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

Skarlet De Marco Steckling

PARÂMETROS GENÉTICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO MESOAMERICANO PARA A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, FERRO, ZINCO E FITATOS

Santa Maria, RS
2018

Skarlet De Marco Steckling

PARÂMETROS GENÉTICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO MESOAMERICANO PARA A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, FERRO, ZINCO E FITATOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agronomia.**

Orientadora: Prof[a]. Dr[a]. Nerinéia Dalfollo Ribeiro

Santa Maria, RS
2018

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

Steckling, Skarlet De Marco
Parâmetros genéticos e seleção de linhagens de feijão Mesoamericano para a concentração de fósforo, ferro, zinco e fitatos / Skarlet De Marco Steckling.- 2018.
61 f.; 30 cm

Orientadora: Nerinéia Dalfollo Ribeiro
Coorientador: Alessandro Dal'Col Lúcio
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Agronomia, RS, 2018

1. Phaseolus vulgaris L. 2. Biofortificação 3. Herdabilidade 4. Padrão de herança I. Ribeiro, Nerinéia Dalfollo II. Lúcio, Alessandro Dal'Col III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2018
Todos os direitos autorais reservados a Skarlet De Marco Steckling. A reprodução de qualquer parte deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.
Endereço: Senador Nereu Ramos 339, Centro, Iraceminha - SC, 89891-000.
Endereço eletrônico: kati_ste@hotmail.com

Skarlet De Marco Steckling

PARÂMETROS GENÉTICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO MESOAMERICANO PARA A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, FERRO, ZINCO E FITATOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agronomia.**

Aprovado em 17 de julho de 2018:

Nerinéia D. Ribeiro

Nerinéia Dalfollo Ribeiro, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Joel Donazzolo, Dr. (UFTPR)

Rogério Luiz Backes, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo e, de uma maneira especial, agradeço:

- a Deus por sempre iluminar e abençoar o meu caminho.

- a minha família, por ser a base de tudo que sou. E de uma forma muito especial, aos meus pais Alda Fátima De Marco e Cleiton Steckling, pela total dedicação, paciência e auxílio nos momentos de incertezas, além do apoio e incentivo prestados a mim durante toda esta trajetória.

- à Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do Mestrado.

- ao Laboratório de Piscicultura da Universidade Federal de Santa Maria, pelo auxílio, infraestrutura e materiais emprestados, para a determinação das análises de ácido fítico.

- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de estudo.

- a minha orientadora Profª. Drª. Nerinéia Dalfollo Ribeiro, pela oportunidade em me orientar, pela amizade, ensinamentos, compreensão e paciência ao longo de todos esses anos.

- aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, especialmente ao João Colpo, pela amizade, risadas e auxílio prestado no preparo da área dos experimentos.

- aos colegas do Grupo de Pesquisa em Melhoramento e Manejo do Feijão, pela amizade e companheirismo em todas as atividades desenvolvidas durante o período. Em especial ao Cleiton Casagrande e ao Henrique Mezzomo, por toda paciência, ajuda e tomada de decisão durante a condução dos experimentos.

- a todos os amigos e colegas desde a graduação, em especial a Priscila Barbieri Zini e Priscila Lany Rex Silva, que contribuíram para a conclusão dessa etapa muito importante da minha formação.

- as minha amigas de infância Claudia Steckling, Dhiely Cappelletto e Pâmela Mezzomo pela amizade, apoio e companheirismo de toda a vida.

Muito obrigada!

RESUMO

PARÂMETROS GENÉTICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO MESOAMERICANO PARA A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, FERRO, ZINCO E FITATOS

AUTORA: Skarlet De Marco Steckling
ORIENTADORA: Nerinéia Dalfollo Ribeiro

O conhecimento de parâmetros genéticos de caracteres que minimizem o efeito antinutricional dos fitatos, e que auxiliem no desenvolvimento de cultivares de feijão biofortificadas para fósforo, ferro e zinco, contribui para diminuir as deficiências destes minerais na população. Portanto, foram objetivos desse trabalho: (1) obter estimativas de herdabilidade para a concentração de fósforo, ferro, zinco e fitatos em linhagens $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$ de feijão do grupo Mesoamericano; (2) analisar o padrão de herança desses caracteres; e (3) selecionar linhagens $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$ com alta concentração de fósforo, ferro e zinco e baixa concentração de fitatos em grãos de feijão do grupo Mesoamericano. Para tanto, foram avaliadas 100 linhagens de feijão obtidas a partir do cruzamento entre as cultivares BRS Esteio × SCS205 Riqueza, as quais eram contrastantes para ferro e zinco e coloração dos grãos. Dois experimentos a campo foram conduzidos na área experimental do Programa de Melhoramento de feijão da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria - RS. Na safrinha de 2017, o experimento foi conduzido em delineamento de blocos aumentados e foram avaliados 103 tratamentos, sendo 100 linhagens da geração $F_{5:6,}$ os dois parentais e a cultivar Pérola. O experimento realizado na safra de 2017/2018, e conduzido no delineamento de látice simples 11 x 11, avaliou um total de 121 tratamentos, sendo 100 linhagens da geração $F_{5:7}$, os dois parentais e 19 cultivares de feijão. Altas estimativas de herdabilidade foram obtidas na geração $F_{5:6}$ para todos os minerais e fitatos, superando 97,47%. Enquanto que na geração $F_{5:7}$, as estimativas de herdabilidade variaram de baixa magnitude para fósforo (30,31%) a alta para fitatos (73,63%). As concentrações de fósforo, ferro, zinco e fitatos apresentaram herança quantitativa, evidenciando efeitos de muitos genes no controle desses caracteres. As linhagens L33-17 e L55-17 possuem consideráveis concentrações de fósforo, ferro e zinco na geração $F_{5:6.}$ Nesta geração as linhagens L1-17 e L61-17 exibiram alta concentração de zinco e baixa concentração de fitatos. Já, na geração $F_{5:7,}$ as linhagens L34-17, L65-17, L61-17 e L89-17 mostraram-se com concentrações dos minerais dentro do limite esperado para grãos de feijão do grupo Mesoamericano. A linhagem L56-17 (geração $F_{5:7}$) mostrou-se com alta concentração de ferro. Nenhuma linhagem apresenta baixa concentração de fitatos nos grãos na geração $F_{5:7}$. A linhagem L61-17 possui concentrações de fósforo, ferro, zinco superiores da média das linhagens avaliada e baixa concentração de fitatos nos grãos e deve ser selecionada pelo programa de melhoramento.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.. Biofortificação. Herdabilidade. Padrão de herança.

ABSTRACT

GENETIC PARAMETERS AND SELECTION OF MESOAMERICAN BEAN LINES FOR THE CONCENTRATION OF PHOSPHORUS, IRON, ZINC AND PHYTATES

AUTHOR: SKARLET DE MARCO STECKLING
ADVISOR: NERINÉIA DALFOLLO RIBEIRO

The knowledge of genetic parameters of characters that minimize the antinutritional effect of phytates, and that help in the development of biofortified common bean cultivars for phosphorus, iron and zinc, is contributes to reduce the deficiencies of these minerals in the population. Therefore, the objectives of this work were: (1) to obtain estimates of heritability for concentration of phosphorus, iron, zinc and phytates in F5:6 and F5:7 bean lines of the Mesoamerican group; (2) to analyze the inheritance pattern of phosphorus, iron, zinc and phytate concentrations in $F_{5:6}$ and $F_{5:7}$ Mesoamerican beans; and (3) to select $F_{5:6}$ and $F_{5:7}$ lines with high phosphorus, iron and zinc concentrations and low concentration of phytates in Mesoamerican bean grains. For this, 100 bean lines obtained from the previous cross between BRS Esteio × SCS205 Riqueza parental were used, which were contrasting for iron and zinc and tegument coloration. Segregant populations were evaluated in two field experiments in the experimental area of the Bean Breeding Program of the Federal University of Santa Maria, Santa Maria-RS. At the beginning of 2017, under the augmented block designs, 103 treatments were analyzed, of which 100 were lineages of the generation $F_{5:6}$, the parents and the cultivar Pérola. The experiment was carried out in the 2017/2018, and conducted in the 11 x 11 simple lattice design, evaluated a total of 121 treatments, where 100 were $F_{5:7}$ generations, the parental and 19 cultivars. . High heritability estimates were generated in $F_{5:6}$ for all minerals and phytate of the evaluated strains, surpassing 97,47%. While the generation $F_{5:7}$, is a variable of variable heritability of low magnitude for phosphorus (30,31%) the high for phytates (73,63%). The combinations of phosphorus, iron, zinc and phytate are the quantitative inheritance, evidencing one of many genes in the control of these characters. The L33-17 and L55-17 lines are considered sequences of phosphorus, iron and zinc in the generation $F_{5:6}$, and high concentration of zinc and phytate low in the same generation, was verified in the L1-17 and L61-17 lines. In the $F_{5:7}$ generation, the L34-17, L65-17, L61-17 and L89-17 lines receive the minerals from the minerals within the range expected for Mesoamerican group bean grains. The L56-17 line (generation $F_{5:7}$) showed a high iron concentration. No line has low phytate content in generation $F_{5:7}$. The L61-17 line has phosphorus, iron, zinc units higher than the lines mean and low concentration of phytate in the grains and should be selected by the Breeding Program.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.. Biofortification. Heritability. Inheritance pattern.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dados meteorológicos de precipitação (Precip, mm), temperatura mínima (Temp Mín, °C), temperatura máxima (Temp Máx, °C) e umidade relativa média do ar (UR, %) diários, obtidos nos cultivos de safrinha 2017 e de safra 2017/2018, no 8º Distrito de Meteorologia, na Estação Meteorológica de Santa Maria, localizada na Universidade Federal de Santa Maria, RS. 29

Figura 2 - Distribuição de frequência para a concentração de fósforo (g kg^{-1} de matéria seca - MS), ferro (mg kg^{-1} de MS), zinco (mg kg^{-1} de MS) e fitatos (%) em grãos de feijão do grupo Mesoamericano avaliados nas gerações $F_{5:6}$ (safrinha 2017) e $F_{5:7}$ (safra 2017/2018), obtidos do cruzamento entre os parentais BRS Esteio (P1) e SCS 205 Riqueza (P2). 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matéria orgânica (M.O.), saturação de bases (V), pH (H_2O), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), cálcio (Ca), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), potássio (K) e fósforo (P) do solo da área experimental do Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, RS, realizada para safrinha 2017 e safra 2017/2018.....28

Tabela 2 - Análise de variância, estimativas de médias e de parâmetros genéticos para a concentração de fósforo (g kg^{-1} de matéria seca - MS), ferro (mg kg^{-1} de MS), zinco (mg kg^{-1} de MS) e fitatos (%) em grãos de 100 linhagens de feijão, parentais e testemunhas avaliados nas gerações $F_{5:6}$ (safrinha 2017) e $F_{5:7}$ (safra 2017/2018). Santa Maria-RS, UFSM, 2018.....35

Tabela 3 - Classificação das 20 linhagens de feijão do grupo Mesoamericano com as maiores concentrações de fósforo (g kg^{-1} de matéria seca - MS), ferro (mg kg^{-1} de MS), zinco (mg kg^{-1} de MS) e menor concentração de fitatos (%) obtidos para as 100 linhagens avaliadas nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, nos períodos de cultivo safrinha 2017 e safra 2017/2018 obtidos em Santa Maria, RS.....47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 REVISÃO DE LITERATURA 15
2.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO FEIJÃO 15
2.2 CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, FERRO E DE ZINCO EM GRÃOS DE FEIJÃO 16
2.3 FITATOS EM GRÃOS DE FEIJÃO 18
2.4 BIOFORTIFICAÇÃO POR MELHORAMENTO GENÉTICO 20
2.5 PARÂMETROS GENÉTICOS 21
3 MATERIAL E MÉTODOS 27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
5 CONCLUSÕES 51
REFERÊNCIAS 52

1 INTRODUÇÃO

A má nutrição afeta mundialmente uma a cada nove pessoas (FAO, 2015), de todas as faixas etárias, gêneros e níveis sociais que utilizam dietas desbalanceadas em macro e microminerais, predominantemente aquelas baseadas em cereais, ricas em calorias e de baixa qualidade nutritiva (CLEMENS, 2014; KAIDAR-PERSON et al., 2008; ROOHANI et al., 2013). Para um bom funcionamento do organismo humano, faz-se indispensável a ingestão de mais de 20 minerais, principalmente no que diz respeito aos microminerais ferro e zinco, além de 40 nutrientes, como vitaminas e aminoácidos (PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2007).

No mundo, várias estratégias têm sido utilizadas no combate à desnutrição. Uma delas, é o desenvolvimento de cultivares com maior concentração de nutrientes biodisponíveis em suas frações comestíveis, conhecidas como cultivares biofortificadas (CLEMENS, 2014). Esta estratégia tem se mostrado mais eficiente e sustentável do que a diversificação dos alimentos de uso diário nas refeições, devido ao alto custo para sua aquisição, e a suplementação ou fortificação de alimentos básicos por meio de adição artificial de vitaminas e minerais pela indústria, pois a longo prazo pode causar problemas gastrointestinais (PEREZ-MASSOTI et al., 2013; RIOS et al., 2009).

Estima-se que aproximadamente 2 bilhões de pessoas no mundo apresentem deficiência de proteína, carboidratos, vitaminas, ferro, zinco e iodo (CASTRO-GUERRERO et al., 2016; PRASAD, 2012; THOMPSON; AMOROSO, 2014). Na literatura são mais comumente descritas as deficiências de ferro e de zinco (CASTRO-GUERRERO et al., 2016; HAMBIDGE; MILLER; KREBS, 2011; LA FRANO et al., 2014; ROOHANI; KELISHADI; SCHULIN, 2013). No entanto, há uma crescente preocupação quanto à deficiência de fósforo, devido a sua estreita ligação com a formação dos dentes e ossos e com o crescimento celular (MONTEIRO; VANNUCCHI, 2010; SOBOTKA; ALLISON; STANGA, 2008).

O fósforo também é imprescindível para a contração muscular e ações metabólicas no organismo humano (THEOBALD, 2005). A deficiência de fósforo pode causar produção insuficiente de adenosina trifosfato (ATP), ocasionando disfunções de miócitos cardíacos e leucócitos, bem como causando hipofosfatemia, que provoca desmineralização óssea e manifestações neuropsiquiátricas e hematológicas (MONTEIRO; VANNUCHI, 2010).

O ferro é um componente integral da hemoglobina e mioglobina, constituinte das enzimas heme e não-heme que participam das reações de redução oxidativas (ABBASPOUR; HURRELL; KELISHADI, 2014; LA FRANO et al., 2014). A carência deste micronutriente

causa anemia e contribui para o aparecimento de debilitações cognitivas e físicas (ABBASPOUR; HURRELL; KELISHADI, 2014; MACHADO; LEONE; SZARFARC, 2011).

O zinco é um elemento básico da bioquímica celular, sendo fundamental para a manutenção das funções do sistema imunológico (DESHPANDE et al., 2013; GIBSON, 2012; ROOHANI et al., 2013). A deficiência de zinco provoca problemas no crescimento e no desenvolvimento dos fetos, aumento do risco de partos prematuros, e ainda, torna o indivíduo suscetível às infecções, devido ao seu efeito negativo no sistema imunológico (DESHPANDE et al., 2013; ROOHANI et al., 2013).

O ácido fítico é um sal derivado de fitato, constitui uma reserva de fósforo nos grãos de feijão. A presença de ácido fítico em altas concentrações tem a capacidade de diminuir o aproveitamento de nutrientes como ferro e zinco (BENEVIDES et al., 2011). Contudo, recentemente tem sido demonstrado que os fitatos também apresentam efeitos benéficos, atuando como anti-oxidantes e anti-carcinogênicos (DELFINO; CANNIATTI-BRAZACA, 2010).

