

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**Riteli Baptista Mambrin**

**SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO,  
ACÚMULO E EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO NA PLANTA**

Santa Maria, RS  
2016

**Riteli Baptista Mambrin**

**SELEÇÃO E LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO, ACÚMULO E  
EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO NA PLANTA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título do grau de **Doutor em Agronomia**.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nerinéia Dalfollo Ribeiro

Santa Maria, RS  
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mambrin, Ritieli Baptista  
Seleção de linhagens de feijão para produção, acúmulo e eficiência de uso de fósforo na planta / Ritieli Baptista Mambrin.- 2016.  
95 f.; 30 cm

Orientadora: Nerinéia Ribeiro  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2016

1. Phaseolus vulgaris L. 2. Acúmulo de fósforo 3. Variabilidade genética 4. Índice de resposta à aplicação de fósforo I. Ribeiro, Nerinéia II. Título.

---

©2016

Todos os direitos autorais reservados a Ritieli Baptista Mambrin. A reprodução de qualquer parte deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua João da Fontoura e Souza, 6997, Camobi, Santa Maria – RS, 97105-210.

Endereço eletrônico: ritimambrin@gmail.com

**Riteli Baptista Mambrin**

**SELEÇÃO E LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO, ACÚMULO E  
EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO NA PLANTA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título do grau de **Doutor em Agronomia**.

**Aprovado em 23 de setembro de 2016:**

---

**Nerinéia Dalfollo Ribeiro, Dr<sup>a</sup>.**  
(Presidente/Orientadora)

---

**Alessandro Dal' Col Lucio, Dr.** (UFSM)

---

**Isabel Lago, Dr<sup>a</sup>.** (UFSM)

---

**Liliane Márcia Mertz Henning, Dr<sup>a</sup>.** (EMBRAPA SOJA)

---

**Fernando Augusto Henning, Dr.** (EMBRAPA SOJA)

Santa Maria, RS  
2016

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus Pais: Rita de Cássia Baptista Mambrin e

Ruicemar de Oliveira Mambrin

À minha irmã: Renata Mambrin Garlet

Ao meu sobrinho: Lorenzo Garlet

Ao meu namorado: Ricardo Höher

A essas pessoas maravilhosas, que fazem parte da minha história, e por acreditarem que tudo isso seria possível.

**Dedico este trabalho**

## **AGRADECIMENTOS**

Neste momento gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

À Deus, que está sempre ao meu lado e me concedeu força durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais, ao Departamento de Fitotecnia e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de realização do Doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Nerinéia Dalfollo Ribeiro, pela paciência e dedicação ao transmitir-me preciosos ensinamentos.

Aos meus colegas de setor, Cleiton Renato Casagrande, Fernanda Daltroso Arns, Greice Rosana Klasener, Henrique Mezzomo, Maykon da Silva Junior e Skarlet Steckling pela amizade e colaboração na condução do trabalho.

Ao meu namorado Ricardo Höher pelo companheirismo, carinho, incentivo e compreensão que sempre me deu.

A todos, **MUITO OBRIGADO.**

“Quando se planeja por um ano, deve-se semear milho; quando se planeja por uma década, deve-se plantar árvores; mas, quando se planeja para a vida, deve-se educar homens.”

**Knan-Tzé**

## RESUMO

### SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PARA PRODUÇÃO, ACÚMULO E EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO NA PLANTA

AUTORA: RITIELI BAPTISTA MAMBRIN  
ORIENTADORA: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

O uso de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) eficientes e responsivas a utilização de fósforo é importante para a elevação da produtividade de grãos e para a redução do custo de produção. Diante disso, os objetivos desse trabalho foram: (1) avaliar a resposta de linhagens de feijão submetidas a diferentes disponibilidades de fósforo na produção de massa seca, nos componentes da produtividade de grãos e no acúmulo de fósforo na planta; (2) investigar a associação entre esses caracteres; (3) avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão quanto à disponibilidade de fósforo; (4) identificar linhagens eficientes no uso de fósforo e responsivas a aplicação deste mineral por diferentes índices. Para isso, os experimentos foram desenvolvidos em casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), durante os anos de 2013 a 2015, em delineamento inteiramente casualizado e parcela sub-sub-dividida. Nos dois primeiros experimentos foram testadas concentrações de fósforo na solução nutritiva de 0,5 a 2,3 mmol L<sup>-1</sup> como componentes da parcela principal; as cultivares Pérola e IPR88 Uirapurú na sub-parcela e, os cultivos de outono-inverno e primavera-verão na sub-sub-parcela. No terceiro experimento foram avaliadas a eficiência no uso de fósforo e a resposta de 12 genótipos de feijão em baixa (0,9 mmol L<sup>-1</sup>) e em alta (1,9 mmol L<sup>-1</sup>) concentração de fósforo na solução nutritiva, em duas épocas de cultivo. Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,33 e 1,84 mmol L<sup>-1</sup> proporcionam maior massa seca das vagens no enchimento das vagens (R8), dos grãos na maturação (R9), número de grãos e produtividade de grãos, para os genótipos Pérola e IPR88 Uirapurú, nos cultivos de outono-inverno e primavera-verão. Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,37 e 1,96 mmol L<sup>-1</sup> acarretam maior concentração de fósforo: nas folhas em terceira folha trifoliada (V4), no caule em floração (R6), nas folhas, caule e vagens em enchimento de vagens (R8) e nos grãos na maturação (R9); produtividade de grãos e concentração de ácido fítico dos grãos, nos cultivos de outono-inverno e primavera-verão. Os caracteres de massa seca das folhas, caule e vagens no enchimento de vagens (R8), massa seca dos grãos na maturação (R9), número de grãos e número de vagens são promissores por permitir seleção indireta. Assim como, a avaliação da concentração de fósforo nos tecidos vegetais no estágio enchimento de vagens (R8) é promissora e permite seleção indireta para a produtividade de grãos. As linhagens L 2225, L 2632, L 2527 e L 2411, destacaram-se por apresentar alta produção de massa seca de caule em baixa concentração de fósforo no meio de cultivo. Existe variabilidade genética entre as linhagens de feijão estudadas, para produção de massa seca, produtividade e acúmulo de fósforo nos tecidos. A linhagem L 2527 mostrou-se eficiente e responsiva ao uso de fósforo para a parte aérea.

**Palavras-chave:** *Phaseolus vulgaris* L. Acúmulo de fósforo. Variabilidade genética. Índice de resposta à aplicação de fósforo.



## ABSTRACT

### SELECTION OF COMMON BEAN LINES FOR GRAIN YIELD, ACCUMULATION AND PHOSPHORUS USE EFFICIENCY IN PLANT

AUTHOR: RITIELI BAPTISTA MAMBRIN  
ADVISOR: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

The use of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars efficient and responsive to phosphorus use is important for increase grain yield and reduce production cost. Thus, the objectives of this work were: (1) evaluate the response of common bean lines in production of dry matter, grain yield components, and accumulation of phosphorus in the plant under different phosphorus availability; (2) investigate the association between these characters; (3) evaluate the genetic variability of common bean lines as the phosphorus availability; (4) identify efficient lines in phosphorus use and responsive to application of mineral by different indexes. For this, four experiments were carried out in a greenhouse of the Plant Science Department at the Santa Maria Federal University during the years 2013 – 2015, in a completely randomized design in a sub-sub-divided plot. In the first two experiments the phosphorus concentration tested in the nutrient solution were from 0.5 to 2.3 mmol L<sup>-1</sup> as part of the main plot; Perola and IPR88 Uirapurú cultivars were evaluated in the sub-plot, and the growing seasons (fall-winter and spring-summer) in the sub-sub-plot. In the third and four experiments were evaluated the efficiency of phosphorus use and 12 genotypes response the low (0.9 mmol L<sup>-1</sup>) and high (1.9 mmol L<sup>-1</sup>) phosphorus concentration in the nutrient solution in two growing seasons. Phosphorus concentration in the nutrient solution from 1.33 to 1.84 mmol L<sup>-1</sup> provided higher dry mass of pod at pod filling stage (R8), high dry mass of grains at maturation (R9), and higher number of grains and grain yield, for Pérola and IPR88 Uirapurú cultivars. Phosphorus concentration in the nutrient solution from 1.37 to 1.96 mmol L<sup>-1</sup> result in high phosphorus concentration in: leaves at first trifoliolate leaf (V4), stem at flowering (R6); leaves, stem and pods at pod filling (R8), grains at maturation (R9), and high grain yield and phytic acid, in growing seasons (fall-winter and spring-summer). The characters dry mass of the leaves, stem and pods at pod filling stage (R8), dry mass of grains at maturity (R9), number of grains and number of pods are promising for allowing indirect selection. The evaluation of the phosphorus concentration in plant tissues at pod filling stage (R8) is promising and allowing indirect selection for the grain yield in common bean. The L 2225, L 2632, L 2527 and L 2411 lines, stood out due to high production of dry mass of stem in low phosphorus concentration in the culture medium. There is genetic variability among common bean lines studied for dry matter production, grain yield and phosphorus accumulation in tissues. The L 2527 line proved to be efficient and responsive for phosphorus use.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris* L. Phosphorus accumulation. Variability genetics. Phosphorus application response index.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### ARTIGO 1

- FIGURA 1 – Massa seca: das folhas e caule em terceira folha trifoliada – V4 (A) e (B); folhas em floração – R6 (C); caule e vagens no enchimento das vagens – R8 (D) e (E); dos grãos na maturação – R9 (F); número de grãos na maturação (G) e produtividade de grãos (H), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva para o cultivo de dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú). Santa Maria – RS, UFSM.....29
- FIGURA 2 – Massa seca: das folhas no estágio de desenvolvimento de terceira folha trifoliada – V4 (A), das folhas e caule na floração – R6 (B) e (C), e folhas e caule no enchimento das vagens – R8 (D) e (E), de genótipos de feijão cultivados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono- inverno (época 1) e de primavera- verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.....31
- FIGURA 3 – Massa seca das vagens no estágio de desenvolvimento de enchimento de vagens – R8 (A) e dos grãos na maturação – R9 (B), número de vagens por planta na maturação – R9 (C), número de grãos por planta na maturação – R9 (D) e produtividade de grãos (E), obtidas em cultivo com cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono- inverno (época 1) e de primavera- verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.....33
- FIGURA 4 – Valores quinzenais de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C) e radiação (Rad., MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) nos períodos de cultivo de outono-inverno de 2013 (época 1) e de primavera-verão de 2013 (época 2). Dados meteorológicos coletados no 8º Distrito de Meteorologia, na Estação Meteorológica Convencional de Santa Maria. Santa Maria - RS, UFSM.....35

### ARTIGO 2

- FIGURA 1 – Concentração de fósforo nas folhas em terceira folha trifoliada – V4 (A), folhas e caule na floração - R6 (B) e (C), nas folhas no enchimento das vagens - R8 (D), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva para o cultivo de dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú). Santa Maria – RS, UFSM.....50
- FIGURA 2 – Concentração de fósforo: no caule no estágio de desenvolvimento de enchimento das vagens - R8 (A), e nos grãos na maturação - R9 (B); e concentração de ácido fítico nos grãos na maturação - R9 (C), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva para o cultivo de dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú). Santa Maria – RS, UFSM.....51
- FIGURA 3 – Concentração de fósforo: nas folhas no estágio de desenvolvimento de terceira folha trifoliada - V4 (A), na folha e caule na floração - R6 (B) e (C), na folha e caule no enchimento das vagens - R8 (D) e (E), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono-inverno (época 1) e de primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.....54

FIGURA 4 – Concentração de fósforo: nas vagens no estágio de desenvolvimento de enchimento das vagens - R8 (A), nos grãos na maturação - R9 (B) e concentração de ácido fítico nos grãos na maturação - R9 (C), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono-inverno (época 1) e de primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.....55

### ARTIGO 3

FIGURA 1 – Classificação de 12 genótipos de feijão quanto a eficiência no uso de fósforo na parte aérea (EUPA,  $g^2 mg^{-1}$ ) em relação ao índice de resposta de fósforo à produção de massa seca da parte aérea (IRPA,  $g mg^{-1}$ ) e eficiência no uso de fósforo nos grãos (EUGrão,  $g^2 mg^{-1}$ ) em relação ao índice de resposta de fósforo nos grãos (IRGrão,  $g^2 mg^{-1}$ ), obtidas em baixa concentração de fósforo em solução nutritiva, em dois cultivos (outono/inverno – Época 1 e primavera/verão – Época 2). Santa Maria - RS, UFSM. ER: eficiente e responsivo; NER: não eficiente e responsivo; NENR: não eficiente e não responsivo e ENR: eficiente e não responsivo. 1 – L2244; 2 – L2519; 3 – L2527; 4 – L2411; 5 – L2625; 6 - IPR88 Uirapurú; 7 – L2528; 8 – L2225; 9 – Pérola; 10 – L2632; 11 – L2637 e 12 – L2428.....77

FIGURA 2 – Classificação de 12 genótipos de feijão quanto a eficiência no uso de fósforo na produção de grãos (EUProd,  $g^2 mg^{-1}$ ) em relação ao índice de resposta de fósforo nos grãos (IRGrão,  $g^2 mg^{-1}$ ) e eficiência no uso de fósforo nas plantas (EUPlanta,  $g^2 mg^{-1}$ ) em relação ao índice de resposta de fósforo à produção de massa seca na planta (IRPlanta,  $g mg^{-1}$ ) obtidas em baixa concentração de fósforo em solução nutritiva, em dois cultivos (outono/inverno – Época 1 e primavera/verão – Época 2). Santa Maria - RS, UFSM. ER: eficiente e responsivo; NER: não eficiente e responsivo; NENR: não eficiente e não responsivo e ENR: eficiente e não responsivo. 1 – L2244; 2 – L2519; 3 – L2527; 4 – L2411; 5 – L2625; 6 - IPR88 Uirapurú; 7 – L2528; 8 – L2225; 9 – Pérola; 10 – L2632; 11 – L2637 e 12 – L2428.....79

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO 1

TABELA 1 – Valores médios obtidos para os caracteres de massa seca: das folhas na terceira folha trifoliada – V4 (MSFolha V4, g), das folhas na floração – R6 (MSFolha R6, g), do caule na floração – R6 (MSCaule R6, g), das folhas no enchimento das vagens – R8 (MSFolha R8, g), do caule no enchimento das vagens – R8 (MSCaule R8, g), das vagens no enchimento das vagens – R8 (MSV R8, g), dos grãos na maturação – R9 (MSG R9, g); número de grãos na maturação – R9 (N°G R9) e produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>), obtidos para dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú), cultivados sob diferentes concentrações de fósforo na solução nutritiva, no período de outono- inverno (época 1) e primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.....34

TABELA 2 – Estimativas de correlação de Pearson entre os caracteres de massa seca em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento: folhas em terceira folha trifoliada – V4 (MSFolha V4), caule em terceira folha trifoliada – V4 (MSCaule V4), folhas na floração – R6 (MSFolha R6), caule na floração – R6 (MSCaule R6), folhas no enchimento das vagens – R8 (MSFolha R8), caule no enchimento das vagens – R8 (MSCaule R8), vagens no enchimento das vagens – R8 (MSV R8), grãos na maturação – R9 (MSG R9); número de vagens na maturação – R9 (N°V R9), número de grãos na maturação – R9 (N°G R9) e produtividade de grãos (Prod), avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, para dois genótipos de feijão cultivados em duas épocas de semeadura. Santa Maria - RS, UFSM.....36

### ARTIGO 2

TABELA 1 – Valores médios obtidos para concentração de fósforo: nas folhas e caule em terceira folha trifoliada – V4 (P Folha V4, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Caule V4, g Kg<sup>-1</sup> de MS), nas folhas e caule na floração – R6 (P Folha R6, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Caule R6, g Kg<sup>-1</sup> de MS), nas folhas, caule e vagens no enchimento das vagens – R8 (P Folha R8, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Caule R8, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Vagem R8, g Kg<sup>-1</sup> de MS), dos grãos na maturação – R9 (P G R9, g Kg<sup>-1</sup> de MS); produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>) e concentração de ácido fítico nos grãos (Ácido fítico, mg Kg<sup>-1</sup> de MS) obtidos para dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú), cultivados sob diferentes concentrações de fósforo na solução nutritiva, no período de outono-inverno (época 1) e primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.....56

TABELA 2 – Estimativas de correlação de Pearson para a concentração de fósforo nas folhas na terceira folha trifoliada (V4) (PFolha V4) e no caule em V4 (PCaule V4); nas folhas na floração (R6) (PFolha R6) e no caule em R6 (PCaule R6) nas folhas no enchimento das vagens (R8) (PFolha R8), no caule em R8 (PCaule R8) e nas vagens em R8 (PVagem R8); nos grãos na maturação (R9) (PGrãos R9); concentração de ácido fítico nos grãos (Ac.Fit.) e produtividade de grãos (Prod) em R9, avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, para dois genótipos de feijão cultivados em duas épocas de semeadura. Santa Maria - RS, UFSM.....57

### ARTIGO 3

- TABELA 1 – Análise de variância para os caracteres de eficiência no uso de fósforo na parte aérea (EUPA,  $g^2 mg^{-1}$ ), eficiência no uso de fósforo nos grãos (EUGrão,  $g^2 mg^{-1}$ ), eficiência no uso de fósforo na planta (EUPlan,  $g^2 mg^{-1}$ ), e eficiência no uso de fósforo na produção de grãos (EUProd,  $g^2 mg^{-1}$ ); índice de resposta de fósforo à produção de massa seca na parte aérea (IRPA), índice de resposta de fósforo à produção de grãos (IRGrão) e índice de resposta de fósforo à produção de massa seca na planta (IRPlan); avaliados em 12 genótipos de feijão, submetidos a duas concentrações de fósforo na solução nutritiva em duas épocas de cultivo. Santa Maria - RS, UFSM.....71
- TABELA 2 – Valores médios obtidos para os caracteres de massa seca do caule (MSCaule, g), folhas (MSFolha, g), vagens (MSVagem, g); número de vagens (NVagem), número de grãos (NGrão) e produtividade de grãos (Prod,  $g planta^{-1}$ ), obtidos para 12 genótipos de feijão, submetidas a duas concentrações de fósforo (Baixo P – 0,9  $mmol L^{-1}$  e Alto P – 1,9  $mmol L^{-1}$ ) na solução nutritiva. Santa Maria – RS, UFSM.....74
- TABELA 3 – Valores médios obtidos para os caracteres de concentração de fósforo no caule (PCaule,  $g Kg^{-1}$  de matéria seca - MS), folhas (PFolha,  $g Kg^{-1}$  de MS), vagens (PVagem,  $g Kg^{-1}$  de MS) e nos grãos (PGrãos,  $g Kg^{-1}$  de MS), obtidos para 12 genótipos de feijão, submetidas a duas concentrações de fósforo (Baixo P – 0,9  $mmol L^{-1}$  e Alto P – 1,9  $mmol L^{-1}$ ) na solução nutritiva. Santa Maria – RS, UFSM.....76

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A	Croqui demonstrativo das unidades experimentais .....	90
APÊNDICE B	Imagem do sistema de dispositivo fora do solo e reservatório da solução nutritiva, com capacidade de 245 l.....	91
APÊNDICE C	Análise de variância para massa seca das folhas e caule em terceira folha trifoliada (MSFolha V4, g; MSCaule V4, g); das folhas e caule em floração (MSFolha R6, g; MSCaule R6, g); das folhas, caule e vagens em enchimento das vagens (MSFolha R8, g; MSCaule R8, g; MSV R8, g); e dos grãos na maturação (MSG R9, g); número de vagens (NV R9), número de grãos (NG R9) e produtividade de grãos (Prod, g planta <sup>-1</sup> ), avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva (Conc, C), para dois genótipos de feijão (Genótipo, G) cultivados em duas épocas de semeadura (Época, E). Santa Maria - RS, UFSM.....	92
APÊNDICE D	Análise de variância e de regressão para a concentração de fósforo nas folhas na terceira folha trifoliada (V4) (PFolha V4) e no caule em V4 (PCaule V4); nas folhas na floração (R6) (PFolha R6) e no caule em R6 (PCaule R6) nas folhas no enchimento das vagens (R8) (PFolha R8), no caule em R8 (PCaule R8) e nas vagens em R8 (PVagem R8); nos grãos na maturação (R9) (PGrãos R9); produtividade de grãos (Prod) e concentração de ácido fítico nos grãos (Ac.Fit.) na maturação, avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva (Conc, C), para dois genótipos de feijão (Genótipo, G) cultivados em duas épocas de semeadura (Época, E). Santa Maria - RS, UFSM.....	93
APÊNDICE E	Análise de variância para os caracteres de massa seca das folhas (MSFolha, g), caule (MSCaule, g), vagens (MSV, g); componentes da produtividade, número de vagens (NVagem), número de grãos (NGrão) e produtividade de grãos (Prod, g planta <sup>-1</sup> ); concentração de fósforo nas folhas (PFolha, g Kg <sup>-1</sup> de matéria seca - MS), caule (PCaule, g Kg <sup>-1</sup> de MS), vagens (PVagem, g Kg <sup>-1</sup> de MS) e nos grãos (PGrãos, g Kg <sup>-1</sup> de MS); avaliados em 12 genótipos de feijão, submetidos a duas concentrações de fósforo na solução nutritiva em duas épocas de cultivo. Santa Maria - RS, UFSM.....	94

## **LISTA DE ANEXO**

ANEXO A	Escala fenológica, descrita por Fernandez et al. (1982).....	95
---------	--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>ARTIGO 1</b> .....	21
	Produção de massa seca e componentes da produtividade de cultivares de feijão em resposta a nutrição com fósforo .....	21
2.1	Introdução .....	22
2.2	Material e métodos .....	24
2.3	Resultados e discussão.....	27
2.4	Conclusões .....	37
2.5	Referências bibliográficas .....	38
<b>3</b>	<b>ARTIGO 2</b> .....	41
	Partição de fósforo, concentração de ácido fítico e produtividade de grãos em cultivares de feijão como resposta a nutrição fosfatada .....	41
3.1	Introdução .....	42
3.2	Material e métodos .....	44
3.3	Resultados e discussão.....	47
3.4	Conclusões .....	58
3.5	Referências bibliográficas .....	58
<b>4</b>	<b>ARTIGO 3</b> .....	63
	Seleção de linhagens de feijão quanto ao uso e resposta ao fósforo disponibilizado em solução nutritiva.....	63
4.1	Introdução .....	64
4.2	Material e métodos .....	67
4.3	Resultados e discussão.....	70
4.4	Conclusões .....	79
4.5	Referências bibliográficas .....	80
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	83
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	86
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	87
	<b>APÊNDICES</b> .....	90
	<b>ANEXO</b> .....	95



## 1 INTRODUÇÃO

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais culturas agrícolas no Brasil, sendo que sua relevância não se deve apenas aos aspectos econômicos e agrônômicos, mas também, ao seu papel social, uma vez que é cultivado principalmente em pequenas propriedades, como subsistência (SILVEIRA et al., 2015). Apesar disso, ainda há a necessidade da geração e transferência de tecnologia para os sistemas de produção de feijão. Tal carência é atribuída, em partes, à vulnerabilidade organizacional da cadeia produtiva do feijão comum, desde pesquisa até as ações de difusão de tecnologia aos agricultores (EMBRAPA, 2013).

De acordo com os dados da Conab (2016), na safra 2015/16 houve uma recuperação das produtividades na cultura do feijão, refletindo em um aumento da produção apesar da queda na área cultivada no país, a qual está estimada em 3.029.900 hectares, com produtividade média de 1.079 kg ha<sup>-1</sup>. Apesar de seu destaque no âmbito nutricional, a produtividade de grãos de feijão ainda é a característica considerada mais importante pelos programas de melhoramento genético da cultura, devendo o aumento da concentração de minerais na planta e/ou em seus grãos estar associado à alta produtividade de grãos.

A cultura do feijão possui, de modo geral, baixa produtividade de grãos (ANDRADE et al., 2009). Um dos fatores mais importantes para explicar esta reduzida produtividade é a carência de fertilidade nos solos brasileiros e o manejo inadequado da adubação, limitando a nutrição da planta (LEAL; PRADO, 2008). Além disso, a cultura é muito exigente em nutrientes em função do seu sistema radicular ser pouco desenvolvido e superficial, o que dificulta ainda mais a absorção de elementos essenciais pelas plantas (SILVA; SILVEIRA, 2000).

O fósforo (P) é um dos macronutrientes menos exigidos pelas culturas. Contudo, trata-se do mineral mais utilizado em adubações no Brasil em função da sua escassez generalizada nos solos e, também, em razão de sua baixa mobilidade, o que reduz a eficiência da adubação fosfatada (FAQUIN, 2005). Esse mineral é altamente limitante ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas de feijão, especialmente em solos ácidos (ROTILI et al., 2010), além de exercer influência na produtividade dos grãos (ZUCARELI, 2006). Contudo, em solução nutritiva, não se observou resposta à concentração de fósforo no aumento da produção de massa seca de folhas, caules e raízes de plântulas de feijão (PASTORINI et al., 2000).

Estudos diagnosticaram respostas de plantas de feijão no uso de fósforo quanto a elevação da produtividade de grãos (PASTORINI et al., 2000; KIKUTI et al., 2005). No entanto, a maioria das pesquisas relacionadas à nutrição de feijão, incluindo a adubação fosfatada, são conduzidos em condições de campo. Nessas condições, a resposta das plantas não pode ser atribuída a apenas um nutriente específico, porque a disponibilidade de vários ou até de todos está sendo alterada simultaneamente.

Uma maneira de elevar a produtividade de grãos de feijão, em nível de lavoura comercial, tem sido por meio da adoção de tecnologias como cultivares melhoradas e a realização de adubação e fornecimento dos minerais essenciais para a planta, dentre esses, o fósforo (SOUTO et al., 2009). Contudo, em função da pequena aptidão das rochas fosfadas no mundo, o melhor aproveitamento dessas reservas é fundamental para manter ou, até mesmo, aumentar a produção agrícola (CORDELL et al., 2009).

O baixo suprimento de fósforo no solo ocasiona uma redução na produção de matéria seca da parte aérea em plantas de feijão (FAGERIA; BARBOSA FILHO; STONE, 2004). De outro modo, a produção de matéria seca aumenta com o fornecimento de doses altas de fósforo no solo, em torno de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (OLIVEIRA et al., 2011). A deficiência de fósforo durante o cultivo do feijão em casa-de-vegetação afeta, consideravelmente, o desenvolvimento vegetativo das plantas, diminuindo a área foliar, o número de folhas e a expansão destas, a altura da planta e o diâmetro do caule (LEAL; PRADO, 2008).

Existe uma estreita relação entre o acúmulo de massa seca, decorrente da adubação fosfatada, com a produtividade de grãos de feijão, uma vez que o fósforo influencia todos os componentes da produção (SANTOS, 2008). O fornecimento de fósforo às plantas de feijão, oriundos de adubações via solo ou foliar, proporciona aumento do número de vagens por planta e da massa de grãos, que são os caracteres determinantes para o aumento da produtividade de grãos (RAMOS FILHO, 2006; GONÇALVES, 2014). Sendo assim, sem um adequado suprimento nutricional de fósforo, as plantas não alcançam seu máximo potencial produtivo (MARSCHNER, 2012).

Em razão do feijão fazer parte da alimentação dos brasileiros e exercer grande importância alimentar, o conhecimento da variação na composição química da planta, durante os diferentes estádios de desenvolvimento, constitui característica de grande valor para o esclarecimento dos problemas básicos de nutrição e da adubação na cultura do feijão, além de servir para avaliar a remoção desses nutrientes da área de cultivo, tornando-se um dos componentes necessários para as recomendações econômicas de adubação. Maziero et al. (2016) ao estimarem os parâmetros genéticos para características agrônômicas e nutricionais

em quatro populações de feijão com grãos biofortificados para minerais, detectaram variabilidade genética nas concentrações de fósforo nos grãos das linhagens endogâmicas avaliadas, as quais variaram de 5,3 a 5,7 g Kg<sup>-1</sup> de MS.

No entanto, informações a respeito da nutrição com fósforo, em especial ao acúmulo deste mineral nas diferentes partes da planta de feijão, não somente nos grãos, e em diferentes estádios de desenvolvimento, ainda são escassos na literatura. Ademais, é imprescindível os conhecimentos importantes relacionados ao fornecimento de adubos minerais de forma adequada e equilibrada para o feijão, que poderá contribuir não só para o aumento na produtividade de grãos, mas também para melhorar o valor nutricional do feijão.

A dificuldade da absorção de fósforo pelas plantas de feijão pode ser vencida melhorando a aquisição, translocação e utilização interna pelas plantas. Isto pode ser conseguido por meio da seleção de cultivares com alta eficiência de utilização e/ou absorção de fósforo (CAO et al., 2009). Os critérios de deficiência normalmente dividem-se entre os que enfatizam a produtividade e aqueles que enfatizam o requerimento interno do nutriente na planta, associados a outras características vegetais como morfologia e fisiologia (GOURLEY et al., 1994).

A eficiência nutricional é dependente de dois fatores principais, a eficiência de aquisição e a eficiência de utilização. O primeiro é influenciado por parâmetros cinéticos e morfológicos, enquanto o segundo depende da translocação e de conversão em biomassa (MOURA et al., 2001). Os melhores métodos para avaliar cultivares mais eficientes na absorção e utilização dos nutrientes têm sido aqueles que empregam o crescimento e desenvolvimento das cultivares em condições de baixo nível do nutriente, verificando se a resposta se deve ao mecanismo de absorção e/ou de utilização do nutriente para a produção de matéria seca, ou depende de ambos (WHITEAKER et al., 1976).

A eficiência pode ser definida como a habilidade da planta em produzir certa porcentagem de produção máxima com certa dose do nutriente (FOHSE et al., 1998). Assim, tanto plantas bem nutridas como as deficientes em um nutriente podem apresentar alta taxa de eficiência.

Para a caracterização da eficiência no uso de fósforo, um índice bastante aceito foi proposto por Siddiqi; Glass (1981), pela equação: (matéria seca produzida)<sup>2</sup> (unidade do nutriente absorvido). Deste modo, reúne-se em um mesmo indicador, eficiência de utilização e o crescimento. O uso deste índice para a classificação de linhagens para a eficiência nutricional evita que plantas eficientes, mas de baixa produção de biomassa, sejam selecionadas.

