$\hat{Y} = -0,1083^{ns} + 1,9111^{**} x$	0,817
7	C	TMG7063	$\hat{Y} = 0,0655^{ns} + 3,8218^{**} x - 2,5346^* x^2$	0,772
7	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,7457^{**} + 3,5753^{**} x$	0,827
7	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,4859^{ns} + 4,4383^{**} x$	0,839
7	C	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,4127^* + 3,5543^* x - 2,6337^{ns} x^2$	0,485
8	-	TMG7063	$\hat{Y} = 0,0189^{**} + 0,0267^* x - 0,0389^{**} x^2$	0,750
8	-	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,0123^{**} + 0,0135^{ns} x - 0,0206^{**} x^2$	0,715
9	A	TMG7063	$\hat{Y} = 58,1288^{ns} + 675,5846^* x - 549,3354^* x^2$	0,614
9	B	TMG7063	$\hat{Y} = 163,6957^* + 1609,3468^{**} x - 1344,8216^{**} x^2$	0,815
9	C	TMG7063	$\hat{Y} = 165,2943^* + 1367,8801^{**} x - 961,8824^* x^2$	0,376
9	D	TMG7063	$\hat{Y} = 217,8495^{ns} + 5524,0829^{**} x - 4516,1511^{**} x^2$	0,599
9	E	TMG7063	$\hat{Y} = 271,7072^{**} + 351,1527^* x$	0,394
9	F	TMG7063	$\hat{Y} = 95,3420^* + 1188,1728^{**} x - 1047,6800^{**} x^2$	0,596
9	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = -568,9706^{ns} + 18315,2108^{**} x - 14966,15^{**} x^2$	0,657
9	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 281,6445^{ns} + 11109,1184^{**} x - 8836,5577^* x^2$	0,899
9	C	UFVS80B10	$\hat{Y} = 276,1679^* + 13156,6954^{**} x - 9064,9784^{**} x^2$	0,785
9	D	UFVS80B10	$\hat{Y} = 268,6676^{ns} + 15227,5427^{**} x - 12082,8878^{**} x^2$	0,518
9	E	UFVS80B10	$\hat{Y} = 145,2673^{ns} + 4538,2262^{**} x - 4367,5043^{**} x^2$	0,534
10	A	TMG7063	$\hat{Y} = 28,9756^{**} + 283,6508^{**} x - 214,7799^{**} x^2$	0,766
10	B	TMG7063	$\hat{Y} = 4,3738^{**} + 53,7136^{**} x^2 - 42,7783^{**} x^2$	0,751
10	C	TMG7063	$\hat{Y} = 5,5363^* + 52,5611^{**} x - 43,5133^{**} x^2$	0,640
10	D	TMG7063	$\hat{Y} = 8,6272^{**} (1 - \exp(-31,0129^* x))$	0,723

10	E	TMG7063	$\hat{Y} = 4,4326^{**} + 55,7467^{**}x - 41,9231^{**}x^2$	0,828
10	F	TMG7063	$\hat{Y} = 8,3562^{*} + 119,7496^{**}x - 87,6797^{**}x^2$	0,824
10	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 31,5849^{*} + 546,4652^{**}x - 430,5889^{**}x^2$	0,818
10	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 11,4838^{**} + 113,4012^{**}x - 90,6026^{**}x^2$	0,669
10	C	UFVS80B10	$\hat{Y} = 9,3373^{**} + 199,9029^{**}x - 161,9404^{**}x^2$	0,895
10	D	UFVS80B10	$\hat{Y} = 7,5763^{ns} + 62,6876^{*}x - 55,4059^{*}x^2$	0,398
10	E	UFVS80B10	$\hat{Y} = 3,2171^{ns} + 61,6521^{**}x - 40,7382^{**}x^2$	0,790
10	F	UFVS80B10	$\hat{Y} = -1,4732^{ns} + 142,6868^{**}x - 117,4896^{**}x^2$	0,822
11	-	TMG7063	$\hat{Y} = 2,1788^{*} + 34,17,52^{**}x - 25,5498^{**}x^2$	0,851
11	-	UFVS80B10	$\hat{Y} = -0,4027^{ns} + 36,1947^{**}x - 28,7365^{**}x^2$	0,859
S4	A	TMG7063	$\hat{Y} = 190,5198^{*} + 4739,9471^{**}x - 3822,0715^{**}x^2,$	0,862
S4	B	TMG7063	$\hat{Y} = 42,5646^{ns} + 855,1897^{*} - 681,8713^{*}x^2$	0,468
S4	C	TMG7063	$\hat{Y} = 152,6541^{*} + 1521,9880^{**}x - 1271,3869^{**}x^2$	0,618
S4	D	TMG7063	$\hat{Y} = -17,1792^{ns} + 192,1172^{**}x$	0,512
S4	E	TMG7063	$\hat{Y} = 65,3493^{ns} + 1036,5044^{**}x - 908,9972^{**}x^2$	0,542
S4	F	TMG7063	$\hat{Y} = -22,1291^{ns} + 1382,6595^{**}x - 1281,8659^{**}x^2$	0,674
S4	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 344,8787^{ns} + 11589,7243^{**}x - 9367,2378^{**}x^2$	0,846
S4	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 192,5034^{ns} + 2502,0231^{**}x - 1798,2674^{*}x^2$	0,823
S4	C	UFVS80B10	$\hat{Y} = -173,2020^{ns} + 22732,3579^{**}x - 19982,83^{**}x^2$	0,855
S4	D	UFVS80B10	$\hat{Y} = 1,0499^{ns} + 695,2108^{**}x - 651,4159^{**}x^2$	0,823
S4	F	UFVS80B10	$\hat{Y} = 18,1797^{*} + 200,0409^{**}x - 159,4357^{**}x^2$	0,504
S5	-	TMG7063	$\hat{Y} = 0,0137^{**} + 0,0095^{*}x - 0,0082^{ns}x^2$	0,259
S5	-	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,0130^{**} + 0,0172^{**}x - 0,0131^{**}x^2$	0,610
S6	A	TMG7063	$\hat{Y} = 0,8420^{**} + 1,6322^{**}x - 0,9737^{*}x^2$	0,688
S6	B	TMG7063	$\hat{Y} = 57,0601^{**} + 102,8549^{**}x - 67,0467^{*}x^2$	0,707
S6	A	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,8969^{**} + 4,1315^{**}x - 3,1079^{**}x^2$	0,846
S6	B	UFVS80B10	$\hat{Y} = 106,0876^{**} + 200,0669^{**}x - 183,5685^{**}x^2$	0,443
S7	-	TMG7063	$\hat{Y} = 0,2042^{**} - 0,3595^{**}x + 0,2420^{**}x^2$	0,781
S7	-	UFVS80B10	$\hat{Y} = 0,2611^{**} - 0,5010^{*}x + 0,3129^{ns}x^2$	0,697