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) faz parte da alimentação de 300 milhões de pessoas, com consumo *per capita* podendo chegar a 30 kg ano^{-1} em regiões da América Central, México e no nordeste brasileiro (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÔES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA, 2017). No Brasil, a preferência de consumo é pelo feijão do grupo Mesoamericano, grãos preto e carioca (tegumento bege com estrias marrons), o que representa vantagem nutricional à população diminuindo as deficiências minerais, devido às altas concentrações de fósforo, ferro e zinco presentes nestes tipos de grãos (BURATTO, 2012; STECKLING et al., 2017). A variabilidade genética encontrada no feijão varia de 4,0 a 5,5 g kg^{-1} de matéria seca (MS) para a concentração de fósforo (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016), de 8,0 a 112,9 mg kg^{-1} de MS para ferro, enquanto que o zinco pode variar de 30,9 a 64,6 mg kg^{-1} de MS (AKOND et al., 2011). Essa leguminosa apresenta a vantagem de acumular maior concentração destes minerais quando comparada aos cereais (CASTRO-GUERERO et al., 2016; PETRY et al., 2015). No entanto, a concentração destes minerais pode ser comprometida devido a presença de fitatos, que são compostos que ocorrem naturalmente em grãos de feijão e que provocam a precipitação dos microminerais ferro e zinco, diminuindo a sua biodisponibilidade para o organismo humano. Na literatura, já foram relatadas concentrações de fitatos variando de 0,24 a 2,41%, indicando seus efeitos negativos no acúmulo de ferro e zinco em grãos de feijão (OOMAH et al., 2008; PEREIRA et al., 2011).

A identificação da natureza da ação de genes envolvidos no controle da concentração de fósforo, ferro, zinco (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017; TEIXEIRA et al., 2015) e de fitatos (BLAIR et al., 2009b; BLAIR et al., 2012), por meio de estimativas de parâmetros genéticos, possibilita o desenvolvimento e a seleção de linhagens de feijão promissoras. O aumento da concentração de fósforo (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016; STECKLING et al., 2017), ferro e zinco (MARTINS et al., 2016; PEREIRA et al., 2014; STECKLING et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2015) por meio do melhoramento em linhagens de feijão tem sido relatado na literatura. Também há referências de linhagens de feijão com menor acúmulo de fitatos nos grãos (AKOND et al., 2011; BLAIR, 2013; KATUURAMU et al., 2018; PEREIRA et al., 2011). A variabilidade genética para a concentração de fósforo, ferro, zinco e fitatos em grãos de feijão, além de altos ganhos preditos com a seleção já foram relatados na literatura para os mesmos minerais (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017), e mutantes com baixa concentração de fitatos já encontrados (CAMPION et al., 2009; COMINELLI et al., 2018), permitem considerar o melhoramento clássico uma eficiente e promissora opção para a biofortificação da cultura do feijão.

Em gerações F_1, F_2 e RC_1 foram observadas estimativas de herdabilidade no sentido restrito de intermediária magnitude 56,75% para a concentração de fósforo, variando de 45,71 a 62,04% para a concentração de ferro, enquanto que para a concentração de zinco foram obtidos valores de 29,48 a 57,47% em feijão do grupo Mesoamericano (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017). Também em gerações iniciais de autofecundação (F_3), Teixeira et al. (2015) observaram herdabilidade no sentido amplo de alta magnitude para a concentração de ferro e de zinco ao avaliarem 100 linhagens de feijão do grupo Mesoamericano. Já, em estudos com linhagens de feijão em homozigose ($F_{6:8}$) foram verificadas estimativas de herdabilidade no sentido amplo de baixa a alta magnitude para a concentração de fósforo (23,9 a 61,9%) e de zinco (21,8 a 64,3%) (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016), e de intermediária magnitude para a concentração de ferro em 272 linhagens em geração F_7 (JOST et al., 2012). Não foram encontrados trabalhos prévios na literatura que contemplem o estudo de parâmetros genéticos para fitatos em feijão em geração com diferentes níveis de homozigose.

Em geração $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$ não foram encontrados trabalhos prévios que estimassem parâmetros genéticos para a concentração de fósforo, ferro, zinco e de ácido fítico em grãos de feijão do grupo Mesoamericano. Além do mais, estimativas de parâmetros genéticos são estritamente relacionadas com a população em estudo, condições ambientais e ao método de estimação (RAMALHO et al., 2012). Sendo assim, este estudo teve como objetivos: (1) obter estimativas de herdabilidade para fósforo, ferro, zinco e fitatos; (2) analisar o padrão de

herança desses caracteres; e (3) selecionar linhagens de feijão do grupo Mesoamericano com alta concentração de fósforo, ferro e zinco e baixa concentração de fitatos nos grãos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO FEIJÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma espécie da família Fabaceae, ordem Fabales. A planta de feijão apresenta porte herbáceo, ciclo anual, é autógama e diplóide (2n=2x=22 cromossomos), com taxa de fecundação cruzada estimada de 3 a 5% (BURLE et al., 2010). A cultura é originária das Américas e foi domesticada por povos indígenas no período pré-colombiano (MENSACK et al., 2010), de maneira distinta. De acordo com Singh et al. (1991), o feijão possui dois centros de origem, sendo estes o Mesoamericano (América Central e México) e o Andino (norte dos Andes). Segundo o mesmo autor, dentro de cada um desses centros pode-se distinguir três raças, com base em diferenças no hábito de crescimento, no tamanho das sementes e nos tipos de faseolina, que é a principal proteína de reserva do feijão.

O feijão oriundo do centro de origem Mesoamericano é dividido em três raças: Mesoamericana, caracterizada por grãos pequenos (< 25 g 100 grãos^{-1}) e com hábito de crescimento do tipo II (indeterminado e arbustivo) ou III (indeterminado e prostrado); raça Durango, apresenta grãos médios (25 a 40 g 100 grãos^{-1}) e hábito de crescimento do tipo III; e a raça Jalisco, caracterizada por genótipos de hábito de crescimento do tipo IV (indeterminado e trepador) e grãos de tamanho médio (SINGH et al., 1991), além de, faseolina do tipo “S”. O grupo Andino, também foi subdividido em três raças: Nova Granada, representada por feijões com grãos grandes (> 40 g 100 grãos^{-1}) e hábito de crescimento dos tipos I (determinado e arbustivo) ou II; raça Peru, com feijões de grãos grandes e hábito de crescimento dos tipos III ou IV; e a raça Chile, a qual predomina feijões com hábito de crescimento do tipo III e grãos médios, apresentando na sua composição química as faseolinas T, C, H e A (BLAIR et al., 2013).

O feijão é uma das leguminosas mais consumidas em todo o mundo (TALUKDER et al., 2010), constituindo a principal fonte de proteína em países da África Oriental e da América Latina, representando 65% da ingestão diária de proteína e 35% da energia (BLAIR et al., 2010). A ingestão de feijão permite o suprimento de grande parte das necessidades nutricionais diárias (WORTHINGTON et al., 2012), em virtude da alta concentração de proteína, fibras e minerais (HEFNI et al., 2010). Assim, representando importância na segurança alimentar global, que pode ser observada pelo consumo *per capita* desse grão, sendo que as populações do nordeste brasileiro, América Central e México consomem,

aproximadamente, de 20 a 30 kg hab^{-1} ano^{-1} de feijão, enquanto que na região dos grandes lagos no continente Africano, o consumo médio é de 50 kg hab^{-1} ano^{-1} (BLAIR et al., 2013; FAO, 2017). No Brasil, o consumo *per capita* médio é de 15 kg hab^{-1} ano^{-1} (WANDER, 2017).

No Brasil, no período de 2001 a 2011 os principais Estados que se destacaram pela maior produção do feijão foram o Paraná (21,13%), Minas Gerais (16,38%), Bahia (10,73%), Goiás (7,77%) e São Paulo (9,16%) (CARNEIRO; DE PAULA JÚNIOR; BORÉM, 2015). De acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (2017), a produção brasileira de feijão foi de 3.418,3 mil toneladas, sendo que aproximadamente 79% deste montante é de grãos de feijão do grupo Mesoamericano, de grãos preto e carioca, nas três safras agrícolas anuais. De acordo com a mesma fonte, a produtividade média do feijão nas últimas safras foi de 1.560 kg ha^{-1}, sendo que esta leguminosa é cultivada nos mais variados sistemas produtivos, e condições climáticas diferentes entre as regiões demográficas do Brasil.

Dentre as diversas características do feijão do grupo Mesoamericano, destaca-se a alta concentração de minerais (principalmente fósforo, ferro e zinco), proteínas, vitaminas e fibras em seus grãos, perfazendo atributos intrínsecos desta leguminosa (TALUKDER et al., 2010; HOGH-JENSEN et al., 2013; MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016; WHITE et al., 2009). Além de seus atributos nutricionais, o feijão pode ser consumido de maneira integral, sem passar por nenhum processo de polimento ou de remoção de tegumento.

2.2 CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, FERRO E DE ZINCO EM GRÃOS DE FEIJÃO

A desnutrição crônica tem aumentado significativamente em todo o mundo, passando de 777 milhões de pessoas no ano de 2015 para 815 milhões de pessoas em 2016 (FAO, 2017). Além disso, a população mundial passará dos atuais 7,3 bilhões para 9,6 bilhões de pessoas em menos de 30 anos (FAO, 2017). Para tanto, de acordo com a mesma fonte, a produção agrícola deve aumentar na ordem de 60%, para ser possível atender a demanda de alimentos em 2050. Diante disso, é evidente que será necessário um aumento na oferta de alimentos em termos de quantidade e de qualidade nutricional, para suprir as carências nutricionais da população.

As exigências nutricionais para cada mineral variam com a idade e gênero das pessoas. Para o fósforo, os valores oscilam de 0,10 a 0,25 g dia^{-1} para crianças de 0 a 13 anos. Na vida adulta, para ambos os sexos, as necessidades são de 0,70 g dia^{-1}. Na gravidez, as mulheres

devem ingerir 1,25 g dia^{-1} de fósforo para o bom funcionamento do organismo (MONTEIRO; VANNUCHI, 2010). Para o ferro é recomendado que crianças de 0 a 15 anos devam ingerir de 0,96 a 1,17 mg dia^{-1}, enquanto que na fase adulta, os homens requerem 1,82 mg dia^{-1} e as mulheres, 2,02 mg dia^{-1}. Na gestação, a ingestão de ferro passa a 6,3 mg dia^{-1} (ABBASPOUR; HURRELL; KELISHADI, 2014).

No que diz respeito ao zinco, até os 15 anos de idade, as necessidades de ingestão diária são de 1,82 mg dia^{-1}. Para as pessoas adultas do sexo masculino, aconselha-se 1,97 mg dia^{-1} e para mulheres, 1,54 mg dia^{-1}. Para as gestantes, a quantidade de zinco indicada é de 2,27 mg dia^{-1} (AHUJA et al., 2012; ROOHANI et al., 2013). Já, para os fitatos, globalmente são ingeridas em dietas tradicionais e vegetarianas de 0,18 a 4,57 g dia^{-1}, respectivamente (SCHLEMMER et al., 2009). Segundo, o Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento (2017), com a ingestão de 100 gramas de feijão cozido suprem-se 385 mg de fósforo, 5 mg de ferro e 2,5 mg de zinco, mostrando assim a importância do feijão na alimentação diária da população em todo o Brasil.

O aumento da concentração de minerais em grãos de feijão é possível porque existe variabilidade genética (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017; BLAIR et al., 2009; JOST et al., 2009; POSSOBOM et al., 2015). Silva et al. (2012), avaliando 100 linhagens de feijão do grupo Mesoamericano, verificaram a presença de variabilidade genética nas seguintes concentrações: fósforo, de 4,00 a 6,90 g kg^{-1} de MS; ferro, de 54,20 a 161,50 mg kg^{-1} de MS; e zinco, de 29,33 a 65,50 mg kg^{-1} de MS. No estudo com 14 linhagens de feijão do grupo Mesoamericano de grãos carioca e preto, na Universidade Federal de Santa Maria, Steckling et al. (2017) verificaram amplitude de variação de 4,28 a 6,24 g kg^{-1} de MS para fósforo, de 63,00 a 140,00 mg kg^{-1} de MS para o ferro, enquanto que, o zinco variou de 18,77 a 25,72 mg kg^{-1} de MS. Na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, foi observado em 206 genótipos de feijão Andino, entre linhagens e cultivares de diversas cores de tegumento, concentrações variando de 3,70 a 5,70 g kg^{-1} para fósforo, 54,50 a 99,30 mg kg^{-1} de ferro, 21,60 a 39,70 mg kg^{-1} para zinco e 1,26 a 2,06% de ácido fítico (KATUURAMU et al., 2018). No cenário mundial, existem apenas relatos de cinco cultivares de feijão biofortificadas para ferro, em Ruanda, na África (SALTZMAN et al., 2013). Para fósforo e zinco, não foram encontrados relatos de cultivares de feijão biofortificadas (ASTUDILLO et al., 2013).

As linhagens de feijão do grupo Mesoamericano que apresentam concentrações superiores a 5,00 g kg^{-1} de MS para fósforo (STECKLING et al., 2017), 95,00 mg kg^{-1} de MS para ferro (JOST et al., 2013; RIBEIRO et al. 2013a) e 31,00 mg kg^{-1} de MS para zinco nos

grãos (TRYPHONE; NCHIMBI-MSOLLA, 2010; ZEMOLIN et al., 2016), são consideradas com alta concentração para estes minerais. Linhagens de feijão com altas concentrações de fósforo já foram identificadas por Hossain et al. (2013), Pinheiro et al. (2010), Pereira et al. (2011) e Maziero et al. (2015), bem como para ferro (BURATTO, 2012; HOSSAIN et al., 2013; SOLICHI et al. 2017) e zinco (RIBEIRO et al., 2014; SILOCHI et al., 2017). Diante desse cenário, a biofortificação do feijão é uma importante estratégia para reduzir os sintomas de deficiência de minerais.

2.3 FITATOS EM GRÃOS DE FEIJÃO

Os fitatos são sais derivados do ácido fítico (mio-inositol-1,2,3,4,5,6-hexaquisfosfato ou ácido hexafosfórico mio-inosito ou IP6) (REDDY; SATHE; SALUNKHE, 1982), e constituem a principal forma de armazenamento do fósforo em grãos de leguminosas e cereais (PETRY et al., 2013). Os fitatos são componentes naturais complexos que geralmente ocorrem em cereais e leguminosas e têm a capacidade de afetar as propriedades funcionais e nutricionais das plantas (BENEVIDES et al., 2011). As principais funções fisiológicas dos fitatos incluem reservas energéticas, grupos fosfato reativos e depósito de cátions (CHERYAN, 1980). Além, de serem responsáveis pela manutenção da planta no processo de dormência, minimizando o gasto energético, quando esta estiver em condições ambientais adversas (REDDY; SATHE; SALUNKHE, 1982). Os fitatos possuem diversas funções na planta, como regular as funções celulares, reparar o ácido desoxirribonucleico (DNA), remodelar a cromatina, permitir a endocitose, exportar ácido ribonucleico mensageiro (mRNA) nuclear e, potencialmente, participar da sinalização hormonal, fundamental para o desenvolvimento das plantas e das sementes (TAN et al., 2007).

As leguminosas possuem maior quantidade de fitatos do que os cereais (SCHLEMMER et al., 2009). Em leguminosas, o fósforo na forma de fitato representa 80% do fósforo total (MARTINEZ-DOMÍNGUEZ; IBÁÑEZ-GÓMEZ; RINCÓN LEÓN, 2002). Segundo Benevides et al. (2011), no processo de germinação das sementes e na digestão dos grãos, o ácido fítico é desfosforilado em seis produtos, hexafosfato (IP6), pentafosfato (IP5), tetrafosfato (IP4), trifosfato (IP3), inositol difosfato (IP2) e monofosfato (IP1). Destes produtos finais, apenas o IP6 apresenta efeito prejudicial à biodisponibilidade de minerais, complexando o zinco e o ferro, enquanto que os outros compostos são mais solúveis.