Gabelman et al. (1976) ao realizarem estudos com feijão, cultivados em sistema hidropônico, com soluções nutritivas contendo diferentes concentrações de fósforo ordenaram as cultivares nas seguintes classes: eficientes, moderadamente eficientes e ineficientes no uso de fósforo, com base na massa seca da parte aérea e na proporção da eficiência da utilização de fósforo (PER), definida como miligrama de matéria seca produzida por miligrama de fósforo no tecido. Os critérios ou definições de eficiência são vários e, geralmente, dividem-se entre os que enfatizam a produtividade e aqueles que enfatizam o requerimento interno do nutriente na planta (GOURLEY et al., 1994), dependente das características morfológicas, bioquímicas e fisiológicas dos vegetais. Cada índice se adapta a uma determinada condição de cultivo, seja esta em campo ou em casa-de-vegetação. Contudo, para a cultura do feijão, ainda existem dúvidas em relação a qual índice discrimina melhor as cultivares de feijão eficientes e responsivas no uso de fósforo.

Com o intuito de selecionar linhagens de feijão com alta produção de massa seca e produtividade de grãos, maior concentração de fósforo, além de eficientes e responsivas no uso do nutriente, o presente estudo teve por objetivos: (1) avaliar a produção de massa seca em diferentes estádios fenológicos e os componentes da produtividade de genótipos de feijão, em resposta à disponibilidade de fósforo na solução nutritiva, bem como investigar a associação entre esses caracteres; (2) avaliar a partição do fósforo nos tecidos das plantas de feijão, em diferentes estádios de desenvolvimento, estudar a concentração de ácido fítico nos grãos, em resposta ao fornecimento de fósforo no meio de cultivo, além de analisar a associação entre esses caracteres; (3) analisar a variabilidade genética de linhagens de feijão quanto ao acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais e produtividade, identificar linhagens eficientes no uso de fósforo e responsivas à aplicação do fósforo na solução nutritiva.

A tese está dividida em três artigos científicos. O primeiro, intitulado “Produção de massa seca e componentes da produtividade de cultivares de feijão em resposta a nutrição com fósforo”. O segundo, “Partição de fósforo, concentração de ácido fítico e produtividade de grãos em cultivares de feijão como resposta a nutrição fosfatada” e o terceiro, “Seleção de linhagens de feijão quanto ao uso e resposta ao fósforo disponibilizado em solução nutritiva”, ambos formatados nas normas da MDT 2015.

## 2 ARTIGO 1

### **Produção de massa seca e componentes da produtividade de genótipos de feijão em resposta a nutrição com fósforo**

#### **Resumo**

Existe uma relação direta entre o fósforo absorvido pelas plantas de feijão com o crescimento destas e sua produtividade de grãos. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a produção de massa seca em diferentes estádios fenológicos e os componentes da produtividade de genótipos de feijão, em resposta à disponibilidade de fósforo na solução nutritiva, bem como investigar a associação entre esses caracteres. O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, usando o delineamento inteiramente casualizado com parcelas sub-sub-divididas. As parcelas principais constituíram-se de cinco concentrações de fósforo (0,5; 0,9; 1,3; 1,9 e 2,3 mmol L<sup>-1</sup>) fornecidas às plantas por meio de solução nutritiva. As sub-parcelas foram compostas por dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú) e as sub-sub-parcelas por duas épocas de cultivo (outono- inverno e primavera-verão). Foi observada interação tripla significativa (C x G x E) para os caracteres de massa seca das folhas em terceira folha trifoliada e em floração, do caule no enchimento das vagens, dos grãos na maturação e para a produtividade de grãos. Ambas as cultivares apresentaram respostas quadráticas para os caracteres de massa seca das vagens no enchimento de vagens, dos grãos na maturação, número de grãos na maturação e produtividade de grãos. Os coeficientes de correlação de Pearson variaram de -0,35 a 0,99. Nos estádios iniciais de desenvolvimento, e floração, a maior produção de massa seca ocorre nas folhas das plantas de feijão. À medida que a planta avança em seu desenvolvimento, passa a produzir mais massa seca nas vagens durante o estágio de enchimento e, posteriormente, nos grãos, no estágio de maturação. Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,33 e 1,84 mmol L<sup>-1</sup> proporcionam maior massa seca das vagens no enchimento das vagens, dos grãos na maturação, número de grãos e produtividade de grãos, para os genótipos Pérola e IPR88 Uirapurú, nos cultivo de outono- inverno e primavera-verão. Os caracteres de massa seca das folhas, caule e vagens no enchimento de vagens, massa seca dos grãos na maturação, número de grãos e número de vagens são promissores por permitir seleção indireta.

**Palavras-chave:** *Phaseolus vulgaris* L.; solução nutritiva; crescimento; correlação de Pearson.

#### **Abstract**

There is a direct relationship between phosphorus absorbed for the growth and grain yield of common bean plants. The aims of this study were to evaluate the dry matter production at different growth stages and the grain yield components of the common bean genotypes in response to phosphorus availability in nutrient solution, and study the association between these characters. The experiment was carried out in a greenhouse, using a completely randomized design in sub-sub-divided plots. The main plots consisted of five phosphorus concentration (0.5; 0.9; 1.3; 1.9 e 2.3 mmol L<sup>-1</sup>) supplied at plants by medium nutrient solution. The sub-plots were composed of two common bean genotypes (Pérola and IPR88 Uirapurú) and the sub-sub-plots by two growing seasons (fall-winter and spring-summer). In the initial stages, at the first trifoliolate leaf and flowering stages, the highest dry mass

production occurred in leaves of common bean plants. As the advances at development stages, passed the produce more mass dry pods during the pod filling stage, and later in grains, at maturation stage. Phosphorus concentrations in the nutrient solution between 1.33 e 1.84 mmol L<sup>-1</sup> provided larger mass of beans in pod filling, grains in maturation, number of grains and grain yield, for the genotypes Pérola and IPR88 Uirapurú. Characters mass dry of the leaves, stems and pods in pod filling, mass dry grains at maturity, number grains and number pods they are promising for allowing indirect selection.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris* L.; nutrient solution; growth; Pearson correlation.

## Introdução

O Brasil é o país com maior dependência de matéria-prima para a produção de fertilizantes, sobretudo de fósforo, com volume de 1.4 milhões de toneladas importadas, o que corresponde a 75% das necessidades da agricultura (Lana, 2015). Isto porque são usadas altas doses de fertilizantes fosfatados, em decorrência da acidez do solo, aliada a baixa disponibilidade e mobilidade do elemento.

As reservas de fósforo são finitas e serão suficientes por mais 40 a 100 anos, segundo as projeções de Cordell, Drangert, White (2009). Portanto, o melhor aproveitamento destas reservas naturais é fundamental para manter ou, até mesmo, aumentar a produção agrícola. Além disso, em solos ácidos, parte do fósforo disponível pode ser fixado, formando compostos de ferro e de alumínio, e podem ocorrer reações de precipitação e/ou adsorção de fósforo, deixando-o indisponível às plantas (TURUKO; MOHAMMED, 2014).

No cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), o fator que mais limita a produtividade de grãos em solos brasileiros é o baixo teor de fósforo disponível para a absorção das plantas (ZUCARELI et al., 2011). Quantidades insuficientes deste elemento limitam a nutrição da cultura e ocasionam redução na produtividade (HERNANDEZ; DOMINGUES, 2012).

As doses de fósforo utilizadas para a implantação de uma lavoura de feijão dependem do teor do mineral livre no solo, da cultivar utilizada e da expectativa de produtividade de grãos. Porém, normalmente, utilizam-se doses muito superiores a real necessidade da cultura. Segundo Silveira; Moreira (1990) é estimado que apenas 5 a 25% do fósforo solúvel adicionado ao solo, por meio de adubação, sejam aproveitados pelas plantas de feijão, ou seja, de 75 a 95% do fósforo são fixados pelo solo.

O feijão é considerado uma planta altamente exigente em nutrientes (CTSBF, 2012). Há uma relação direta entre o fósforo absorvido pelas plantas de feijão com o crescimento e a produtividade de grãos. As limitações na disponibilidade do elemento no início do ciclo

vegetativo da cultura resultam em restrições no desenvolvimento das quais a planta não se recupera posteriormente. Isto ocorre porque o fósforo é essencial para o metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). As plantas de feijão adubadas com fósforo de forma adequada e equilibrada são mais resistentes às adversidades ambientais após a semeadura e apresentam condições de produzir maior quantidade de sementes, aliada à melhor qualidade fisiológica destas (ZUCARELI et al., 2011).

Para a realização de estudos de nutrição mineral de plantas, o solo constitui-se em um meio bastante complexo e interativo, dificultando as análises dos efeitos de um dado nutriente. Zucareli et al. (2011) ao estudarem a produtividade e a qualidade de sementes de feijão carioca sobre a influência de fósforo na adubação de solo, verificaram grande divergência de resultados, ao comparar a estudos similares, desenvolvidos por outros pesquisadores. Além disto, os autores constataram que a resposta à adubação no campo depende de vários fatores, destacando-se a disponibilidade de fósforo no solo, a disponibilidade de outros nutrientes, a cultivar avaliada e as condições climáticas.

Por esta razão, pesquisas realizadas em condições controladas, com uso de solução nutritiva, são de extrema importância, por não ocorrer o efeito tóxico dos nutrientes ou a interferência de outros elementos encontrados no solo. Nesta situação, o uso de soluções nutritivas permite um melhor controle das proporções dos diversos nutrientes, pois possibilita que as plantas sejam cultivadas com alto grau de controle dos fatores, tais como a absorção de nutrientes, a absorção de água, o pH e a salinidade e permite isolar o efeito de variações de outros nutrientes no crescimento das plantas e na produtividade de grãos (SNAPP; LYNCH; 1995).

A maioria das pesquisas conduzidas em ambiente controlado, utilizando o cultivo de plantas de feijão em solução nutritiva, foram desenvolvidas para a caracterização dos genótipos quanto à eficiência nutricional de fósforo (HERNANDEZ et al., 2007; ARAÚJO; PLASSARD; DREVON, 2008). Alguns autores como Araújo et al. (2013) estudaram o efeito do fósforo na produção de massa seca de plantas de feijão, ao avaliar o efeito da interação entre fosfito e fosfato como fonte do nutriente em solução nutritiva. Contudo ainda são escassos, para a cultura, estudos atuais e específicos em condições controladas utilizando-se solução nutritiva, que permitam mensurar a correta influência da disponibilidade de fósforo sobre o crescimento das plantas e a produtividade de grãos. A análise de crescimento pode ser utilizada para conhecer a adaptação ecológica das plantas a novos ambientes, a competição

interespecífica, aos efeitos de sistemas de manejo e à capacidade de interações com o ambiente (ZUCARELI et al., 2010).

Além do que, grande parte destas pesquisas foram feitas em plantas com até 30 dias de desenvolvimento (SNAPP; LYNCH, 1995; ARAÚJO; PLASSARD; DREVON, 2008; TAWARAYA et al., 2014). Para a nutrição adequada das plantas é preciso conhecer a relação entre os nutrientes e a real resposta da cultura em razão do fósforo que lhe é disponível ao longo do tempo de cultivo. A viabilidade de estudos como este se dá com uso de solução nutritiva e, é preciso que a cultura complete seu ciclo e que os estudos e análises sejam realizados durante os diferentes estádios de desenvolvimento.

Assim, foram objetivos deste trabalho avaliar a produção de massa seca em diferentes estádios fenológicos e os componentes da produtividade de cultivares de feijão em resposta à disponibilidade de fósforo na solução nutritiva, bem como investigar a associação entre esses caracteres.

## **Material e métodos**

Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (latitude 29°42'S, longitude 53°49'W e 95 m de altitude). O cultivo foi realizado em cinco dispositivos fechados de cultivo fora do solo, os quais foram construídos e descritos por Domingues et al. (2014). Em cada dispositivo foram distribuídos uniformemente 48 vasos de polipropileno com capacidade para 4 L, de cor preta e perfurados na parte inferior. Os vasos foram preenchidos com uma camada de brita (5 cm) e com areia média (granulometria entre 1,2 a 2,4 mm), previamente lavada com solução de hipoclorito de sódio a 1%. O espaçamento entre os vasos foi de 5 cm na fileira e de 10 cm entre as fileiras. Em cada vaso foram semeadas quatro sementes e no estágio de folhas primárias abertas (V2) foi realizado o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso.

Para as análises estatísticas foi considerado o delineamento inteiramente casualizado com parcelas sub-sub-divididas em faixas, com três repetições (APÊNDICE A). As parcelas principais constituíram-se de cinco concentrações de fósforo fornecidas às plantas por meio de fertirrigação (0,5; 0,9; 1,3; 1,9 e 2,3 mmol L<sup>-1</sup>). As sub-parcelas foram compostas por dois genótipos de feijão, Pérola e IPR88 Uirapurú, sendo estas escolhidas por fazerem parte de grupos distintos e, ambas serem bastante cultivadas na região. A cultivar Pérola é do tipo



carioca, apresenta crescimento bastante vigoroso, adaptação a diversos sistemas de produção e ciclo de maturação médio de 86 dias (CTSBF, 2012). Já, a cultivar IPR Uirapurú pertence ao grupo preto, possui alto potencial de produtividade de grãos, porte ereto, apresenta tolerância ao déficit hídrico e a alta temperatura durante a fase reprodutiva e comporta-se como relativamente eficiente no uso de fósforo em condições de baixa disponibilidade do elemento (CTSBF, 2012). As sub-sub parcelas consistiram de duas épocas de cultivo, outono-inverno (semeadura em 28 de março de 2013) e primavera-verão (semeadura em 02 de setembro de 2013).

Em cada dispositivo foi realizada a fertirrigação das plantas de feijão com uma solução nutritiva que continha as mesmas quantidades de nutrientes essenciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas: potássio ( $\text{KNO}_3$ ;  $404,40 \text{ mg L}^{-1}$ ), cálcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;  $318,74 \text{ mg L}^{-1}$ ), magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ;  $197,12 \text{ mg L}^{-1}$ ), e micronutrientes: molibdênio ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ;  $0,03 \text{ mg L}^{-1}$ ), boro ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ;  $0,26 \text{ mg L}^{-1}$ ), cobre ( $\text{CuSO}_4$ ;  $0,06 \text{ mg L}^{-1}$ ), manganês ( $\text{MnSO}_4$ ;  $0,50 \text{ mg L}^{-1}$ ), zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ;  $0,22 \text{ mg L}^{-1}$ ) e ferro ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ;  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ ). A concentração de fósforo fornecida foi variável em cada dispositivo de cultivo, quais sejam  $0,5$ ;  $0,9$ ;  $1,3$ ;  $1,9$ ;  $2,3 \text{ mmol L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ . Sendo estas adaptadas com valores abaixo e acima do ideal para a cultura, o que equivale, respectivamente, a  $10,31 \text{ Kg ha}^{-1}$ ,  $18,54 \text{ Kg ha}^{-1}$ ,  $26,78 \text{ Kg ha}^{-1}$ ,  $39,14 \text{ Kg ha}^{-1}$  e  $44,38 \text{ Kg ha}^{-1}$ . Em função da fonte de fósforo também possuir em sua composição química nitrogênio, a medida que se aumentou a concentração da fonte de fósforo, reduziu-se a quantidade de nitrogênio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) fornecido, sendo esses:  $80 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $64 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $48,4 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $24 \text{ mg L}^{-1}$  e  $8 \text{ mg L}^{-1}$ .

Para a fertirrigação foram utilizadas mangueiras de gotejamento em um circuito fechado. O excedente da solução nutritiva escoava pelos canais das telhas do dispositivo, que foram preenchidos com uma camada de brita basáltica média, e retornava ao reservatório de fibra de vidro com capacidade para 245 L, instalado na parte mais baixa das bancadas, na área externa da casa-de-vegetação (APÊNDICE B). Cada reservatório de solução foi conectado a uma motobomba controlada por um programador de horário (timer). Desta forma, as soluções foram fornecidas individualmente, para cada dispositivo, em três turnos diários de fertirrigação durante o outono-inverno e, com cinco turnos na primavera-verão, cada um com duração de 15 minutos.

O pH da solução nutritiva foi mantido na faixa de 5,5 a 6,5, mediante a adição de NaOH ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  na concentração de 1N, sempre que necessário. Quando a condutividade elétrica (CE) apresentou um desvio superior a 10%, em relação ao seu valor inicial (variando de 1,0 a 1,5 mS), foi realizada a sua correção com adição de água ou de alíquotas de nova

solução nutritiva. A quantificação do pH e da condutividade elétrica das soluções contidas nos reservatórios foi realizada três vezes por semana. As soluções nutritivas foram completamente renovadas nos reservatórios a cada 15 dias.

Três plantas de cada cultivar foram colhidas nos estádios de desenvolvimento de terceira folha trifoliada (V4), floração (R6) e enchimento das vagens (R8), caracterizados de acordo com a escala fenológica descrita em Fernandez et al. (1982) (APÊNDICE C), para a determinação da massa seca. Após as coletas, cada planta foi fracionada em folhas e caules, e no estádio R8, também, em vagens. Os tecidos vegetais foram acondicionados individualmente em sacos de papel e levados à estufa de secagem, com circulação forçada de ar (65 a 70°C) (marca SPLabor, modelo SP-102/630, São Carlos, SP, Brasil) até massa constante, quando se determinou a massa seca das folhas, caules e vagens (gramas/planta). No estádio de maturação (R9) foram quantificados o número de vagens por planta, o número de grãos por planta e a produtividade de grãos em gramas por planta, a 13% de umidade. Ainda, no estádio R9 foi mensurada a massa seca dos grãos (gramas/planta). Para tanto, os grãos foram levados para a estufa de secagem até a obtenção de massa constante.

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância, considerando todos os efeitos como fixos, com exceção do erro, o qual considerou-se aleatório. Sendo o efeito da interação tripla significativa, realizou-se o desdobramento desta em três interações duplas. Para tanto, utilizou-se o teste de análise complementar do fator que está na parcela principal (concentração de fósforo na solução nutritiva), dentro de cada nível do fator que está na sub-parcela (genótipos) e na sub-sub-parcela (épocas). Sendo significativas as interações foi realizada a análise de regressão para as concentrações de fósforo, ajustando-se a equação de maior grau significativo, e o teste F, a 5% de probabilidade para a comparação das médias entre genótipos ou épocas de cultivo.

As associações entre os caracteres foram obtidas a partir da estimativa da matriz fenotípica com os coeficientes de correlação linear de Pearson entre os onze caracteres avaliados (massa seca e caracteres produtivos), sendo verificada a significância dos coeficientes por meio do teste *t* de Student a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram efetuadas com uso do Microsoft® Office Excel e dos softwares Sisvar (FERREIRA, 2011), Genes (CRUZ, 2013) e Sigma Plot (SIGMAPLOT, 2008).

## Resultados e Discussão

Na análise de variância foi observada interação tripla significativa (concentração de fósforo x genótipo x época de cultivo: C x G x E) para os caracteres massa seca: das folhas em V4, das folhas em R6, do caule em R8 e dos grãos em R9; e para a produtividade de grãos (APÊNDICE C). Isso indica que, para esses caracteres, nas diferentes concentrações de fósforo fornecidas por fertirrigação, a resposta dos genótipos foi variável em função das épocas de cultivo. Até o momento, nas pesquisas desenvolvidas com fósforo em feijão e utilizando solução nutritiva, não foram encontrados trabalhos de avaliação de diferentes genótipos em épocas de cultivo. Já, Kikuti et al. (2007), ao estudarem o efeito da adubação fosfatada e nitrogenada no solo sobre a produtividade de grãos de duas cultivares de feijão, obtidas em épocas de cultivo distintas, também constataram significância da interação tripla C x G x E para a produtividade de grãos.

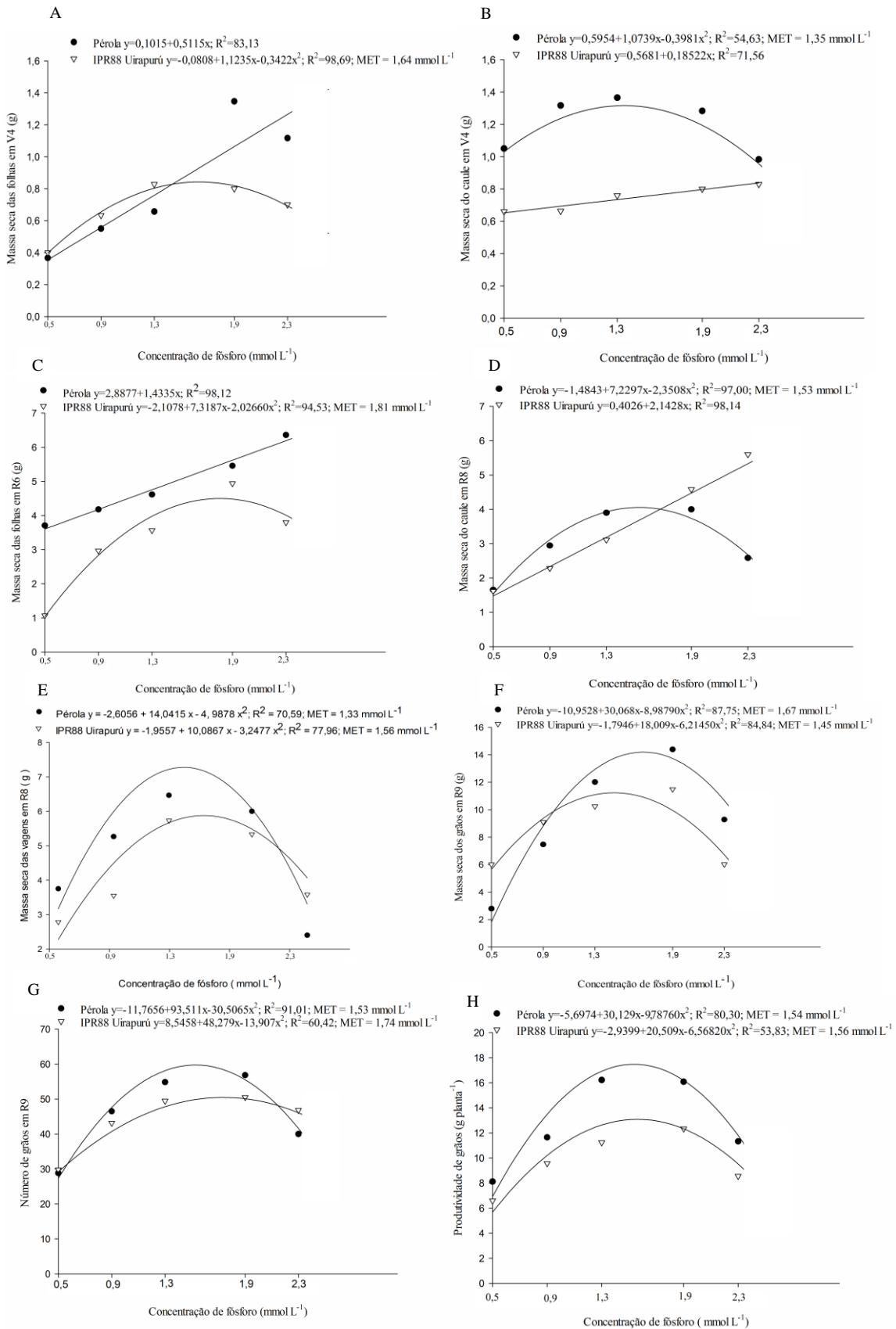
Para os caracteres, massa seca do caule em V4, das vagens em R8 e número de grãos em R9 constatou-se a significância da interação dupla concentração de fósforo x genótipo (C x G) (APÊNDICE C). Esta interação representa o fato da alteração da concentração de fósforo no meio de cultivo modificar as respostas dos genótipos de feijão e, assim, expressar a variabilidade genética. Hernandez et al. (2014), ao avaliarem a eficiência de uso de fósforo em genótipos de feijão cultivados em solução nutritiva, também, constataram interação C x G significativa para a massa seca do caule. Assim como, Lana et al. (2006), ao avaliarem oito genótipos de feijão quanto à eficiência na absorção e utilização de fósforo, ao serem cultivados em duas concentrações de fósforo na solução nutritiva, constataram significância para interação C x G para a produção de massa seca da parte aérea.

No que se refere à significância da interação concentração de fósforo x época de cultivo (C x E), esta foi observada para os caracteres massa seca: das folhas em V4, R6 e R8; do caule em R6 e R8; das vagens em R8 e dos grãos em R9 (APÊNDICE C). Além do número de vagens e grãos em R9 e produtividade de grãos. Assim, evidenciou-se que as condições ambientais nas épocas de cultivo, especialmente a temperatura, exerceram influência sobre o modo como as plantas de feijão absorveram o fósforo na solução e assim, repercutiram sobre o crescimento e a produção destas. Como o principal mecanismo de transporte do fósforo no solo é a difusão, sendo essa influenciada pela interação fósforo-colóide, pelo teor do elemento e a temperatura do ar (COSTA et al., 2006), entende-se que as condições durante o período produtivo atuaram indiretamente sobre o acúmulo de massa seca e a produtividade das plantas de feijão. Isto é justificado pelo fato de que as baixas

temperaturas podem influenciar a planta na obtenção de fósforo, principalmente nos estádios iniciais de crescimento, devido à difusão ser mais lenta nestas condições, e haver menor solubilidade do fósforo no solo (GRANT et al., 2001).

Para os caracteres massa seca das folhas e de vagens em R8 e número de grãos em R9, não houve interação tripla C x G x E, contudo, constatou-se interação genótipo x época de cultivo (G x E) significativa, caracterizando efeito diferenciado dos genótipos de feijão em função da variação das épocas de cultivo. A avaliação desta interação é importante no melhoramento de plantas, em virtude da possibilidade de uma linhagem se desenvolver bem em um dado ambiente, e em outro não apresentar caracteres favoráveis, tornando possível a indicação de linhagens para épocas de cultivo específicas (FARIA et al., 2009).

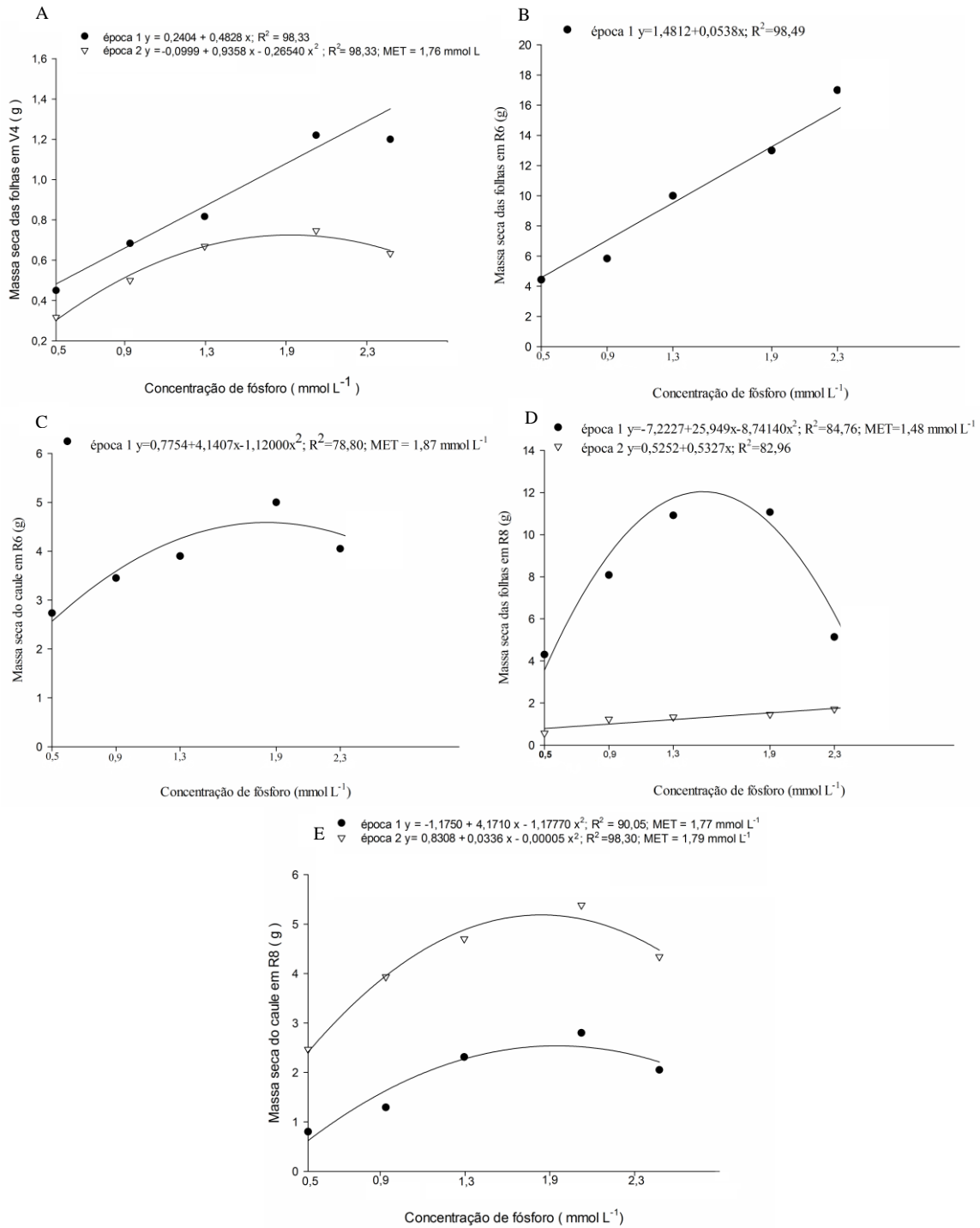
Resposta linear em função da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação foi obtida para a cultivar Pérola nos caracteres massa seca das folhas em V4 (FIGURA 1A) e em R6 (FIGURA 1C), e para a cultivar IPR88 Uirapurú nos caracteres massa seca do caule em V4 (FIGURA 1B) e em R8 (FIGURA 1D). Desta forma, a concentração de fósforo de 2,3 mmol L<sup>-1</sup> proporciona o maior crescimento das folhas e do caule de plantas de feijão nestes estádios fenológicos. Este resultado corrobora com os encontrados por Leal; Prado (2008), em pesquisas com solução nutritiva para avaliar as desordens nutricionais no feijão por deficiência de fósforo, os quais constataram que o suprimento de fósforo proporcionou maior crescimento vegetativo nas plantas, ocasionando aumento linear na produção de matéria seca de folhas e de caule. No entanto, para a cultivar IPR88 Uirapurú nos caracteres massa seca das folhas em V4 (FIGURA 1A) e em R6 (FIGURA 1C), e para a cultivar Pérola para os caracteres massa seca do caule em V4 (FIGURA 1B) e em R8 (FIGURA 1D) houve resposta quadrática, com pontos de máxima eficiência técnica estimados nas concentrações de fósforo de 1,6; 1,8; 1,3 e 1,5 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 1** - Massa seca: das folhas e caule em terceira folha trifoliada – V4 (A) e (B); folhas em floração – R6 (C); caule e vagens no enchimento das vagens – R8 (D) e (E); dos grãos na maturação – R9 (F); número de grãos na maturação (G) e produtividade de grãos (H), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva para o cultivo de dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú). Santa Maria – RS, UFSM.