O fitatos podem formar complexos insolúveis com proteínas ou minerais, de modo que estes se tornam resistentes à ação no trato intestinal, reduzindo sua disponibilidade (SILVA et

al., 2011; SILOCHI et al., 2016). O fitato é fortemente influenciado pelo pH do alimento: em pH baixo, o ácido fítico precipita Fe^{3+}; em pH intermediário e alto, o ácido fítico forma complexos insolúveis com vários cátions divalentes (Cu^{2+}, Zn^{2+}, Co^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{3+}, Ca^{2+}, respectivamente nessa ordem), reduzindo a biodisponibilidade de vários minerais (SILVA; SILVA, 1999). A fosforilação é o que determina a ação negativa do fitato e quanto maior for a fosforilação, menor será a biodisponibilidade dos minerais (SANDBERG; CARISSON; SVANBERG, 1989). Portanto, somente quando ocorrer a desfosforilação, ou seja, quando o grupo fosfato for retirado da molécula de ácido fítico, na presença das enzimas fitases, é que os minerais estarão mais prontamente disponíveis para a absorção (JUNIOR et al., 2015).

De acordo com Petry et al. (2105), a biodisponibilidade do ferro está estritamente ligada com a baixa concentração dos fitatos. Assim os efeitos deletérios deste fator antinutrional serão minimizados quando houver o consumo de grãos de feijão com alta concentração de ferro. Para fósforo e zinco, os fitatos apresentam os mesmos problemas relatados para o ferro no que diz respeito à biodisponibilidade de absorção pelo organismo humano (LA FRANO et al., 2014; ROOHANI et al., 2013). De acordo Pereira et al. (2011), valores inferiores a 0,40% de fitatos em grãos de feijão, representam melhorias na biodisponibilidade de minerais para a absorção pelo organismo.

O conteúdo de fitato em grãos de feijão é muito influenciado pelo ambiente de cultivo, dose de fertilizante aplicada, condições de armazenamento, métodos de determinação e principalmente pelo nível de fósforo no solo (COELHO et al., 2007). Tal fato pode ser observado devido à grande variabilidade da concentração de fitato em genótipos de feijão. Oomah et al. (2008) verificaram variações de 1,67 a 2,41% no conteúdo de fitatos, em 10 cultivares de feijão do centro de origem Mesoamericano e Andino, cultivadas no Sul de Manitoba, Canadá. Em um estudo realizado em duas safras agrícolas, no Estado de Santa Catarina, Pereira et al. (2011) encontraram amplitudes de 0,24 a 1,09% na concentração de fitatos em 34 genótipos de feijão de origem Mesoamericana.

A redução deste fator antinutricional é de grande importância, uma vez que altos níveis de ingestão de fitatos podem estar associados a efeitos nutricionais adversos ao homem como redução da biodisponibilidade mineral e inibição de enzimas proteolíticas e amilolíticas (RAMIREZ-CARDENAS; LONEL; COSTA, 2008). Segundo, Delfino et al. (2010), os fitatos também apresentam efeitos benéficos quando em baixas quantidades, podendo atuar como anti-oxidante e anti-carcinogênico. A baixa concentração de ácido fítico em grãos de feijão é importante nutricionalmente, pois evita a indisponibilidade dos minerais ferro e zinco no organismo humano (AKOND et al., 2011).

2.4 BIOFORTIFICAÇÃO POR MELHORAMENTO GENÉTICO

Dentre as várias estratégias de combate a má nutrição, segundo Perez-Massoti et al. (2013), a melhor alternativa seria diversificar os alimentos utilizados diariamente nas refeições. Contudo, este fator esbarra nas condições econômicas da população de baixa renda. Além dessa, a suplementação ou fortificação de alimentos básicos no preparo de alimentos, como sal e farinha, por meio de adição artificial, também é eficiente. A outra alternativa é a biofortificação, que nada mais é do que o aumento da concentração de minerais em porções comestíveis das plantas (DWIVEDIS et al., 2012).

O uso de técnicas de engenharia genética e de métodos de melhoramento convencional são duas alternativas que podem ser usadas para aumentar a concentração de fósforo, ferro e zinco. Para a cultura do feijão, os métodos convencionais de melhoramento são as intervenções mais utilizadas para biofortificar os grãos (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017). A ampla variabilidade genética existente na espécie do feijão, para os diversos minerais, possibilita que essa cultura seja utilizada pelos melhoristas (MESQUITA et al., 2007; GOUVEIA et al., 2014). Os ganhos com a seleção indicam incrementos na concentração de minerais nos grãos. Na literatura para feijão do grupo Mesoamericano, os ganhos preditos com a seleção para o fósforo foram de 10,88 a 10,97 % (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017), para ferro de 11,14 a 30,05 % (JOST et al., 2009; POSSOBOM et al., 2015), enquanto que para zinco encontraram-se amplitudes de 7,31 a 18,96 % (BURATTO et al., 2017; ROSA et al., 2010), em geração F_2, mostrando considerável aumento na concentração destes minerais nos grãos dessa leguminosa.

Um dos maiores benefícios do desenvolvimento de cultivares biofortificadas é que essa tem alcance nas áreas rurais pobres, mesmo que apresente um custo de desenvolvimento inicial alto. Posteriormente a sua inserção no sistema de produção, as cultivares biofortificadas serão cultivadas com as práticas de manejo já conhecidas e com a substituição das cultivares menos nutritivas (BURATTO, 2012). É importante ressaltar que as cultivares melhoradas nutricionalmente serão cultivadas e consumidas ao longo dos anos, independentemente se o governo e o financiamento internacional não tiverem mais interesse na questão de micronutrientres, além de que o custo da biofortificação, quando comparada com suplementações e fortificação de alimentos, é menor (NESTEL et al., 2006). De acordo com Bouis et al. (2011), o feijão é um alimento com potencial para ser biofortificado e utilizado no controle de deficiências minerais, uma vez que atende aos seguintes princípios:

alta rentabilidade para o agricultor, variabilidade genética para a concentração dos minerais deficitários e ampla aceitação pelos agricultores e consumidores.

Dentre os programas que se preocupam com a biofortificação, no cenário internacional, estão o "*Harvest Plus*" e o AgroSalud (MORAES et al., 2009). Já, no Brasil, algumas instituições públicas desenvolvem atividades para a biofortificação do feijão, citando-se a Embrapa Arroz e Feijão (inserida no programa "*Harvest Plus*"), o Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) (programa BIOFORTA) e as Universidades Federais de Lavras e de Santa Maria (BURATTO, 2012). Ramalho et al. (2012) relataram também que culturas como o feijão têm mostrado pequeno interesse das empresas de melhoramento, por ser principalmente cultivado por agricultores familiares, uma vez que aproximadamente 60% do total da produção brasileira é obtida na agricultura familiar (COMISSÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE FEIJÃO, 2010). Este fato demonstra a grande importância que as instituições públicas de melhoramento representam para essa cultura.

2.5 PARÂMETROS GENÉTICOS

Para aumentar as chances de sucesso no desenvolvimento de cultivares de feijão biofortificadas para minerais, é preciso se ter um melhor conhecimento dos parâmetros genéticos envolvidos nesse processo. Deste modo, o uso de parâmetros genéticos como variâncias, herdabilidade no sentido amplo e restrito, coeficiente de determinação genotípico, coeficiente de variação genético e ganho com a seleção de uma população, são ferramentas que auxiliam os melhoristas na avaliação da variabilidade genética da população em estudo (CORRÊA et al., 2012).

Os componentes de variância são importantes fatores a serem determinados, uma vez que são utilizados como estimadores da herdabilidade de um caráter em uma determinada população. Assim, é possível observar os erros associados às estimativas de parâmetros genéticos da população em estudo (BURATTO, 2012). No Estado de Goiás, Martins et al. (2016), observaram em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano, estimativas de variância genética de 25,02 a 30,92 para ferro, enquanto que para o zinco foram de 2,66 a 9,99. Esses valores de variância genética superaram a variância ambiental e indicaram condições favoráveis para a seleção desses dois minerais. Estimativas de parâmetros genéticos para quatro populações de feijão do grupo Mesoamericano em geração F_6 e F_7, para os minerais fósforo e zinco, mostraram variâncias genéticas inferiores às variâncias ambientais, evidenciadas pelos baixos valores obtidos pela razão entre os coeficientes de variação

genético e ambiental (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016). Logo, os componentes de variância têm importância na identificação de quais alelos podem ser herdados ou não herdados na população estudada e assim serem passadas à próxima geração.

O coeficiente de variação genético (CVG) representa o quanto da variação que ocorreu para determinado caractere, se deve às características genéticas das linhagens avaliadas. Já, o coeficiente de variação experimental (CVE) indica o quanto o ambiente influenciou no desempenho das linhagens ao longo do seu desenvolvimento para o caractere avaliado. Uma informação importante sobre as estratégias na seleção de cultivares superiores é a razão entre o CVG e o CVE, sendo que se o esse valor for igual ou superior a unidade, tem-se sucesso no ganho com a seleção para determinado caractere (VENCOVSKY, 1992). Jost et al. (2009) observaram valores acima da unidade para a relação CVG/CVE nas progênies obtidas a partir do cruzamento de dois parentais de feijão do tipo preto e origem Mesoamericana contrastantes para ferro e ganhos com a seleção de 30,05% para esse mineral, nas primeiras gerações de autofecundação. Enquanto que Maziero, Ribeiro e Facco (2016) encontraram razões CVG/CVE variando de 0,30 a 0,70 para fósforo e zinco em feijão do grupo Mesoamericano, sugerindo menores ganhos na seleção de linhagens com altas concentração destes minerais.

A herdabilidade (h^2) é um dos parâmetros genéticos que auxilia os melhoristas na previsão dos ganhos com a seleção, sendo que a herdabilidade pode ser estimada em sentido amplo (h^2a) ou em sentido restrito (h^2r) (RAMALHO et al., 2012). Para o fósforo, Buratto e Moda-Cirino (2017) e Maziero, Ribeiro e Facco (2016) obtiveram estimativas de herdabilidade de alta magnitude no sentido amplo (h^2a: 75,47%) e no sentido restrito (h^2r: 60,63% e 61,90%) para a concentração de fósforo em grãos de feijão do grupo Mesoamericano, em geração inicial e avançada, respectivamente. Enquanto que Ribeiro et al. (2011) verificaram herdabilidade no sentido restrito de baixa a intermediária (h^2r: 21,37 e 65,54%) magnitude em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano. As amplitudes de herdabilidade encontradas na literatura, indicam que é possível aumentar a concentração de fósforo em feijão do grupo Mesoamericano, e posteriormente desenvolver cultivares com alta concentração deste mineral por meio do melhoramento genético.

Para o ferro, estimativas de herdabilidade no sentido restrito de magnitude intermediária (h^2r: 54,69%) e de alta no sentido amplo (h^2a: 68,54 a 70,20%), foram observadas em geração inicial em feijão do grupo Mesoamericano (POSSOBOM et al., 2015), corroborando com as magnitudes encontradas por Martins et al. (2016), ao avaliar 140 linhagens elite de feijão do grupo Mesoamericano. Enquanto que, Jost et al. (2012) verificaram estimativa de herdabilidade no sentido amplo de magnitude intermediária (h^2a:

59,00%) para ferro, ao estudar linhagens de feijão em geração F_7. Essas diferenças observadas mostraram que as estimativas de herdabilidade para o ferro, variam de acordo com a população avaliada, momento do melhoramento, ambiente de cultivo, entre outros fatores (RAMALHO et al., 2012), sugerindo que sejam estudadas em todos os genótipos que sejam desenvolvidos.

Ao estudar a geração F_2 obtida do cruzamento de quatro cultivares de feijão do grupo Mesoamericano, foram verificadas amplitudes de herdabilidade no sentido restrito variando de baixa a intermediária (h^2r: 29,48 a 57,47%), enquanto que no sentido amplo foi de intermediária a alta (h^2a: 45,14 a 65,68%) para o zinco (BURATTO; MODA-CIRINO, 2017). Resultado similar foi observado no estudo de quatro populações avançadas ($F_{6:7}$) para a concentração de zinco em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano, para a herdabilidade no sentido restrito (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016). Estimativas superiores de herdabilidade no sentido amplo e restrito foram encontradas por Rosa et al. (2010) e por Silva et al. (2010) para zinco em gerações iniciais. As diferenças observadas para as estimativas de herdabilidade podem ser justificadas pela variabilidade genética entre as linhagens, indicando que quando o valor genotípico supera o ambiental, aumentam-se as chances de se obter ganhos para o zinco ao se desenvolver linhagens superiores. Não foram encontrados estudos prévios de obtenção de parâmetros genéticos para a concentração de fitatos em grãos de feijão do grupo Mesoamericano.

O conhecimento do tipo de herança que controla os genes que influenciam o caráter é primordial para se obter sucesso no aumento da concentração dos minerais, inclusive fósforo, ferro e zinco, além de diminuir fatores antinutricionais, como os fitatos. Cichy et al. (2009) e Blair et al. (2012), avaliando linhagens de feijão em geração avançada, e Ribeiro et al. (2011) em geração inicial, ao estudarem a genética da concentração de fósforo em grãos de feijão Andino e Mesoamericano, respectivamente, constataram herança quantitativa. Isso sugere dificuldades na seleção de linhagens de feijão com alta concentração de fósforo, uma vez que, caracteres quantitativos apresentam maior influência do ambiente, além de menores estimativas de herdabilidade.

Para o micromineral ferro, inúmeros estudos verificaram distribuição contínua, caracterizando herança do tipo quantitativa em feijão do grupo Mesoamericano em geração avançada (BLAIR et al., 2009a, 2010, 2012; RIBEIRO et al., 2014a) e em geração inicial (POSSOBOM et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2015). Caracteres que apresentem uma faixa contínua de variação, em distribuições de frequência, indicam uma variável aleatória

contínua, ou seja, é controlada por muitos genes, trazendo consigo a dificuldade na seleção de linhagens de feijão do grupo Mesoamericano com alto ferro.

Cichy et al. (2005), ao estudarem híbridos do cruzamento entre duas cultivares de feijão do grupo Mesoamericanas (Albion e Voyager), verificaram herança monogênica com interação alélica dominante para o zinco. Contudo, inúmeros outros estudos realizados para o zinco concluíram padrão de herança quantitativa em feijão do grupo Mesoamericano em geração inicial (F_2 e F_3) (ROSA et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2015) e em geração avançada (F_7, F_{10} e linhas puras) (BLAIR et al., 2009a; 2010; PEREIRA et al., 2014), a qual foi confirmada por meio de *Quantitative Trait Loci* (*QTLs)* em geração F_7 (Blair et al., 2009a). As diferenças encontradas para o mesmo mineral indicam a variabilidade existente para o zinco, além de importantes implicações na estratégia de melhoramento genético para o aumento da concentração de zinco.

Para o ácido fítico, Blair et al. (2009b) e Blair et al. (2012) ao estudarem as mesmas linhagens puras recombinantes de feijão, obtidas do cruzamento entre uma linhagem Mesoamericana e outra linhagem Andina, cultivadas em solo com níveis médios e altos de fósforo, sugerem que este caractere possui herança quantitativa. Contudo, não foram encontrados estudos prévios sobre o padrão de herança de fitatos em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano.

Além de verificar se a distribuição de frequência é discreta ou contínua, é possível determinar o afastamento médio dos dados de um conjunto de valores em relação à medida de tendência central e como eles estão alocados em torno desta medida, por meio de cálculos de normalidade dos dados, curtose e assimetria (ESTATCAMP, 2014). A normalidade dos dados por ser verificada pelos testes de normalidade, os quais observam a probabilidade de um conjunto de dados se aproximar da distribuição normal. O teste Shapiro-Wilk é o mais utilizado, pois avalia uma ampla classe de distribuições, além de estar baseado na razão entre dois estimadores diferentes da variância populacional, sendo que o do numerador é devido a uma combinação linear de quantidade relacionada às estatísticas de ordem da distribuição normal, e o estimador do denominador é obtido de forma convencional (PEREIRA FILHO, 2013).

A curtose (K) determina o grau de achatamento de uma distribuição de frequência, sendo que os valores de curtose maiores que o coeficiente da curva normal (0,263) indicam um pico mais acentuado das observações na distribuição de frequência, e são chamadas de distribuições leptocúrticas; maior achatamento da curva é observado quando se tem um valor de curtose menor que o coeficiente, sendo denominada de distribuição platicúrtica; e um valor

igual ao coeficiente indica achatamento idêntico à curva normal, caracterizando uma distribuição mesocúrtica (RODRIGUES, 2015). Buratto (2012) observou grau de achatamento classificado como platicúrtica para concentração de fósforo e de zinco e leptocúrticas para a concentração de ferro em 1400 acessos de feijão do grupo Mesoamericano.