Ambas as cultivares de feijão apresentaram respostas quadráticas para os caracteres de massa seca das vagens em R8 (FIGURA 1E), dos grãos em R9 (FIGURA 1F), número de grãos em R9 (FIGURA 1G) e produtividade de grãos (FIGURA 1H). Sendo que o ponto de máxima eficiência técnica para estes caracteres, respectivamente, ocorreram nas seguintes concentrações de fósforo: 1,33 mmol L<sup>-1</sup>-Pérola e 1,56 mmol L<sup>-1</sup>-IPR88 Uirapurú (FIGURA 1E), 1,67 mmol L<sup>-1</sup>-Pérola e 1,45 mmol L<sup>-1</sup>- IPR88 Uirapurú (FIGURA 1F), 1,53 mmol L<sup>-1</sup>-Pérola e 1,74 mmol L<sup>-1</sup>- IPR88 Uirapurú (FIGURA 1G), 1,54 mmol L<sup>-1</sup>-Pérola e 1,56 mmol L<sup>-1</sup>- IPR88 Uirapurú (FIGURA 1H), evidenciando variabilidade genética entre as cultivares estudadas. Portanto, concentrações de fósforo inferiores e/ou superiores a estes valores, não garantiram suprimento adequado do nutriente para o crescimento das plantas de feijão. Segundo Fageria (2003), a influência do fósforo na cultura do feijão reside no aumento da produção de massa seca de vagens e de grãos, além do número de vagens, que são os principais determinantes da produtividade de grãos. Isto porque o fósforo é o constituinte energético das plantas, e desta forma, favorece os processos de biossíntese (FONTES, 2016).

No cultivo de outono-inverno (época 1) para os caracteres massa seca das folhas em V4, R6 e R8 (FIGURA 2A, 2B e 2D) e do caule em R6 e R8 (FIGURA 2C e 2E), os genótipos de feijão apresentaram resposta quadrática em função da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação. Para os caracteres massa seca das folhas em R6 e do caule em R6, na época de cultivo 2 (FIGURA 2B e 2C), não se obteve resposta linear, quadrática ou cúbica, por isso, não foram apresentados os valores obtidos.

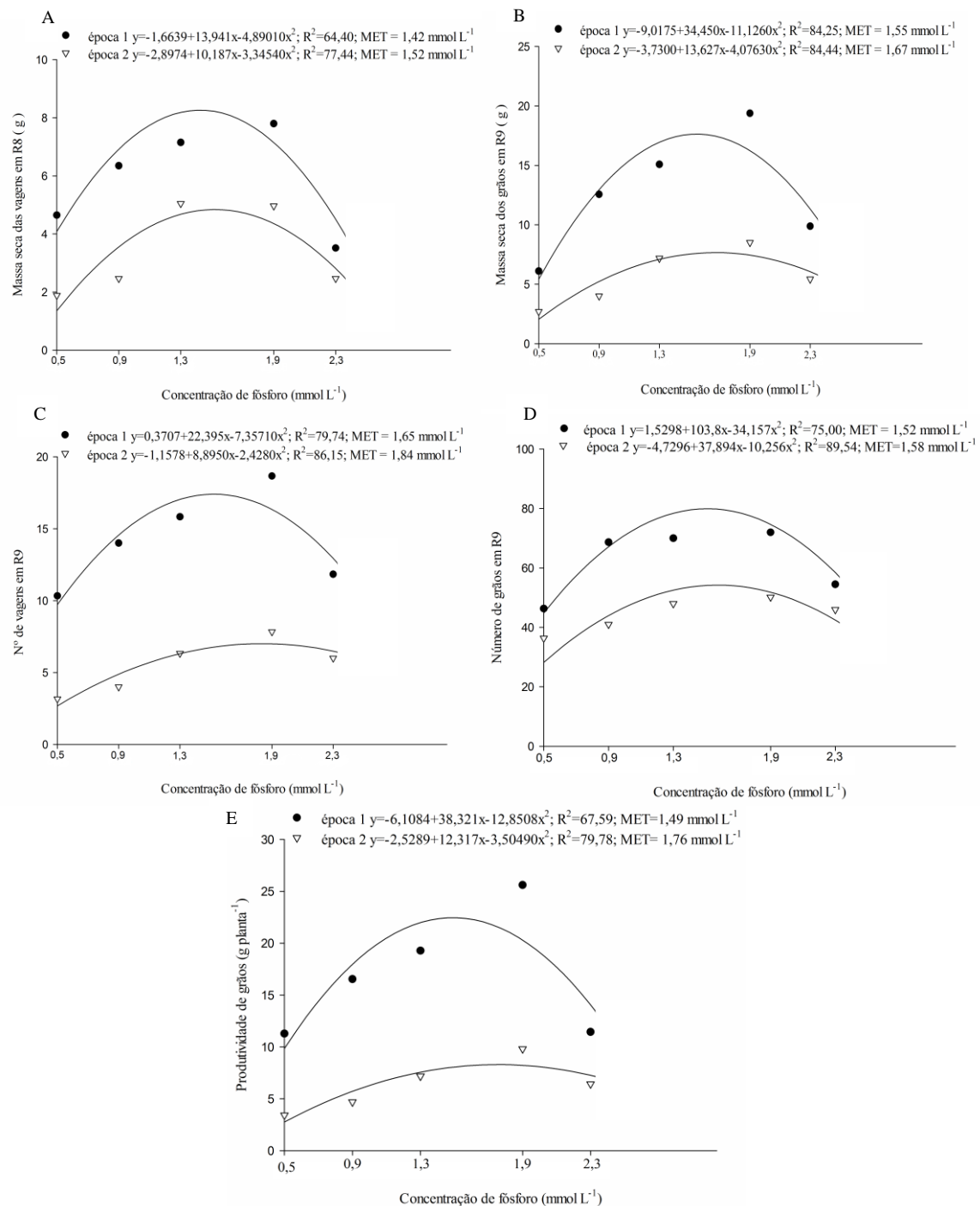


**Figura 2** - Massa seca: das folhas no estágio de desenvolvimento de terceira folha trifoliada – V4 (A), das folhas e caule na floração – R6 (B) e (C), e folhas e caule no enchimento das vagens – R8 (D) e (E), de genótipos de feijão cultivados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono- inverno (época 1) e de primavera- verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.

Nos estádios fenológicos de enchimento de vagens e de maturação, para os caracteres de massa seca das vagens em R8 (FIGURA 3A) e dos grãos em R9 (FIGURA 3B), número de vagens em R9 (FIGURA 3C), número de grãos em R9 (FIGURA 3D) e produtividade de grãos (FIGURA 3E), o comportamento das cultivares de feijão pode ser expresso por uma equação de segundo grau, em ambas as épocas de cultivo (época 1 e época 2). Além disto, para estes caracteres, o ponto de máxima eficiência técnica deu-se nas seguintes concentrações de fósforo: 1,42 mmol L<sup>-1</sup>-época 1 e 1,52 mmol L<sup>-1</sup>-época 2 (FIGURA 3A), 1,55 mmol L<sup>-1</sup>-época 1 e 1,67 mmol L<sup>-1</sup>-época 2 (FIGURA 3B), 1,52 mmol L<sup>-1</sup>-época1 e 1,84 mmol L<sup>-1</sup>-época 2 (FIGURA 3C), 1,52 mmol L<sup>-1</sup>-época1 e 1,58 mmol L<sup>-1</sup>-época 2 (FIGURA 3D) e 1,49 mmol L<sup>-1</sup>-época 1 e 1,76 mmol L<sup>-1</sup>-época 2 (FIGURA 3E). Este comportamento pode ser justificado em razão do fósforo ter sido aplicado de modo localizado, por meio da fertirrigação. Assim, o nutriente encontrou-se a disposição do sistema radicular das plantas de feijão, mesmo estando em menores quantidades, contribuindo para o aumento da produção massa seca da parte aérea, vagens e grãos.

Na literatura ainda há poucas pesquisas a cerca do tema influência da concentração de fósforo, disponibilizado na solução nutritiva, sobre a produção de massa seca e os componentes da produtividade de grãos em plantas de feijão. Todavia, em condições de campo, Fernandes et al. (2013), ao analisarem a produtividade de feijão caupi, em função da adubação fosfatada no solo, assim como neste estudo, evidenciaram resposta quadrática para a massa seca das vagens e a massa seca dos grãos. Da mesma forma que Silva; Vahl (2002), em pesquisa sobre diferentes doses de fósforo no solo, obtiveram resposta quadrática para a produtividade de grãos, considerando as cultivares BR FEPAGRO 44 e Guapo Brilhante.





**Figura 3** - Massa seca das vagens no estágio de desenvolvimento de enchimento de vagens – R8 (A) e dos grãos na maturação – R9 (B), número de vagens por planta na maturação – R9 (C), número de grãos por planta na maturação – R9 (D) e produtividade de grãos (E), obtidas em cultivo com cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono- inverno (época 1) e de primavera- verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.

O cultivo de outono-inverno (época 1) favoreceu o crescimento e a produção da cultivar Pérola, a qual diferiu da cultivar IPR88 Uirapurú para todos os caracteres avaliados,

formando o grupo com as maiores médias (Tabela 1). Já, no cultivo de primavera-verão (época 2), a cultivar IPR 88 Uirapurú constituiu o grupo com as maiores médias para os caracteres de massa seca das folhas em V4, R6 e R8 e, número de grãos em R9, diferindo da cultivar Pérola. Essa divergência de comportamento de resultados, em relação ao acúmulo de massa seca nas folhas, confirma os relatos de Souza; Lobato (2006), os quais afirmaram que a resposta à adubação fosfatada em plantas de feijão depende de vários fatores, destacando-se as condições abióticas como temperatura do ar e radiação solar.

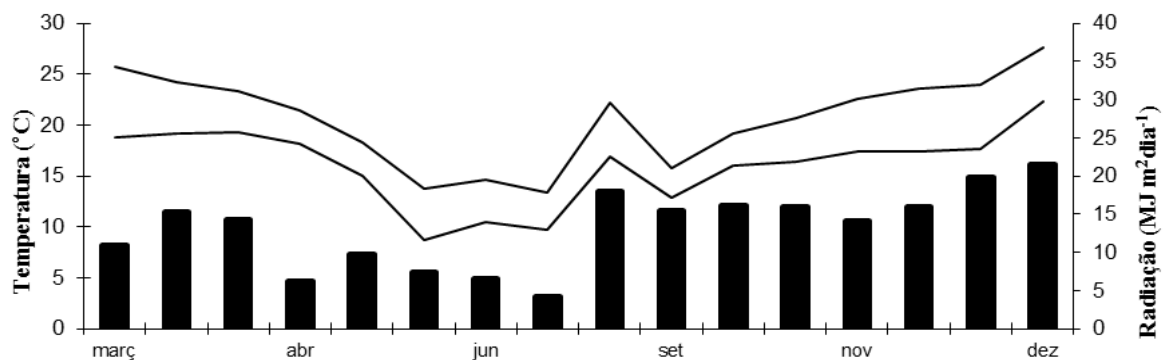
**Tabela 1** - Valores médios obtidos para os caracteres de massa seca: das folhas na terceira folha trifoliada – V4 (MSFolha V4, g), das folhas na floração – R6 (MSFolha R6, g), do caule na floração – R6 (MSCaule R6, g), das folhas no enchimento das vagens – R8 (MSFolha R8, g), do caule no enchimento das vagens – R8 (MSCaule R8, g), das vagens no enchimento das vagens – R8 (MSV R8, g), dos grãos na maturação – R9 (MSG R9, g); número de grãos na maturação – R9 (N°GR9) e produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>), obtidos para dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú), cultivados sob diferentes concentrações de fósforo na solução nutritiva, no período de outono- inverno (época 1) e primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.

Genótipo	MSFolha V4		MSFolha R6		MSCaule R6		MSFolha R8		MSCaule R8	
	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2
Pérola	1,13 a	0,48 b	9,09 a	0,64 b	3,61 a	4,38 a	9,56 a	1,05 b	2,14 a	4,47 a
IPR88 Uirapurú	0,68 b	0,67 a	5,39 b	1,51 a	4,15 a	2,77 b	6,88 b	1,47 a	1,56 b	4,58 a
Média	0,91	0,57	7,24	1,08	3,88	3,57	8,22	1,26	1,85	4,52
Genótipo	MSVagem R8		MSGrão R9		N°GR9		Prod			
	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2
Pérola	6,77 a	3,53 a	13,94 a	5,24 a	71,87 a	20,53 b	19,89 a	6,27 a		
IPR88 Uirapurú	5,59 b	3,21 a	11,26 b	5,89 a	58,73 b	26,8 a	13,78 b	6,34 a		
Média	6,18	3,37	12,60	5,57	65,30	23,67	16,83	6,30		

\* Médias seguidas pela mesma letra na vertical constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste F (valor de  $p \leq 0,05$ ).

Além disso, quando se considera mais de um ambiente, além do efeito genético e ambiental, detecta-se, também, efeito causado pela interação genótipo x ambiente (CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Tal interação é influenciada por diferentes fatores, entre os quais se destacam o nível tecnológico, a variação entre anos, locais e épocas de semeadura. Em experimento de competição de cultivares de feijão, conduzidos em Goiás por Pereira et al. (2010), foi constatado que as interações genótipo x época de cultivo e genótipo x ano (G x A) foram mais expressivas. Por isso, cabe ao melhorista avaliar a magnitude e a significância da interação G x A por meio de avaliações de linhagens em diversos ambientes, permitindo, assim, a sua indicação para ambientes específicos e/ou gerais.

É perceptível uma inversão no comportamento dos genótipos, com a mudança na época de cultivo, o que pode ser explicada pelas diferenças de temperatura média do ar e de radiação solar, que foram registradas nas duas épocas (FIGURA 4). No cultivo de outono-inverno as temperaturas médias, nos meses de maio e junho, foram abaixo do ideal para o desenvolvimento da cultura, a qual deve variar de 17,5 a 24°C (VALDERRAMA et al., 2009). Este fato pode ter beneficiado o crescimento e a produção das plantas da cultivar Pérola. Isto porque o acúmulo de matéria seca e o conteúdo de carboidratos nas diversas partes da planta de feijão é influenciado pelo hábito de crescimento (KIKUTI et al., 2007). Como a cultivar Pérola é uma planta do tipo III, com hábito indeterminado, prostrado ou semiprostrado, com ramificação bem desenvolvida e aberta, ela caracteriza-se por continuar emitindo folhas e ramos vegetativos após o início da floração (DOURADO NETO et al., 2009). Com isso, em condições de adversidades, apresentam vantagens por continuarem crescendo, mesmo em baixos níveis de recurso no ambiente (RADOSEVICH, 2007), podendo este ser indicativo da cultivar se mais adaptada. A estimativa da estabilidade e adaptabilidade de genótipos de feijão, propicia maior segurança na indicação. A identificação de cultivares, com maior estabilidade fenotípica, tem sido uma alternativa muito utilizada para atenuar os efeitos da interação genótipos com ambientes e tornar o processo de indicação de cultivares mais seguro (MELO et al., 2007).



**Figura 4** - Valores quinzenais de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C) e radiação (Rad., MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) nos períodos de cultivo de outono-inverno de 2013 (época 1) e de primavera-verão de 2013 (época 2). Dados meteorológicos coletados no 8º Distrito de Meteorologia, na Estação Meteorológica Convencional de Santa Maria. Santa Maria - RS, UFSM.

Já no cultivo de primavera-verão (época 2) a cultivar IPR88 Uirapurú destacou-se em virtude da radiação solar ter ficado mais próximas a ideal para o desenvolvimento e a produção das plantas de feijão do que na época 1, estando entre 15 a 22 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (PAULA

JÚNIOR et al., 2004). Por se tratar de uma planta com hábito de crescimento determinado, arbustivo, com porte mais ereto e caule pouco ramificado, que normalmente floresce e amadurece em período menor, sendo mais precoces, o que faz com que estas fiquem menos expostas às condições de adversidades ambientais. No cultivo de outono-inverno, nos meses de maio e junho, ocorreram incidência de radiação inferior ao necessário às plantas de feijão. A interceptação de radiação solar pelas plantas e a utilização dessa energia para a produção de biomassa representam o processo fundamental que governa o crescimento das plantas e a produtividade de grãos.

Os coeficientes de correlação de Pearson variaram de  $-0,35$  (massa seca do caule em V4 e massa seca do caule em R6) a  $0,99$  (massa seca dos grãos em R9 e o número de vagens em R9) (Tabela 2). A produtividade de grãos apresentou estimativas de correlação de alta magnitude com os caracteres massa seca das folhas ( $r= 0,96$ ), do caule ( $r= 0,96$ ) e das vagens ( $r= 0,90$ ) no estágio de desenvolvimento R8 e massa seca dos grãos ( $r= 0,95$ ), número de grãos ( $r= 0,97$ ) e número de vagens em R9 ( $r= 0,98$ ).

**Tabela 2** - Estimativas de correlação de Pearson entre os caracteres de massa seca em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento: folhas em terceira folha trifoliada – V4 (MSFolha V4), caule em terceira folha trifoliada – V4 (MSCaule V4), folhas na floração – R6 (MSFolha R6), caule na floração – R6 (MSCaule R6), folhas no enchimento das vagens – R8 (MSFolha R8), caule no enchimento das vagens – R8 (MSCaule R8), vagens no enchimento das vagens – R8 (MSV R8), grãos na maturação – R9 (MSG R9); número de vagens na maturação – R9 (N°V R9), número de grãos na maturação – R9 (N°G R9) e produtividade de grãos (Prod), avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, para dois genótipos de feijão cultivados em duas épocas de semeadura. Santa Maria - RS, UFSM.

	MSCV4	MSFR6	MSCR6	MSFR8	MSCR8	MSVR8	MSGR9	N°GR9	N°VR9	PROD
MSFV4	0,23 <sup>ns</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	0,61 <sup>ns</sup>
MSCV4		-0,24 <sup>ns</sup>	-0,35 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	0,65 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	0,63 <sup>ns</sup>
MSFR6			0,36 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>
MSCR6				0,33 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>
MSFR8					0,97 <sup>*</sup>	0,94 <sup>*</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>*</sup>	0,92 <sup>*</sup>	0,96 <sup>*</sup>
MSCR8						0,82 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>*</sup>	0,98 <sup>*</sup>	0,95 <sup>*</sup>	0,96 <sup>*</sup>
MSVR8							0,72 <sup>ns</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	0,90 <sup>*</sup>
MSGR9								0,94 <sup>*</sup>	0,99 <sup>*</sup>	0,95 <sup>*</sup>
N°GR9									0,97 <sup>*</sup>	0,97 <sup>*</sup>
N°VR9										0,98 <sup>*</sup>

\* Significativo pelo teste *t* em nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> = não significativo.

Observou-se, ainda, que os coeficientes para esses pares de caracteres apresentaram associação linear positiva, indicando que, para haver um aumento na produtividade de grãos, deve-se maximizar as variáveis que interferem na fotossíntese. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2013), ao investigarem as relações genotípicas entre a

produtividade de grãos em feijão com os componentes da produtividade de grãos e características agronômicas. Os autores constataram a relação genética de alto efeito direto e positivo da massa seca da parte aérea e o número de vagens por planta com a produtividade. Assim como Coutinho et al. (2014), ao estudarem o crescimento e a produtividade de feijão-caupi em resposta a doses de fósforo em Latossolo Amarelo, observaram correlação positiva entre a produtividade de grãos e o número de grãos e de vagens por planta.

Contudo, divergindo dos resultados encontrados neste estudo, Borges et al. (2012), em uma pesquisa sobre a correlação entre a massa seca e a produção de grãos em plantas de feijão, constataram correlação significativa e positiva entre a produtividade de grãos e a massa seca das folhas e caule aos 35 dias após a emergência das plântulas, período que corresponde ao estágio de floração (R6). No entanto, aos 65 dias após a emergência, quando se dá o início de formação de vagens (R8), não obtiveram correlação significativa para estes caracteres.

Na presente pesquisa, a significância das estimativas de correlação foi observada a partir do estágio de desenvolvimento R8, indicando que a produção de massa seca em plantas jovens, nos estádios fenológicos iniciais, não se correlacionaram com a produtividade de grãos. Desta forma, aponta-se que a maior massa nos estádios V4 e R6 não irá repercutir na maior produtividade de grãos. No entanto, a avaliação dos caracteres de produção de massa seca e componentes da produtividade, a partir do estágio R8, podem ser promissores por permitir a seleção indireta, com o intuito de obter ganhos genéticos sobre a produtividade de grãos.

## **Conclusões**

Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,33 e 1,84 mmol L<sup>-1</sup> proporcionam maior produção de massa seca das vagens, dos grãos número de grãos e produtividade de grãos. Para estes caracteres, o comportamento dos genótipos varia em função da época de cultivo e da concentração de fósforo na solução nutritiva.

Os caracteres de massa seca das folhas, caule e vagens no enchimento das vagens, massa seca dos grãos na maturação, número de grãos e número de vagens na maturação são promissores para a seleção indireta, com o intuito de obter ganhos genéticos sobre a produtividade de grãos.

Houve inversão no comportamento dos genótipos, com a mudança na época de cultivo, sendo que, a cultivar Pérola mostrou-se mais adaptada, obtendo maior crescimento e produção na época de cultivo não preferencial, de outono-inverno.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelas bolsas concedidas.

## Referências bibliográficas

ANDRADE, C. A. B. et al., Produtividade, crescimento e partição de matéria seca em duas cultivares de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 3, n. 1, p. 683 - 688, 2009.

ARAÚJO, A. P.; PLASSARD, C.; DREVON, J. J. Phosphatase and phytase activities in nodules of common bean genotypes at different levels of phosphorus supply. **Plant and Soil**, Crawley, v. 3, n. 1, p 129 - 138, 2008.

ARAÚJO, J. L.; FAQUIN, V.; ÁVILA, F. W., PEDROSO T.Q. Interação fosfito e fosfato no crescimento e na nutrição fosfatada do feijoeiro em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, n. 2, p. 482 - 490, 2013.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP. 42 p., 2006.

BORGES, P. R. S. et al. Distribuição de massa seca e rendimento de feijão-caupi inoculadas com rizóbio em Gurupi, TO. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 2, n. 5, p. 37 - 44, 2012.

COMISSÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE FEIJÃO. **Informações técnicas para o cultivo de feijão na Região Sul brasileira**. 157 p., 2012.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Ontário, v. 1, n. 9, p. 292 - 305, 2009.

COSTA, J. P. V. et al. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 828 - 835, 2006.

CRUZ, C. D. Genes - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 3, n. 5, p. 271 - 276, 2013.

COUTINHO, P. W. R. et al. Doses de fósforo na cultura do feijão-caupi na região nordeste do Estado do Pará. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n.1, p. 66 - 73, 2014.

CRUZ C. D.; CARNEIRO P. C. S.; REGAZZI A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento de plantas**. 3 Ed, 585 p., 2014.

- CRUZ, C. D. Genes - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 3, n. 5, p. 271 - 276, 2013.
- DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Produção de feijão**, 3 Ed, 385p., 2009.
- FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v, 2, n. 1, p. 6 - 16, 2003.
- FARIA, A. P. et al. Interação genótipo x ambiente na produtividade de grãos de cultivares de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 3, n. 1, p. 579 - 585, 2009.
- FERNANDES, A. R.; FONSECA, M. R.; BRAZ, A. M. S. Produtividade de feijão caupi em função da calagem e fósforo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 2, n. 6, p. 54 - 62, 2013.
- FERNANDEZ, F.; GEPTS, P.; LOPES, M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum. **Cali: Centro Nacional de Agricultura Tropical**. 26 p., 1982.
- FERREIRA D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agroecologia**, Lavras, v. 3, n. 5, p. 1039 - 1042, 2011.
- GRANT, C. A. et al. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, v. 9, n. 5, p. 1 - 16, 2001.
- HERNANDEZ, G. et al. Phosphorus stress in common bean: Root transcript and metabolic responses. **Plant Physiology**, Washington, v, 14, n. 4, p. 752 - 767, 2007.
- HERNÁNDEZ-DOMÍGUEZ, E. E.; VALENCIA-TURCOTTE, L. G.; RODRÍGUEZ-SOTRES, R. Changes in expression of soluble inorganic pyrophosphatases of *Phaseolus vulgaris* under phosphate starvation. **Plant Science**, Whashington, v. 1, n. 1, p. 39 - 48, 2014.
- KIKUTI, H.; ANDRADE, M. J. B.; CARVALHO, J. G.; MORAIS, A. R. Nitrogênio e fósforo em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade cultivada BRS MG Talismã. **Acta Scientiarum Agronomica**, Maringa, v. 2, n. 7, p. 415 - 422, 2007.
- LANA, R. M. Q. et al. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso do fósforo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 3, n. 6, p. 1 - 7, 2006.
- LANA, R. P. **Respostas de animais e plantas aos nutrientes**. Viçosa, 171 p., 2015.
- LEAL, R. M.; PRADO, R. M. Desordens nutricionais no feijoeiro por deficiência de macronutrientes, boro e zinco. **Revista de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 3, n. 1, p. 301 - 306, 2008.
- MELO, L. C. Interação com ambientes e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum na Região Centro-Sul do Brasil, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 715 - 723, 2007.
- OLIVEIRA, A. P. et al. Rendimento de feijão-caupi cultivado com esterco bovino e adubo mineral. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 1, n. 9, p. 81 - 84, 2011.

PAULA JÚNIOR, T. J. **Informe Agropecuário**, 25 Ed, p. 223 - 230, 2004.

PEREIRA, H. S. Estratificação ambiental na avaliação de genótipos de feijoeiro comum tipo Carioca em Goiás e no Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 4, n. 5, p. 554 - 562, 2010.

RADOSEVICH, A. C. Ecology of weeds and invasive plantas: Relationship to agriculture and natural resource management. **Hoboken: John Wiley Sons**, Washington, v. 1, n. 3, p.130 - 147, 2007.

RIBEIRO, N. D. et al. Selection of common bean lines with high agronomic performance and high calcium and iron concentrations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 4, n. 8, p. 1368 - 1375, 2013.

SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. Resposta do feijoeiro a doses de fósforo e lâminas de água de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 63 - 67, 1990.

SNAPP, S.; KOIDE, R.; LYNCH, J. Exploitation of localized phosphorus-patches by common bean roots. **Plant and Soil**, Crawley, v. 1, n. 1, p. 211 - 218, 1995.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, L. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. **Informações Agronômicas: Potafós**, v. 10, n. 2, p. 1 - 16, 2006.

TAWARAYA, K. et al. Metabolite Profiling of Root Exudates of Common Bean under Phosphorus Deficiency. **Metabolites**, Philadelphia, v. 4, n. 1, p. 599 - 611, 2014.

TURUKO M.; MOHAMMED A. Effect of different phosphorus fertilizer rates on growth, dry matter yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Agricultural Research**, Bloemfontein, v. 2, n. 1, p. 88 - 92, 2014.

VALDERRAMA, M. et al. Fontes e doses de nitrogênio e fósforo em feijoeiro no sistema plantio direto, **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 9, n. 1, p. 191 - 196, 2009.

ZUCARELI, C. et al. (2010) Índices biométricos e fisiológicos em feijoeiro sob diferentes doses de adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 3, n. 1, p. 1313 - 1324, 2010.

ZUCARELI, C. et al. Fósforo na produtividade e qualidade de sementes de feijão Carioca Precoce cultivado no período das águas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 4, n. 2, p. 32 - 38, 2011.

ZUCARELI, C. et al. Crescimento do feijoeiro cv. IAC Carioca Tybatã em função da adubação fosfatada. **Revista de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 1, n. 1, p. 44 - 58, 2012.



### 3 ARTIGO 2

#### Partição de fósforo, concentração de ácido fítico e produtividade de grãos de cultivares de feijão como resposta a nutrição fosfatada

##### Resumo

O feijão faz parte da dieta dos brasileiros e, por isso, o conhecimento da variação da composição química da planta, constitui característica de grande valor. Os objetivos deste estudo foram avaliar a partição do fósforo nos tecidos das plantas de feijão, em diferentes estádios de desenvolvimento, a concentração de ácido fítico nos grãos e a produtividade, em resposta ao fornecimento de fósforo no meio de cultivo, além de analisar a associação entre esses caracteres. Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação, usando o delineamento inteiramente casualizado com parcelas sub-sub-divididas em faixas. As parcelas principais constituíram-se de cinco concentrações de fósforo (0,5; 0,9; 1,3; 1,9 e 2,3 mmol L<sup>-1</sup>) fornecidas às plantas por meio de solução nutritiva. As sub-parcelas foram compostas por dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú) e as sub-sub-parcelas por duas épocas de cultivo (outono-inverno e primavera-verão). Interação concentração de fósforo x genótipo x época de cultivo significativa foi constatada para a concentração de fósforo: nas folhas e no caule na floração – R6, nas folhas durante o enchimento de vagens – R8 e nos grãos na maturação – R9; e para a produtividade de grãos. Respostas quadráticas em função da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação foram obtidas em ambas as cultivares, para os caracteres concentração de fósforo: nas folhas e no caule em terceira folha trifoliada, no caule em floração, nas folhas no enchimento das vagens e, nos grãos na maturação; produtividade de grãos e ácido fítico nos grãos. A produtividade de grãos apresentou estimativas de correlação de alta magnitude com os caracteres: concentração de fósforo nas folhas em R8 ( $r= 0,93$ ), nas vagens em R8 ( $r= 0,97$ ) e concentração de fósforo nos grãos em R9 ( $r= 0,94$ ). O valor nutricional das folhas em plantas no estágio inicial de desenvolvimento, para fósforo, se equivale ao dos grãos. Para os genótipos Pérola e IPR88 Uirapurú, os maiores valores de fósforo nos tecidos da planta, de produtividade de grãos e de ácido fítico ocorrem nas concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,57 e 2,30 mmol L<sup>-1</sup>. Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,37 e 2,29 mmol L<sup>-1</sup> acarretam maior concentração de fósforo: nas folhas em terceira folha trifoliada, no caule em floração, nas folhas, caule e vagens em enchimento de vagens e nos grãos na maturação; produtividade de grãos e concentração de ácido fítico dos grãos, nos cultivos de outono-inverno e primavera-verão. A avaliação da concentração de fósforo nos tecidos vegetais no estágio enchimento de vagens é promissora e permite seleção indireta para a produtividade de grãos.

**Palavras-chave:** *Phaseolus vulgaris* L.; estádios de desenvolvimento; concentração de fósforo; análise de correlação.

##### Abstract

The bean is part of the Brazilian diet and that is why, knowledge variation chemical composition of the plant, is characteristic of great value. The aims of this study were evaluate the phosphorus partition in the bean plant, at different stages of development, to study the phytic acid concentration in grains, in response to supply phosphorus in the culture medium,

and to analyze the association between these characters. The experiment was carried out in a greenhouse, using a completely randomized design in sub-sub-divided plots. The main plots consisted of five phosphorus concentration (0.5; 0.9; 1.3; 1.9 e 2.3 mmol L<sup>-1</sup>) supplied at plants by medium nutrient solution. The sub-plots were composed of two common bean genotypes (Pérola and IPR88 Uirapurú) and the sub-sub-plots by two growing seasons (fall-winter and spring-summer). A significant phosphorus concentration x genotype x growing season interaction was observed for phosphorus concentration in the leaves and stems in flowering, leaves during in pod filling, grains in maturation and grain yield. Response quadratic according of phosphorus concentration provided in fertigation they were obtained in both cultivars, for the characters phosphorus concentration in the leaves and stem at the first trifoliolate leaf, stem in flowering, leaves in pod filling, grains in maturation, grain yield and phytic acid. Grain productivity showed high magnitude correlation estimates with the following characteristics: phosphorus concentration in the leaves at R8 ( $r = 0.93$ ), pods at R8 ( $r = 0.97$ ) and phosphorus concentration in the grains at R9 ( $r = 0.94$ ). The nutritional value of the leaves in young plants, for phosphorus, is equivalent to the grains. For genotypes Pérola and IPR88 Uirapurú, higher phosphorus value in tissues, of the grain yield and phytic acid occur at concentration in the nutrient solution between 1.57 e 2.3 mmol L<sup>-1</sup>. Phosphorus concentrations in the nutrient solution between 1.37 e 2.29 mmol L<sup>-1</sup> constitute major phosphorus concentration in leaves at the first trifoliolate leaf; stem in flowering; leaves, stem and pods in pod filling; grains in maturation; grain yield and phytic acid, in growing seasons (fall-winter and spring-summer). The evaluation of the phosphorus concentration in plant tissues from the pod filling stage is promising and allowing indirect selection with grain yield.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris* L.; growth stages; phosphorus concentration; correlation analysis.

## Introdução

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) está inserido na dieta diária de grande parte dos brasileiros, sendo uma das principais fontes proteicas, além de contribuir substancialmente para uma adequada ingestão de minerais, tais como ferro, cálcio, zinco e fósforo (HEFNI et al., 2010). O fósforo (P) é um elemento necessário para o equilíbrio da saúde humana, sendo sua deficiência capaz de acarretar problemas graves, como a ocorrência de defeitos do tubo neural em bebês, diferentes formas de demência e problemas cardiovasculares em adultos, além de anormalidade neuromuscular esquelética e hematológica (KHANAL et al., 2013).

Indivíduos saudáveis comumente possuem uma oferta exógena de fósforo acima das quantidades diárias de ingestão recomendadas, devido à ampla disposição desse mineral nos alimentos (OLIVEIRA, 2007). Portanto, são raras as situações de carência de tal mineral decorrente da ingestão alimentar. Contudo, pessoas idosas, ou aquelas que fazem restrição alimentar, ou ainda, têm alguma condição impedindo a absorção ou aumentando a excreção de nutrientes, não é incomum ocorrer deficiência de fósforo (KHANAL et al., 2013). No alcoolismo crônico, a diminuição da ingestão alimentar e da absorção de nutrientes, assim

como o aumento da excreção urinária de fósforo, são fatores que contribuem para a deficiência desse mineral (OLIVEIRA, 2007).

No entanto, o aumento da concentração de fósforo na planta e/ou nos grãos de feijão deve estar associado à alta produtividade, uma vez que, esta é uma das características mais importantes e um dos objetivos dos programas de melhoramento, em razão de muitas vezes a cultura apresentar reduzida produção. O crescimento das plantas, a produtividade de grãos e o estado nutricional do feijão são afetados por diversos fatores, destacando-se entre estes, as adubações fosfatadas realizadas no sistema de cultivo (PEREIRA et al., 2011). A quantidade de fósforo no tecido vegetal reflete o seu estado nutricional e este, por sua vez, é influenciado pelos fatores genéticos e ambientais (SILVA, 2006). Como a concentração dos minerais e a produtividade de grãos variam de acordo com a cultivar utilizada e as condições em que esta é produzida, as exigências pelos diferentes minerais também será variável.

Sabe-se que, a ingestão de uma porção de 86 g de feijão cozido contém 120 mg de fósforo, sendo esta a quantidade capaz de suprir as necessidades diárias de uma pessoa adulta, a qual varia de 0,8 a 1,2 g (MONTEIRO; VANNUCCHI, 2010). Isto porque, apesar de haver variabilidade genética entre as cultivares, o feijão apresenta alta concentração de fósforo em seus grãos, variando de 4,50 a 7,20 g Kg<sup>-1</sup> de matéria seca (MS) (MESQUITA et al., 2007).

Plantas de feijão absorvem fósforo até completar seu ciclo de cultivo, sendo que o acúmulo máximo do nutriente ocorre na parte aérea da planta, na fase de maturação fisiológica dos grãos (VIEIRA et al., 2009). O fósforo concentra-se principalmente nos grãos, o que ocorre segundo Stauffer; Sulewski (2004), porque esse mineral está ligado aos processos metabólicos da planta e por ser móvel nesta, fica concentrado nas áreas mais ativas de crescimento. Pegoraro et al. (2014) ao avaliarem o crescimento por meio da produção de biomassa e absorção de nutrientes nos componentes da produtividade e parte aérea de plantas de feijão, concluíram que, até os 30 dias após a emergência, as folhas foram responsáveis pelo acúmulo relativo de, aproximadamente 80% do fósforo absorvido. No entanto, a partir do início dos estádios reprodutivos a proporção de nutrientes nas folhas começa decrescer até o momento de maturação fisiológica, onde os grãos são os responsáveis pelo maior acúmulo do macronutriente.

O fósforo nos grãos de feijão está ligado aos compostos orgânicos de reserva como os fitatos, os quais estão envolvidos na regulação da síntese de amido, durante o enchimento dos grãos (COELHO et al., 2002). Os fitatos são sais derivados do ácido fítico, sendo a principal forma de fósforo nos grãos de cereais e leguminosas, representando, aproximadamente, 70% do conteúdo de fosfato (FANTINI et al., 2008). Sua presença pode diminuir o aproveitamento

digestivo de nutrientes como cálcio, zinco, fósforo, ferro e cobre, devido a habilidade de formar quelatos com íons divalentes, formando complexos solúveis resistentes à ação do trato intestinal (BENEVIDES et al., 2011). Contudo, recentemente tem sido demonstrado que os fitatos também apresentam efeitos benéficos, podendo atuar como anti-oxidante e anti-carcinogênico (DELFINO et al., 2010).

A biodisponibilidade do fósforo nos grãos de feijão pode variar de acordo com os chamados fatores antinutricionais, como os fitatos (BARRUETO-GONZALEZ, 2008). A indisponibilidade do elemento ocorre em razão da ausência da enzima fitase no trato digestivo, fazendo com que o fitato não seja quebrado e, com isso, o fósforo não é liberado e absorvido pelo organismo humano (BRINCH-PEDERSON et al., 2007). Os fitatos podem atingir concentrações de até 2% da massa total das sementes de feijão (ISRAEL et al., 2006). Contudo, estes valores podem variar de acordo com os genótipos, além de ser afetado pelas condições ambientais, e a quantidade de fósforo disponível para a absorção da planta (ARIZA-NIETO, 2007).

O conhecimento da variação na composição química da planta de feijão, durante os diferentes estádios de desenvolvimento, constitui característica de grande valor para o esclarecimento dos problemas básicos de nutrição humana, de adubação, além de servir para explorar a maior produtividade por meio do melhoramento genético da cultura. Para o feijão, não foram encontrados na literatura estudos que avaliaram a nutrição com fósforo, em diferentes épocas de cultivo, considerando à distribuição desse mineral nos tecidos, bem como, a concentração de ácido fítico nos grãos, com o intuito de compreender o real valor biológico.

Diante disso, os objetivos deste trabalho foram avaliar a partição do fósforo nos tecidos, em diferentes estádios de desenvolvimento, a concentração de ácido fítico nos grãos e a produtividade de plantas de feijão, em resposta ao fornecimento de fósforo no meio de cultivo, além de analisar a associação entre esses caracteres.

## **Material e Métodos**

Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação não climatizada do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (latitude 29°42'S, longitude 53°49'W e 95 m de altitude). O delineamento usado foi o inteiramente casualizado com parcelas sub-sub-

divididas em faixas, utilizando três repetições. As parcelas principais constituíram-se de cinco concentrações de fósforo fornecidas às plantas por meio de fertirrigação (0,5; 0,9; 1,3; 1,9; e 2,3 mmol L<sup>-1</sup>). As sub-parcelas foram compostas por duas cultivares de feijão, Pérola e IPR88 Uirapurú. As sub-sub-parcelas consistiram de duas épocas de cultivo, outono-inverno (semeadura em 28 de março de 2013) e primavera-verão (semeadura em 02 de setembro de 2013).

Cinco dispositivos fechados de cultivo fora do solo foram utilizados, os quais foram construídos e descritos por Domingues et al. (2014). Em cada dispositivo distribuiu-se uniformemente 48 vasos de polipropileno com capacidade para 4 L, preenchidos com uma camada de brita (5 cm) e com areia média (granulometria entre 1,2 a 2,4 mm), previamente lavada com solução de hipoclorito de sódio a 1%. Por vaso semearam-se quatro sementes e, no estágio de folhas primárias abertas (V2) foi realizado o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso.

As plantas foram fertirrigadas com solução nutritiva, sendo que a concentração de fósforo fornecida variou de um dispositivo para o outro, assim sendo: 57,51; 103,52; 149,54; 218,55; 264,57 mg L<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, equivalente a 0,5; 0,9; 1,3; 1,9 e 2,3 mmol L<sup>-1</sup> de fósforo, respectivamente. Para manter o equilíbrio iônico, houve também a mudança da concentração de nitrogênio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), as quais foram, 80 mg L<sup>-1</sup>, 64 mg L<sup>-1</sup>, 48, 4 mg L<sup>-1</sup>, 24 mg L<sup>-1</sup> e 8 mg L<sup>-1</sup>. Os demais macronutrientes (KNO<sub>3</sub> - 404,40 mg L<sup>-1</sup>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - 318,74 mg L<sup>-1</sup>, MgSO<sub>4</sub> - 197,12 mg L<sup>-1</sup>) e micronutrientes (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> - 0,03 mg L<sup>-1</sup>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> - 0,26 mg L<sup>-1</sup>, CuSO<sub>4</sub> - 0,06 mg L<sup>-1</sup>, MnSO<sub>4</sub> - 0,50 mg L<sup>-1</sup>, ZnSO<sub>4</sub> - 0,22 mg L<sup>-1</sup> e quelato de ferro - 1,0 mg L<sup>-1</sup>), possuíam quantidades equivalentes nos diferentes dispositivos.

As soluções foram fornecidas individualmente, em três turnos diários de fertirrigação no cultivo de outono-inverno e, cinco turnos no cultivo de primavera-verão, com duração de 15 minutos cada. O pH das soluções foi mantido na faixa de 5,5 a 6,5, sendo acrescidos NaOH ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na concentração de 1N. A condutividade elétrica (CE) foi preservada na faixa de 1,0 a 1,5 mS, pela adição de água ou de alíquotas de nova solução nutritiva, quando apresentou um desvio superior a 10% em relação ao seu valor inicial.

Para a determinação da concentração de fósforo nos tecidos vegetais, nos estádios de desenvolvimento de terceira folha trifoliada (V4), floração (R6) e de enchimento das vagens (R8), caracterizados de acordo com a escala fenológica descrita em Fernandez et al. (1982), foram colhidas três plantas de cada cultivar, em cada bancada. Estas foram fracionadas em folhas, caule e vagens, acondicionadas separadamente em sacos de papel, e secas em estufa de circulação forçada de ar (60 a 70°C), até a obtenção de massa constante. As demais plantas

foram conduzidas até a maturação (R9), quando se determinou a concentração de fósforo nos grãos.

As amostras de folhas e de caule nos estádios V4, R6 e R8, de vagens em R8 e de grãos em R9 foram moídas com auxílio de um micromoinho analítico de faca (Q298A21; Quimis, São Paulo, Brasil), até a obtenção de uma farinha com partículas de aproximadamente 1 mm. Alíquotas de 0,5 g da farinha obtida foram reservadas, as quais foram digeridas em 5 ml de solução ácida composta por ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) (Ultrapuro, Proquímios, Rio de Janeiro, Brasil) e ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>) (Ultrapuro, Vetec Química Fina, Rio de Janeiro, Brasil), na proporção volumétrica de 3:1, de acordo com o método descrito por Souza et al. (2012). A concentração de fósforo, expressa em g kg<sup>-1</sup> de matéria seca de amostra, foi determinada por leitura em espectrofotômetro de emissão óptica (AA-7000; Shimadzu, São Paulo, Brasil), com comprimento de onda de 660 nm.

Das amostras de farinha dos grãos de feijão em R9, também, se quantificou a concentração de ácido fítico, em duas repetições. Para isto, a metodologia descrita por Latta; Skin (1980) foi seguida e adotou-se a solução de fitato de sódio como padrão.

A extração inicial do ácido fítico foi realizada em alíquotas de 2,0 g de farinha de grãos de feijão, sendo adicionados 40 ml de HCl 2,4% (0,65 N). Após 1 hora e 30 minutos em agitação rápida no banho-maria (500/D; Servylab, Rio Grande do Sul, Brasil) e 10 minutos em centrífuga (MTDIIIPlus; Logen Scientific, Lagos, Nigéria) a 3500 rpm, fez-se a filtração do sobrenadante. Este foi transferido para uma coluna de vidro, previamente preparada com lã de vidro e 0,5 g de resina "bio-rad", a qual foi ativada com a adição de 15 ml de água deionizada, 15 ml da solução NaCl 0,1 M e 15 ml da solução NaCl 0,7 M. Após a passagem deste último na coluna, o mesmo foi coletado para proceder a determinação do fitato. Neste eluato foi acrescentado 1 ml do reagente de cor de Wade (0,03% FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O e 0,3% ácido sulfosalicílico em H<sub>2</sub>O deionizada) e, após decorridos 15 minutos, foi realizada a leitura do ácido fítico (mg Kg<sup>-1</sup> de matéria seca - MS) em espectrofotômetro UV/visível, na faixa de 500 nm (SP-220; Biospectro, São Paulo, Brasil).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, considerando todos os efeitos como fixos, com exceção do erro, o qual considerou-se como aleatório. Sendo o efeito da interação tripla concentração de fósforo x genótipo x época de cultivo (C x G x E) significativa, realizou-se o desdobramento desta em três interações duplas com o uso de variância complexa. Quando ocorreu a significância da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação, foi realizada a análise de regressão, ajustando-se a equação de maior grau

significativo. Nos casos em que houve significância de genótipo ou de época de cultivo, foi usado o teste F, a 5% de probabilidade para a comparação das médias.

A análise de correlação de Pearson foi estimada por meio da matriz fenotípica entre os dez caracteres avaliados. A significância dos coeficientes foi avaliada pelo teste  $t$  (valor de  $p \leq 0,05$ ). As estatísticas foram efetuadas com uso do Microsoft® Office Excel e dos softwares Sisvar (FERREIRA, 2011), Genes (CRUZ, 2013) e Sigma Plot (SIGMAPLOT, 2008).

## **Resultados e discussão**

De acordo com a análise de variância foi possível evidenciar interação concentração de fósforo x genótipo x época de cultivo (C x G x E) significativa para a concentração de fósforo nas folhas e no caule em R6, nas folhas em R8 e nos grãos em R9 (APÊNDICE D). Com isto, deduz-se que os efeitos simples de um único fator isolado, não foram os mesmos em todos os níveis dos demais fatores. Até o momento, nas pesquisas desenvolvidas com feijão, utilizando diferentes concentrações de fósforo na solução nutritiva, não foram encontrados trabalhos semelhantes a este, que estudem o efeito da interação tripla. Contudo, para a cultura da soja, De Paula (2011), observou interação tripla concentração de fósforo x genótipo x época de cultivo significativa para concentração de ácido fítico nos grãos, divergindo do resultado encontrado no presente estudo.

Para os caracteres em que a interação tripla (C x G x E) não foi significativa - concentração de fósforo nas folhas em V4 e no caule em R8 e concentração de ácido fítico nos grãos foi observado significância da interação dupla concentração de fósforo x genótipo (APÊNDICE D). Essa interação representa o fato da alteração da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação modificar as respostas dos genótipos de feijão no acúmulo de fósforo e de fitatos nas plantas e nos grãos de feijão. Cunha; Teixeira (2011), de maneira similar, ao estudarem o efeito da adubação fosfatada em cultivares de feijão concluíram que a concentração de fósforo nas folhas foi influenciada pela interação doses de fósforo x cultivares. Assim como, Coelho et al. (2002), em pesquisa com solução nutritiva para comparar onze genótipos de feijão quanto a concentração de fósforo nos grãos e de ácido fítico, evidenciaram interação concentração de fósforo x genótipo significativa para o ácido fítico.

Considerando a concentração de fósforo nas folhas em V4, no caule em R8 e nas vagens em R8 e a concentração de ácido fítico nos grãos, houve significância da interação

concentração de fósforo x época de cultivo (C x E) (APÊNDICE D). Assim, constatou-se que as condições ambientais durante o cultivo das plantas de feijão exerceram influência sobre o acúmulo de fósforo e de ácido fítico nos tecidos vegetais. Entretanto, em experimentos com feijão conduzidos para avaliar o efeito do fósforo e sua partição nos tecidos vegetais, normalmente, foram conduzidos em condições de campo e/ou, em apenas um ano de cultivo (PETRILI, 2007; DE PAULA, 2011; CUNHA, 2014), dificultando a comparação com os resultados obtidos no presente estudo.

Semelhante ao exposto anteriormente, não ocorreu interação tripla significativa, porém a interação genótipo x época de cultivo (G x E) foi significativa para a concentração de fósforo nas folhas em V4, no caule em V4 e em R8, nas vagens em R8 e para a concentração de ácido fítico nos grãos (APÊNDICE D). Isto representou a expressão da variabilidade genética em decorrência das variações ambientais que ocorreram nas diferentes épocas de cultivo (STORCK, 2006).

Os valores de coeficiente de variação (CV) oscilaram entre 4,3% (concentração de ácido fítico nos grãos) a 14,7% (concentração de fósforo em R8) (APÊNDICE D). Pereira et al. (2011), em pesquisa realizada com 34 genótipos de feijão pertencentes ao germoplasma da Universidade de Santa Catarina, obtiveram valores de CV inferiores a 10% para a concentração de fósforo e de ácido fítico nos grãos em experimentos com solução nutritiva.

Ao observar as médias gerais apresentadas no Apêndice D, para a concentração de fósforo nos tecidos das plantas, percebe-se que nos estádios iniciais de desenvolvimento ocorre maior acúmulo do nutriente nas folhas, quando comparados com o acúmulo no caule (estádios V4 e R6 de desenvolvimento). À medida que avança os ciclos de desenvolvimento da planta, o fósforo segue se concentrando nas folhas (estádio R8), porém em menor quantidade e, posteriormente, nos grãos (estádio R9). Isto ocorre porque, em feijão, as concentrações de fósforo nas folhas e no caule diminuem com a maturidade da planta, uma vez que, a concentração é alta nos pecíolos e caule no início do crescimento e depois diminui gradualmente até o fim do ciclo (HANWAY; WEBW, 1971).

Desta forma, os valores de concentração de fósforo observados em folhas de feijão em estádios iniciais são muito próximos aos encontrados nos grãos. Portanto, o uso de folhas jovens de feijão como fonte de fósforo na alimentação humana precisa ser melhor avaliado. O consumo de folhas verdes de feijão é comum em alguns países da África (LAMB et al., 1985), isto em razão de conhecimentos prévios a cerca de sua alta concentração de proteínas, ferro e fibras, superando os valores encontrados nos grãos (FONSECA et al., 2002). Contudo, ainda



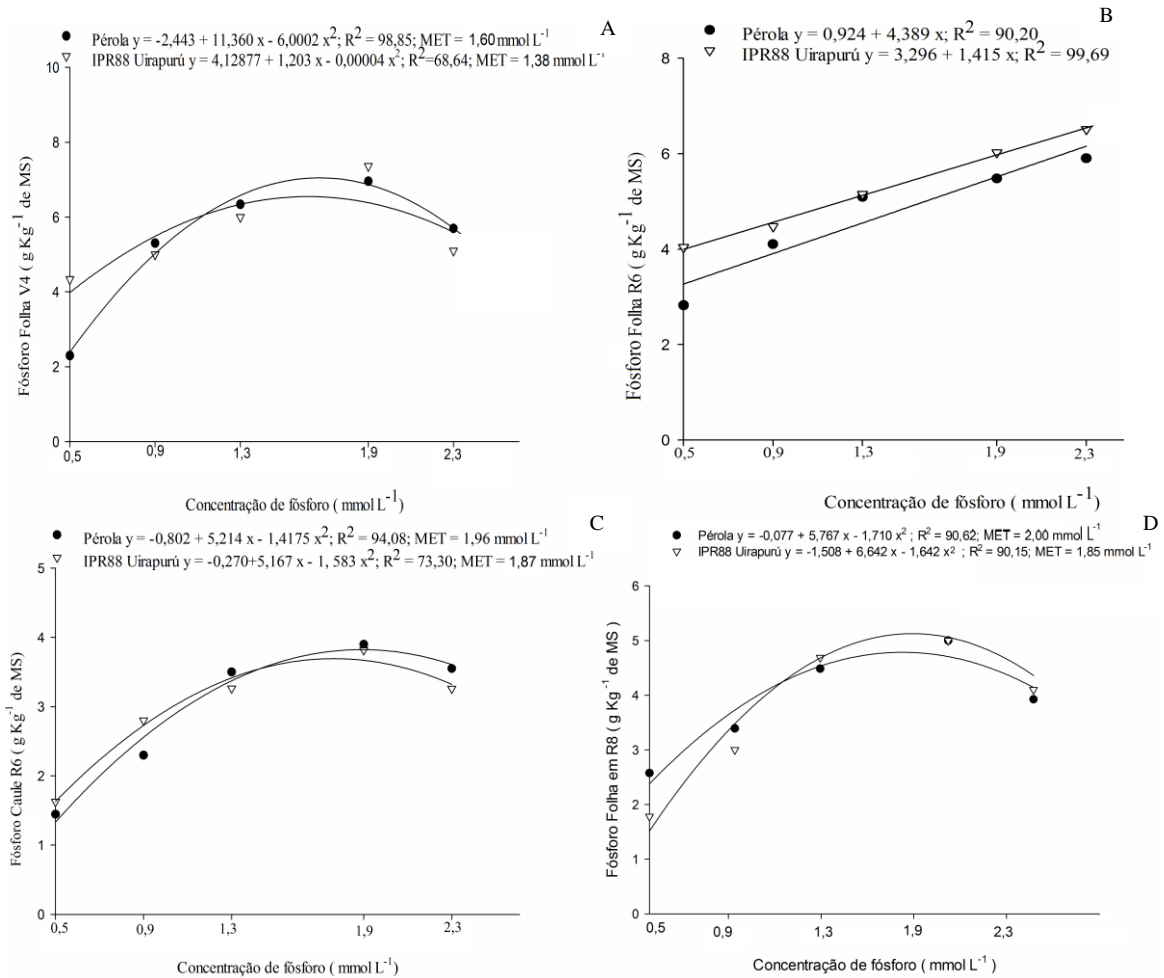
não foram encontrados na literatura pesquisas que tenham avaliado o uso de folhas de feijão como fonte de fósforo para a alimentação humana.

Respostas quadráticas em função da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação foram obtidas em ambas as cultivares de feijão, para os caracteres concentração de fósforo nas folhas em V4 (FIGURA 1A), no caule em R6 (FIGURA 1C), nas folhas em R8 (FIGURA 1D) e nos grãos em R9 (FIGURA 2B), e concentração de ácido fítico nos grãos (FIGURA 2C). Nestes casos, respectivamente, os menores valores para a concentração de fósforo nos tecidos, produtividade de grãos e ácido fítico foram verificados na concentração de 0,5 mmol L<sup>-1</sup> de fósforo fornecida por fertirrigação. Contudo, as maiores respostas para estes caracteres ocorreram nas concentrações de: 2,30 mmol L<sup>-1</sup> – Pérola e 2,17 mmol L<sup>-1</sup> – IPR88 Uirapurú (FIGURA 1A); 1,96 mmol L<sup>-1</sup> – Pérola e 1,95 mmol L<sup>-1</sup> – IPR88 Uirapurú (FIGURA 1C); 2,17 mmol L<sup>-1</sup> – Pérola e 2,30 mmol L<sup>-1</sup> – IPR88 Uirapurú (FIGURA 1D); 1,59 mmol L<sup>-1</sup> – Pérola e 1,58 mmol L<sup>-1</sup> – IPR88 Uirapurú (FIGURA 2B); e 1,87 mmol L<sup>-1</sup> – Pérola e 1,73 mmol L<sup>-1</sup> – IPR88 Uirapurú (FIGURA 2C).

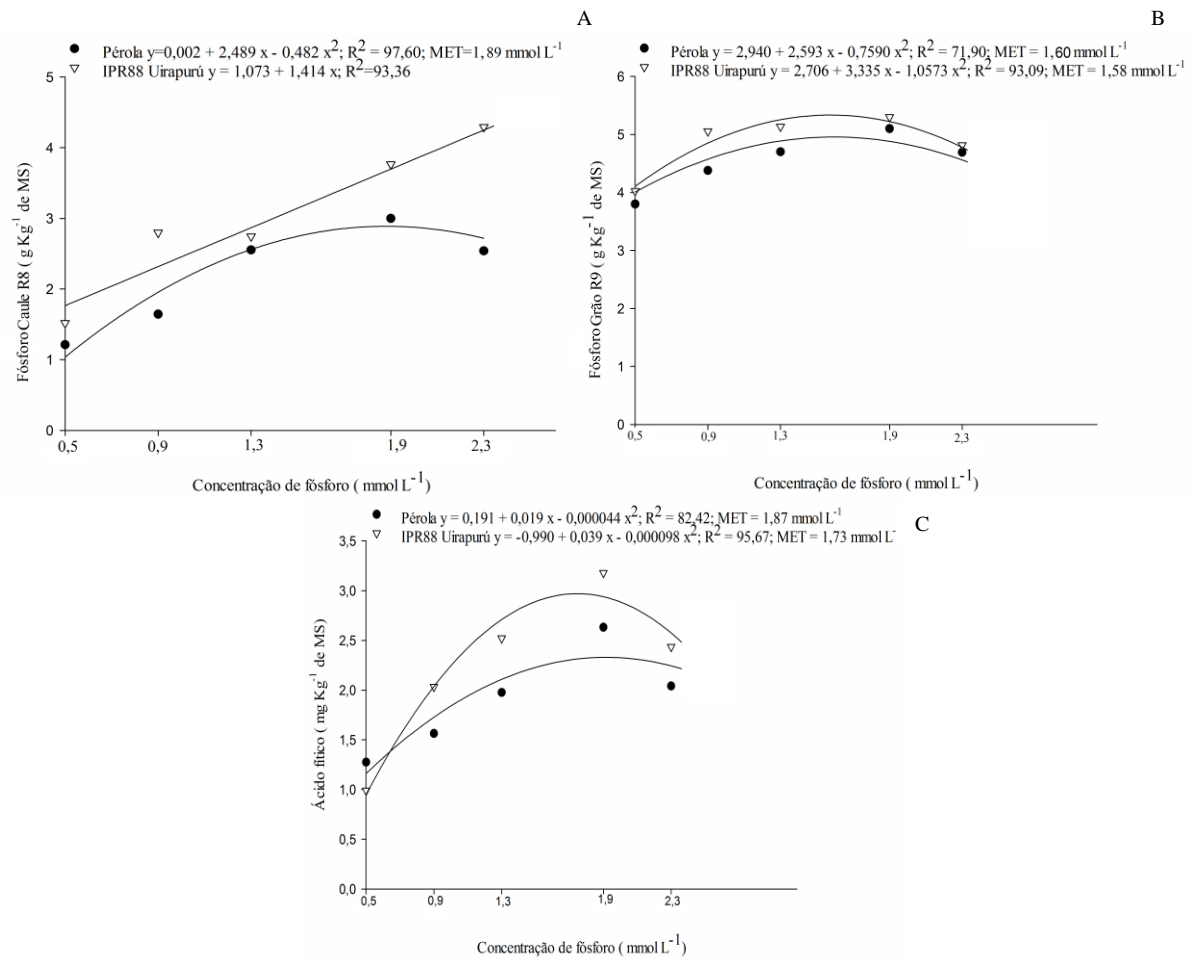
Em valores de fósforo maiores e menores aos pontos de máxima eficiência técnica, houve menor a absorção e o acúmulo do nutriente nos tecidos vegetais. Este fato pode ser justificado pela forma localizada onde o nutriente foi disponibilizado às plantas, uma vez que, se trata de solução nutritiva. Além do mais, a alta concentração de fósforo foliar, nos estádios iniciais de desenvolvimento, pode explicar o aumento da produtividade de grãos, observado também nesta condição (FLOSS, 2008). Isto, considerando-se que há relatos na literatura a respeito da estreita correlação entre teores foliares de nutrientes e a produtividade de feijão (SILVA et al., 2010). Segundo Pires et al. (2006), o padrão de redistribuição do fósforo na planta, seja nas folhas ou nos grãos, é determinado pelas influências das propriedades da fonte e do dreno.