A assimetria (AS) da curva está vinculada com os valores coincidentes de média, moda e mediada da distribuição, de modo que quando estas sejam próximas com a da distribuição e os quartis são equidistantes (FEREIRA, 2009). Se o coeficiente de assimetria for próximo a zero, indica que a distribuição foi simétrica, enquanto que valores maiores do que zero, mostram assimetria à direita e menos que zero assimetria a esquerda (MARTINS; DONAIRE, 2012). Em histogramas montados por Buratto (2012) analisando acessos de feijão do grupo Mesoamericano cultivados em quatro municípios diferentes no Estado do Paraná, verificaram assimetrias maior do que zero para fósforo, ferro e zinco.

Uma das estratégias para se selecionar as melhores linhagens para mais de um caractere ou para caracteres individuais é a utilização de índices de seleção. Dentre os vários índices, Willians (1962) sugere que o índice base pondera valores fenotípicos de acordo com pesos econômicos, assim evitando a interferência dos erros das matrizes de variâncias e covariâncias (LIMA, 2010). Desta maneira podem ser encontrados, dentre as inúmeras linhagens avaliadas, aquelas linhagens que apresentam altas concentrações de fósforo, ferro e zinco e baixa concentração de fitatos em grãos de feijão.

Um dos obstáculos à obtenção de linhagens de feijão com alta concentração de minerais é a baixa confiabilidade das informações geradas pelos experimentos para a seleção de plantas superiores para a concentração de minerais. O uso da acurácia seletiva como estatística experimental resulta em boa qualidade das informações obtidas para a predição de valores genéticos (PIMENTEL et al., 2014). Resende e Duarte (2007) acreditam que a confiabilidade dos dados gerados pela acurácia seletiva se dá devido, a sua dependência da variância genética e residual de maneira individual para cada característica avaliada no experimento.

Assim, quanto maior for o valor da acurácia seletiva, maior será a precisão experimental na avaliação e no valor genético para aquele determinado caractere. Valores superiores a 0,94 de acurácia seletiva foram encontrados para a concentração de ferro e de zinco em experimentos de feijão do grupo Mesoamericano, indicando alta precisão experimental na avaliação desses microminerais (MARTINS et al., 2016; SILVA et al., 2013).

Existem poucos relatos de trabalhos que utilizam a acurácia seletiva como indicador de qualidade experimental para a concentração de minerais em feijão.

3 MATERIAL E MÉTODOS

As linhagens em geração $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$ foram obtidas a partir de cruzamentos dirigidos entre as linhagens de feijão do grupo Mesoamericano CNFP 10104 e CHC 01-175, que atualmente são as cultivares BRS Esteio e SCS 205 Riqueza, respectivamente. Estes cruzamentos foram realizados no perírodo de verão-outono de 2012 para a obtenção das sementes F_1 e F_1 recíprocas e no período de inverno-primavera do mesmo ano para obter as gerações F_2, F_2 recíproca e retrocruzamentos 1 e 2. Os parentais eram contrastantes para a concentração de ferro e de zinco, coloração do tegumento dos grãos, produtividade de grãos e tempo de cozimento dos grãos (Ribeiro et al., 2013b).

O cruzamento entre as linhagens FT 85-113 x POT 51, realizado em 1992 na Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás, Goiás, originou a cultivar BRS Esteio (PEREIRA et al., 2013). De acordo com os mesmos autores, os segregantes obtidos nesse cruzamento foram avançados até a geração F_7 pelo método de seleção massal. A seleção de plantas foi baseada na resistência à antracnose, crestamento bacteriano comum e ferrugem, e as melhores linhagens foram avaliadas nos experimentos Preliminar e Valor de Cultivo e Uso (VCU). Segundo Ribeiro et al. (2013b), em uma avaliação realizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a cultivar BRS Esteio apresentou baixa concentração de ferro (71,70 mg kg^{-1} de MS) e de zinco (29,32 mg kg^{-1} de MS) nos grãos, coloração de tegumento preto, produtividade média de grãos de 2390,50 kg ha^{-1}, tempo de cozimento de aproximadamente 21 minutos e hábito de crescimento do tipo II, ou seja, plantas de crescimento indeterminado com guias curtas.

A cultivar SCS 205 Riqueza foi originada em 2000 de um cruzamento entre a cultivar BRS Campeiro e a IAC Tybatã, realizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) na cidade de Chapecó, Santa Catarina (KAVALCO et al., 2017). Os segregantes obtidos, de acordo com os mesmos autores, foram avançados até a geração F_7 pelo método Populacional. As progênies foram avaliadas a campo com seleção para a coloração e a qualidade de grãos e caracteres agronômicos e, posteriormente, as linhagens foram analisadas nos experimentos Preliminar (F_9 e F_{10}) e VCU (F_{11} e F_{12}). A cultivar SCS 205 Riqueza apresentou em seus grãos alta concentração de ferro (105,80 mg kg^{-1} de MS) e de zinco (33,18 mg kg^{-1} de MS), além de coloração de tegumento carioca e produtividade média de 2266,00 kg ha^{-1}, menor tempo de cozimento (17 minutos) e hábito de crescimento do tipo III (plantas com hábito de crescimento indeterminado com guias longas) (RIBEIRO et al., 2013b).

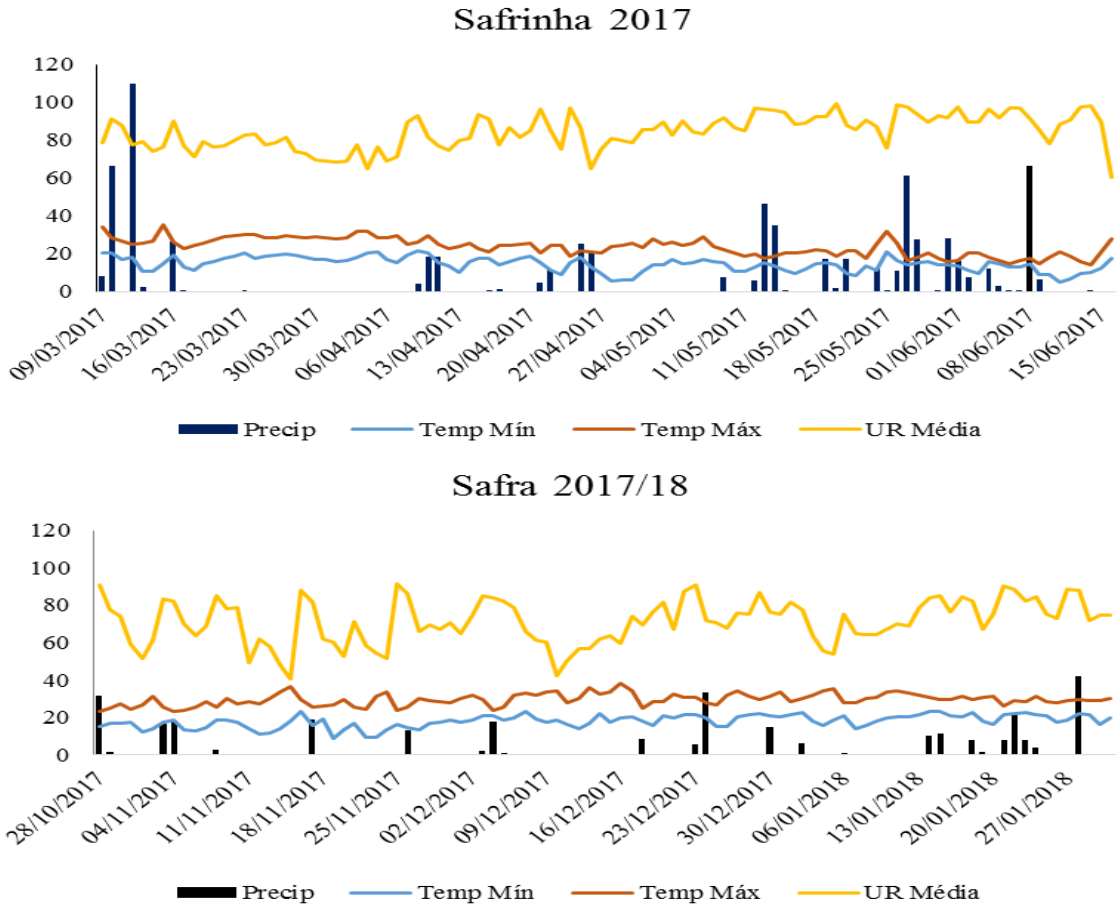
As gerações segregantes obtidas no presente estudo foram avançadas até a geração F_5 pelo Método Descêndencia de Uma Única Semente (SSD) modificado, em casa-de-vegetação do Departamento de Fitotecnia da UFSM, possibilitando a obtenção de 100 plantas. A alteração praticada no método SSD, foi a utilização de um maior número de sementes na semeadura para que depois fosse realizado o desbaste, assim permanecendo apenas uma planta de cada progênie. As sementes obtidas em cada uma dessas plantas foram colhidas individualmente e armazenadas em sacos de papel em câmara fria (2°C e 70% de umidade relativa).

Posteriormente, foram realizados dois experimentos de campo na área do Departamento de Fitotecnia da UFSM (latitude: 29°43'22.31"S, longitude: 53°43'15.14"O e altitude: 95 m). O clima da região é classificado como Cfa, subtropical úmido, conforme Köppen (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). O solo da área experimental é classificado como Argissolo Bruno-Acinzentado alítico típico (STRECK, 2008). A correção da fertilidade do solo e a adubação foram realizadas de acordo com a análise química do solo (Tabela 1). Os dados meteorológicos observados nas duas épocas de cultivo dos experimentos são apresentados na Figura 1. Os experimentos foram instalados em dois cultivos consecutivos (safrinha 2017 e safra 2017/2018), no mesmo local da área experimental do Programa de Melhoramento de Feijão da UFSM.

Tabela 1 - Matéria orgânica (M.O.), saturação de bases (V), pH (H_2O), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), cálcio (Ca), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), potássio (K) e fósforo (P) do solo da área experimental do Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria, RS, realizada para safrinha 2017 e safra 2017/2018.

M.O.	V	pH	CTC efetiva	Ca	Cu	Zn	Fe	K	P
(%)	(%)	H_20	(cmolc dm^{-3})				(mg dm^{-3})		
1,80	73,90	6,10	9,90	6,70	1,20	0,50	2.026,50	80,00	12,70

Figura 1 - Dados meteorológicos de precipitação (Precip, mm), temperatura mínima (Temp Mín, °C), temperatura máxima (Temp Máx, °C) e umidade relativa média do ar (UR, %) diários, obtidos nos cultivos de safrinha 2017 e de safra 2017/2018, no 8º Distrito de Meteorologia, na Estação Meteorológica de Santa Maria, localizada na Universidade Federal de Santa Maria, RS.



Nas duas épocas de cultivo, o solo foi preparado de maneira convencional, por meio de aragem e gradagem. Na adubação de base foram aplicados 275 kg ha^{-1} de adubo da fórmula 5-20-20 (ureia: 45% de nitrogênio, superfosfato triplo: 18% P_2O_5 e cloreto de potássio: 60% K_2O). Já, na adubação de cobertura foram aplicados 67 kg ha^{-1} de ureia (45% de nitrogênio), no estádio de primeira folha trifoliolada (V3) (CTSBF, 2012).

A geração $F_{5:6}$ foi avaliada em cultivo de safrinha 2017, com semeadura realizada no dia 09 de março de 2017, em delineamento experimental de blocos aumentados, com duas repetições. A parcela experimental foi constituída de uma linha de 1 m de comprimento, espaçada em 0,50 m, e com densidade de 10 sementes por metro linear. Os tratamentos foram constituídos por 103 genótipos de feijão, sendo 100 linhagens na geração $F_{5:6}$ (tratamentos não comuns), duas linhagens parentais (CNFP 10104 e CHC 01-175) e a cultivar Pérola (testemunha). Os blocos foram dispostos em uma área homogênea de 28,5 m², de modo que

cada bloco contemplasse 50 linhagens de feijão e os tratamentos comuns: parentais e a cultivar Pérola.

A geração $F_{5:7}$, semeada no dia 28 de outubro de 2017, foi avaliada em cultivo de safra 2017/2018, em delineamento látice simples 11 x 11. A parcela experimental foi composta de uma linha de 1 m de comprimento, espaçada em 0,50 m, e com 15 sementes por metro linear. Os tratamentos compreenderam 121 linhagens de feijão, sendo 100 linhagens $F_{5:7}$, duas linhagens parentais (CNFP 10104 e CHC 01-175) e 19 cultivares (BRS Campeiro, BRS Esplendor, BRS Estilo, BRS Expedito, BRSMG Pioneiro, BRS Valente, Carioca, Fepagro Garapiá, Fepagro Triunfo, Guapo Brilhante, IAC Imperador, IAC Milênio, IAC Netuno, IPR Juriti, IPR Siriri, IPR Tangará, IPR Uirapurú, IPR Tiziu e Pérola). O experimento foi estruturado de modo que os tratamentos de qualquer um dos 11 blocos da primeira repetição se distribuíssem pelos blocos da segunda repetição. Assim, as duas repetições apresentariam pelo menos uma vez cada tratamento avaliado.

O manejo cultural foi comum aos dois experimentos ao longo de todo o desenvolvimento da cultura. Para a semeadura as sementes foram tratadas com o fungicida Maxim XL (Fludioxonil + Metalaxyl−M) e o inseticida Cruiser (Tiametoxam), ambos na dose de 200 ml/100 kg de sementes, os quais foram aplicados sob as sementes com o auxílio de um pulverizador manual. O controle de plantas daninhas foi realizado por meio de capinas semanais, de forma manual, para evitar a competição com as plantas de feijão. A aplicação do inseticida Engeo™ Pleno (Tiametoxam + Lambda-cialotrina), na dose de 125 ml ha^{-1}, se deu quando ocorreram 5% de dano nas plantas, causado principalmente pela *Diabrotica speciosa*. A fim de se verificar a incidência natural das doenças e o comportamento das linhagens frente a estas, não se efetuou o controle químico com a aplicação de fungicidas na cultura.

As plantas de feijão de toda a linha foram colhidas de forma manual quando atingiram o estádio de maturação (R9), caracterizado pela secagem e perda da pigmentação das vagens. Os grãos foram secos ao sol e beneficiados, contudo quando houve a necessidade de secagem em estufa (± 40ºC), até atingir 13% de umidade média. Amostras aleatórias de 10 g de grãos das linhagens, testemunhas e dos parentais, foram moídas em micromoinho (Q298A21, Quimis, Diadema, SP, Brasil), até a obtenção de partículas inferiores a 1 mm de diâmetro, não peneiradas, para a determinação da concentração dos minerais e dos fitatos.

Alíquotas de 0,5 g da farinha de feijão cru obtida foram utilizadas para a digestão em solução de ácido nítrico e perclórico (3:1), conforme descrito por Jost et al. (2013), para a determinação da concentração dos minerais. Ao término da digestão nítrica-perclórica, indicada pela coloração cristalino-transparente no volume de 1 ml de cada tubo digestor, a

solução foi transferida para um tubo falcon de 50 ml e foi acrescida água destilada até completar o volume de 50 ml. A concentração de fósforo foi obtida em um espectrofotômetro de emissão ótica (AA-7000, Shimadzu, São Paulo, Brasil), com comprimento de onda de 660 nm, enquanto que as leituras das concentrações de ferro e de zinco foram realizadas em um espectrofotômetro de absorção atômica (AAS, Perkin Elmer AAnalyst 200, Waltham, Estados Unidos da América), com comprimento de onda de 248,30 nm e 213,90 nm, respectivamente.