Até o momento, não foram encontradas na literatura pesquisas sobre a influência da concentração de fósforo, disponibilizado na solução nutritiva, na concentração do nutriente nos tecidos vegetais, produtividade de grãos e ácido fítico nos grãos em plantas de feijão. Todavia, em condições de campo, Santos et al. (2011) encontraram resultados divergentes aos obtidos no presente estudo, ao avaliarem as respostas de plantas de feijão à adubação com diferentes doses de fósforo no solo. Os autores concluíram que o conteúdo do nutriente na parte aérea (folhas e caule) apresenta uma resposta linear em razão das doses de fósforo. Assim como, Petrilli (2007) ao realizar uma pesquisa sobre a acumulação de nutrientes nas folhas, grãos e a produtividade de grãos da cultivar de feijão Pérola, sob efeito de diferentes doses e modos de aplicação de fósforo no solo, perceberam que o conteúdo de fósforo nos

grãos e a produtividade destes aumentou com o incremento da dose de fósforo, mostrando uma ascensão linear. Estas diferenças de respostas encontradas devem-se ao fato de que há disparidade do cultivo de campo, para o cultivo de ambiente controlado.



**Figura 1** - Concentração de fósforo nas folhas em terceira folha trifoliada – V4 (A), folhas e caule na floração - R6 (B) e (C), nas folhas no enchimento das vagens - R8 (D), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva para o cultivo de dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú). Santa Maria – RS, UFSM.



**Figura 2** - Concentração de fósforo: no caule no estágio de desenvolvimento de enchimento das vagens - R8 (A), e nos grãos na maturação - R9 (B); e concentração de ácido fítico nos grãos na maturação - R9 (C), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva para o cultivo de dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú). Santa Maria – RS, UFSM.

Para os caracteres concentração de fósforo nas folhas em R6 (FIGURA 1C) e no caule em R8 (FIGURA 2A), a cultivar IPR88 Uirapurú apresentou uma resposta linear em razão do aumento da concentração de fósforo fornecida na fertirrigação. Sendo assim, não foi possível estimar a concentração de fósforo que proporcionou o maior acúmulo de fósforo nas folhas e no caule para a cultivar IPR88 Uirapurú nestes estádios fenológicos.

A concentração de fósforo de  $1,60 \text{ mmol L}^{-1}$  para a cultivar Pérola e de  $1,58 \text{ mmol L}^{-1}$  para a cultivar IPR88 Uirapurú, utilizadas na fertirrigação, garantiram o maior acúmulo do nutriente nos grãos de feijão (FIGURA 2B). Estas não foram as maiores concentrações disponibilizadas às plantas, mas mesmo assim, foram as que propiciaram as mais altas concentrações de fósforo nos grãos. Este fato pode ser visto como promissor para o melhoramento genético, uma vez que pode ser um indicativo da eficiência de uso do nutriente, tornando necessário a realização de estudos mais aprofundados sobre eficiência e

resposta dessas cultivares no uso de fósforo. Neste sentido, será possível a obtenção de um produto de melhor qualidade nutricional, o qual pode ser fornecido à população com redução de custos.

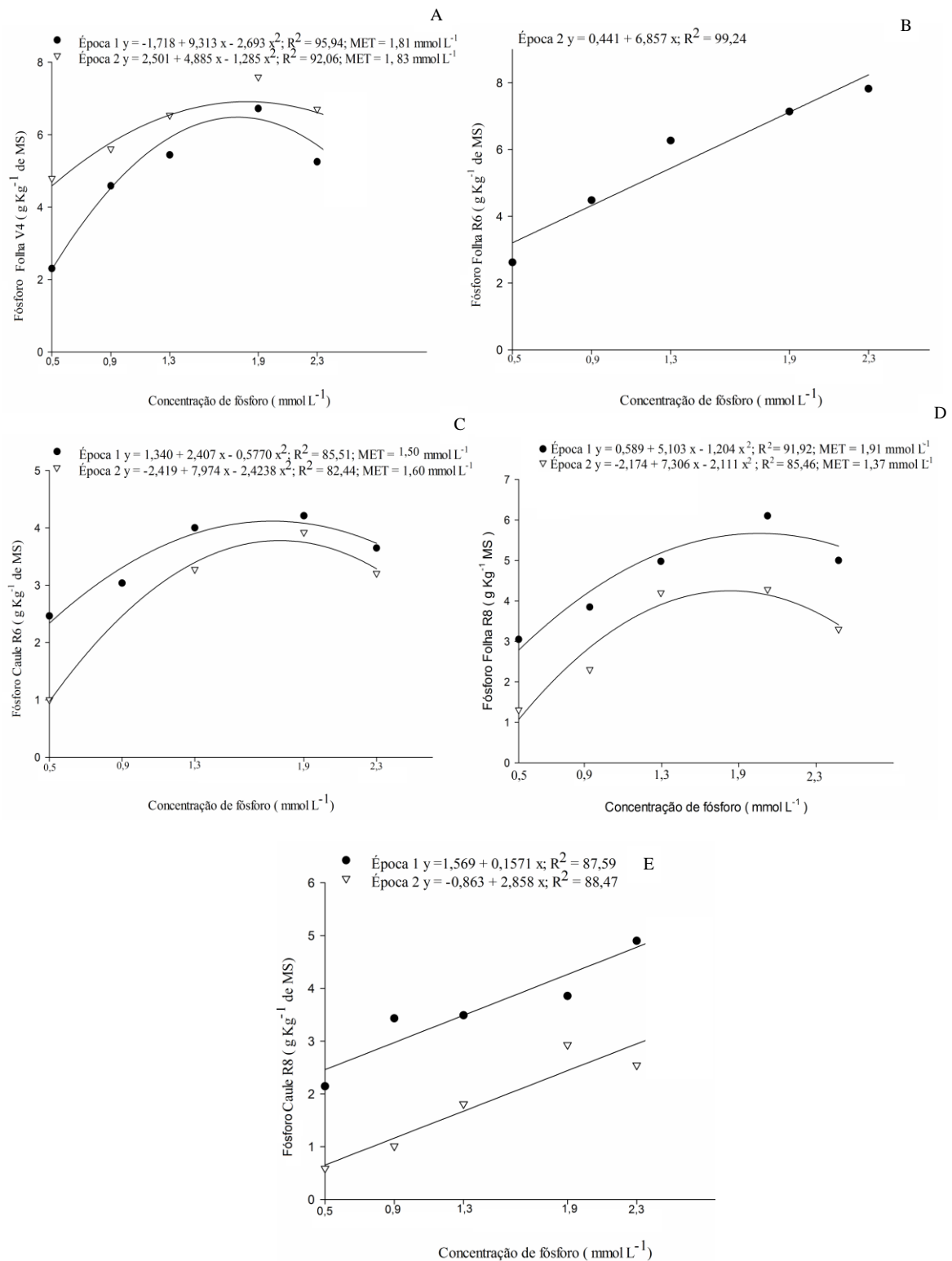
A busca por alimentos que possam suprir as carências nutricionais e proteicas, com qualidade e com baixo custo, é uma necessidade iminente (RIBEIRO, 2010). O aumento da concentração de fósforo nos grãos de feijão é benéfico para a nutrição humana, tendo em vista o delicado elo de sua biodisponibilidade (OLIVEIRA, 2007). Também, traz importantes contribuições para a produção agrícola, pois, o fósforo é necessário para a formação do embrião, dos órgãos de reserva e, na composição química da semente, afetando, conseqüentemente, a qualidade desta e seu potencial produtivo (OLIVEIRA et al., 2014). Além de aumentar a disponibilidade do nutriente em estádios iniciais de infecção simbiótica e formação dos nódulos, particularmente sob condições de baixa disponibilidade de fósforo (ARAÚJO, 2002).

As concentrações de  $1,87 \text{ mmol L}^{-1}$  para a cultivar Pérola e de  $1,73 \text{ mmol L}^{-1}$  para a cultivar IPR88 Uirapurú, fornecidas na fertirrigação propiciaram as maiores concentrações de ácido fítico nos grãos (FIGURA 2C). Em se tratando de sementes, a busca por altas concentrações de ácido fítico torna-se importante, uma vez que estes são reservas secundárias de fósforo usadas subsidiariamente nas funções vitais da semente, principalmente na germinação (SILVA et al., 2011). Sabe-se que durante a estocagem, fermentação, germinação, processamento e digestão dos grãos e sementes, o ácido fítico pode ser parcialmente desfosforilado, produzindo penta-fosfato (IP5), tetra-fosfato (IP4), tri-fosfato (IP3) e, possivelmente, inositol difosfato (IP2) e mono-fosfato (IP1), por ação de fitases endógenas (BENEVIDES, 2011). Contudo, somente IP5 tem efeito negativo na biodisponibilidade de minerais. Portanto, o aumento de ácido fítico nos grãos, o qual normalmente acompanha o aumento da concentração de fósforo nos grãos, não é indicativo de que este fósforo encontra-se pouco disponível para a absorção de humanos.

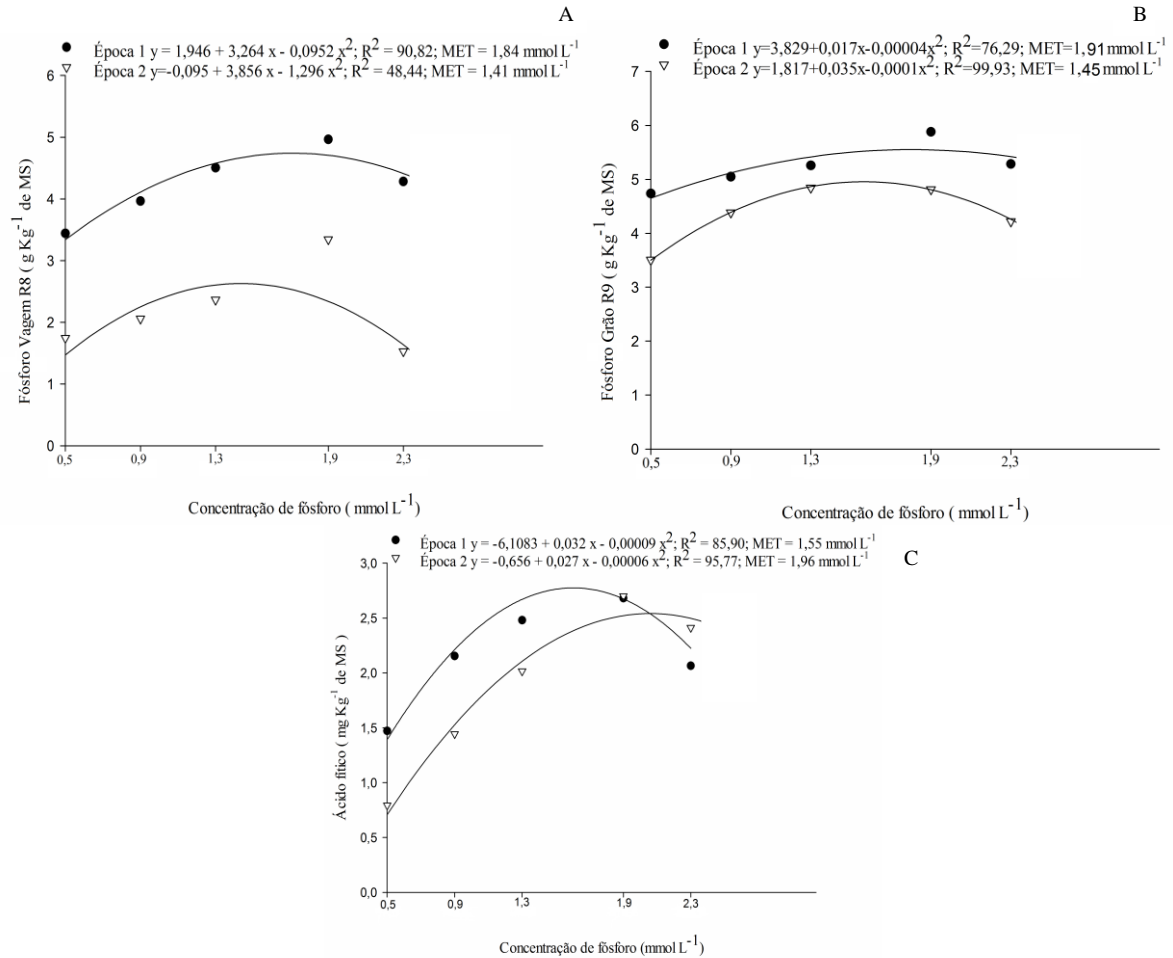
O comportamento das cultivares de feijão pode ser expresso por uma equação de segundo grau, em ambas as épocas de cultivo (época 1 e época 2), para os caracteres de concentração de fósforo nas folhas em V4 (FIGURA 3A), no caule em R6 (FIGURA 3C), nas folhas em R8 (FIGURA 3E), no caule em R8 (FIGURA 3D), nas vagens em R8 (FIGURA 4A), nos grãos em R9 (FIGURA 4B), e concentração de ácido fítico nos grãos (FIGURA 4C). Para esses caracteres, concentrações de fósforo na solução nutritiva de  $1,37$  a  $2,29 \text{ mmol L}^{-1}$  propiciaram a máxima eficiência técnica. Em pesquisas sobre a eficiência de uso de fósforo em genótipos de feijão, Silva et al. (2014) observaram ajuste em um modelo polinomial de

segundo grau para o acúmulo de fósforo na parte aérea (folhas e caule) em plantas de feijão, onde a concentração de  $2,37 \text{ mmol L}^{-1}$  na solução nutritiva, foi a melhor.

Carvalho et al. (2014) ao avaliarem diferentes cultivares de feijão, sob o efeito das combinações de doses de fósforo no solo, verificaram significância da interação concentração de fósforo x época de cultivo para o acúmulo de fósforo na parte aérea e nos grãos de plantas da cultivar Pérola. Porém, diferente dos resultados encontrados no presente estudo, os mesmos autores constataram que a cultivar IPR88 Uirapurú não diferiu entre o primeiro e o segundo ano de cultivo, para estes caracteres. Observando as Figuras 4A, 4B e 4C nota-se a diferença das épocas de cultivo sobre as médias de acúmulo de fósforo nas vagens, nos grãos, e ácido fítico, onde, para todos estes caracteres, o cultivo de outono-inverno (época 1) foi o mais favorável.



**Figura 3** - Concentração de fósforo: nas folhas no estágio de desenvolvimento de terceira folha trifoliada - V4 (A), na folha e caule na floração - R6 (B) e (C), na folha e caule no enchimento das vagens - R8 (D) e (E), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono-inverno (época 1) e de primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.



**Figura 4** - Concentração de fósforo: nas vagens no estágio de desenvolvimento de enchimento das vagens - R8 (A), nos grãos na maturação - R9 (B) e concentração de ácido fítico nos grãos na maturação - R9 (C), obtidos em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, nas épocas de cultivo de outono-inverno (época 1) e de primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.

Na Tabela 1 observou-se que para os caracteres concentração de fósforo nas folhas em V4, no caule em V4 e nas folhas em R6, ou seja, nos estádios iniciais de desenvolvimento, quando ocorreu diferença entre as duas cultivares, a IPR88 Uirapurú apresentou as maiores médias. À medida que as plantas avançaram seu ciclo, para os caracteres de concentração de fósforo nas folhas, no caule e nas vagens em R8, nos grãos em R9, produtividade de grãos e concentração de ácido fítico nos grãos, quando houve diferença entre as cultivares, a Pérola destacou-se com os maiores valores.

**Tabela 1** - Valores médios obtidos para concentração de fósforo: nas folhas e caule em terceira folha trifoliada – V4 (P Folha V4, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Caule V4, g Kg<sup>-1</sup> de MS), nas folhas e caule na floração – R6 (P Folha R6, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Caule R6, g Kg<sup>-1</sup> de MS), nas folhas, caule e vagens no enchimento das vagens – R8 (P Folha R8, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Caule R8, g Kg<sup>-1</sup> de MS; P Vagem R8, g Kg<sup>-1</sup> de MS), dos grãos na maturação – R9 (P G R9, g Kg<sup>-1</sup> de MS); produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>) e concentração de ácido fítico nos grãos (Ácido fítico, mg Kg<sup>-1</sup> de MS) obtidos para dois genótipos de feijão (Pérola e IPR88 Uirapurú), cultivados sob diferentes concentrações de fósforo na solução nutritiva, no período de outono-inverno (época 1) e primavera-verão (época 2). Santa Maria – RS, UFSM.

Genótipo	P Folha V4		P Caule V4		P Folha R6		P Caule R6		P Folha R8	
	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2
Pérola	4,91 b	4,81 b	3,43 a	2,59 b	3,83 b	4,68 b	3,26 a	3,37 a	4,40 a	5,07 a
IPR88 Uirapurú	5,73 a	6,76 a	3,16 a	3,68 a	5,53 a	5,80 a	2,92 a	2,96 a	3,38 b	2,59 b
Média	5,32	5,79	3,30	3,14	4,68	5,24	3,09	3,16	3,89	3,83

Genótipo	P Caule R8		P Vagem R8		P Grão R9		Ácido Fítico	
	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2	época 1	época 2
Pérola	2,87 a	4,26 a	4,05 a	4,51 a	5,10 a	5,54 a	2,35 a	2,12 a
IPR88 Uirapurú	1,76 b	1,79 b	1,32 b	3,09 b	4,40 b	4,31 b	1,44 b	2,35 a
Média	2,31	3,02	2,68	3,80	4,75	4,92	1,89	2,23

\* Médias seguidas pela mesma letra na vertical constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste F (valor de  $p \leq 0,05$ ).

Este comportamento distinto entre os genótipos, em virtude da mudança de ambientes (épocas de cultivo), expressa a variabilidade genética existente entre as duas cultivares analisadas. Pereira et al. (2011) detectaram a existência de variabilidade genética entre cultivares de feijão para o acúmulo de fósforo nos grãos com variação de 2,84 a 5,87 g kg<sup>-1</sup>, assim como, Coelho et al. (2002), encontraram variabilidade genética quanto as concentrações de ácido fítico, com os valores entre 0,7 a 1,48 mg Kg<sup>-1</sup> de MS. O ácido fítico nos grãos de leguminosas podem representar de 50 a 70% do fósforo total, sendo que as variações em seus valores são decorrentes em razão do genótipo e das condições ambientais (SILVA et al., 2011).

Os coeficientes de correlação de Pearson variaram de 0,58 (concentração de fósforo nas folhas em R6 e produtividade de grãos) a 0,99 (concentração de fósforo nas vagens em R8 e concentração de fósforo nos grãos em R9) (Tabela 2). A produtividade de grãos apresentou estimativas de correlação de alta magnitude com os caracteres: concentração de fósforo nas folhas em R8 ( $r = 0,93$ ), nas vagens em R8 ( $r = 0,97$ ) e concentração de fósforo nos grãos em R9 ( $r = 0,94$ ). Observou-se, ainda, que os coeficientes para esses pares de caracteres apresentaram associação linear positiva, indicando que, para haver um aumento na produtividade de grãos, deve-se maximizar as concentrações de fósforo nos tecidos, a partir do estágio de enchimento de vagens, ou seja, em estádios de desenvolvimento da cultura mais avançados. Sendo assim, a avaliação da concentração de fósforo nos tecidos vegetais a partir



do estágio R8, pode ser promissora por permitir seleção indireta, com o intuito de obter ganhos genéticos sobre a produtividade de grãos.

**Tabela 2** - Estimativas de correlação de Pearson para a concentração de fósforo nas folhas na terceira folha trifoliada (V4) (PFolha V4) e no caule em V4 (PCaule V4); nas folhas na floração (R6) (PFolha R6) e no caule em R6 (PCaule R6) nas folhas no enchimento das vagens (R8) (PFolha R8), no caule em R8 (PCaule R8) e nas vagens em R8 (PVagem R8); nos grãos na maturação (R9) (PGrãos R9); concentração de ácido fítico nos grãos (Ac.Fit.) e produtividade de grãos (Prod) em R9, avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva, para dois genótipos de feijão cultivados em duas épocas de semeadura. Santa Maria - RS, UFSM.

	PCaule V4	PFolha R6	PCaule R6	PFolha R8	PCaule R8	PVagem R8	Pgrão R9	Ácido Fítico	Prod
PFolha V4	0,98 *	0,88 *	0,96 *	0,94 *	0,82 ns	0,82 ns	0,83 ns	0,86 ns	0,84 ns
PCaule V4		0,84 ns	0,98 *	0,95 *	0,80 ns	0,88 *	0,88 ns	0,91 *	0,87 ns
PFolha R6			0,91 *	0,83 ns	0,98 *	0,64 ns	0,72 ns	0,84 ns	0,58 ns
PCaule R6				0,93 *	0,89 *	0,85 ns	0,87 ns	0,95 *	0,79 ns
PFolha R8					0,84 ns	0,95 *	0,97 *	0,95 *	0,93 *
PCaule R8						0,69 ns	0,79 ns	0,88 *	0,60 ns
PVagem R8							0,99 *	0,93 *	0,97 *
PGrão R9								0,96 *	0,94 *
Ácido Fítico									0,83 ns

\* Significativo pelo teste *t* em nível de 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Isto ocorre, pois, apesar do efeito dominante do suprimento de fósforo nas fases iniciais do desenvolvimento da cultura, é importante que seu fornecimento continue também nas fases posteriores. É preciso garantir suprimento contínuo de fósforo até a fase de maturação dos grãos para permitir o funcionamento do mecanismo de translocação de carboidratos para que não haja redução na produtividade de grãos (GRANT et al., 2001). O fósforo utilizado na formação dos grãos pode ser suprido pela absorção do solo, assim como pela redistribuição e acúmulo interno do elemento nas folhas e caule.

Forte correlação positiva entre a concentração de fósforo nos grãos e a concentração de ácido fítico ( $r= 0,96$ ) pode ser observada (Tabela 2), indicando que ao se aumentar a concentração de fósforo, aumenta-se o ácido fítico. Isto reitera a ideia de que, o ácido fítico encontra-se amplamente distribuído na maioria das leguminosas e grãos de cereais, apresentando-se como reserva primária de fósforo, atuando como reserva energética (ROSSET, 2007). Silva et al. (2011), ao avaliarem o efeito da adubação fosfatada sobre a produtividade, concentração de fósforo e ácido fítico nos grãos de feijão, constataram resposta contrária a do presente estudo. Para estes autores, não foi observada correlação significativa entre estes caracteres. No presente estudo a significância da correlação entre a concentração de fósforo nos grãos e a concentração de ácido fítico representa que este fósforo faz parte da

molécula do ácido fítico. Ao se considerar sementes, este elemento poderá exercer sua função fisiológica, servindo de estoque de fósforo que será liberado durante a germinação.

## **Conclusões**

Os valores de fósforo nas folhas de feijão em estádios iniciais de desenvolvimento são muito próximos aos encontrados nos grãos.

Para os genótipos Pérola e IPR88 Uirapurú, os maiores valores de fósforo nos tecidos da planta e de ácido fítico ocorrem nas concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,38 e 2,00 mmol L<sup>-1</sup>.

Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,37 e 1,96 mmol L<sup>-1</sup> acarretam maior concentração de fósforo nas folhas em terceira folha trifoliada, no caule em floração, nas folhas, caule e vagens em enchimento de vagens e nos grãos na maturação, e maior concentração de ácido fítico dos grãos, nos cultivos de outono-inverno e primavera-verão.

A avaliação da concentração de fósforo nos tecidos vegetais a partir do estágio enchimento de vagens é promissora e permite seleção indireta para a produtividade de grãos.

## **Agradecimentos**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas.

## **Referências bibliográficas**

ARAÚJO, A. P., TEIXEIRA, M. G., LIMA, E. R. Efeitos do aumento do teor de fósforo na semente, obtido via adubação foliar, no crescimento e na nodulação do feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Pernambuco, v. 2, n. 6, p. 183 - 189, 2002.

ARIZA-NIETO, M. et al. Scredning of iron bioavailability patterns in eight bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes using the Caco-2 cell in vitro model. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 55, n. 19, p. 7950 - 7956, 2007.

- BARRUETO-GONZALEZ, N. B. Biodisponibilidade de minerais das fontes leguminosas. **Revista Simbio-Logias**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 174 - 183, 2008.
- BENEVIDES, C. M. J.; SOUZA, M. V.; SOUZA, R. D. B.; LOPES, M. V. Fatores antinutricionais em alimentos: revisão. **Segurança Alimentar e Nutricional**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 67 - 79, 2011.
- BRINCH-PEDERSON, H.; BORG, S.; TAURIS, B.; HOLM, P. B. Molecular genetic approaches to increasing mineral availability and vitamin content of cereals. **Journal Cereal Science**, Philadelphia, v. 4, n. 6, p. 308 - 326, 2007.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. Estatísticas de avaliação da precisão experimental em ensaios de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 17 - 24, 2007.
- CARVALHO, J. J.; SAAD, J. C. C.; BASTOS, A. V. S.; NAVES, S. S.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, V. M. Teor e acúmulo de nutrientes em grãos de feijão comum em semeadura direta, sob déficit hídrico. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 104 - 117, 2014.
- COELHO, C. M.; SANTOS, J. C. P.; TSAI, M. T.; VITORELLO, V. A. Seed phytate content and phosphorus uptake and distribution in dry bean genotypes. **Plant Physiology**, Washington, v. 14, n. 1, p. 51 - 58, 2002.
- CORDEIRO, J. S.; HAAG, H. P.; DE OLIVEIRA, G. D. Concentração de macronutrientes em função da idade, doses de fósforo aplicadas em partes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill. **Anais da E.S.A. Luiz de Queiroz**, v. 300, n. 1, p. 99 - 142, 1980.
- CRUZ, C. D. Programa Genes: versão Windows, aplicativo computacional em genética e estatística. **Editora UFV: Viçosa**, 648 p, 2006.
- CUNHA, D. A.; TEIXEIRA, I. R.; JESUS, F. F.; GUIMARÃES, R. T.; TEIXEIRA, G. T. Adubação fosfatada e produção de feijão-comum e mamona em consórcio. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 2, p. 617 - 628, 2014.
- DE PAULA, S. A. Influência da temperatura de cultivo e doses de fósforo no solo na composição bioquímica nas sementes de soja. 2011. 87 p. **Tese** (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
- DELFINO, R. A.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Interação de polifenóis e proteínas e o efeito na digestibilidade protéica de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Pérola. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 308 - 12, 2010.
- DOMINGUES, L. da S.; RIBEIRO, N. D.; ANDRIOLO, J. L.; POSSOBOM, M. T. D. F.; ZEMOLIN, A. E. M. Selection of common bean lines for calcium use efficiency. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 45, n. 4, p. 767 - 776, 2014.
- FANTINI, A. P.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G.; SOUZA, M. C.; MANSI, D. N. C. Disponibilidade de ferro em misturas de alimentos com adição de alimentos com alto teor de vitamina C e de cisteína. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 435 - 439, 2008.

FERNANDEZ, F.; GEPTS P.; LOPES M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum. **Centro Nacional de Agricultura Tropical**, 26 p, 1982.

FERREIRA D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agroecologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039 - 1042, 2011.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo – RS. UPF, 2008.

FONSECA, S. V.; VIEIRA, C.; MINIM, V. P. R.; CARDOSO, A. A. Folhas verdes de feijão na alimentação humana: avaliação sensorial, adubação nitrogenada e desfolhamento. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 161 - 167, 2002.

FONTES, P. C. R. **Nutrição mineral de plantas: anamnese e diagnóstico**. Ed. UFV, 315 p. 2016.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações agrônomicas: ESALQ**, v. 95, 16 p, 2001.

HANWAY, J.J.; WEBER, C.R. Percentages in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) plant parts. **Agronomy Journal**, New York, v. 63, n. 1, p. 286 - 290, 1971.

HEFNI, M.; OHRVIK, V.; TABEKHA, M.; WITTH, C. Folate content in foods commonly consumed in Egypt. **Food Chemistry**, Philadelphia, v. 121, n. 2, p. 540 - 545, 2010.

ISRAEL, D.W.; KWANYUEN, P.; BURTON, J. W. Genetic variability for phytic acid phosphorus and inorganic phosphorus in seeds of soybeans in maturity groups V, VI, and VII. **Crop Science**, East Melbourne, v. 4, n. 6, p. 67 - 71, 2006.

KHANAL, S. XUE, J.; KHANAL, R.; XIE, W.; SHI, J.; PAULS, K. P.; NAVABI, A. Quantitative Trait Loci Analysis of Folate Content in Dry Beans, *Phaseolus vulgaris* L. **International Journal of Agronomy**, New York, v. 9, n. 1, p. 1 - 9, 2013.

LAMB, E. M.; HARDMAN, L. L.; CLARKE, S. A.; NYABYENDA, P. A survey of bean genotypes grown in Rwanda. **Annual Report of the Bean Improvement Cooperative**, East Lansing, v. 2, n. 8, p. 17 - 18, 1985.

LATTA, M.; ESKIN, M. A simple and rapid colorimetric method for phytate determination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, New York, v. 28, n. 6, p. 1313 - 1315, 1980.

MESQUITA, F. R.; Corrêa, A. D.; Abreu, C. M. P.; Lima, R. A. Z.; abreu, A. F. B. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agroecologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1114 - 1121, 2007.