O ácido fítico foi quantificado de acordo com a metodologia descrita por Latta e Skin (1980), a qual permite, por meio de cálculos matemáticos, a determinação da concentração de fitatos. Para tanto, foram adicionadas alíquotas de 2,0 g de farinha crua de grãos de feijão, conjuntamente com 40 ml de ácido clorídrico (HC1) 2,4% (0,65 N) em tubos falcons. Após 1 h e 30 min em agitação rápida em banho-maria (500/D; Servylab, Rio Grande do Sul, Brasil) e 10 minutos em centrífuga (MTDIIIPlus; Logen Scientific, Lagos, Nigéria) a 3500 rpm, foi realizada a filtragem do sobrenadante. Posteriormente, o sobrenadante passou por uma coluna de vidro, previamente preparada com lã de vidro e 0,5 g de resina "bio-rad", a qual foi ativada por meio da adição de 15 ml de água deionizada, 15 ml da solução cloreto de sódio (NaCl) 0,1 M e 15 ml da solução NaCl 0,7 M. Nessa solução se deu a determinação da concentração do ácido fítico. Neste eluato foram acrescentados 1 ml do reagente de cor de Wade (0,03% $FeCl_{36}H_2O$ e 0,3% ácido sulfosalicílico em H_20 deionizada), e após 15 minutos realizou-se a leitura do ácido fítico (%) em espectrofotômetro UV/visível, na faixa de 500 nm (SP-220; Bioespectro, São Paulo, Brasil).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância de acordo com os delineamentos de blocos aumentados e de látice simples para as gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, respectivamente. A precisão experimental foi avaliada pelo coeficiente de variação experimental (CV, %) obtido por: $CV = 100\frac{\sqrt{(QME)}}{m}$, em que QME corresponde ao quadrado médio do erro, e m é a média geral do experimento. A acurácia seletiva (AS) foi obtida pela expressão: $AS = \sqrt{1 - \frac{1}{Fc}}$, para Fc ≥1; e AS =0, para Fc <1, considerando Fc o valor do teste F para tratamento (RESENDE; DUARTE, 2007).

Apenas para o delineamento em látice foi verificada a sua eficiência em relação ao delineamento de blocos ao acaso, pois este apresenta repetibilidade de todos os tratamentos avaliados. Devido ao maior número de restrições presentes no látice, diminuem-se os graus de liberdade do erro e, consequentemente, aumenta-se o quadrado médio do erro (AGUIAR; RAMALHO; SOUZA, 2000; SILVA; FERREIRA; PACHECO, 2000). Além de que o

delineamento de blocos ao acaso usa as médias originais, enquanto que o látice utiliza as médias ajustadas, resultando em informações mais fidedignas. A eficiência do delineamento látice (EF, %) em relação ao delineamento de blocos ao acaso foi determinada, considerando a fórmula $EF = \frac{100QM}{EE}$, sendo QM o quadrado médio do resíduo e EE o erro efetivo da análise intrabloco considerando-se o modelo de blocos completos casualizados.

Os parâmetros genéticos foram obtidos a partir das seguintes estimativas: variância fenotípica, variância genética, variância ambiental, herdabilidade, coeficiente de variação genético, coeficiente de variação ambiental, além da relação entre o coeficiente de variação genético e ambiental para as duas gerações avaliadas. Para o primeiro experimento avaliado no delineamento de blocos aumentados a variância ambiental foi baseada na média das testemunhas. A herdabilidade (%) foi calculada com base nos componentes da variância, utilizando as médias de tratamentos, pela fórmula: $h^2 = \frac{\sigma^2 G}{\sigma^2 F}$, em que: $\sigma^2 G$ é a variância genética e $\sigma^2 F$ é a variância fenotípica, trata-se, portanto, de herdabilidade no sentido amplo devido ao alto nível de endogamia das linhagens, a qual se assemelha a herdabilidade no sentido restrito.

O coeficiente de variação genético (CVG, %), foi estimado por $CVG = 100\left(\frac{\sqrt{\sigma^2 G}}{m}\right)$, onde m é a média. A determinação do coeficiente de variação ambiental (CVE, %), foi realizada por meio da fórmula $CVE = 100\left(\frac{\sqrt{\sigma^2 E}}{m}\right)$. A razão entre o coeficiente de variação genético e o coeficiente de variação ambiental foi obtida pela fórmula: $CVG/CVE = \sqrt{\frac{\sigma^2 G}{\sigma^2 E}}$.

A avaliação do padrão de herança (quantitativo ou qualitativo) foi verificado por meio de gráficos de distribuição de frequência e de análises de normalidade, curtose e assimetria, para todos os caracteres avaliados nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$. Para tanto, foi inicialmente calculado o número de classes, utilizando-se a fórmula $\sqrt{n}$, sendo n = número de observações, para posterior confecção dos gráficos. A normalidade dos dados foi determinada por meio do teste de Shapiro-Wilk, a 5% de probabilidade.

As vinte melhores linhagens apresentadas na Tabela 3 foram definidas por meio do índice base (WILLIANS, 1962) para as maiores concentrações de fósforo, ferro e zinco nos grãos de feijão. Para a concentração de fitatos o procedimento de ordenamento das linhagens foi semelhante ao anterior, contudo, as linhagens que apresentaram as menores concentrações de fitatos foram consideradas as melhores.

Os gráficos de distribuição foram realizados com o auxílio do uso da planilha eletrônica Microsoft® Office Excel e as análises estatísticas foram geradas pelo software GENES (CRUZ, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de variância foi constatado que os genótipos de feijão diferiram significativamente ($p \leq 0,05$) para a concentração de fósforo, ferro, zinco e fitatos nos grãos nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$ (Tabela 2). Diferenças significativas também foram verificadas em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano para os minerais fósforo (BLAIR et al., 2012; STECKLING et al., 2017), ferro (FIGUEIREDO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2013b; STECKLING et al., 2017), zinco (AKOND et al., 2011; FIGUEIREDO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2013b; STECKLING et al., 2017) e fitatos (AKOND et al., 2011; BLAIR et al., 2012). Portanto, existe variabilidade genética para a concentração destes minerais e fitatos em feijão, ou seja, é possível aumentar a concentração de fósforo, ferro e zinco e reduzir a concentração de fitatos nos grãos de feijão do grupo Mesoamericano.

A eficiência do delineamento látice variou de 101,11% (concentração de ferro) a 148,29 (concentração de zinco) (Tabela 2). Valores acima de 100% para os caracteres avaliados confirmaram a eficiência do látice em relação ao delineamento de blocos ao acaso para todos os caracteres avaliados na safra 2017/2018. Isso indica que as variações que ocorreram dentro dos blocos se sobressaíram àquelas derivadas das variações entre as repetições. Na análise de variância o efeito de bloco foi considerado aleatório e foi ajustado em relação ao quadrado médio de tratamentos e ao erro efetivo do delineamento látice dentro de cada uma das repetições. A escolha adequada do látice como delineamento para o estudo da concentração de minerais também foi verificada previamente por outros autores, ou seja, eficiências superiores a 100%. Jost et al. (2012) afim de selecionar linhagens de feijão com alta concentração de ferro, observaram eficiência de 148,27% para este mineral em um látice 17 x 17, avaliando 289 linhagens F_7. Já, Maziero, Ribeiro e Facco (2016) verificaram eficiência de 120,95 e 104,26% para fósforo e zinco, respectivamente, ao realizarem uma análise conjunta entre os tratamentos comuns aos experimentos avaliados em látice 15 x 15 (safra 2012) e 13 x 13 (safrinha 13).

Tabela 2 - Análise de variância, estimativas de médias e de parâmetros genéticos para a concentração de fósforo (g kg^{-1} de matéria seca - MS), ferro (mg kg^{-1} de MS), zinco (mg kg^{-1} de MS) e fitatos (%) em grãos de 100 linhagens de feijão, parentais e testemunhas avaliados nas gerações $F_{5:6}$ (safrinha 2017) e $F_{5:7}$ (safra 2017/2018). Santa Maria-RS, UFSM, 2018.

Fonte de variação	GL	Fósforo		Ferro		Zinco		Fitatos	
		g kg^{-1}		mg kg^{-1}		mg kg^{-1}		%	
				Geração $F_{5:6}$					
Blocos	1	1,563		221,706		3,159		0,208	
Tratamentos (ajustado)	102	0,214	*	45,296	*	30,722	*	0,306	*
Resíduo	2	0,003		1,676		0,713		0,008	
Média geral		3,19		70,53		30,36		1,13	
Média comuns - testemunhas		3,52		69,36		33,85		0,96	
Média não comuns - linhagens		3,18		70,60		30,15		1,14	
CVE (%)[1]		1,65		1,83		2,78		7,89	
Acurácia seletiva		0,99		0,98		0,99		0,99	
Variância fenotípica		0,212		48,575		29,803		0,316	
Variância ambiental		0,003		1,676		0,713		0,008	
Variância genotípica		0,209		46,899		29,090		0,308	
Herdabilidade ampla (%)[2]		98,68		96,55		97,61		97,47	
CVG (%)[3]		14,40		9,70		17,89		48,51	
Razão CVG/CVE		8,64		5,29		6,39		6,20	
				Geração $F_{5:7}$					
Repetições	1	0,045		1005,476		331,157		0,017	
Bloco/repetição (ajustado)	20	0,181		93,669		23,182		0,235	
Tratamentos (ajustado)	120	1,142	*	147,735	*	8,828	*	0,612	*
Resíduo	100	0,099		74,803		5,165		0,161	
Eficiência do látice (%)		107,44		101,11		148,29		102,98	
Média geral		3,95		68,65		23,20		1,71	
Média das testemunhas		3,94		70,00		22,72		1,99	
Média das linhagens		3,95		68,61		23,22		1,70	
CVE (%)[1]		7,97		12,60		9,79		23,50	
Acurácia seletiva		0,55		0,70		0,64		0,86	
Variância fenotípica		0,071		73,867		4,414		0,306	
Variância ambiental		0,051		37,401		2,583		0,081	
Variância genotípica		0,022		36,466		1,831		0,225	
Herdabilidade ampla (%)[2]		30,31		49,37		41,49		73,63	
CVG (%)[3]		3,72		8,80		5,83		27,77	
Razão CVG/CVE		0,47		0,70		0,59		1,18	

[1]Coeficiente de variação experimental. [2]Herdabilidade no sentido amplo. [3]Coeficiente de variação genético.
* Significativo pelo teste F a 5% de probabilidade

Os valores de coeficiente de variação experimental e de acurácia seletiva foram utilizados como indicadores de precisão experimental (Tabela 2). Na geração $F_{5:6,}$ os valores de coeficiente de variação experimental variaram de 1,65 (concentração de fósforo) a 7,89% (concentração de fitatos). Para todos os caracteres avaliados na geração $F_{5:7}$, os coeficientes de variação mostraram-se mais alto, com amplitude de variação de 7,97 (concentração de fósforo) a 23,50% (concentração de fitatos). Valores de coeficientes de variação superiores aos obtidos na geração $F_{5:6}$ e semelhantes aos verificados na geração $F_{5:7}$ foram observados para a concentração de fósforo (JOST et al., 2010; JOST et al., 2012; MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016), ferro (BLAIR et al., 2009; JOST et al., 2009; MARTINS et al., 2016), zinco (BLAIR et al., 2009; MARTINS et al., 2016; MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016) e fitatos (DORIA et al., 2012; ZILIO et al., 2017) em experimentos de avaliação de linhagens de feijão do grupo Mesoamericano.

A primeira geração avaliada apresentou maior precisão experimental, o que não é comumente observado no delineamento de blocos aumentados. De acordo Ramalho, Ferreira e Oliveira (2005), os tratamentos regulares (100 linhagens avaliadas) não tem influência sobre a estimativa do erro experimental, pois o erro é calculado sobre os tratamentos comuns, assim se o número de testemunhas for muito grande a avaliação das linhagens é prejudicada, pois haverá maior eficiência do delineamento ao analisar os caracteres, devido as médias das testemunhas e não das linhagens. Ademais, as semelhanças entre as testemunhas utilizadas no primeiro experimento, também podem explicar a maior precisão na geração $F_{5:6}$ do que na geração $F_{5:7}$. Diferindo do que Aguiar, Ramalho e Souza (2000) observaram ao estudarem famílias segregantes de feijão do grupo Mesoamericano comparando os delineamentos em blocos aumentados e um látice 14 x 14, onde o último mostrou-se mais preciso (CV: 25,47%) do que o blocos aumentados (CV: 31,97%). Além disso, é possível observar que os fitatos apresentaram os maiores valores de coeficiente de variação experimental em ambas as gerações estudadas, tal fato pode ser explicado pela influência ambiental de altas umidades relativas médias e precipitação no final do ciclo (Figura 1), que é quando acontece sua síntese no interior da planta (LOPEZ-ARREDONDO et al., 2014).

A acurácia seletiva é uma estimativa de precisão experimental que utiliza não apenas do viés estatístico, mas também os valores genéticos dos tratamentos avaliados, permitindo maior segurança na interpretação das informações obtidas (RESENDE; DUARTE, 2007). A geração $F_{5:6}$ apresentou valores de acurácia seletiva, variando de 0,98 (concentração de ferro) a 0,99 (demais caracteres), o que é configurado como precisão experimental muito alta, de acordo com as classes estabelecidas por Resende e Duarte (2007). Menores valores para a

acurácia seletiva foram verificados na geração $F_{5:7}$, que oscilou de moderada precisão experimental para as concentrações de fósforo e de zinco (0,55 e 0,64, respectivamente) e alta, para as concentrações de ferro (0,70) e de fitatos (0,86), conforme classes previamente descritas por Resende e Duarte (2007). A menor acurácia seletiva observada no segundo experimento não era esperada, uma vez que o delineamento látice é considerado eficiente ao avaliar linhagens em fases intermediárias (F_4-F_6) de um programa de melhoramento. A casualização das linhagens e das testemunhas em vários blocos menores, proporciona comparações mais precisas como é o caso do delineamento látice. Contudo, tal fato pode ser explicado devido a maior variância ambiental e, consequentemente, ao maior quadrado médio do resíduo, diminuindo assim a precisão experimental.

Valores de acurácia seletiva indicando boa precisão experimental, como verificados na geração $F_{5:6}$ para todos os caracteres, também foram observados por Silva et al. (2012) ao avaliarem a concentração de fósforo, ferro e zinco em 100 linhagens de feijão provenientes da Universidade Federal de Lavras e por Martins et al. (2016) estudando a qualidade nutricional para a concentração de ferro (0,95) e zinco (0,96) em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano. Não foram encontrados trabalhos de avaliação da precisão experimental para a concentração de fitatos em linhagens de feijão. Estimativas de acurácia seletiva alta (> 0,70) garantem maior confiabilidade nos resultados obtidos (RESENDE; DUARTE, 2007), e, portanto, servem como suporte na tomada de decisão para selecionar linhagens com alta concentração de fósforo, ferro, zinco e baixo fitatos, permitindo ganhos genéticos.

Na Tabela 2 encontram-se as médias gerais, das testemunhas e das linhagens observados para os minerais fósforo, ferro, zinco e fitatos nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$ avaliadas neste estudo. De modo geral, as médias verificadas para a concentração de fósforo e de ferro nos grãos de feijão nas duas gerações estudadas entre os tratamentos comuns (testemunhas) e as linhagens foram semelhantes. Valores médios semelhantes para a concentração de fósforo foram encontrados por Jost et al. (2010) ao avaliar em dois locais o desempenho de 19 cultivares de feijão, embora outros autores verificaram concentrações de fósforo superiores em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano (SILVA et al., 2012; STECKLING et al., 2017). O menor acúmulo de fósforo nos grãos se deu na geração $F_{5:6}$, na safrinha de 2017, sendo que o acumulado de precipitação no início do desenvolvimento e do enchimento dos grãos da cultura (Figura 1) diminuiu a sua concentração devido à alta mobilidade deste mineral na planta (SCHLEMMER et al. 2009), evidenciando o efeito ambiental sobre o elemento fósforo. Pereira et al. (2011) também observaram menor acúmulo de fósforo nos grãos de feijão em situação de umidade relativa e acumulados pluviométricos semelhantes,

nas mesmas fases de desenvolvimento da cultura do feijão como a do presente estudo. Já para a concentração de ferro, médias superiores foram observadas por Buratto e Moda-Cirino (2016), ao estudarem cruzamentos entre cultivares de feijão cultivadas nos municípios de Guarapuava e Ponta Grossa, no Paraná. As menores concentrações de ferro observadas no presente estudo podem ser justificadas pelos diferentes parentais utilizados nos cruzamentos, além dos diferentes ambientes de cultivo, concentração de minerais no solo e condições climáticas.