MONTEIRO, T. H.; VANNUCCHI, H. Funções plenamente reconhecidas de nutrientes: fósforo. **International life sciences institute do Brasil**. v. 15, n.1, p. 6 - 10, 2010.

OLIVEIRA, T. C.; SILVA, J.; SALGADO, F. H. M.; BARROS, H. B.; FIDELIS, R. R. Influência do fósforo na qualidade fisiológica de sementes de feijão comum armazenadas sob condições naturais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 303 - 310, 2014.

OLIVEIRA, T. C. Fósforo: função, metabolismo e recomendações. **Revista Digital de Nutrição**, v. 1, n. 1, p. 1 - 24, 2007.

PEGORARO, R. F.; OLIVEIRA, D.; MOREIRA, C. G.; KONDO, M. K.; PORTUGAL, A. F. Partição de biomassa e absorção de nutrientes pelo feijoeiro comum. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 3, p. 41 - 52, 2014.

PEREIRA, T.; COELHO, C. M. M.; SANTOS, J. C. P.; BOGO, A.; MIQUELLUTI, D. J. Diversidade no teor de nutrientes em grãos de feijão crioulo no Estado de Santa Catarina. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 33, n. 3, p. 477 - 485, 2011.

PETRILLI, L. R. T. Doses e modos de aplicação de fósforo na nutrição e produção do feijoeiro cultivar Pérola. 2007. 58 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 2007.

RIBEIRO, N. D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 1367 - 1376, 2010.

ROSSET, M. Distribuição de ácido fítico e minerais durante o processamento de extrato hidrossolúvel de soja e Tofu. 2007. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2007.

SANTOS, J. L.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A. V.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; MORETTI, B. S. Resposta do feijoeiro à adubação fosfatada em solos de cerrado com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 193 - 202, 2011.

SIGMAPLOT, Sigmaplot for windows version 11.0. **Systat Software**, 2008.

SILVA, A.; PEREIRA, T.; COELHO, C. M. M.; ALMEIDA, J. A.; SCHIMITT, C. Teor de fitato e proteína em grãos de feijão em função da aplicação de pó de basalto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 33, n. 1, p. 147 - 52, 2011.

SILVA, A. M.; UCHÔA, S. C. P.; ALVES, J. M. A.; LIMA, A. C. S.; SANTOS, C. S. V.; OLIVEIRA, J. M. F.; MELO, V. F. Resposta do feijão-caupi à doses e formas de aplicação de fósforo em Latossolo Amarelo do Estado de Roraima. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 40, n. 1, p. 31 - 36, 2010.

SILVA, D. A.; ESTEVES, J. A. F.; MESSIAS, U.; TEIXEIRA, A.; GONÇALVES, J. G. R.; CHIORATO, A. F.; CARBONELL, S. A. M. Efficiency in the use of phosphorus by common bean genotypes. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 71, n. 3, p. 232 - 239, 2014.

SILVA, E. B.; RESENDE, J. C. F.; CINTRA, W. B. R. Resposta do feijoeiro a doses de fósforo em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 973 - 977, 2001.

SILVA, H. P.; BRANDÃO JUNIOR, D. S.; NEVES, J. M. G.; SAMPAIO, R. A.; DUARTE, R. F.; OLIVEIRA, A. S. Qualidade de sementes de *Helianthus annuus* L. em função da adubação fosfatada e da localização na inflorescência. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1160 - 165, 2011.

SILVA, P. R. C. **Processo de produção de adubos foliares**. Salvador: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Rede de Tecnologia da Bahia, 5 p. 2006.

SOUZA, D. M.; MADARI, B. E.; SENA, M. M. Aplicação de métodos quimiométricos na otimização da extração de Ca, Mg, K, Fe, Zn, Cu E Mn em folhas de Braquiária. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 1 - 5, 2012.

STAUFFER, M. D.; SULEWSKI, G. Fósforo – Essencial para a vida In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba: **Potafos**, Cap. 1, p. 1 – 12, 2004.

STORCK, L. et al. **Experimentação vegetal**. 2. ed. Santa Maria/RS: UFSM, 2006.

## 4 ARTIGO 3

### Seleção de linhagens de feijão quanto ao uso e resposta ao fósforo disponibilizado em solução nutritiva

#### Resumo

Na atualidade, os desafios econômicos e ambientais estão dirigidos na utilização eficiente dos minerais. Diante disso, os objetivos deste trabalho foram avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) quanto ao acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais e produtividade, identificar linhagens de feijão eficientes no uso de fósforo e responsivas à aplicação do fósforo. Para tanto, 12 genótipos de feijão, diferentes quanto à concentração de fósforo nos grãos, foram avaliadas em baixa (0,9 mmol L<sup>-1</sup>) e em alta (1,9 mmol L<sup>-1</sup>) concentração de fósforo na solução nutritiva, em duas épocas de cultivo (outono-inverno e primavera-verão). Os índices de resposta de fósforo na parte aérea, nos grãos e nas plantas, a interação GxE apresentou significância. As linhagens L 2225, L 2632, L 2527 e L 2411, destacaram-se por apresentar alta produção de massa seca de caule em baixa concentração de fósforo no meio de cultivo. Existe variabilidade genética entre as linhagens de feijão estudadas, para produção de massa seca, produtividade e acúmulo de fósforo nos tecidos. A linhagem L 2527 mostrou-se eficiente e responsiva ao uso de fósforo para a parte aérea, ou seja, produziu acima da média sob condições de baixa concentração de fósforo no meio de cultivo. A linhagem L 2225 mostrou ser eficiente no uso de fósforo na parte aérea, nos grãos e na produção de grãos, além de manter esta característica nas duas épocas de cultivo.

**Palavras chave:** (*Phaseolus vulgaris* L.), alta concentração de fósforo, baixa concentração de fósforo, eficiência no uso de fósforo, variabilidade genética.

#### Abstract

Today, the economic and environmental challenges are addressed in the efficient use of minerals. The objectives of this study were to evaluate the genetic variability of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as the phosphorus accumulation in plant tissues and productivity, identify efficient bean lines in phosphorus use and responsive to phosphorus application. For this, 12 genotypes differing in concentration of phosphorus in the grains were evaluated in low (0.9 mmol L<sup>-1</sup>) and high (1.9 mmol L<sup>-1</sup>) phosphorus concentration in the nutrient solution in two growing seasons (fall - winter and spring - summer). The efficiency ratios in phosphorus use in the aerial part of the plant, in the grains, plants and production, all double interactions (CXG, CXE and GxE) and triple (CxGxE) were significant. For phosphorus response rates in the shoot, the grains and plants, the GxE interaction presented significance. The lines L 2225, L 2632, L 2527 and L 2411, stood out due to high production of stem dry weight in low phosphorus concentration in the culture medium. There is genetic variability among bean lines studied for dry matter production, productivity and phosphorus accumulation in tissues. L 2527 strain proved to be efficient and responsive to the use of phosphorus to shoots, or above average produced under low phosphorus concentration in the culture medium. L 2225 line proved to be efficient in the use of phosphorus in the shoot, in grains and grain production, in addition to and keep this feature in the two growing seasons.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris* L.; high phosphorus concentration; low phosphorus concentration; phosphorus use efficiency; genetic variability.

## **Introdução**

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) possui ampla distribuição no Brasil em virtude de sua boa adaptação às mais variadas condições edafoclimáticas (PEREIRA et al., 2010). A importância da cultura extrapola o aspecto econômico, desempenhando papel fundamental, também, na alimentação dos brasileiros e, na demanda por mão-de-obra, já que faz parte dos mais diversificados sistemas de produção, com pequenos, médios e grandes agricultores (BARBOSA; GONZAGA, 2012).

Um fator considerável que limita a nutrição das plantas de feijão e, como consequência, desfavorece a obtenção de alta produtividade de grãos, é a baixa disponibilidade e mobilidade de fósforo (P) nos solos brasileiros (LEAL; PRADO, 2008). A grande maioria dos solos nacionais são ácidos, com baixa fertilidade e alta capacidade de retenção de fósforo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Entre os minerais, o fósforo é um recurso não renovável e de fonte finita, que frequentemente limita a produção das culturas (OLIVEIRA et al., 2012). É um elemento químico, que naturalmente está contido em rochas de depósitos sedimentares, ígneos e biogênicos (MARTINS, et al., 2014). Em 2010, o International Fertilizer Development Center realizou um estudo de reavaliação das reservas e recursos mundiais de fosfato, e neste, concluiu-se que as reservas de fosfato são ainda menores do que se estimava. As reservas do Marrocos e do Saara Ocidental, consideradas as maiores do planeta, foram reduzidas de 50 bilhões de toneladas para 5,7 bilhões, nos últimos 10 anos.

O uso excessivo de corretivos e de fertilizantes fosfatados acarreta aumento dos custos de produção, fato que tem sido notadamente evitado. Como alternativa para fugir da demasiada aplicação de fertilizantes fosfatados, o qual é um obstáculo à produção vegetal, há o desenvolvimento de cultivares eficientes na absorção e na utilização de fósforo (HINSINGER, 2001). Os efeitos da deficiência do elemento podem ser minimizados quando se utilizam algumas práticas como a correção da acidez do solo, adubação fosfatada adequada e, utilização de cultivares eficientes ao uso de fósforo. Desta forma, cada vez mais destaca-se a busca pelo potencial genético das plantas com o uso eficiente de minerais. O desenvolvimento e a identificação de cultivares de feijão eficientes e responsivas no uso de



fósforo pode ser uma estratégia para se conseguir maiores produtividades de grãos, sem ocorrer o incremento nos custos do sistema produtivo. Dentre os fatores que contribuem para isto, está o melhoramento genético, por meio do qual obtêm-se cultivares superiores (BERTOLDO et al., 2009).

Na atualidade, os desafios econômicos e ambientais estão dirigidos na utilização eficiente dos nutrientes (BALIGAR et al., 2001). Em função da pequena aptidão das rochas fosfadas no mundo, o melhor aproveitamento dessas reservas é fundamental para manter ou, até mesmo, aumentar a produção agrícola (CORDELL et al., 2009). A utilização eficiente dos nutrientes permite a diminuição das perdas dos mesmos, sendo que estas perdas podem prejudicar a qualidade do ar e da água (eutrofização), especialmente de nitrogênio (N) e fósforo (P) (SRINIVASAR, 2006).

Essencial e muito explorada pelos programas de melhoramento genético, a variabilidade genética existente entre plantas de uma mesma espécie e/ou, entre espécies diferentes, é o que permite expressar o potencial da população para a seleção (BERNARDO, 2002). Diversas são as comprovações de variabilidade entre e dentre espécies vegetais, quanto à utilização e absorção de nutrientes (RAO, 1996; OTANI, 1996). Quanto à eficiência no uso de fósforo e, quanto à absorção deste elemento, diferentes culturas já foram avaliadas como, arroz (ROTILI et al., 2010); trigo (SILVA et al., 2008) milho (CARVALHO et al., 2012) e feijão (OLIVEIRA et al., 1987). Fageria (1998), concluiu que existe grande variabilidade genética entre genótipos de feijão, os quais apresentaram comportamento diferenciado com relação à eficiência de utilização de fósforo. Sabe-se que esta diferença na seleção dos genótipos quanto à eficiência de uso de fósforo e produção de grãos está relacionada com a translocação do nutriente das raízes para a parte aérea (LANA et al., 2006).

O termo eficiência nutricional é utilizado para caracterizar a capacidade das plantas em absorver e utilizar nutrientes, estando relacionado à eficiência de absorção, utilização e translocação destes (AMARAL et al., 2011). Esta eficiência se refere à quantidade de matéria seca ou grãos produzidos por unidade de nutriente aplicado, sendo sua otimização de grande importância na produção das espécies vegetais (FAGERIA, 1998). Sendo assim, para ampliar a produtividade e reduzir o custo de produção é necessário que haja o aprimoramento da eficiência nutricional. As plantas eficientes no uso de fósforo são aquelas que produzem maior quantidade de massa seca por unidade de fósforo absorvido (TOMAZ; AMARAL, 2008). O conceito de eficiência de plantas na utilização de um nutriente engloba processos pelos quais as plantas absorvem, translocam, acumulam e utilizam melhor o referido nutriente para a produção de matéria seca e grãos em condições nutricionais normais ou com limitado

suprimento do nutriente em questão. Föhse et al. (1988) definiram a eficiência no uso de fósforo como sendo a habilidade de uma planta em produzir certa porcentagem da produção máxima com o menor consumo de fósforo.

A eficiência de utilização do fósforo pela planta está relacionada com vários mecanismos internos e externos, sendo eles: aspectos da morfologia radicular, alterações químicas na rizosfera, alterações de características fisiológicas de cinética de absorção, alterações em processos bioquímicos, variabilidade genética e interações com microrganismos que habitam o solo (LYNCH, 2007). Além disso, ela pode ser expressa e calculada de maneiras diferentes, sendo o índice proposto por Siddiqui; Glass (1981) o mais utilizado para avaliar a eficiência no uso de nutrientes, em virtude de relacionar a eficiência no uso ao crescimento das plantas. Ramos et al. (2010), ao avaliarem a utilização do fósforo e a produção de grãos de feijão, quando cultivado em sucessão às gramíneas forrageiras adubadas com diferentes fontes desse nutriente, utilizaram o índice Siddiqui; Glass para determinar a eficiência de uso do mineral. Assim como, Procópio et al. (2005), também utilizaram o mesmo índice, ao estudarem a eficiência na absorção e utilização do fósforo pelas culturas da soja e do feijão e por espécies de plantas daninhas.

Já a resposta das plantas à aplicação visa a observação do comportamento das linhagens em ambientes contrastantes quanto a disponibilidade do nutriente. Esta resposta é estimada pela relação entre as diferenças de produção e biomassa e a disponibilidade do nutriente, sendo inicialmente conceituada para fósforo por Fox (1978) e adaptada por Furtini (2008) para a produção de grãos.

Além do mais, as plantas de feijão são consideradas, como sendo, pouco eficientes na absorção deste nutriente em virtude do baixo influxo e requerimento do fósforo para a produção de biomassa (FOHSE et al., 1988). A seleção de cultivares de feijão que possuam maior eficiência na utilização de fósforo passa a ser uma alternativa útil e viável, para cultivos instalados sob condições de baixa disponibilidade deste nutriente.

Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar a variabilidade genética de linhagens de feijão quanto ao acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais e produtividade, além de identificar linhagens de feijão eficientes no uso de fósforo e responsivas à aplicação do fósforo no meio de cultivo.

## Material e métodos

O trabalho foi realizado no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (latitude 29°42S, longitude 53°49W e 95 m de altitude), onde foram conduzidos os experimentos em casa-de-vegetação. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, com parcelas sub-sub-divididas. Os tratamentos constituíram de um trifatorial 2x12x2 em faixa, sendo duas concentrações de fósforo, na parcela principal, fornecidas às plantas por meio de fertirrigação (baixa: 0,9 e alta: 1,9 mmol L<sup>-1</sup>), as quais foram determinadas com base nos resultados de experimentos anteriores sobre a dinâmica da acumulação de fósforo nos tecidos de plantas de feijão. Na sub-parcela foram distribuídos 12 genótipos de feijão com diferenças na concentração de fósforo nos grãos e na produtividade, sendo duas cultivares (Pérola e IPR88 Uirapurú), usadas como testemunhas, e 10 linhagens avançadas fornecidas pelo Programa de Melhoramento de Feijão da UFSM, sendo estas: L 2225, L 2632, L 2527, L 2411, L 2519, L 2428, L 2244, L 2637, L 2528 e L 2625. Estas 10 linhagens avaliadas foram obtidas a partir de cruzamentos controlados entre cultivares de feijão contrastantes para a concentração de fósforo (MAZIERO et al., 2016). Na sub-sub-parcela, foram utilizados dois períodos de cultivo, outono-inverno com semeadura em 1º de maio de 2014 (época 1) e primavera-verão com semeadura em 10 de setembro de 2014 (época 2).

Em cada época de cultivo haviam quatro dispositivos fechados de cultivo fora do solo, os quais foram construídos e descritos por Domingues et al. (2014). Sobre estes foram colocados 48 vasos pretos de polipropileno, com capacidade para 4 L, preenchidos com uma camada de brita e areia média, e realizou-se a semeadura. Em dois dispositivos as plantas foram fertirrigadas com solução nutritiva contendo a concentração baixa de fósforo (0,9 mmol L<sup>-1</sup>) e, nos outros dois, com a solução contendo a concentração alta de fósforo (1,9 mmol L<sup>-1</sup>). Nas soluções baixa e alta de fósforo, adicionou-se nitrogênio 0,9 mg L<sup>-1</sup> e 2,4 mg L<sup>-1</sup> (formulação NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>).

Apenas a concentração de fósforo fornecida variou de um dispositivo para o outro e os demais nutrientes, essenciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, eram fornecidos nas mesmas quantidades, sendo estes: potássio (KNO<sub>3</sub>; 404,40 mg L<sup>-1</sup>), cálcio (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; 318,74 mg L<sup>-1</sup>), magnésio (MgSO<sub>4</sub>; 197,12 mg L<sup>-1</sup>), e micronutrientes: molibdênio (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>; 0,03 mg L<sup>-1</sup>), boro (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; 0,26 mg L<sup>-1</sup>), cobre (CuSO<sub>4</sub>; 0,06 mg L<sup>-1</sup>), manganês (MnSO<sub>4</sub>; 0,50 mg L<sup>-1</sup>), zinco (ZnSO<sub>4</sub>; 0,22 mg L<sup>-1</sup>) e ferro (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>; 1,0 mg L<sup>-1</sup>).

A cada 20 dias todas as soluções eram refeitas e, três vezes por semana media-se o pH e a condutividade elétrica (CE) destas. O pH foi mantido na faixa de 5,5 a 6,5 mediante a adição de NaOH ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> quando a solução encontrava-se fora deste limite estipulado. A condutividade elétrica foi preservada entre 1,0 e 1,5 mS, sendo acrescido água ou alíquotas de nova solução quando fora desta faixa. As plantas foram fertirrigadas com o auxílio de mangueiras de gotejamento interligadas ao circuito fechado. Desta forma, as soluções foram fornecidas individualmente, para cada dispositivo, em três turnos diários de fertirrigação durante o outono-inverno e, com quatro turnos na primavera/verão, cada um com duração de 15 minutos.

Quando as plantas encontravam-se no estágio de desenvolvimento de enchimento de vagens (R8), de acordo com a escala fenológica descrita por Fernandez et al. (1982), foram coletadas duas plantas de cada linhagem, em cada um dos dispositivos fechados. Totalizando a retirada de quatro plantas fertirrigadas com a concentração baixa de fósforo e quatro, com a concentração alta. Estas foram fracionadas e, separadamente, folhas, caule e vagens foram acondicionados em sacos de papel, levados para estufa de circulação forçada de ar (Odontobras 1.5; Odontobras, São Paulo, Brasil) até a obtenção de uma massa constante, da qual se determinou a massa seca dos tecidos, com o auxílio de uma balança digital. Ao atingirem o estágio de maturação (R9), novas plantas foram coletadas (duas plantas de cada linhagem) e destas, quantificaram-se o número de vagens por planta, o número de grãos por vagem e a produtividade de grãos por planta, a 13% de umidade.

Para determinar a concentração de fósforo nos tecidos vegetais, as amostras de folhas, caule e vagens em R8 e grãos em R9 foram moídas com auxílio de um micromoinho analítico de faca (Q298A21; Quimis, São Paulo, Brasil), até a obtenção de uma farinha com partículas de aproximadamente 1 mm. Destas amostras retiraram-se alíquotas de 0,5 g as quais foram digeridas em 5 ml de solução ácida composta por ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>), na proporção 3:1, como recomendado por Miyazawa et al. (1999). A concentração de fósforo, expressa em g kg<sup>-1</sup> de matéria seca de amostra, foi determinada por leitura em espectrofotômetro de emissão óptica (AA-7000; Shimadzu, São Paulo, Brasil), com comprimento de onda de 660 nm.

A eficiência de uso de fósforo foi determinada com o emprego dos seguintes índices propostos e adaptados por Siddiqui; Glas (1981) e Domingues et al. (2014):

- 1) eficiência no uso de fósforo nos grãos (EUGrãos) = (g de massa seca de grãos)<sup>2</sup> . (mg de P acumulado nos grãos)<sup>-1</sup>.

- 2) eficiência no uso de fósforo na parte aérea (EUPAérea) =  $(\text{g de massa seca de parte aérea})^2 \cdot (\text{mg de P acumulado na parte aérea})^{-1}$ .
- 3) eficiência no uso de fósforo na planta (EUPlanta) =  $(\text{g de massa seca de parte aérea e grãos})^2 \cdot (\text{mg de P acumulado na parte aérea e grãos})^{-1}$ .
- 4) eficiência no uso de fósforo na produção de grãos (EUProd) =  $(\text{g de massa seca de grãos})^2 \cdot (\text{mg de P acumulado na parte aérea e grãos})^{-1}$ .

A resposta das linhagens de feijão quanto à aplicação de fósforo na solução nutritiva foi determinada pela metodologia adaptada de Furtini (2008), a partir da expressão:  $IR = [(MS_A - MS_B) (A - B)^{-1}]$ . A partir da equação de Furtini (2008) foram estimados os índices:

- 1) índice de resposta de fósforo à produção de grãos (IRGrãos) =  $[(MGP_A - MGP_B) (A - B)^{-1}]$ , em que  $MGP_A$  e  $MGP_B$  correspondem a massa dos grãos por planta (g) em alta e baixa concentração de fósforo; e  $A - B$  é a diferença entre as concentrações de fósforo na solução nutritiva.
- 2) índice de resposta à produção da massa seca da parte aérea (IRPAérea) =  $[(MSPA_A - MSPA_B) (A - B)^{-1}]$ , em que  $MSPA_A$  e  $MSPA_B$  correspondem a massa seca da parte aérea (g) em alta e baixa concentração de fósforo; e  $A - B$  é a diferença entre as concentrações de fósforo na solução nutritiva.
- 3) índice de resposta à produção de massa seca pela planta (IRPPlanta) =  $[(MSPI_A - MSPI_B) (A - B)^{-1}]$ , em que  $MSPI_A$  e  $MSPI_B$  correspondem a massa seca da parte aérea e dos grãos por planta (g) em alta e baixa concentração de fósforo; e  $A - B$  é a diferença entre as concentrações de fósforo na solução nutritiva.

Com base nos índices de eficiência de uso de fósforo e de resposta a aplicação de fósforo na solução nutritiva, foram confeccionados gráficos relacionando a eficiência e a capacidade de resposta das linhagens. Assim, foi feita a classificação das linhagens de feijão em eficientes e responsivas (ER), não eficientes e responsivas (NER), não eficientes e não responsivas (NENR) e eficientes e não responsivas (ENR), de acordo com Batten et al. (1984).

A análise estatística dos dados foi realizada, considerando todos os efeitos como fixos, exceto o erro que foi aleatório, com o auxílio da planilha eletrônica Microsoft® Office Excel e o software Sisvar (FERREIRA, 2011). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, considerando três repetições. Sendo o efeito da interação tripla significativa, realizou-se o desdobramento desta em três interações duplas. Quando ocorreu a significância da interação dupla concentração de fósforo na solução nutritiva x genótipo (CxG) ou genótipo x época de cultivo (GxE) foi usado o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro para a

comparação das médias. Nos casos em que houve significância da interação dupla que abrangeu concentração de fósforo na solução nutritiva x época de cultivo (CxE) foi usado o teste *t* de Student, a 5% de probabilidade para a comparação das médias.

### **Resultados e discussão**

Na análise de variância observaram-se, para todos os caracteres de crescimento, produção e acúmulo de fósforo nos tecidos houve significância da interação tripla concentração de fósforo x genótipos x época de cultivo (CxGxE), exceto para a variável fósforo na vagem. (APÊNDICE E). O mesmo ocorreu para os efeitos isolados da concentração de fósforo na solução nutritiva, genótipos e época de cultivo. Isso evidencia a influência na disponibilidade de fósforo, a variabilidade genética existente entre as linhagens de feijão estudadas e a variação entre as épocas de cultivo sobre esses caracteres.

Também, foram significativas as interações duplas, concentração de fósforo x genótipo, concentração de fósforo x época de cultivo, genótipo x época de cultivo, para os caracteres de crescimento (massa seca do caule-MSCaule e massa seca das vagens-MSVagem) e caracteres produtivos (número de vagens por planta-NVagem, número de grãos por planta-NGrão e produtividade de grãos-Prod) (APÊNDICE E). Comportamento semelhante foi percebido para os caracteres de acúmulo de fósforo nas folhas (PFolha), no caule (PCaule), nas vagens (PVagem) e nos grãos (PGrão). A exceção ocorreu na interação dupla, concentração de fósforo x época de cultivo, para a massa seca das folhas (MSFolha) e acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais. Resultados distintos a estes foram encontrados por Fageria (1998), ao avaliar a eficiência do uso de fósforo em 15 genótipos de feijão, em níveis baixo, médio e alto, em um Latossolo Vermelho-Escuro. O autor concluiu que, para os caracteres de massa seca da parte aérea e, acúmulo de fósforo na parte aérea, a interação dose de fósforo x genótipos não foi significativa, de modo que os genótipos analisados mostraram existência de estabilidade de adaptação, tanto para o baixo como para o alto nível de fósforo. Já, Lana et al. (2006), ao estudar oito genótipos de feijão quanto a eficiência na absorção e utilização de fósforo na solução nutritiva, detectaram significância na interação concentração de fósforo x genótipo, para os caracteres de massa seca da parte aérea e acúmulo de fósforo na parte aérea.

Com relação aos índices de eficiência no uso de fósforo na parte aérea da planta (EUPA), nos grãos (EUGrão), nas plantas (EUPlan) e na produção (EUProd), todas as

interações duplas (CxG, CxE e GxE) e tripla (CxGxE) foram significativas (Tabela 1). Desta forma, em razão das concentrações de fósforo na solução nutritiva serem distintas, evidencia-se a possibilidade de seleção de linhagens de feijão para o cultivo em baixo e alto fósforo. Além disto, há variabilidade genética entre as linhagens estudadas, permitindo a seleção para eficiência no uso de fósforo.

**Tabela 1** - Análise de variância para os caracteres de eficiência no uso de fósforo na parte aérea (EUPA,  $g^2 mg^{-1}$ ), eficiência no uso de fósforo nos grãos (EUGrão,  $g^2 mg^{-1}$ ), eficiência no uso de fósforo na planta (EUPlan,  $g^2 mg^{-1}$ ), e eficiência no uso de fósforo na produção de grãos (EUProd,  $g^2 mg^{-1}$ ); índice de resposta de fósforo à produção de massa seca na parte aérea (IRPA), índice de resposta de fósforo à produção de grãos (IRGrão) e índice de resposta de fósforo à produção de massa seca na planta (IRPlan); avaliados em 12 genótipos de feijão, submetidos a duas concentrações de fósforo na solução nutritiva em duas épocas de cultivo. Santa Maria - RS, UFSM.

Quadrado Médio					
Fonte de variação	Grau de liberdade	EUPA	EUGrão	EUPlan	EUProd
Conc (C)	1	1611,767 *	0,568 ns	592,235 *	0,1370 ns
Erro C	2	2,100	0,100	1,570	0,010
Gen (G)	11	97,090 *	2,160 *	38,810 *	0,920 *
Erro G	44	1,110	0,090	0,380	0,020
Época (E)	1	1951,040 *	2,240 *	1002,820 *	0,020 ns
Erro (E)	4	0,490	0,040	0,730	0,030
C x G	11	56,060 *	0,900 *	19,110 *	0,600 *
C x E	1	1284,080 *	8,000 *	642,000 *	2,570 *
G x E	11	67,980 *	3,080 *	23,310 *	1,460 *
C x G x E	11	72,770 *	2,290 *	27,490 *	0,860 *
Erro	46	1,550	0,100	0,520	0,020
Média		7,210	1,820	7,660	0,910
CV		12,1 <sup>1</sup> - 14,6 <sup>2</sup> -9,7 <sup>3</sup> - 17,2 <sup>4</sup>	17,2 <sup>1</sup> - 16,3 <sup>2</sup> -10,8 <sup>3</sup> - 17,1 <sup>4</sup>	16,3 <sup>1</sup> - 8,1 <sup>2</sup> - 11,1 <sup>3</sup> - 9,4 <sup>4</sup>	10,7 <sup>1</sup> - 15,3 <sup>2</sup> - 19,4 <sup>3</sup> - 15,6 <sup>4</sup>
Fonte de variação	Grau de liberdade	IRPA	IRGrão	IRPlan	
Gen (G)	11	0,004 *	0,037 *	0,109 *	
Erro G	22	0,006	0,002	0,007	
Época (E)	1	0,004 ns	0,010 *	0,027 *	
Erro (E)	2	0,001	0,000	0,001	
G x E	11	0,005 *	0,050 *	0,161 *	
Erro	24	0,0002	0,003	0,011	
Média		0,070	0,060	0,120	
CV (%)		15,0 <sup>1</sup> - 18,3 <sup>2</sup> - 13,2 <sup>3</sup>	18,2 <sup>1</sup> - 14,7 <sup>2</sup> - 9,2 <sup>3</sup>	14,5 <sup>1</sup> - 9,4 <sup>2</sup> - 18,1 <sup>3</sup>	

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo. <sup>1</sup> Coeficiente de variação da sub-parcela. <sup>2</sup> Coeficiente de variação da sub-sub-parcela. <sup>3</sup> Coeficiente de variação da interação GxE.

Para os índices de resposta de fósforo na parte aérea (IRPA), nos grãos (IRGrão) e nas plantas (IRPlan), a interação genótipo x época de cultivo (GxE) apresentou significância, de modo que possibilita a constatação de que as linhagens de feijão apresentaram resposta quanto a aplicação de fósforo diferenciada em virtude da época de cultivo (Tabela 1). Sabendo que resposta à adubação está associada à capacidade de aumento da produção de biomassa com o maior suprimento do nutriente (FIDELIS et al., 2005) e que, a época em que a planta é cultivada, também exerce influência sobre a produção de biomassa, verifica-se nítida diferença entre os ambientes. A radiação, a qual foi distinta nas duas épocas de cultivo, é um dos fatores climáticos que tem influência direta sobre a produção de biomassa na cultura do feijão, uma vez que está diretamente relacionada com a taxa fotossintética das plantas (TEIXEIRA et al., 2015).