Na geração $F_{5:6}$ foram obtidos valores médios maiores para a concentração de zinco e menores para fitatos, enquanto que na geração $F_{5:7}$ o comportamento para estes caracteres se deu de maneira contrária (Tabela 2). Assim, apenas as testemunhas avaliadas no primeiro experimento mostraram concentração média de zinco superior a 31 mg kg^{-1} de MS, que é considerada como alta para grãos de feijão (TRYPHONE; NCHIMBI-MSOLLA, 2010). Valores médios semelhantes aos observados na geração $F_{5:6}$ foram constatados por Barros e Prudêncio (2016) em cultivares de feijão comercializadas na região Sul e Sudeste do Brasil, e por Teixeira et al. (2015) ao estudar populações originárias de cruzamentos entre linhagens com alta concentração de zinco nos grãos de feijão do grupo Mesoamericano. Para a concentração de fitatos as linhagens de feijão, de modo geral, nas duas gerações avaliadas, $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, tanto as testemunhas quanto as linhagens apresentaram concentração de fitatos acima do sugerido por Pereira et al. (2011) como baixa concentração de fitatos (0,40%). Blair et al. (2012) encontraram valores inferiores de fitatos (1,39%) nos grãos de feijão em linhagens obtidas a partir do cruzamento entre uma linhagem Mesoamericana e outra Andina. No entanto, de acordo com Torrezan, Frazier e Cristianini (2010), as leguminosas podem apresentar desde 0,5 a 5,0% de fitatos em seus grãos, pois esse composto é importante em funções metabólicas das plantas. Contudo, quanto menor forem os valores médios de fitatos observados em grãos de feijão, maior será o aproveitamento de fósforo, ferro e de zinco pelo organismo humano (KATUURAMU et al., 2018).

Na geração $F_{5:6}$, a variância genotípica superou a variância ambiental para a concentração dos minerais (fósforo, ferro e zinco) e fitatos nos grãos de feijão (Tabela 2). Entretanto, na geração $F_{5:7}$ as variâncias ambientais se sobrepuseram às variâncias genéticas para a concentração de fósforo, ferro e zinco, enquanto que para os fitatos a variância genotípica foi maior do que a variância ambiental. Assim, evidenciou-se que as condições ambientais que ocorreram durante o cultivo da cultura apresentaram uma maior interação com os tratamentos avaliados na geração $F_{5:7}$, ou seja, obteve-se um maior quadrado médio do resíduo nessa geração, aumentando assim a variância ambiental, possivelmente devido ao

maior número de tratamentos estudados. As variâncias ambientais também foram superiores as variâncias genotípicas para concentração de fósforo, de zinco (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016) e de ferro (JOST et al., 2012) em experimentos de avaliação de linhagens de feijão. Hossain et al. (2013) ao estudarem 11 linhagens de feijão na Universidade Estadual de Dakota do Norte, verificaram variâncias genéticas maiores do que as variâncias ambientais para fósforo e ferro, enquanto que o contrário foi observado para o zinco. Não foram encontrados na literatura trabalhos prévios que estimaram variâncias fenotípicas, genéticas e ambientais para a concentração de fitatos em grãos de feijão.

As causas das variâncias fenotípicas, genotípicas e ambientais estão intrinsecamente ligadas com as estimativas de herdabilidade (CRUZ; REGAZZI, 2004), medindo a confiabilidade sobre os caracteres da população analisada, uma vez que as variâncias são utilizadas para a estimação da herdabilidade. A herdabilidade quando estimada para linhagens de feijão em geração $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, ou seja, com homozigose dos locos aproximada de 93,75%, pode ser considerada de sentido restrito, uma vez que as duas estimativas de herdabilidade, amplo e restrito, nessa fase são praticamente iguais (HANSON, 1963). Em plantas autógamas como é o caso do feijão, busca-se a fixação dos caracteres, que é devido ao efeito aditivo dos genes. As estimativas de herdabilidade no sentido restrito permitem verificar se houve a aditividade do caractere pelos genes, contudo quando as linhagens já apresentam alto grau de homozigose, os valores de herdabilidade no sentido amplo e restrito representam o mesmo efeito. Na Tabela 2 é possível verificar que na geração $F_{5:6}$ foram observados valores de herdabilidade superiores a 96,55% para todos os minerais avaliados, inclusive para os fitatos. Contudo, na geração $F_{5:7}$ foram verificadas menores estimativas de herdabilidade, variando de 30,31% (fósforo) a 73,63% (fitatos), devido as maiores variâncias ambientais verificadas no experimento de safrinha 2017.

Valores de estimativas de herdabilidade no sentido amplo para a concentração de fósforo semelhantes aos observados na geração $F_{5:7}$ foram obtidos por Maziero, Ribeiro e Facco (2016) ao estudarem quatro populações segregantes de feijão do grupo Mesoamericano para aumento da concentração deste mineral. Além do fósforo, os mesmos autores estudaram a herdabilidade para a concentração de zinco nas mesmas populações que estavam em geração $F_{6:8}$, e observaram amplitudes de magnitudes variando de baixa (21,80%) a alta (64,30%). Valores de herdabilidade no sentido amplo, semelhantes aos obtidos nas duas gerações avaliadas no presente estudo, foram encontradas em linhagens elite de feijão da Embrapa Arroz e Feijão em Santo Antônio de Goiás para o acúmulo de zinco em grãos (MARTINS et al., 2016). Estimativa de herdabilidade de alta magnitude para à concentração de fósforo,

como a observada na geração $F_{5:6,}$ indica sucesso na seleção de linhagens com alta concentração desse mineral nos grãos de feijão, uma vez que mostram superioridade dos efeitos genéticos nas linhagens em relação aos efeitos do ambiente.

Para o mineral ferro, Jost et al. (2010) avaliando 289 linhagens de feijão em geração F_7 de cruzamentos entre as cultivares Minuano x Diamante Negro e Diamante Negro x IAPAR 44 e avançadas por métodos de condução de populações diferentes obtiveram estimativa de herdabilidade no sentido amplo de 59%, ou seja, de magnitude intermediária, corroborando com os valores verificados na geração $F_{5:7}$ avaliada neste trabalho. Possobom et al. (2015) observaram variações de 54,69% e 68,54% ao estudar estimativas de herdabilidade no sentido restrito e amplo, respectivamente, em geração inicial para ferro para progênies do cruzamento de duas linhagens puras. Devido aos poucos trabalhos encontrados na literatura avaliando herdabilidade no sentido amplo para a concentração de ferro em gerações avançadas, utilizaram-se informações destas estimativas em geração inicial. De acordo com Silva, Abreu e Ramalho (2013), altas estimativas de herdabilidade em sentido amplo podem ser atribuídas a ampla variabilidade para a concentração encontrada no germoplasma em estudo. Para plantas autógamas, altas magnitudes de herdabilidade no sentido restrito indicam fixação de alelos favoráveis passados de geração em geração (RAMALHO et al., 2012).

A concentração de fitatos apresentou alta magnitude na estimativa de herdabilidade independente da geração em que foi avaliada, variando de 97,47 (geração $F_{5:6}$) a 73,63% (geração $F_{5:7}$) (Tabela 2). As estimativas de herdabilidade observadas nas duas gerações para fitatos permitem inferir que é possível fixar alelos responsáveis pela baixa concentração de fitatos em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano. Magnitudes inferiores foram observadas por Katuuramu et al. (2018) ao avaliarem 206 genótipos de feijão Andino (108 cultivares, 72 variedades e 26 linhagens), observaram estimativas de herdabilidade no sentido restrito de baixa magnitude (24,7%). A comparação dos valores de herdabilidade com estimativas de feijão de outro centro de origem se deve a falta de informação dentro do grupo gênico Mesoamericano. Contudo, esta estimativa de herdabilidade serviu como balizador para mostrar que as 100 linhagens oriundas dos cruzamentos entre BRS Esteio e SCS 205 Riqueza, apresentam potencial para se tornarem linhagens com baixo acúmulo de ácido fítico nos grãos.

A média geral da quantidade de variação genética presente no germoplasma pode ser expressa pelo coeficiente de variação genético (CVG), de modo que quanto mais alto for o seu valor percentual, maior o potencial genético das linhagens para a seleção. Valores de coeficiente de variação genético superior ao ambiental foram verificados por Martins (2016)

em linhagens de feijão do grupo Mesoamericano, tais valores de CVG associados aos ganhos preditos com a seleção e razão de CVG/CVE próximos a unidade, serviram de balizadores para a seleção de linhagens para compor ensaios de validação em cinco ambientes agrícolas. Maziero, Ribeiro e Facco (2016) ao estudarem populações em geração $F_{6:8}$ de cruzamentos contrastantes para os minerais potássio, fósforo, zinco e cobre identificaram cinco linhagens de feijão com alta concentração de zinco, nas populações segregantes que se mostraram com os maiores coeficientes de variação genético, mesmo que não fosse superior ao ambiental. A relação entre o coeficiente de variação genético e ambiental (razão CVG/CVE) permite quantificar a proporção da variabilidade genética em relação à variabilidade ambiental, sem considerar o efeito da média na população avaliada (MARTINS, 2016). Nos tratamentos avaliados foi possível observar razões CVG/CVE acima da unidade para todos os caracteres na geração $F_{5:6}$, já na geração $F_{5:7}$ os valores oscilaram de 0,47 (concentração de fósforo) a 1,18 concentração de (fitatos). De acordo com Vencovsky (1992), valor da razão CVG/CVE igual ou superior a unidade, tem-se sucesso na seleção para determinado caractere, pois significa que a variância genotípica é maior do que a variância devida ao ambiente.

Para o macromineral fósforo, razões CVG/CVE inferiores em linhagens de feijão, variando de zero (JOST et al., 2010) a 0,30 (MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016), evidenciando assim que as linhagens provenientes do cruzamento entre BRS Esteio x SCS 205 Riqueza, apresentaram maior coeficiente de variação genotípico, e portanto, maior potencial para acumular fósforo nos grãos de feijão. No entanto, Martins et al. (2016) encontraram razões de CVG/CVE inferiores e superiores aos apresentados nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, respectivamente, para a concentração de ferro e de zinco em grãos de feijão do grupo Mesoamericano. Valores similares a razão CVG/CVE para ferro (0,70) e zinco (0,59) na geração $F_{5:7}$, também foram verificadas por Jost et al. (2012) e Maziero, Ribeiro, Facco (2016), ao estudar linhagens híbridas em geração F_7 (ferro) e $F_{6:8}$ (zinco), respectivamente, provenientes de cruzamento entre cultivares visando desenvolver linhagens com alta concentração destes. Esperava-se que o potencial genético das linhagens para o aumento da concentração de minerais verificado na geração $F_{5:6}$ se mantivesse na geração $F_{5:7}$, contudo isso não foi observado devido ao efeito ambiental ter afetado o desempenho das linhagens no segundo experimento. Segundo Vencovsky (1964) com valores da razão CVG/CVE maior que a unidade é verificado ganho genético para o caractere avaliado. A concentração de fitatos para ambas as gerações, obteve os maiores valores de coeficientes de variação genético dentre os caracteres analisados, o que refletiu em razões CVG/CVE, superiores a unidade. Assim,

corroborando com os valores de alta herdabilidade e variâncias genéticas encontradas para a concentração de fitatos.

O tipo de herança da concentração dos minerais e de fitatos pode ser verificado por meio das distribuições de frequência das variáveis estudadas nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, oriundas do cruzamento entre os parentais BRS Esteio e SCS 205 Riqueza (Figura 2). Para ambas as gerações avaliadas, foi observado um comportamento de uma variável aleatória contínua para a concentração de fósforo, ferro, zinco e fitatos, sugerindo herança quantitativa, ou seja, entre os valores extremos observados nas linhagens, existem várias classes intermediárias. Uma variável contínua pode assumir um número infinito de diferentes valores dentro de uma faixa contínua de variação, apresentando herança complexa, ou seja, muitos genes envolvidos (MARTINS; DONAIRE, 2012). De acordo com Cruz (2012), caracteres de herança quantitativa representam maiores dificuldades para a seleção do que os caracteres de herança qualitativa, em virtude do grande número de genes envolvidos na expressão do caráter, uma vez que esses genes possuem pequeno efeito sobre o genótipo. Blair et al. (2012) ao estudarem possíveis associações entre o mineral fósforo e a concentração de fitatos com o auxílio de 11 marcadores moleculares verificaram herança quantitativa para os dois caracteres, em grãos de feijão de linhagens em geração $F_{7:11}$, oriundos do cruzamento entre DOR364 (Mesoamericana) x G19833 (Andina).

Para os microminerais ferro e zinco, vários trabalhos tem mostrado que seu comportamento é controlado por muitos genes e muito influenciado pelo ambiente em geração inicial (JOST et al., 2009; POSSOBOM et al., 2015) e avançada (BLAIR et al., 2009, 2010;; MAZIERO; RIBEIRO; FACCO, 2016). Blair et al. (2009) ao avaliarem o padrão de herança da concentração de ferro e de zinco em linhagens de feijão em geração $F_{7:11}$ do cruzamento entre linhagens de feijão do grupo Mesoamericano e Andino, verificaram características quantitativas para os dois minerais, após avaliar conjuntamente a normalidade, a curtose e a assimetria em gráficos de distribuição de frequência. Semelhante ao que foi verificado neste estudo, sugerindo então dificuldades na seleção de linhagens com alta concentração de ferro e zinco em grãos de feijão do grupo Mesoamericano.

A aplicação do teste de Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de probabilidade, indica que o fósforo foi o único dos caracteres a apresentar normalidade dos dados em ambas as gerações ($F_{5:6}$ e $F_{5:7}$) avaliadas (Figura 2A e 2B). Tal fato pode ser explicado pela pequena variação entre valores extremos (máximos e mínimos) dos dados, o qual pode ser verificado pelo desvio padrão próximo a zero. No entanto, para os minerais ferro e zinco, e fitatos não houve distribuição normal dos dados pelo o teste de Shapiro-Wilk (Figura 2C, 2D, 2E, 2F, 2G e 2H).

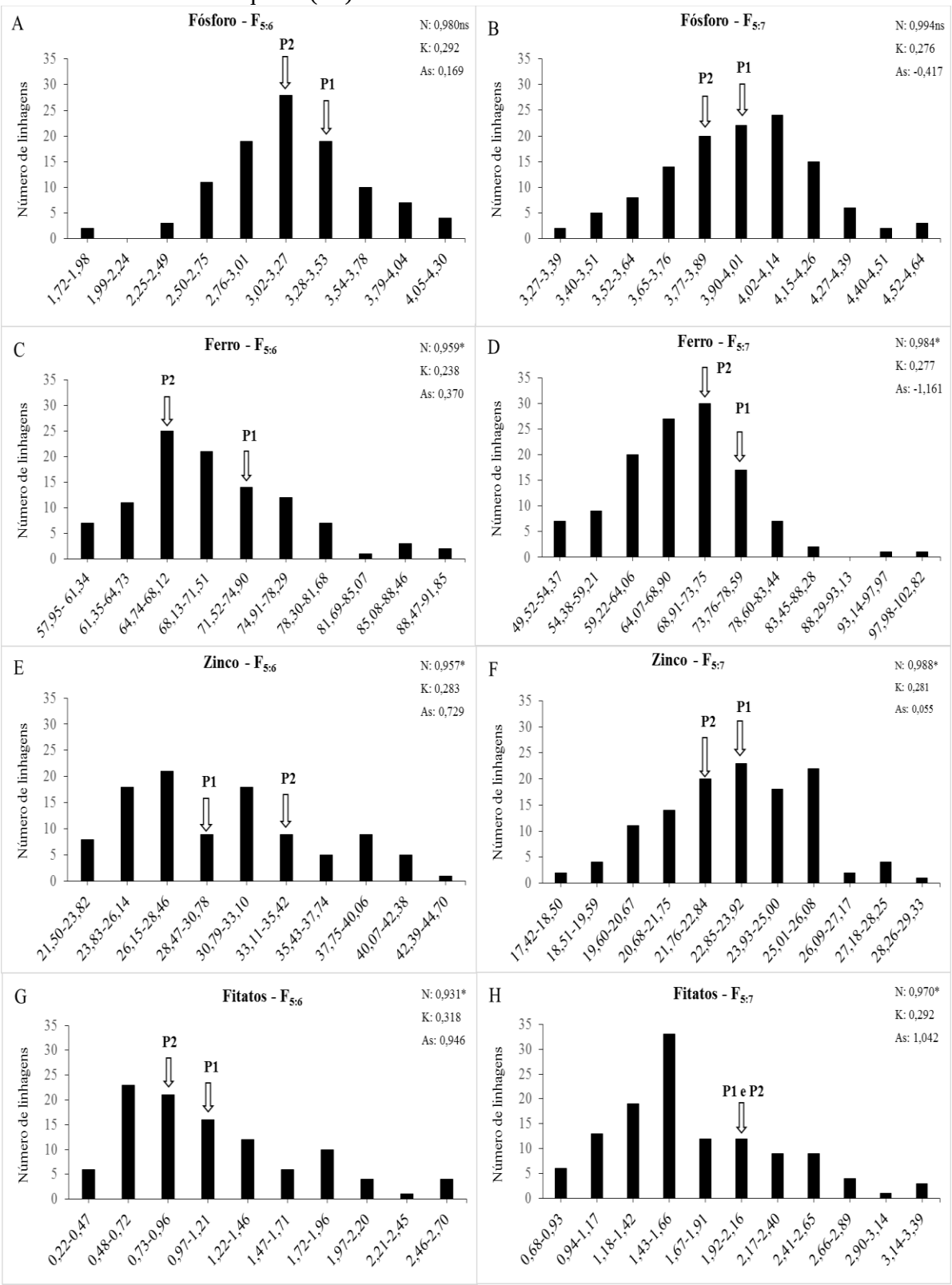
Embora que normalidades não significativas para ferro e significativas para a concentração de zinco foram observadas em 87 linhagens de feijão oriundas do cruzamento entre uma linhagem Mesoamericana e outra Andina (geração $F_{7:11}$) desenvolvidas no Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (BLAIR et al., 2009). As diferenças verificadas entre Blair et al. (2009) e este estudo para a normalidade dos dados, pode ser explicada pela maior ou menor amplitude entre as concentrações extremas dos minerais, de modo que aquelas que possuem maiores valores extremos apresentam normalidade significativa dos dados.