Ao considerar os valores médios dos caracteres de crescimento que constam na Tabela 2, é possível perceber que para a produção de massa seca nas folhas, as linhagens L 2225, L 2632 e L 2527 constituíram o grupo das maiores médias na baixa concentração de fósforo, o que não ocorreu na alta concentração. Com exceção da linhagem L 2527, que formou o grupo com as maiores médias para esse caractere tanto no baixo P, quanto no alto P, indicando boa adaptação há ambos os ambientes.

Para o caractere massa seca do caule, na baixa concentração de fósforo houve a formação de três grupos de linhagens, já na alta concentração se verificou a formação de quatro grupos, de acordo com o teste Skott Knott. Somente a cultivar Pérola manteve-se no grupo com a maior produção de massa seca de caule em ambas as concentrações de fósforo. As linhagens L 2225, L 2632, L 2527 e L 2411, destacaram-se por ter alta produção de massa seca de caule, somente quando submetidas a baixa concentração de fósforo. Já para a produção de massa seca das vagens (MSVagem) não houve diferença entre a baixa e a alta concentração de fósforo nas linhagens L 2632, L 2411, L 2244 e L 2528.

Tanto nos caracteres de crescimento, quanto nos caracteres produtivos, as médias gerais de todos os genótipos estudados, foram inferiores na solução nutritiva com baixo fósforo e, superiores no alto fósforo (Tabela 2). Sabendo da existência da relação direta entre a produção de biomassa com a produtividade final, a condição que favorece o crescimento vegetal, também acarreta na maior produção. O decréscimo na produção de biomassa sob a menor concentração de fósforo está relacionado à elevada partição de carboidratos alocados para as raízes em plantas deficientes em fósforo (FONTES, 2016). Este fato pode ser explicado, pois plantas desenvolvidas com concentrações baixas de fósforo apresentam menor



teor de carboidratos solúveis totais e açúcares redutores na composição dos seus tecidos vegetais, desta forma, menos se desenvolvem (COUTINHO et al., 2000).

As linhagens L 2632 e L 2411 apresentaram as maiores médias para número de vagens por planta, nas duas concentrações de fósforo fornecidas na solução nutritiva (alta e baixa concentração) (Tabela 2). Estas, juntamente com a L 2625 formaram o grupo com o maior número de vagens por planta. Contudo, esta última destacou-se para a produção de vagens apenas quando cultivada sob baixa disponibilidade de fósforo, uma vez que na alta concentração não constitui o grupo das maiores médias. Resultado semelhante ao da L 2625, pode ser observado para a L 2632 quanto ao número de grãos por planta, de modo que essa linhagem formou o grupo isolado quanto ao número de grãos, distinguindo-se das demais.

O destaque para número de grãos e/ou número de vagens das linhagens L 2632, L 2411, L 2625, sob baixa concentração de fósforo na solução nutritiva, pode ter contribuído para que estas, juntamente com a Pérola, L 2225 e L 2244, fossem as mais produtivas nestas condições de baixo fósforo. No entanto, nenhuma delas evidenciou-se como mais produtiva, quando cultivada sob alta concentração de fósforo na solução nutritiva. Este fato pode ser um indicativo de linhagens eficientes no uso do fósforo. Segundo Fageria (1998), cultivares eficientes na utilização do mineral geralmente diminuem sua produção com o aumento de níveis de nutriente; isto significa que a eficiência de utilização de fósforo é máxima a mais baixo nível de nutriente e mínima a mais alto nível.

**Tabela 2** - Valores médios obtidos para os caracteres de massa seca do caule (MSCaule, g), folhas (MSFolha, g), vagens (MSVagem, g); número de vagens (NVagem), número de grãos (NGrão) e produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>), obtidos para 12 genótipos de feijão, submetidas a duas concentrações de fósforo (Baixo P – 0,9 mmol L<sup>-1</sup> e Alto P – 1,9 mmol L<sup>-1</sup>) na solução nutritiva. Santa Maria – RS, UFSM.

Linhagem	MSFolha		MSCaule		MSVagem	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
Pérola	3,18 b B	8,90 a B	5,13 b A	8,56 a A	4,00 b B	5,00 a B
L 2225	4,05 b A	6,69 a D	4,54 b A	6,46 a C	2,53 b D	6,05 a A
L 2632	3,90 b A	6,20 a E	4,50 b A	5,65 a C	4,64 a A	3,34 a D
L 2527	4,66 b A	10,25 a A	4,28 b A	7,75 a B	2,13 b D	5,94 a A
L 2411	3,31 b B	6,34 a D	4,20 b A	5,68 a C	3,73 a B	4,23 a C
L 2519	3,11 b B	6,37 a D	3,96 b B	7,05 a B	2,79 b C	4,86 a B
IPR88 Uirapurú	3,35 b B	7,64 a C	3,63 b B	5,84 a C	1,08 b F	2,68 a E
L 2428	3,09 b B	5,11 a F	3,41 b B	5,73 a C	3,03 a C	3,43 a D
L 2244	2,91 b B	5,64 a F	3,33 b B	5,51 a C	2,16 a D	2,54 a E
L 2637	2,84 b B	6,23 a E	3,09 b C	5,95 a C	2,29 b D	6,19 a A
L 2528	3,05 b B	7,01 a D	3,03 b C	5,65 a C	1,86 a D	2,34 a E
L 2625	3,91 b A	6,23 a E	2,33 b C	4,31 a D	1,40 b F	4,01 a C
Média	3,45	6,88	3,78	6,18	2,63	4,22
Cv		15,0		14,3		16,1
Linhagem	Nvagem		NGrão		Prod	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
Pérola	4,75 b B	9,63 a B	13,50 b E	40,75 a B	6,83 b A	17,05 a B
L 2225	5,75 b B	11,00 a A	25,25 b B	38,50 a C	7,66 b A	13,99 a C
L 2632	8,13 b A	10,50 a A	30,50 b A	42,88 b B	8,18 b A	14,23 a C
L 2527	3,50 b C	6,38 a C	12,88 b E	23,13 a F	4,18 b C	7,69 a F
L 2411	7,13 b A	10,50 a A	22,25 b C	31,88 a D	7,31 b A	9,54 a E
L 2519	3,63 b C	8,50 a B	9,75 b E	35,75 a D	3,33 b C	15,50 a C
IPR88 Uirapurú	2,75 b C	9,13 a B	11,25 b E	34,00 a D	3,70 b C	13,79 a C
L 2428	5,75 b B	11,13 a A	17,75 b D	37,38 a C	4,71 b B	11,86 a D
L 2244	5,13 b B	8,75 a B	18,00 a D	34,25 b D	6,19 b A	11,60 a D
L 2637	5,00 b B	12,00 a A	20,38 b C	51,38 a A	5,39 b B	19,05 a A
L 2528	4,00 b C	9,13 a B	14,38 b E	41,63 a B	5,13 b B	16,93 a B
L 2625	8,00 b A	9,50 a B	19,38 b C	27,50 a E	6,55 b A	14,29 a C
Média	5,29	9,68	17,94	36,58	5,76	13,79
Cv		15,6		13,6		15,4

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste F (valor de  $p \leq 0,05$ ) e, maiúscula na vertical constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste Scott Knott (valor de  $p \leq 0,05$ ).

Na Tabela 3 observou-se que a concentração de fósforo na solução nutritiva influenciou no acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais, onde plantas irrigadas com baixa concentração acumularam menos este nutriente no caule (PCaule), folha (PFolha), vagens (PVagem) e grãos (PGrão), do que àquelas irrigadas com a maior concentração. Para Malavolta et al. (1997) o teor adequado de fósforo nas folhas de feijão, de modo que a planta

não apresente sintomas de deficiência nutricional, é de 2 a 3 g Kg<sup>-1</sup>. No presente estudo, pode-se observar que no baixo P, o teor de fósforo acumulado nas folhas foi menor que os valores sugeridos pelos autores, contudo, não houve sintomas aparentes de deficiência de fósforo.

Para o acúmulo de fósforo no grão, a linhagem L 2632 foi a única que esteve no grupo com as maiores médias, em ambas as concentrações de fósforo, sendo que, em baixo fósforo na solução, diferiu de todas as demais linhagens, superando as testemunhas. Esta pode ser uma evidência de que a linhagem L 2632 mostra-se eficiente e responsiva na absorção e na utilização de fósforo. A quantidade de minerais presentes nos grãos depende da absorção das raízes na rizosfera, do transporte pelo xilema, da transferência para folhas, grãos e outros tecidos (BURATTO, 2012). A eficiência de absorção e mobilização de fósforo para os grãos pode ser limitado pela disponibilidade deste mineral no solo. Partindo da importância do feijão na alimentação humana, verifica-se a necessidade de caracterizar como os nutrientes podem interferir na qualidade nutricional do grão, o que pode resultar na indicação de uso dos grãos para consumo, ou serem indicados para os cruzamentos nos programas de melhoramento da cultura (ALVES, 2013).

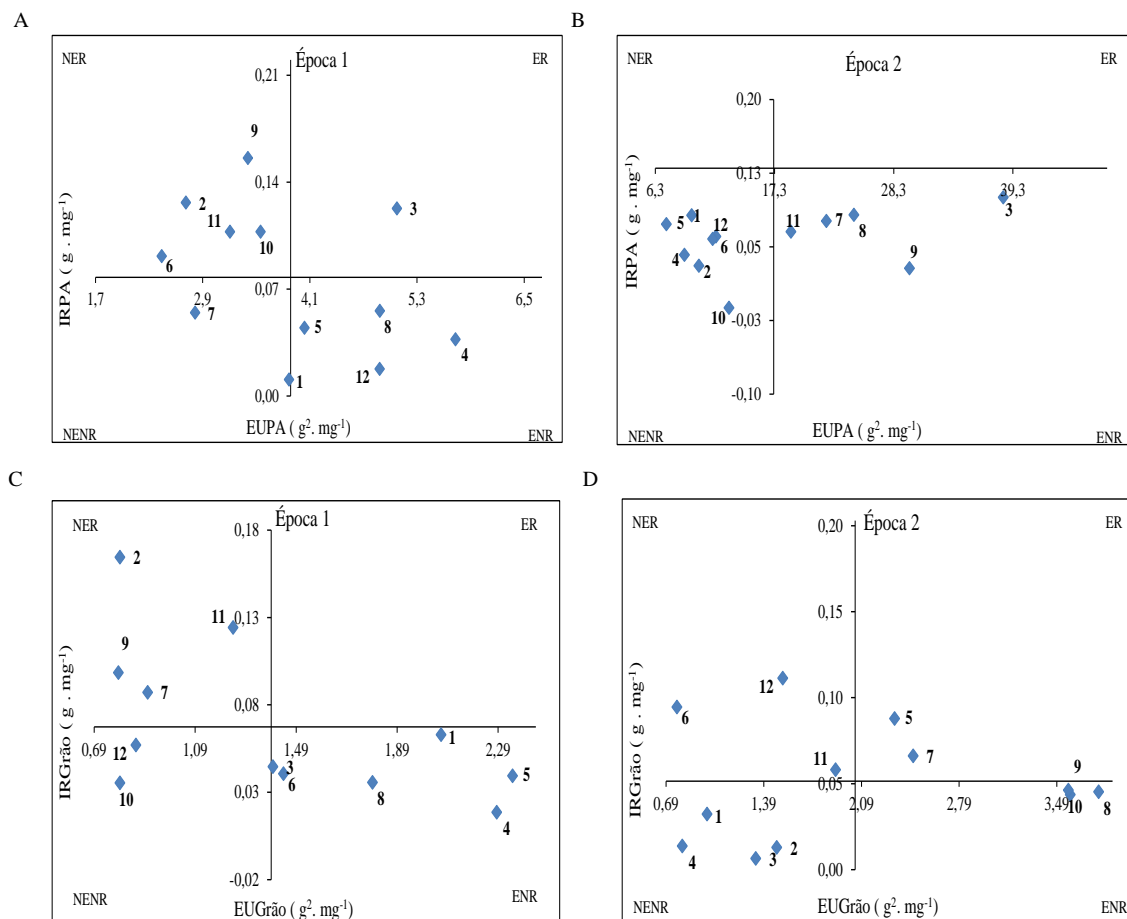
**Tabela 3** - Valores médios obtidos para os caracteres de concentração de fósforo no caule (PCaule, g Kg<sup>-1</sup> de matéria seca - MS), folhas (PFolha, g Kg<sup>-1</sup> de MS), vagens (PVagem, g Kg<sup>-1</sup> de MS) e nos grãos (PGrãos, g Kg<sup>-1</sup> de MS), obtidos para 12 genótipos de feijão, submetidas a duas concentrações de fósforo (Baixo P – 0,9 mmol L<sup>-1</sup> e Alto P – 1,9 mmol L<sup>-1</sup>) na solução nutritiva. Santa Maria – RS, UFSM.

Linhagem	PFolha		PCaule	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
Pérola	1,01 b A	3,92 a D	0,99 b B	4,09 a B
L 2225	1,26 b A	3,68 a D	1,21 b B	3,47 a B
L 2632	1,30 b A	5,92 a B	1,11 b B	5,02 a A
L 2527	1,11 b A	5,27 a B	0,53 b C	4,77 a A
L 2411	1,87 b A	3,02 b D	0,74 b C	4,41 a A
L 2519	1,62 b A	5,86 a B	1,87 b A	4,99 a A
IPR88 Uirapurú	2,15 b A	5,42 a B	0,78 b C	4,10 a B
L 2428	1,37 b A	6,48 a A	1,21 b B	5,01 a A
L 2244	1,15 b A	4,75 a C	0,91 b B	3,93 a B
L 2637	0,92 b A	4,38 a C	1,00 b B	3,97 a B
L 2528	1,38 b A	5,12 a B	0,80 b C	4,71 a A
L 2625	1,60 b A	7,03 a A	0,57 b C	3,82 a B
Média	1,40	5,07	0,97	4,36
Cv		12,6		9,8
Linhagem	PVagem		Pgrão	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
Pérola	1,84 b B	4,34 a C	3,12 b C	6,18 a A
L 2225	2,31 b B	4,51 a C	2,66 b C	5,47 a A
L 2632	2,77 b A	5,08 a B	4,91 a A	5,14 a A
L 2527	1,94 b B	4,79 a C	2,64 b C	5,99 a A
L 2411	1,70 b B	4,18 a C	4,23 b B	5,71 a A
L 2519	2,07 b B	4,76 a C	2,84 b C	5,82 a A
IPR88 Uirapurú	2,05 b B	4,71 a C	2,60 b C	5,91 a A
L 2428	2,01 b B	5,19 a B	3,08 b C	6,73 a A
L 2244	2,70 b A	4,88 a C	2,39 b C	5,81 b A
L 2637	1,92 b B	4,34 a C	2,78 b C	6,00 a A
L 2528	2,13 b B	5,72 a A	2,61 b C	6,20 a A
L 2625	2,27 b B	4,67 a C	2,50 b C	5,81 a A
Média	2,14	4,76	3,03	5,90
Cv		13,1		12,4

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste F (valor de  $p \leq 0,05$ ) e, maiúscula na vertical constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste Scott Knott (valor de  $p \leq 0,05$ ).

Ao observar a figura 1A, percebeu-se que na condição de cultivo da época 1, apenas a linhagem L 2527 mostrou-se eficiente e responsiva ao uso de fósforo para a parte aérea, ou seja, produziu acima da média sob condições de baixa concentração de fósforo no meio de cultivo e responde bem ao incremento na produção, a alto nível do nutriente. Na segunda época de cultivo (FIGURA 1B) nenhuma linhagem expressou seu potencial de eficiência e

resposta ao uso de fósforo, ao mesmo tempo. Contudo, as linhagens 2244, 2411, 2625, 2225 e 2428 mostraram-se eficientes no uso de fósforo para a parte aérea das plantas na época 1, porém, não mantiveram este comportamento na época 2, onde as linhagens 2528, Pérola e 2637 foram as eficientes.



**Figura 1** - Classificação de 12 genótipos de feijão quanto a eficiência no uso de fósforo na parte aérea (EUPA, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) em relação ao índice de resposta de fósforo à produção de massa seca da parte aérea (IRPA, g mg<sup>-1</sup>) e eficiência no uso de fósforo nos grãos (EUGrão, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) em relação ao índice de resposta de fósforo nos grãos (IRGrão, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>), obtidas em baixa concentração de fósforo em solução nutritiva, em dois cultivos (outono/inverno – Época 1 e primavera/verão – Época 2). Santa Maria - RS, UFSM.

ER: eficiente e responsivo; NER: não eficiente e responsivo; NENR: não eficiente e não responsivo e ENR: eficiente e não responsivo.

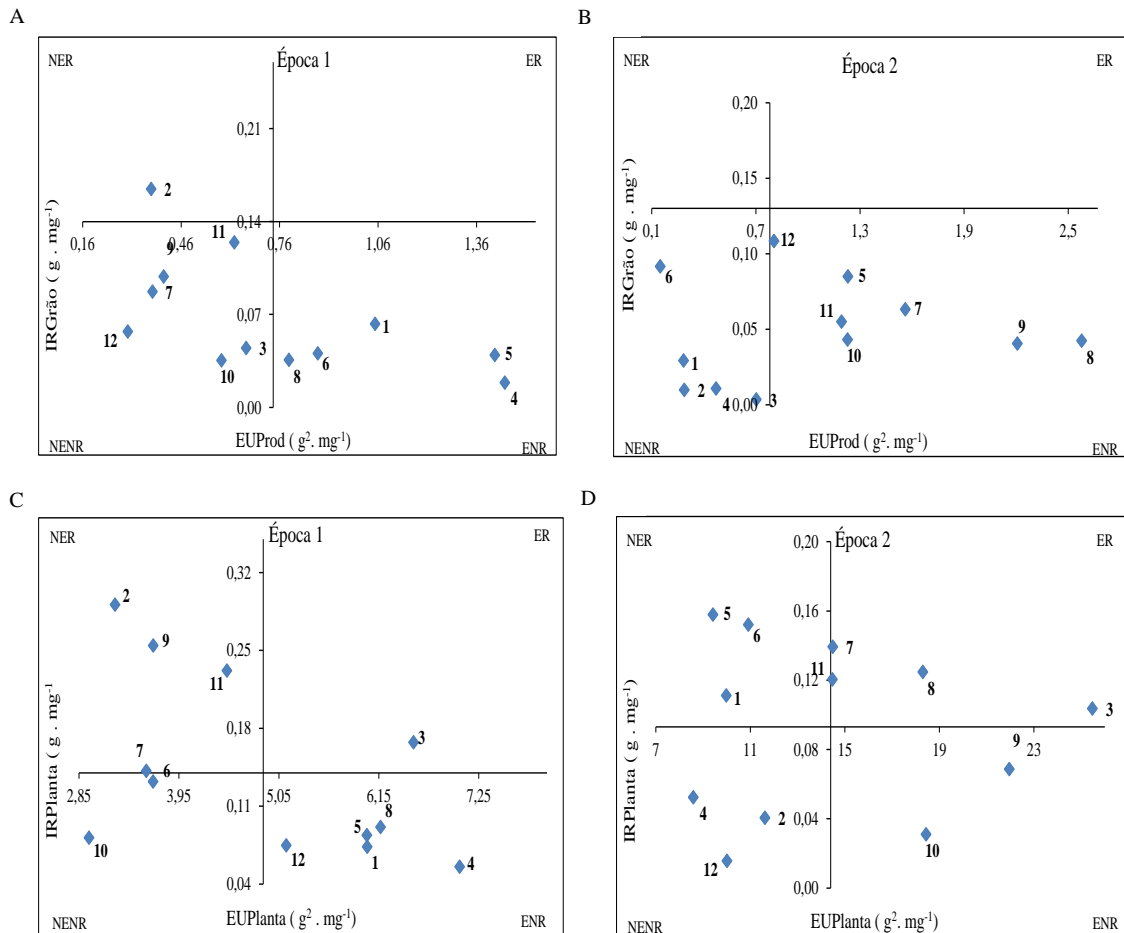
1 – L2244; 2 – L2519; 3 – L2527; 4 – L2411; 5 – L2625; 6 – IPR88 Uirapurú; 7 – L2528; 8 – L2225; 9 – Pérola; 10 – L2632; 11 – L2637 e 12 – L2428.

Apenas as linhagens L 2527 e L 2225 repetiram o comportamento para a característica de eficiência no uso do fósforo na parte aérea das plantas, uma vez que, foram eficientes em ambas as épocas de cultivo (outono-inverno:época 1; primavera-verão:época 2), figura 1A e 1B, respectivamente. Portanto, estes genótipos produzem acima da média em baixa

concentração de fósforo no meio de cultivo. A preferência por cultivares com ampla adaptação aos vários ambientes de cultivo deve ser considerada (CARBONELL et al., 2001). Fageria (1998) ao avaliar os 15 genótipos de feijão no uso de fósforo em um Latossolo Vermelho-Escuro, também constatou que os genótipos apresentaram comportamento diferenciado com relação à eficiência de utilização de fósforo, sendo que Rio Doce, São José, IPA 9, Aporé, Goytacazes, Carioca-MG, Carioca-IAC, Serrano, Safira e Roxo 9 foram considerados eficientes na utilização de fósforo na parte aérea.

Apesar da linhagem L 2527 ter se destacado como eficiente e responsiva no uso de fósforo para a parte aérea, ou seja, tendo produzido maior biomassa de parte aérea na menor concentração de fósforo na solução e ter respondido positivamente ao incremento do nutriente, isso não fez com que a planta convertesse biomassa em produção e, a linhagem ficou no quadrante não eficiente e não responsivo ao fósforo quanto a produtividade de grãos (FIGURA 2A e 2B). Este resultado corrobora com os encontrados por Zucarelli et al. (2011), onde objetivando identificar efeitos genéticos que controlam a herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em feijão, realizaram um estudo com dois níveis de disponibilidade de fósforo (alto e baixo). Os autores concluíram que a eficiência de utilização, em baixa disponibilidade de fósforo, não se correlacionou com a produtividade de grãos. Todavia, sob alta disponibilidade do nutriente, esses parâmetros se correlacionaram.

Contudo, a linhagem L 2225, a qual mostrou ser eficiente no uso de fósforo na parte aérea (EUPA) (FIGURA 1A e 1B), e grãos (EUGrão) (FIGURA 1C e 1D) e manteve esta característica nas duas épocas de cultivo, também esteve presente, na época de cultivo 1 e época de cultivo 2, no grupo eficiente mas não responsivo ao uso de fósforo na produção de grãos (FIGURA 2A e 2B). Esta linhagem, juntamente com a 2244, 2411, IPR88 Uirapurú (na época 1), 2528, Pérola, 2632, 26,37 e 2428 (época 2) e 2625 (épocas 1 e 2), foram as mais eficientes na conversão do fósforo para produção em baixa disponibilidade de fósforo, portanto são promissoras para o cultivo em ambientes com restrição de fósforo e, podem ser úteis para o melhoramento genético visando à eficiência ao fósforo em feijão. Entre as características consideradas favoráveis em um genótipo de feijão eficiente na utilização de fósforo, incluem-se a translocação do fósforo das raízes para os tecidos em crescimento e um desenvolvimento reprodutivo adequado para que maior quantidade possível de fósforo seja utilizada na produção de grãos (YOUNGDAHL, 1990).



**Figura 2** - Classificação de 12 genótipos de feijão quanto a eficiência no uso de fósforo na produção de grãos (EUProd, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) em relação ao índice de resposta de fósforo nos grãos (IRGrão, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) e eficiência no uso de fósforo nas plantas (EUPlanta, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) em relação ao índice de resposta de fósforo à produção de massa seca na planta (IRPlanta, g mg<sup>-1</sup>) obtidas em baixa concentração de fósforo em solução nutritiva, em dois cultivos (outono/inverno – Época 1 e primavera/verão – Época 2). Santa Maria - RS, UFSM.

ER: eficiente e responsivo; NER: não eficiente e responsivo; NENR: não eficiente e não responsivo e ENR: eficiente e não responsivo.

1 – L2244; 2 – L2519; 3 – L2527; 4 – L2411; 5 – L2625; 6 - IPR88 Uirapurú; 7 – L2528; 8 – L2225; 9 – Pérola; 10 – L2632; 11 – L2637 e 12 – L2428.

## Conclusões

Existe variabilidade genética entre as linhagens de feijão estudadas, para produção de massa seca, produtividade e acúmulo de fósforo nos tecidos.

A linhagem L 2527 mostrou-se eficiente e responsiva ao uso de fósforo para a parte aérea da planta.

A linhagem L 2225 mostrou ser eficiente no uso de fósforo na parte aérea, nos grãos e na produção de grãos, além de manter esta característica nas duas épocas de cultivo.

## Referências bibliográficas

- AMARAL, J. F. T. et al., Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 4, p. 621 - 629, 2011.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI-NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa, MG: SBCS, Lavras: UFLA / DCS, p. 183-204, 1999.
- BARBOSA, F. R.; GONZAGA, A. C. O. (Ed.). **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: 2012-2014**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 272 p., 2012.
- BATTEN, G. D. et al. Yield responses by modern wheat genotypes to phosphate fertilizer for breeding. **Euphytica**, Wageningen, v. 3, n.3, p.81 - 89, 1984.
- BERTOLDO, J. G. et al. Rendimento de grãos de feijão preto: o componente que mais interfere no valor fenotípico é o ambiente. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n.7, p. 1974 - 1982, 2009.
- CARBONELL, S. A. M. et al. Adaptabilidade e estabilidade de produção de cultivares e linhagens de feijoeiro no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 2, p. 69 - 77, 2001.
- CARVALHO, R. P. Eficiência de cultivares de milho na absorção e uso de nitrogênio em ambiente de casa de vegetação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2125 - 2136, 2012.
- CORDELL D., DRANGERT J.O., WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Ontário, v. 1, n. 9, 292 - 305, 2009.
- COUTINHO, P. W. R. et al. Doses de fósforo na cultura do feijão-caupi na região nordeste do Estado do Pará. **Revista Agro@mbiente**, Boa Vista, v. 8, n. 1, p. 66 - 73, 2014.
- DOMINGUES, L. da S.; RIBEIRO, N. D.; ANDRIOLO, J. L.; POSSOBOM, M. T. D. F.; ZEMOLIN, A. E. M. Selection of common bean lines for calcium use efficiency. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 4, p. 767 - 776, 2014.
- FAGERIA, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão, **Resvista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p.128 - 131, 1998.
- FERNANDEZ F., GEPTS P., LOPES M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum. **Cali: Centro Nacional de Agricultura Tropical**. v. 2, n. 6, p. 508 - 519, 1982.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agroecologia**, Lavras, v. 3, n. 5, p. 1039 - 1042, 2011.



- FIDELIS, R. R. et al. Metodologias de seleção de cultivares de milho para eficiência na absorção e utilização de nitrogênio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 52, n. 304, p. 987 - 1002, 2005.
- FOEHSE, D.; JUNGK, A. Influence of phosphate and nitrate supply on root hair formation of rape, spinach and tomato plants. **Plant and Soil**, Crawley, v. 74, n. 1, p. 359 - 368, 1988.
- FONTES, P. C. **Nutrição Mineral de Plantas: anamnese e diagnóstico**. Ed. UFV, 315 p., 2016.
- FOX, R. H. Selection for phosphorus efficiency in corn. **Communications Soil Science Plant**, Georgia, v.9, n. 1, p. 13 - 37, 1978.
- FURTINI, M. V. Implicações da seleção no feijoeiro efetuada em ambientes contrastantes em níveis de nitrogênio. **Dissertação**, Universidade Federal de Lavras. 2008.
- HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Crawley, v. 237, n. 1, p.173 - 195, 2001.
- LANA, R. M. Q. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso do fósforo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 1 - 10, 2006.
- LEAL, R. M.; PRADO, R. M. Desordens nutricionais no feijoeiro por deficiência de macronutrientes, boro e zinco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 4, p. 301 - 306, 2008.
- LYNCH, J. P. Roots of the second green revolution. **Australian Journal of Botany**. East Melbourne, v. 55, n. 5, p. 493 - 512, 2007.
- MARTINS, C. et al. **Minerais estratégicos e terras-raras**. Centro de Documentação e Informação, 1ª Ed., Brasília, 241 p., 2014.
- MIYAZAWA M.; PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F. Análises químicas de tecido vegetal. in: **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**, Ed by SILVA F. C., Embrapa Solos, Brasília, p. 171 - 223, 1999.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV Departamento de Solos, 399 p., 1999.
- OLIVEIRA, I. P. Avaliação de cultivares de feijão quanto a eficiência no uso de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 39 - 45, 1987.
- OLIVEIRA, T. C. et al. Potencial produtivo de genótipos de feijão comum em função do estresse de fósforo no Estado do Tocantins. **Journal Biotechnology Biodiversity**, Most Viewed, v. 3, n .3, p. 24 - 30, 2012.
- PEREIRA, H. S. et al. Indicação de cultivares de feijoeiro-comum baseada na avaliação conjunta de diferentes épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 1, p. 571 - 578, 2010.
- PROCÓPIO, S. O. et al. Absorção e utilização do fósforo pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, n. 9, p. 911 - 921, 2005.

RAMOS, S. J. et al. Utilização de fósforo e produção do feijoeiro: influência de gramíneas forrageiras e fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, n. 4, p. 89 - 96, 2010.

ROTILI, E. A. et al. Eficiência do uso e resposta à aplicação de fósforo de cultivares de arroz em solos de terras altas. **Bragantia**, Campinas v. 69, n. 3, p. 705 - 710, 2010.

SIDDIQI M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 4, n. 8, p. 289 - 302, 1981.

SRINIVASARÃO, C. H. et al. Phosphorus and micronutrient nutrition of chickpea genotypes in a multi-nutrient-deficient typical Ustochrept. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 29, p. 747 - 763, 2006.

SILVA, A. A. Diferenciação de genótipos de trigo quanto à tolerância à deficiência de fósforo, em solução hidropônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1949 - 1958, 2008.

TEIXEIRA, G. C. S. et al. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 45, n. 1, p. 9 - 17, 2015.

YOUNGDAHL, L.J. Differences in phosphorus efficiency in bean genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 13, n. 11, p. 1381 - 1392, 1990.

ZUCARELLI, C. Fósforo na produtividade e qualidade de sementes de feijão Carioca Precoce cultivado no período das águas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 32 - 38, 2011.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos três estudos realizados pode-se observar que, de maneira geral, existe variabilidade genética entre as cultivares estudadas e também, entre as linhagens avançadas de feijão analisadas, com relação aos caracteres de crescimento e desempenho agrônomico, concentração de fósforo nos tecidos vegetais e ácido fítico nos grãos, além da eficiência e resposta no uso de fósforo. Esta variabilidade é fundamental para o apoio e desenvolvimento dos programas de melhoramento e para a sustentabilidade da agricultura. Nos programas de melhoramento de plantas, a informação quanto à variabilidade genética e divergência dentro de uma espécie é essencial para o uso racional dos recursos genéticos (LOARCE et al., 1996).

As cultivares e as linhagens de feijão empregadas respondem positivamente ao aumento da concentração de fósforo disponibilizada na solução nutritiva quanto à produção de massa seca das frações da planta (folhas, caule, vagens e grãos), componentes da produtividade de grãos, concentração de fósforo nos tecidos e concentração de ácido fítico nos grãos.

O primeiro estudo avaliou a produção de massa seca em diferentes estádios fenológicos e os componentes de produtividade de cultivares de feijão em resposta a disponibilidade de fósforo na solução nutritiva e, juntamente com a segunda pesquisa, serviu de embasamento para a determinação das duas concentrações (baixo fósforo e alto fósforo) utilizadas na fertirrigação no terceiro trabalho. Este segundo estudo aprofundou ainda mais as análises, abordando um tema que vai além da questão agrônômica e, adentra no valor nutricional dos grãos de feijão, com a presença de ácido fítico em razão da disponibilidade de fósforo na solução nutritiva. Vários fatores afetam a disponibilidade dos conteúdos de ácido fítico e fósforo nos grãos, tais como, genética, variações ambientais, local, condições de irrigação, tipos de solo e aplicações de fertilizantes (QUIRRENBACH et al., 2009). O papel fisiológico do ácido fítico nas plantas consiste na reserva de fósforo e energia. Contudo, também é considerado um fator antinutricional nos grãos pela sua interação com proteínas e sais minerais. Por essas razões, ressalva-se a importância de análises como esta, a qual destaca-se por fornecer informações não apenas da concentração do nutriente nos grãos, mas também, a forma em que este nutriente se encontra.

Nos dois primeiros experimentos em que foram empregados tratamentos quantitativos (diferentes concentrações de fósforo na solução nutritiva) foi possível observar, para a maioria dos caracteres analisados, resposta quadrática das cultivares e épocas de cultivo. Este fato reforçou ainda mais a necessidade de desenvolver estudos como estes, uma vez que comprova

existir um limite na absorção e utilização do nutriente pelas plantas, onde a aplicação acima deste limite não proporcionará maiores respostas, apenas acarretará no aumento dos custos de produção. O agricultor não usa adubos com o objetivo apenas de aumentar sua produtividade. O agricultor usa e deve usar insumos a fim de aumentar o seu lucro, ou seja, a relação benefício/custo. Para isso, o que interessa não é a busca da Produtividade Máxima (PM) mas a Produtividade Máxima Econômica (PME), isto é, o nível de produtividade que proporciona o maior lucro (EMBRAPA, 1980). Ainda com relação aos dois primeiros estudos, cabe salientar o caráter inovador com a avaliação das plantas durante todo o ciclo da cultura, fornecendo importantes informações a respeito da interferência da nutrição com fósforo principalmente no que tange aos caracteres produtivos.

O terceiro artigo avaliou a variabilidade genética de linhagens avançadas de feijão quanto ao acúmulo de fósforo nos tecidos vegetais e produtividade, além de identificar aquelas eficientes no uso de fósforo e responsivas. Assim, foi possível afirmar que as linhagens de feijão respondem de modo diferenciado a deficiência de fósforo. Além disso, o estudo permitiu identificar linhagens promissoras quanto à eficiência de uso e resposta como: L 2527, L 2625 e L 2528, que mostraram-se eficientes e responsivas para alguns caracteres. A identificação de populações de plantas que possuem capacidade de absorver e utilizar o fósforo de forma eficiente é extremamente importante, pois possibilita a redução dos custos de produção, a utilização de menor quantidade de nutrientes e a conservação do agroecossistema (FIDELIS, 2010). No melhoramento de plantas para a identificação de cultivares eficientes na absorção e utilização do nutriente é necessário estabelecer métodos rápidos, de baixo custo e que permitam discriminar germoplasmas com alta repetibilidade dos resultados e avaliar grande quantidade de plantas, famílias ou populações.

Um aspecto importante neste estudo foi considerar mais de um ambiente, não se restringindo a apenas um como normalmente ocorre nos estudos de eficiência de uso. Analisaram-se duas épocas de cultivo, ou seja, dois ambientes contrastantes, o que garante selecionar simultaneamente linhagens com boa tolerância ao estresse e capazes de responder a melhorias nas duas condições.

O ponto desfavorável do estudo de eficiência de uso e resposta de fósforo em solução nutritiva é que, sendo o fósforo um nutriente absorvido via difusão, é difícil em solução nutritiva, obter um ambiente que imponha as mesmas restrições de acesso ao nutriente que acontecem no solo. Portanto, todas as informações obtidas quanto à resposta das linhagens de feijão no comportamento de visando à seleção pela eficiência no uso e resposta ao fósforo necessitam ser validadas em experimentos a campo, o que poderá, no futuro, credenciar essas

linhagens para serem submetidas ao processo de registro e disponibilizadas futuramente aos produtores.

## 6 CONCLUSÕES

Concentrações de fósforo na solução nutritiva entre 1,33 e 1,84 mmol L<sup>-1</sup> proporcionam maior massa seca das vagens, dos grãos, número de grãos e produtividade de grãos, para as cultivares Pérola e IPR88 Uirapurú, nos cultivo de outono-inverno e primavera-verão. Já as concentrações entre 1,37 e 1,96 mmol L<sup>-1</sup> acarretam os maiores valores de fósforo nos tecidos da planta, de produtividade de grãos e de ácido fítico.

Os caracteres de massa seca das folhas, caule e vagens no enchimento de vagens, massa seca dos grãos na maturação, número de grãos, número de vagens e concentração de fósforo nos tecidos vegetais no estágio enchimento de vagens são promissores por permitir seleção indireta.

O valor nutricional das folhas em plantas jovens, para fósforo, se equivale ao dos grãos.

Existe variabilidade genética entre as linhagens de feijão estudadas, para produção de massa seca, produtividade e acúmulo de fósforo nos tecidos.

A linhagem L 2527 mostrou-se eficiente e responsiva ao uso de fósforo para a parte aérea da planta.

A linhagem L 2225 mostrou ser eficiente no uso de fósforo na parte aérea, nos grãos e na produção de grãos, além de manter esta característica nas duas épocas de cultivo.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. A. et al. Produtividade, crescimento e partição de matéria seca em duas cultivares de feijão. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringa, v. 31, n. 4, p. 683 - 688, 2009.
- CAO, H. et al. Chromosomal location of traits associated with wheat seedling water and phosphorus use efficiency under diferente water and phosphorus stress. **International Journal of Molecular Sciences**, St. Alban, v. 10, n. 2, p. 4116 - 4136, 2009.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas: Feijão 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> safra.** Disponível em: [http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_obj](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_obj). Acesso em: 15 de fev. 2016.
- CORDELL D., DRANGERT J.O., WHITE S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Ontário, v. 1, n. 9, p. 292 - 305, 2009.
- CRUCIOL, C. A. C. et. al., Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 643 - 649, 2005.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Projeto “Racionalização do uso de insumos”. Sub-projeto “Pesquisa em racionalização de fertilizantes e corretivos na agricultura”. Brasília, DF, 78 p. 1980.
- FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; STONE, L. F. Nutrição de fósforo na produção de feijoeiro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: **Potafós**, p. 435 - 456, 2004.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de Plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 186 p., 2005.
- FIDELIS, R. R. Classificação de populações de milho quanto à eficiência e resposta ao uso de fósforo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 241 - 246, 2010.
- FOHSE, D. et al. Phosphorus efficiency of plants. **Plant and Soil**, Crawley, v. 110, n. 1, p. 101 - 109, 1988.
- FURLANI, P. R.; FERNANDEZ JÚNIOR F. Cultivo hidropônico de morango em ambiente protegido. In: **Anais do Simpósio Nacional do Morango & Encontro De Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul**, ed by CORRÊA ANTUNEZ L. E., Embrapa, Pelotas, p. 102 - 115, 2004.
- GABELMAN, W. H. Genetic potenciais in nitrogen, phosphorus and potassium efficiency. In: Proceedings of workshop on plant adaptations to mineral stress in problem soils. Beltsville, p. 205 - 212, 1976.
- GOULEY, C. J. P. et al. Plant nutrient efficiency: a comparison na suggested improvement. **Plant and Soil**, Crawley, v. 158, n. 1, p. 29 - 37, 1994.

GUIMARÃES, P. E. O., CORREIA, L. A. Adaptabilidade e Estabilidade de Genótipos Avaliados no Ensaio Nacional de Milho Precoce nas safras de 1999-2000 e 2000-2001. IN Congresso Brasileiro de Milho e Sorgo, Florianópolis, 2002.

KIKUTI, H. et. al., Nitrogênio e fósforo em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade cultivada BRS MG Talismã. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 3, p. 415 - 422, 2005.

LEAL, R. M.; PRADO, R. M. Desordens nutricionais no feijoeiro por deficiência de macronutrientes, boro e zinco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 3, n. 4, p. 301 - 306, 2008.

LOARCE, Y.; GALLEGU, R.; FERRER, E. A comparative analysis of the genetic relationship between rye cultivars using RFLP and RAPD markers. **Euphytica**, Wageningen, v. 88, n. 8, p. 107 - 115, 1996.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. Avaliação do estado nutricional das plantas. 2 ed. Piracicaba: **Potafós**, 319 p. 1997.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. In.: (ed.) MARSCHNER, P. 3° ed. Academic Press, 2012. p. 651.

MAZIERO, S. M.; RIBEIRO, N. D.; FACCO, H. S. Genetic parameters of agronomic and nutritional traits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) populations with biofortified grains. **Australian of Journal Crop Science**, East Melbourne, v. 10, n. 6, p. 824 - 830, 2016.

MENTEN, J. O. M et al. Qualidade das sementes de feijão no Brasil. **Pesquisa & Tecnologia**, Campinas, v. 3, n. 8, p. 22 - 27, 2006.

MOURA, W. M. et al. Eficiência nutricional para fósforo em linhagens de pimentão. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 306 - 312, 2001.

OLIVEIRA, A. P. et al. Rendimento de feijão-caupi cultivado com esterco bovino e adubo mineral. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 1, p. 81 - 84, 2011.

PASTORINI, et al., Crescimento inicial de feijoeiro submetido a doses de fósforo em solução nutritiva. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 47, n. 270, p. 219 - 228, 2000.

RAMOS FILHO, E. D. Níveis de fósforo e épocas de semeadura na extração de nutrientes do cultivar de feijão carioca precoce. **Tese (Doutorado) – Universidade** estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 152 p., 2006.

ROTILI, E. A. et. al., Eficiência do uso e reposta à aplicação de fósforo de cultivares de arroz em solos de Terras Altas. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 8, p. 705 - 710, 2010.

SILVA, C. C.; SILVEIRA, P. M. da. Influência de sistemas agrícolas na resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado à adubação nitrogenada em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 30, n. 1, p.86 - 96, 2000.

SOUTO, J. A. et al. Efeito da aplicação de fósforo no desenvolvimento de plantas de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L) millsp). **Revista Verde**, Olinda, v. 4 n. 1, p. 135 - 140, 2009.



QUIRRENBACH, H. R. et al Comportamento do ácido fítico na presença de Fe(II) e Fe(III). **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, Campinas, v. 29, p. 1, p. 24 - 32, 2009.

WHITEAKER, G. et al. Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Philadelphia, v. 101, n. 1, p. 472 - 475, 1976.

ZUCARELI, C. et al. Adubação fosfatada, componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica em sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 9 - 15, 2006.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
U	P	U	P
<i>BANCADA A</i>			

**0,5 mmol L<sup>-1</sup>**  
**Fósforo**

U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
U	U	P	P
<i>BANCADA B</i>			

**0,9 mmol L<sup>-1</sup>**  
**Fósforo**

P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
P	P	U	U
<i>BANCADA C</i>			

**1,3 mmol L<sup>-1</sup>**  
**Fósforo**

P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
P	U	U	P
<i>BANCADA D</i>			

**1,9 mmol L<sup>-1</sup>**  
**Fósforo**

P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
P	U	P	U
<i>BANCADA E</i>			

**2,3 mmol L<sup>-1</sup>**  
**Fósforo**

Croqui demonstrativo das unidades experimentais.

**APÊNDICE B**

Imagem do sistema de dispositivo fora do solo e reservatório da solução nutritiva, com capacidade de 245 l.

## APÊNDICE C

Análise de variância para massa seca das folhas e caule em terceira folha trifoliada (MSFolha V4, g; MSCaule V4, g); das folhas e caule em floração (MSFolha R6, g; MSCaule R6, g); das folhas, caule e vagens em enchimento das vagens (MSFolha R8, g; MSCaule R8, g; MSV R8, g); e dos grãos na maturação (MSG R9, g); número de vagens (NV R9), número de grãos (NG R9) e produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>), avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva (Conc, C), para dois genótipos de feijão (Genótipo, G) cultivados em duas épocas de semeadura (Época, E). Santa Maria - RS, UFSM.

Quadrado Médio							
FV	GL	MSFolha V4	MSCaule V4	MSFolha R6	MSCaule R6	MSFolha R8	MSCaule R8
Conc (C)	4	0,87 *	0,31 *	16,10 *	1,67 <sup>ns</sup>	43,15 *	13,44 *
Grau 1	1	2,87 *	0,12 *	58,93 *	2,48 *	21,50 *	48,07 *
Grau 2	1	0,33 *	0,44 *	4,41 *	3,42 *	130,77 *	5,60 *
Grau 3	1	0,20 *	0,40 *	0,17 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	17,81 *	0,05 <sup>ns</sup>
Desvios	1	0,07 <sup>ns</sup>	0,30 *	0,92 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	2,52 *	0,05 <sup>ns</sup>
Erro C	8	0,03	0,05	0,33	0,52	0,48	0,43
Gen (G)	1	0,27 *	1,59 *	38,22 *	17,13 *	19,25 *	1,77 <sup>ns</sup>
Erro G	10	0,03	0,06	0,52	0,47	1,78	0,46
Época (E)	1	1,67 *	12,68 *	602,74 *	1,40 <sup>ns</sup>	726,55 *	107,15 *
Erro E	10	0,01	0,06	0,19	0,62	0,50	0,23
C x G	4	0,31 *	0,22 *	2,72 *	1,48 <sup>ns</sup>	3,57 <sup>ns</sup>	7,20 *
C x E	4	0,18 *	0,08 <sup>ns</sup>	11,66 *	4,40 *	35,88 *	2,32 *
G x E	1	1,52 *	0,08 <sup>ns</sup>	66,38 *	4,30 *	35,90 *	0,79 <sup>ns</sup>
C x G x E	4	0,61 *	0,06 <sup>ns</sup>	1,78 *	1,87 <sup>ns</sup>	2,67 <sup>ns</sup>	4,87 *
Erro	12	0,01	0,05	0,41	0,86	1,66	0,32
Média		0,74	0,99	4,07	3,73	4,74	3,19
CV (%)		11,9 <sup>1</sup> - 13,4 <sup>2</sup> - 14,5 <sup>3</sup> - 14,5 <sup>4</sup>	13,8 <sup>1</sup> - 15,6 <sup>2</sup> - 14,0 <sup>3</sup> - 12,7 <sup>4</sup>	14,1 <sup>1</sup> - 17,7 <sup>2</sup> - 10,6 <sup>3</sup> - 15,7 <sup>4</sup>	19,4 <sup>1</sup> - 18,5 <sup>2</sup> - 21,2 <sup>3</sup> - 24,8 <sup>4</sup>	14,7 <sup>1</sup> - 18,2 <sup>2</sup> - 14,9 <sup>3</sup> - 17,2 <sup>4</sup>	10,6 <sup>1</sup> - 11,4 <sup>2</sup> - 14,9 <sup>3</sup> - 17,9 <sup>4</sup>
FV	GL	MSV R8	MSG R9	NV R9	NG R9	Prod	
Conc (C)	4	38,25 *	157,14 *	72,82 *	1545,85 *	198,23 *	
Grau 1	1	5,26 *	173,47 *	87,83 *	1751,43 *	130,58 *	
Grau 2	1	107,66 *	366,90 *	151,90 *	3131,25 *	424,64 *	
Grau 3	1	39,26 *	76,77 *	47,06 *	596,62 *	202,10 *	
Desvios	1	0,84 <sup>ns</sup>	11,42 *	4,47 <sup>ns</sup>	704,10 *	35,62 *	
Erro C	8	0,54	0,34	2,65	28,45	1,60	
Gen (G)	1	8,51 *	15,34 *	2,40 <sup>ns</sup>	176,82 *	136,70 *	
Erro G	10	0,40	1,06	2,73	31,22	2,08	
Época (E)	1	118,72 *	742,03 *	1126,67 *	26000,02 *	1663,48 *	
Erro (E)	10	0,48	1,08	1,70	27,15	2,23	
C x G	4	4,00 *	34,20 *	1,07 <sup>ns</sup>	151,32 *	9,00 *	
C x E	4	5,16 *	28,23 *	13,08 *	314,18 *	52,22 *	
G x E	1	2,82 *	41,67 *	1,07 <sup>ns</sup>	1411,35 *	142,79 *	
C x G x E	4	1,06 <sup>ns</sup>	5,91 *	0,73 <sup>ns</sup>	44,52 <sup>ns</sup>	31,05 *	
Erro	12	0,46	1,20	3,92	24,50	3,12	
Média		4,77	9,08	9,80	44,48	11,57	
CV		15,4 <sup>1</sup> - 13,2 <sup>2</sup> - 14,6 <sup>3</sup> - 14,3 <sup>4</sup>	6,5 <sup>1</sup> - 11,3 <sup>2</sup> - 11,4 <sup>3</sup> - 12,1 <sup>4</sup>	16,6 <sup>1</sup> - 16,9 <sup>2</sup> - 13,3 <sup>3</sup> - 20,2 <sup>4</sup>	12,0 <sup>1</sup> - 12,6 <sup>2</sup> - 11,7 <sup>3</sup> - 11,1 <sup>4</sup>	10,9 <sup>1</sup> - 12,5 <sup>2</sup> - 12,9 <sup>3</sup> - 15,3 <sup>4</sup>	

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo. <sup>1</sup> Coeficiente de variação da parcela principal. <sup>2</sup> Coeficiente de variação da sub-parcela. <sup>3</sup> Coeficiente de variação da sub-sub-parcela. <sup>4</sup> Coeficiente de variação da interação CxGxE.

## APÊNDICE D

Análise de variância e de regressão para a concentração de fósforo nas folhas na terceira folha trifoliada (V4) (PFolha V4) e no caule em V4 (PCaule V4); nas folhas na floração (R6) (PFolha R6) e no caule em R6 (PCaule R6) nas folhas no enchimento das vagens (R8) (PFolha R8), no caule em R8 (PCaule R8) e nas vagens em R8 (PVagem R8); nos grãos na maturação (R9) (PGrão R9); produtividade de grãos (Prod) e concentração de ácido fítico nos grãos (Ac.Fit.) na maturação, avaliados em cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva (Conc, C), para dois genótipos de feijão (Genótipo, G) cultivados em duas épocas de semeadura (Época, E). Santa Maria - RS, UFSM.

Quadrado Médio						
FV	GL	PFolhaV4	PCauleV4	PFolhaR6	PCauleR6	PFolhaR8
Conc (C)	4	21,512 *	5,368 *	15,005 *	10,708 *	20,298 *
Grau 1	1	56,765 *	21,122 *	58,291 *	23,525 *	55,873 *
Grau 2	1	25,127 *	17,409 *	1,544 ns	14,297 *	17,842 *
Grau 3	1	2,831 *	0,912 ns	0,050 ns	0,200 ns	6,317 *
Desvios	1	1,322 ns	0,425 ns	0,137 ns	4,811 *	1,161 ns
Erro C	8	0,270	1,385	0,549	0,152	0,267
Gen (G)	1	3,315 *	0,184 *	4,704 *	0,086 ns	0,062 ns
Erro G	10	0,276	1,064	0,401	0,029	0,212
Época (E)	1	28,893 *	2,507 *	29,765 *	2,170 *	45,885 *
Erro E	10	0,342	1,235	0,273	0,139	0,245
C x G	4	4,717 *	0,743 ns	0,541 ns	0,877 *	2,135 *
C x E	4	1,279 *	1,856 ns	12,169 *	2,556 *	0,957 *
G x E	1	4,774 *	0,286 *	1,291 *	0,021 ns	8,059 *
C x G x E	4	1,119 ns	0,275 ns	1,944 *	0,478 *	1,338 *
Erro	12	0,513	1,401	0,268	0,134	0,321
Média		5,554	3,350	4,962	3,127	3,864
CV (%)		9,4 <sup>1</sup> - 9,5 <sup>2</sup> - 10,5 <sup>3</sup> - 12,9 <sup>4</sup>	15,1 <sup>1</sup> - 7,7 <sup>2</sup> - 13,1 <sup>3</sup> - 15,3 <sup>4</sup>	14,9 <sup>1</sup> - 12,8 <sup>2</sup> - 10,5 <sup>3</sup> - 10,4 <sup>4</sup>	12,5 <sup>1</sup> - 5,4 <sup>2</sup> - 11,9 <sup>3</sup> - - 11,7 <sup>4</sup>	13,4 <sup>1</sup> - 11,9 <sup>2</sup> - 12,8 <sup>3</sup> - 14,7 <sup>4</sup>
FV	GL	PCauleR8	PVagemR8	PGrãoR9	Ac.Fit.	
Conc (C)	4	10,588 *	4,366 *	2,490 *	3,421 *	
Grau 1	1	41,331 *	3,892 *	4,149 *	8,807 *	
Grau 2	1	0,820 ns	8,025 *	5,239 *	3,763 *	
Grau 3	1	0,061 ns	4,864 *	0,429 ns	0,870 *	
Desvios	1	0,139 ns	0,684 *	0,142 ns	0,246 *	
Erro C	8	0,190	0,039	0,207	0,008	
Gen (G)	1	7,554 *	17,067 *	0,132 ns	1,115 *	
Erro G	10	0,078	0,113	0,143	0,031	
Época (E)	1	48,008 *	61,448 *	11,810 *	1,161 *	
Erro (E)	10	0,192	0,152	0,158	0,024	
C x G	4	0,615 *	0,082 ns	0,438 ns	0,247 *	
C x E	4	1,150 *	0,623 *	0,341 ns	0,380 *	
G x E	1	6,888 *	7,336 *	0,490 *	3,267 *	
C x G x E	4	0,306 ns	0,443 ns	0,675 *	0,8637 ns	
Erro	12	0,100	0,151	0,096	0,022	
Média		2,669	3, 219	4,797	2,064	
CV (%)		6,1 <sup>1</sup> - 10,4 <sup>2</sup> - 12,1 <sup>3</sup> - 11,9 <sup>4</sup>	6,1 <sup>1</sup> - 10,4 <sup>2</sup> - 12,1 <sup>3</sup> - 12,1 <sup>4</sup>	9,5 <sup>1</sup> - 7,9 <sup>2</sup> - 8,3 <sup>3</sup> - 6,4 <sup>4</sup>	4,3 <sup>1</sup> - 8,5 <sup>2</sup> - 7,6 <sup>3</sup> - 7,3 <sup>4</sup>	

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo.

<sup>1</sup> Coeficiente de variação da parcela principal. <sup>2</sup> Coeficiente de variação da sub-parcela. <sup>3</sup> Coeficiente de variação da sub-sub-parcela. <sup>4</sup> Coeficiente de variação da interação CxGxE.

## APÊNDICE E

Análise de variância para os caracteres de massa seca das folhas (MSFolha, g), caule (MSCaule, g), vagens (MSV, g); componentes da produtividade, número de vagens (NVagem), número de grãos (NGrão) e produtividade de grãos (Prod, g planta<sup>-1</sup>); concentração de fósforo nas folhas (PFolha, g Kg<sup>-1</sup> de matéria seca - MS), caule (PCaule, g Kg<sup>-1</sup> de MS), vagens (PVagem, g Kg<sup>-1</sup> de MS) e nos grãos (PGrãos, g Kg<sup>-1</sup> de MS); avaliados em 12 genótipos de feijão, submetidos a duas concentrações de fósforo na solução nutritiva em duas épocas de cultivo. Santa Maria - RS, UFSM.

Quadrado Médio						
Fonte de variação	Grau de liberdade	MSFolha	MSCaule	MSVgem	Nvagem	NGrão
Conc (C)	1	574,05 *	275,52 *	110,66 *	923,13 *	16632,13 *
Erro C	3	3,26	0,74	0,75	0,09	7,30
Gen (G)	11	12,70 *	13,13 *	13,93 *	31,39 *	480,41 *
Erro G	66	0,60	0,51	0,30	1,36	13,74
Época (E)	1	26,41 *	190,01 *	4,80 *	619,92 *	14473,38 *
Erro E	6	0,27	0,20	0,24	1,48	25,95
C x G	11	6,08 *	2,13 *	11,51 *	10,84 *	255,97 *
C x E	1	0,88 <sup>ns</sup>	6,23 *	18,11 *	30,88 *	1296,88 *
G x E	11	4,03 *	1,43 *	6,57 *	8,60 *	305,18 *
C x G x E	11	7,20 *	8,01 *	8,48 *	6,93 *	258,11 *
Erro	46	0,45	0,46	0,43	1,48	8,32
Média		5,18	4,98	3,43	7,48	27,25
CV (%)		14,9 <sup>1</sup> - 15,0 <sup>2</sup> - 10,0 <sup>3</sup> - 12,9 <sup>4</sup>	17,3 <sup>1</sup> - 14,3 <sup>2</sup> - 8,9 <sup>3</sup> - 13,7 <sup>4</sup>	15,3 <sup>1</sup> - 16,1 <sup>2</sup> - 14,3 <sup>3</sup> - 19,1 <sup>4</sup>	4,0 <sup>1</sup> - 15,6 <sup>2</sup> - 16,3 <sup>3</sup> - 16,2 <sup>4</sup>	9,9 <sup>1</sup> - 13,6 <sup>2</sup> - 18,7 <sup>3</sup> - 10,6 <sup>4</sup>

Fonte de variação	Grau de liberdade	Prod	Pfolha	Pcaule	Pvagem	Pgrão
Conc (C)	1	3095,65 *	486,34 *	409,90 *	247,21 *	296,05 *
Erro C	2	3,16	0,15	0,25	0,12	0,09
Gen (G)	11	53,13 *	4,98 *	1,50 *	1,20 *	1,39 *
Erro G	44	2,28	0,45	0,16	0,21	0,31
Época (E)	1	755,61 *	25,39 *	38,73 *	63,33 *	64,25 *
Erro (E)	4	5,93	0,29	0,28	0,22	0,22
C x G	11	51,20 *	4,19 *	0,91 *	0,52 *	3,02 *
C x E	1	338,81 *	0,46 <sup>ns</sup>	5,04 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>
G x E	11	61,23 *	5,77 *	1,54 *	0,96 *	1,23 *
C x G x E	11	52,14 *	4,50 *	0,67 *	0,52 <sup>ns</sup>	4,34 *
Erro	46	2,05	0,48	0,12	0,30	0,25
Média		9,78	3,23	2,66	3,45	4,46
CV		18,2 <sup>1</sup> - 15,4 <sup>2</sup> - 14,9 <sup>3</sup> - 14,6 <sup>4</sup>	11,9 <sup>1</sup> - 12,6 <sup>2</sup> - 16,7 <sup>3</sup> - 12,4 <sup>4</sup>	8,8 <sup>1</sup> - 14,9 <sup>2</sup> - 9,8 - 13,0	9,9 <sup>1</sup> - 13,1 <sup>2</sup> - 13,5 <sup>3</sup> - 15,8 <sup>4</sup>	6,6 <sup>1</sup> - 12,4 <sup>2</sup> - 10,5 <sup>3</sup> - 11,3 <sup>4</sup>

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo. <sup>1</sup> Coeficiente de variação da parcela principal. <sup>2</sup> Coeficiente de variação da sub-parcela. <sup>3</sup> Coeficiente de variação da sub-sub-parcela. <sup>4</sup> Coeficiente de variação da interação CxGxE.

## ANEXO

## ANEXO A

Fase	Etapa		Evento con que se inicia cada etapa
	Código	Nombre	
Vegetativa	V0	Germinación	La semilla está en condiciones favorables para iniciar la germinación
	V1	Emergencia	Los cotiledones del 50% de las plantas aparecen al nivel del suelo
	V2	Hojas primarias	Las hojas primarias del 50% de las plantas están desplegadas
	V3	Primera hoja trifoliada	La primera hoja trifoliada del 50% de las plantas está desplegada
	V4	Tercera hoja trifoliada	La tercera hoja trifoliada del 50% de las plantas está desplegada

Fase	Etapa		Evento con que se inicia cada etapa
	Código	Nombre	
Reproductiva	R5	Prefloración	Los primeros botones o racimos han aparecido en el 50% de las plantas
	R6	Floración	Se ha abierto la primera flor en el 50% de las plantas
	R7	Formación de las vainas	Al marchitarse la corola, en el 50% de las plantas aparece por lo menos una vaina
	R8	Llenado de las vainas	Llenado de semillas en la primera vaina en el 50% de las plantas
	R9	Maduración	Cambio de color en por lo menos una vaina en el 50% de las plantas (del verde al amarillo uniforme o pigmentado)

Escala fenológica, descrita por Fernandez et al. (1982).