A curtose (K) determina o grau de achatamento de uma curva de distribuição de frequência. O grau de achatamento observado nos gráficos de distribuição de frequência pode ser classificado como leptocúrtica para todos os caracteres avaliados, independentemente da geração avaliada (Figura 2A, 2B, 2D, 2F, 2G e 2H), exceto para o ferro na geração $F_{5:6}$, o qual apresentou distribuição platicúrtica (Figura 2C). Isto significa que os valores de curtose foram maiores do que o coeficiente da curva normal (0,263), indicando um pico mais acentuado das observações na distribuição de frequência, e por isso, foram denominados de distribuições leptocúrticas (RODRIGUES, 2015). Enquanto que o ferro obteve a classificação de platicúrtica, devido ao maior achatamento da curva, pois o valor de curtose foi menor do que o coeficiente da curva normal. Blair et al. (2009) verificaram coeficientes de curtose variando de -0,45 a 0,36 para ferro e de -0,01 a 2,45 para o zinco em gerações $F_{7:11}$ de feijão, diferindo dos valores encontrados na Figura 2C, 2D, 2E e 2F, para ambas as gerações estudas neste trabalho. Não foram encontrados outros trabalhos prévios avaliando curtose em linhagens avançadas de feijão do grupo Mesoamericano. Entretanto, em geração $F_{2,}$ nos histogramas montados por Buratto (2012) avaliando 1400 acessos de feijão do grupo Mesoamericano em dois cultivos agrícolas e em quatro municípios diferentes no Estado do Paraná, foi observado que o grau de achatamento das curvas foi classificado como platicúrticas para os minerais fósforo e zinco e leptocúrticas para o ferro.

A assimetria (AS) da curva está vinculada com o deslocamento da mesma em relação a curva normal dos dados (MARTINS; DONAIRE, 2012). Assimetrias positivas (> 0) foram observadas para todos os caracteres estudados na geração $F_{5:6}$, indicando que houve o deslocamento das curvas para a direita em relação a curva normal (Figura 2 A, 2C, 2E, 2F e 2G). Na geração $F_{5:7}$ foram verificadas assimetrias negativas (< 0) para a concentração de fósforo e de ferro, e positivas para a concentração de zinco e de fitatos (Figura 2 B e 2D e 2F e 2H, respectivamente). Ao estudar o padrão de herança e dois diferentes métodos para determinar a concentração de ferro e de zinco em geração $F_{7:11}$ de feijão, Blair et al (2009)

verificaram valores de assimetria positivos para todos os tratamentos avaliados, exceto para o ferro, que apresentou valor negativo. Em gerações iniciais (F_2), coeficientes de assimetria maiores do que zero ocorreram para a concentração de fósforo, ferro e zinco em 1400 acessos de feijão do grupo Mesoamericano em quatro municípios no Estado do Paraná (BURATTO, 2012).

Figura 2 - Distribuição de frequência para a concentração de fósforo (g kg^{-1} de matéria seca - MS), ferro (mg kg^{-1} de MS), zinco (mg kg^{-1} de MS) e fitatos (%) em grãos de feijão do grupo Mesoamericano avaliados nas gerações $F_{5:6}$ (safrinha 2017) e $F_{5:7}$ (safra 2017/2018), obtidos do cruzamento entre os parentais BRS Esteio (P1) e SCS 205 Riqueza (P2).



*N= normalidade dos dados; K= curtose; As= assimetria.

A partir dos gráficos de distribuição de frequência é possível verificar as amplitudes mínimas e máximas para a concentração de fósforo, ferro, zinco e fitatos, apresentadas na Figura 2. Conjuntamente a essa informação, pode ser verificado na Tabela 3 o ranqueamento das vinte melhores linhagens selecionadas para cada caractere individualmente, excluindo-se as cultivares utilizadas para o balanceamento do delineamento látice, as quais foram determinadas por meio do índice ase de Willians (1962). No presente estudo, objetivou-se o aumento da concentração dos minerais e a redução dos fitatos nos grãos de feijão.

As amplitudes máximas e mínimas obtidas para a concentração de fósforo nos grãos de feijão na geração $F_{5:6}$ foram de 1,72 a 4,30g kg^{-1} de MS e de 3,27 a 4,64 g kg^{-1} de MS para a geração $F_{5:7}$, respectivamente (Figura 2A e 2B). As linhagens L26-17 e L19-17 foram ranqueadas com as maiores concentrações de fósforo na geração $F_{5:6}$, apresentando 4,30 e 4,26 g kg^{-1} de MS, respectivamente. Na geração $F_{5:7}$, verificou-se que as linhagens L34-17, L65-17 e L61-17 obtiveram os maiores valores de fósforo quando comparadas com as demais linhagens avaliadas neste estudo (Tabela 3). Concentrações superiores de fósforo foram observadas em genótipos de feijão cultivados em diversas regiões do mundo (HOSSAIN et al., 2013; PINHEIRO et al., 2010; PEREIRA et al., 2011; SILVA et al., 2012; MAZIERO et al., 2015), indicando que é possível obter cultivares de feijão biofortificadas para este mineral. Nenhuma das linhagens avaliadas neste estudo, em ambas as gerações, foram consideradas com alta concentração de fósforo, pois de acordo com Steckling et al. (2017), seriam valores superiores a 5,00 g kg^{-1} de MS.

A baixa concentração deste macromineral nos parentais, BRS Esteio e SCS 205 Riqueza, pode ser uma das explicações, visto que o objetivo inicial do cruzamento entre estas cultivares foi o aumento da concentração de ferro e zinco. Além disso, o efeito ambiental, relacionados com as condições meteorológicas de precipitações acima da necessidade da cultura, ou seja, maiores do que 100 mm mensais, no início e final do ciclo do desenvolvimento nas duas gerações estudadas pode ser outra causa das baixas concentrações de fósforo (PEREIRA et al.,2011) (Figura 1) (Tabela 2). Condições meteorológicas de umidade relativa, precipitação e temperatura semelhantes a este estudo, também foram verificadas por Zilio et al. (2017) ao estudar a concentração de minerais de 26 genótipos de feijão em diferentes épocas de cultivo no Estado de Santa Catarina.

Tabela 3 - Classificação das 20 linhagens de feijão do grupo Mesoamericano com as maiores concentrações de fósforo (g kg^{-1} de matéria seca - MS), ferro (mg kg^{-1} de MS), zinco (mg kg^{-1} de MS) e menor concentração de fitatos (%) obtidos para as 100 linhagens avaliadas nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, nos períodos de cultivo safrinha 2017 e safra 2017/2018 obtidos em Santa Maria, RS.

	Linhagens	Fósforo	Linhagens	Ferro	Linhagens	Zinco	Linhagens	Fitatos
			Geração $F_{5:6}$					
1	L26-17	4,30	L33-17	91,85	L100-17	44,70	L61-17	0,22
2	L19-17	4,26	L14-17	90,25	L32-17	42,20	L91-17	0,29
3	L33-17	4,13	L24-17	87,75	L96-17	41,10	L67-17	0,31
4	L1-17	4,08	L7-17	86,85	L51-17	40,40	L1-17	0,39
5	L23-17	4,04	L55-17	86,55	L47-17	40,10	L4-17	0,43
6	L27-17	4,04	L8-17	82,55	L93-17	40,10	L12-17	0,45
7	L77-17	3,89	L67-17	81,65	L49-17	39,80	L43-17	0,49
8	L29-17	3,84	L52-17	81,15	L64-17	38,50	L93-17	0,49
9	L55-17	3,84	L44-17	80,45	L50-17	38,40	L79-17	0,56
10	L5-17	3,83	L61-17	79,25	L55-17	38,40	L90-17	0,56
11	L76-17	3,73	L40-17	78,45	L97-17	38,40	L71-17	0,58
12	L65-17	3,71	L57-17	78,35	L10-17	38,30	L68-17	0,59
13	L93-17	3,66	L86-17	78,35	L33-17	38,10	L4517	0,62
14	L21-17	3,63	L25-17	78,15	L61-17	37,90	L46-17	0,62
15	L10-17	3,62	L2-17	78,05	L1-17	37,60	L81-17	0,62
16	L16-17	3,62	L15-17	78,05	L63-17	37,50	L47-17	0,63
17	L72-17	3,62	L53-17	76,95	L99-17	36,30	L10-17	0,65
18	L50-17	3,59	L9-17	76,45	L54-17	35,50	L82-17	0,66
19	L51-17	3,59	L17-17	75,85	L95-17	35,50	L94-17	0,66
20	L10-17	3,59	L54-17	75,65	L98-17	35,08	L65-17	0,68
BRS Esteio		3,48		73,88		28,73		0,98
SCS 205 Riqueza		3,05		65,03		33,80		0,91
Pérola		4,02		69,18		39,03		0,98
			Geração $F_{5:7}$					
1	L34-17	4,64	L56-17	102,82	L21-17	27,98	L35-17	0,78
2	L65-17	4,60	L86-17	90,27	L61-17	27,72	L55-17	0,80
3	L61-17	4,56	L16-17	83,57	L24-17	27,64	L29-17	0,86
4	L89-17	4,50	L32-17	83,25	L89-17	27,29	L72-17	0,92
5	L52-17	4,38	L34-17	82,27	L79-17	26,32	L39-17	0,93
6	L92-17	4,35	L89-17	81,80	L10-17	26,03	L53-17	0,96
7	L24-17	4,34	L54-17	81,27	L69-17	25,97	L90-17	0,98
8	L69-17	4,33	L79-17	80,12	L65-17	25,87	L12-17	0,98
9	L9-17	4,31	L66-17	78,75	L34-17	25,87	L82-17	1,06
10	L71-17	4,26	L17-17	78,52	L92-17	25,72	L73-17	1,07
11	L1-17	4,26	L14-17	78,22	L15-17	25,71	L38-17	1,07
12	L36-17	4,25	L80-17	77,82	L99-17	25,67	L5-17	1,09
13	L68-17	4,24	L15-17	77,02	L19-17	25,64	L45-17	1,10
14	L11-17	4,23	L61-17	75,32	L46-17	25,63	L10-17	1,11
15	L74-17	4,22	L65-17	75,02	L50-17	25,53	L92-17	1,13
16	L54-17	4,21	L19-17	74,87	L38-17	25,46	L76-17	1,17
17	L66-17	4,21	L4-17	74,72	L16-17	25,40	L17-17	1,18
18	L3-17	4,20	L99-17	74,57	L53-17	25,39	L80-17	1,19
19	L83-17	4,20	L62-12	74,52	L23-17	25,26	L27-17	1,19
20	L19-17	4,19	L20-17	74,47	L8-17	25,23	L48-17	1,22
BRS Esteio		4,01		78,27		23,30		2,08
SCS 205 Riqueza		3,71		72,77		21,86		2,01
Pérola		3,94		66,37		24,43		1,59

As amplitudes mínimas e máximas para a concentração de ferro em ambas as gerações, $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, podem ser visualizadas na Figura 2C e 2D. As linhagens L33-17 e L14-17 foram as únicas linhagens que ultrapassaram os 90 mg kg^{-1} de MS de ferro na primeira geração avaliada. Na geração $F_{5:7}$, foi verificada que a linhagem L56-17 apresentou 102,82 mg kg^{-1} de MS, podendo ser caracterizada com alta concentração de ferro, ou seja, acima de 95 mg kg^{-1} de MS de acordo com Ribeiro et al. (2013). O consumo de grãos de feijão biofortificados pela população que apresenta deficiência mineral para o ferro, reduzirá os sintomas de anemia, além de diminuir o surgimento de debilitações cognitivas e físicas (ABBASPOUR; HURRELL; KELISHADI, 2014). Nesse sentido, a L56-17 é uma importante linhagem a ser utilizada para novas hibridações ou para lançamento como nova cultivar. A linhagem L86-17 também se mostrou com concentração média de ferro nos grãos semelhantes as melhores linhagens da geração $F_{5:6}$, indicando que foram obtidas linhagens com concentração semelhante a observada na literatura para este micromineral (Tabela 3). No Brasil, foram lançadas duas cultivares de feijão consideradas biofortificadas para ferro, com valores de 78,84 (BRS Agreste) e de 80,24 mg kg^{-1} de MS (BRS Pontal) (BASINELLO et al., 2009). Isso evidencia que as linhagens de feijão avaliadas no presente estudo apresentam potencial tanto para serem lançadas como cultivares com alta concentração de minerais, bem como utilizadas para novos cruzamentos.

Para o micromineral zinco na primeira geração avaliada neste estudo, aproximadamente 45 linhagens apresentaram concentrações acima de 31 mg kg^{-1} de MS e foram classificadas com alta concentração de zinco (TRYPHONE; NCHIMBI-MSOLLA, 2010) (Figura 2E e 2F). As vinte linhagens de feijão selecionadas pelo índice base na geração $F_{5:6}$ possuem alta concentração de zinco nos grãos, sendo que a L100-17 (44,70 mg kg^{-1} de MS), L32-17 (42,20 mg kg^{-1} de MS) e a L96-17 (41,10 mg kg^{-1} de MS) superaram os 40 mg kg^{-1} de MS (Tabela 3). Enquanto que na segunda geração avaliada, a linhagem L21-17 obteve concentração média de 27,99 mg kg^{-1} de MS, não atingindo concentração superior a 30 mg kg^{-1} de MS, no entanto apresentou concentração para zinco superior do que dos parentais e da cultivar Pérola, comum aos dois experimentos. O feijão é um alimento diário da população brasileira, principalmente daquelas de baixa renda, portanto o consumo das linhagens que possuem alta concentração de zinco nos grãos, o que representa uma alternativa para diminuir os sintomas da deficiência mineral, melhorando o sistema imunológico do consumidor (DESHPANDE et al., 2013).

Para os fitatos as amplitudes das concentrações tiveram comportamento diferenciado ao longo das duas épocas de cultivo, podendo ser observados valores variando de 0,22 a 2,70

% (geração $F_{5:6}$) e de 0,68 a 3,39 % (geração $F_{5:6}$) (Figura 2G e 2H). É possível verificar na Figura 2G que a classe da distribuição de frequência que variou de 0,22 a 0,47% da concentração de fitatos, englobou as linhagens L61-17, L91-17, L67-17, L1-17 e L4-17, as quais apresentaram conteúdo de fitatos menores do que 0,40%, e conforme Pereira et al. (2011) são consideradas com baixa concentração deste fator antinutricional. Estas linhagens representam sucesso nos programas de melhoramento de feijão para a biofortificação dos grãos desta leguminosa, pois permitem tornar os minerais mais prontamente disponíveis a absorção pelo organismo humano. Na geração $F_{5:7}$ não foram observadas linhagens de feijão com baixa concentração de fitatos. As linhagens avaliadas em gerações diferentes e o efeito ambiental muito expressivo dos fitatos, são as causas mais prováveis desta amplitude entre concentrações deste fator antinutricional nas duas gerações, e já foi observado em outros trabalhos variações entre os valores extremos dos genótipos avaliados (BLAIR et al., 2009; PEREIRA et al., 2011; SILVA et al., 2011). Esperava-se que as linhagens que obtiveram maior concentração de fósforo consequentemente tivessem alta concentração de fitatos, pois o fósforo acumula-se como sais de ácido fítico nos grãos das leguminosas, contudo isso não foi observado nos 100 genótipos avaliados nesse estudo.

Ao se avaliar as vinte linhagens de feijão com maior concentração de minerais e menor acúmulo de fitatos nos grãos, do cruzamento entre a BRS Esteio e a SCS 205 Riqueza, e avançadas pelo SSD modificado no programa de melhoramento em feijão da UFSM, foi possível verificar que algumas delas encontram-se com concentrações semelhantes as encontradas na literatura para mais de um caractere avaliado (SILVA et al., 2012; STECKLING et al. 2017) (Tabela 3). Na geração $F_{5:6}$ as linhagens L33-17 e L55-17 mostraram-se com concentração superiores à média das linhagens avaliadas no experimento, para a concentração dos minerais fósforo, ferro e zinco nos grãos (Tabela 2 e 3). Enquanto que as linhagens L61-17 e a L1-17 foram classificadas com alto zinco (>31 mg kg^{-1} de MS) e com baixa concentração de fitatos (< 0,40%), além de apresentarem concentração de fósforo (L1-17, 4,08 g kg^{-1} de MS) e de ferro (L61-17, 79,25 mg kg-1 de MS) superiores aos das testemunhas avaliadas na mesma geração.

Já na geração $F_{5:7}$, as linhagens de feijão com melhor desempenho na concentração para mais de um mineral estudado neste trabalho foram L34-17, L65-17, L89-17 e L61-17. Embora, essas linhagens não foram classificadas com alta concentração de minerais, tiveram concentrações de fósforo, ferro e zinco superiores aos parentais e a cultivar Pérola (única cultivar utilizada nos dois experimentos), exceto para as linhagens L61-17 e L65-17 para a concentração de ferro, sendo inferior ao parental BRS Esteio. A linhagem L61-17 foi a única

que se manteve entre as melhores linhagens nas duas gerações avaliadas. O bom desempenho para a concentração de ferro e de zinco da linhagem L61-17 de feijão se deu nas gerações $F_{5:6}$ e $F_{5:7}$, contudo verificou-se comportamento inverso para as concentrações médias de fósforo e de fitatos nos grãos.

O cruzamento entre as cultivares de feijão do grupo Mesoamericano, BRS Esteio e a SCS 205 Riqueza, permitiu o desenvolvimento de linhagens de feijão que possuem concentrações próximas às consideradas altas para fósforo, alta de ferro e de zinco, e baixa concentração de fitatos nos grãos, nessa fase intermediária nos programas de melhoramento. Essas linhagens constituem uma alternativa de uso promissora para novas combinações híbridas no programa de melhoramento. Também será possível lançar cultivares de feijão com qualidade nutricional para fósforo, ferro, zinco e baixo fitatos, para diminuir os sintomas de deficiência destes minerais e o efeito antinutricional dos fitatos.

5 CONCLUSÕES

A concentração de fósforo, ferro, zinco e de fitatos apresenta alta herdabilidade em feijão do grupo Mesoamericano na geração $F_{5:6}$.

A estimativa de herdabilidade de baixa magnitude (fósforo), intermediária (ferro e zinco) e alta (fitatos) é observada em feijão do grupo Mesoamericano na geração $F_{5:7}$.

As concentrações de fósforo, ferro, zinco e de fitatos apresentam herança quantitativa nas linhagens avaliadas.

A linhagem L56-17 possui alta concentração de ferro nos grãos, 102,82 mg kg^{-1} de MS, na geração $F_{5:7}$.

A linhagem L61-17 apresenta maior concentração de fósforo, ferro e zinco e menor concentração de fitatos nos grãos de feijão e será selecionada pelo programa de melhoramento.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, N.; HURRELL, R.; KELISHADI, R. Review on iron and its importance for human health. **International Journal of Research in Medical Sciences**, Rockville, v. 19, n. 2, p. 164-174, 2014.

AGUIAR, A. M.; RAMALHO, M. A. P.; SOUZA, E. A. Comparação entre látice e blocos aumentados na avaliação de famílias segregantes em um programa de melhoramento do feijoeiro. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 4, p. 857-860, 2000.

AHUJA, J. K. A. et al. **USDA Food and Nutrient. Data base for Dietary Studies**. U. S. Department of Agriculture, Beltsville. MD: Agricultural Research Service. Food Surveys Research Group. 5. ed. 2012. 108 p.

AKOND, A. S. M. et al. Minerals (Zn, Fe, Ca and Mg) and antinutrient (phytic acid) constituent in common bean. **American Journal of Food Technology**, New York, v. 6, n. 3, p. 235-243, 2011.

ASTUDILLO, C. et al. The *Phaseolus vulgaris* ZIP gene family: identification, characterization, mapping, and gene expression. **Plant Physiology**, Parkville, v. 4, n. 6, p. 1-12, 2013.

BARROS, M.; PRUDENCIO, S. H. Physical and chemical characteristics of common bean varieties. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 2, p. 751-762, 2016.

BASSINELLO, P. Z. et al. **Desenvolvimento de cultivares de feijoeiro comum adaptadas e biofortificadas com ferro e zinco**. In: Reunião Anual de Biofortificação no Brasil, 2009, Aracaju. Anais: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009.

BENEVIDES, C. M. J. et al. Fatores antinutricionais em alimentos: revisão. **Segurança Alimentar e Nutricional**, Campinas, v. 18, n. 2, p. 67-79, 2011.

BLAIR, M. W. et al. Genetic diversity, inter-gene pool introgression and nutritional quality of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from Central Africa. **Theoretical and Applied Genetics**, Bethesda, v. 121, n. 2, p. 237-248, 2010.

BLAIR, M. W. et al. Inheritance of seed iron and zinc concentrations in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Molecular Breeding**, Bethesda, v. 23, n. 2, p. 197-207, 2009.

BLAIR, M. W. et al. Inheritance of seed phytate and phosphorus levels in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and association with newly-mapped candidate genes. **Molecular Breeding**, Bethesda, v. 17, n. 1, p. 1-12, 2012.

BLAIR, M. W. Mineral biofortification strategies for food staples: the example of common bean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Ithaca, v. 61, n. 35, p. 8287-8294, 2013.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 523 p.

BOUIS, H. E. et al. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. **Food and Nutrition Bulletin**, Medford, v. 32, n. 1, p. 31-40, 2011.

BOUIS, H. E.; WELCH, R. M. Biofortification-A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. **Crop Science**, Madison, v. 50, n. 1, p. 20-32, 2010.

BURATTO, J. S. **Teores de minerais e proteína em grãos de feijão e estimativa de parâmetros genéticos**. 2012. 148 f. Tese (Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

BURATTO, J. S.; MODA-CIRINO, V. Estimativas de parâmetros genéticos para ferro, zinco, magnésio e fósforo em grãos de feijão. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 8, n. 1, p. 24-31, 2017.

BURLE, M. L. et al. Microsatellite diversity and genetic structure among common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces in Brazil, a secondary center of diversity. **Theoretical and Applied Genetics**, Bethesda, v. 121, n. 1, p. 801-813, 2010.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBEIRO, N. D. Medidas da precisão experimental em ensaios com genótipos de feijão e de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1225-1231, 2009.

CARNEIRO, J. E.; DE PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. Feijão: do plantio à colheita. In: MOURA, A. D.; BRITO, L. M. **Aspectos socioeconômicos**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2015. 384 p.

CASTRO-GUERRERO, N. A. et al. Common Bean: A Legume Model on the Rise for Unraveling Responses and Adaptations to Iron, Zinc, and Phosphate Deficiencies. **Frontiers Plant Science**, Lausanne, v. 7, n. 3, p. 1-7, 2016.

CHERYAN, M. Phytic acid interactions in food systems. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Amherst, v. 13, n. 4, p. 297-335, 1980.

CICHY, K. A. et al. QTL Analysis of Seed Iron, Zinc, and Phosphorus Levels in an Andean Bean Population. **Crop Science**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1742-1750, 2009.

CICHY, K. A. et al. Inheritance of seed zinc accumulation in navy bean. **Crop Science**, Madison, v. 45, n. 3, p. 864-870, 2005.

CLEMENS, S. Zn and Fe biofortification: The right chemical environment for human bioavailability. **Plant Science**, Madison, v. 225, n. 53, p. 52-57, 2014.

COELHO, C. M. M. et al. Diversidade genética em acessos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1241-1247, 2007.

COMINELLI, E. et al. Phytic acid transport in Phaseolus vulgaris: A new low phytic acid mutant in the PvMRP1 gene and study of the PvMRPs promoters in two different plant systems. **Plant Science**, Madison, v. 270, n. 5, p. 1–12, 2018.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: feijão - 12º levantamento. Brasília: CONAB, 2017. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_10_11_27_12_boletim_graos_setembro_2017. pdf. Acesso em: 08 nov. 2017.

CORRÊA, A. M. et al. Estimativas de parâmetros genéticos e correlações entre caracteres fenológicos e morfoagronômicos em feijão-caupi. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 1, p. 88-94, 2012.

CRUZ, C. D. **Princípios de genética quantitativa**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 394 p.

CRUZ, C. D. Software – extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 38, n. 4, p. 547-552, 2016.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2004. 300 p.

CTSBF. COMISSÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE FEIJÃO. **Informações técnicas para o cultivo de feijão na Região Sul brasileira 2009**. Epagri: Florianópolis, 2010. 164 p.

DELFINO, R. de A.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Interação de polifenóis e o efeito na digestibilidade proteica de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Pérola. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. 2, p. 308-312, 2010.

DESHPANDE, J. D. et al. Zinc: The trace elements of major importance in human nutrition and health. **International Journal of Medical Science and Public Health**, Patan, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2013.

DORIA, E. et al. Anti-nutrient components and metabolites with health implications in seeds of 10 common bean (*Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus lunatus* L.) landraces cultivated in southern Italy. **Journal of Food Composition and Analysis**, Beltsville, v. 26, n. 2, p. 72-80, 2012.

DWIVEDIS, S. L. et al. Nutritionally enhanced staple food crops. **Plant Breeding Reviews**, New Jersey, v. 34, n. 1, p. 169-262, 2012.

FANTINI, A. P. et al. 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**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 435-439, 2008.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATON OF THE UNITED NATIONS. The state of Food insecurity in the world 2015. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Rome, FAO, 2015. 62 p.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATON OF THE UNITED NATIONS. The State of Food Security and Nutrition in the world 2017. Building resilience for peace and food security. Rome, FAO, 2017. 132 p.

FEREIRA, D. F. **Estatística básica**. 2. Ed. Lavras: UFLA, 2009. 644 p.

FIGUEIREDO, M. A. et al. Zinc and selenium accumulation and their effect on iron bioavailability in common bean seeds. **Plant Physiology and Biochemistry**, Bari, v. 111, n. 2, p. 193-202, 2017.

GIBSON, R. Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 361, n. 1, p. 291-299, 2012.

GOUVEIA, C. S. S. et al. Nutritional and mineral variability in 52 accessions of common 12 bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) from Madeira Island. **Journal of Agricultural Sciences**, Toronto, v. 5, n. 1, p. 317-329, 2014.

HAMBIDGE, K. M.; MILLER, L. V.; KREBS, N. F. Physiological requirements for zinc. **International Journal for Vitamin and Nutrition Research**, Boston, v. 81, n. 1, p. 72-78, 2011.

HANSON, W. D. Heritability. In: HANSON, W. D.; ROBINSON, H. F. **Statistical genetics and plant breeding**. Washington: NAS-NCR, 1963. p. 125-139.

HEFNI, M. et al. Folate content in foods commonly consumed in Egypt. **Food Chemistry**, Amsterdan, v. 121, n. 2, p. 540-545, 2010.

HOGH-JENSEN, H. et al. **The Bean – Naturally bridging agriculture and human wellbeing**. In: Dr. Innocenzo Muzzalupo (Ed.). Food Industry, Croatia: InTech, p. 23-38, 2013.

HOPPLER, M. et al. Iron Speciation in Beans (*Phaseolus vulgaris*) Biofortified by Common Breeding. **Journal of Food Science**, Raleigh, v. 79, n. 9, p. 1630-1635, 2014.

HOSSAIN, K. G. et al. Interdependence of genotype and growing site on seed mineral compositions in common bean. **Asian Journal of Plant Sciences**, Dubai, v. 12, n. 1, p. 11-20, 2013.

JOST, E. et al. Comparison among direct, indirect and index selections on agronomic traits and nutritional quality traits in common bean. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 93, n. 5, p. 1097-1104, 2013.

JOST, E. et al. Composição de macrominerais em cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 31-38, 2010.

JOST, E. et al. Potencial de aumento do teor de ferro em grãos de feijão por melhoramento genético. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 1, p. 35-42, 2009.

JUNIOR, V. R. et al. Importância da enzima fitase na nutrição animal. **Revista eletrônica Nutritime**, Viçosa, v. 12, n. 4, p. 4127-4139, 2015.

KAIDAR-PERSON, O. et al. Nutritional deficiencies in morbidly obese patients: a new form of malnutrition? Part B: minerals. **Obesity Surgery**, New York, v. 18, n. 8, p. 1028-1034, 2008.

KATUURAMU, D. N. et al. Genome-wide association analysis of nutritional composition-related traits and iron bioavailability in cooked dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Molecular Breeding**, Bracknell, v. 38, n. 44, p. 1-18, 2018.

KAVALCO, S. A. F. et al. SCS205 Riqueza: Carioca common bean cultivar for Southern Brazil. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 30, n. 1, p. 48-51, 2017.

KHUSH G, S. et al. Biofortification of corps for reducing malnutrition. **Plant Biotechnology Reports**, Lausanne, v. 6, n. 1, p. 195–202, 2012.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

LA FRANO, M. R. et al. Bioavailbility of iron, zinc and provitamin A carotenoids in biofortified staple crops. **Nutrition Reviews**, Oxford, v. 72, n. 5, p. 289-307, 2014.

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

LIMA, L. K. L. **Implicações da interação progênies x ambientes no índice de seleção envolvendo alguns caracteres na cultura do feijoeiro**. 2010. 74 f. Dissertação (Genética e Melhoramento de plantas)-Universidade Federal de Lavras, MG, 2010.

LOPEZ-ARREDONDO, D. L. et al. Phosphate Nutrition: Improving Low-Phosphate Tolerance in Crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 95-123, 2014.

LOVATO, F. et al. Composição centesimal e conteúdo mineral de diferentes cultivares de feijão biorfortificado (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 1-6, 2018.

MACHADO, E. H. S.; LEONE, C.; SZARFAC, S. C. Deficiência de ferro e desenvolvimento cognitivo. **Revista Brasileira de Crescimento e Desenvolvimento Humano**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 368-373, 2011.

MARTINEZ, D. B.; IBANEZ, G. M. V.; RINCON, L. F. Ácido fítico: aspectos nutricionales e implicaciones analíticas. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, Caracas, v. 52, n. 3, p. 219-231, 2002.

MARTÍNEZ-BALLESTA, M. C. et al. Minerals in plant food: effect of agricultural practices and role in human health. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 30, n. 2, p. 295-309, 2010.

MARTINS, A.; DONAIRE, G. **Princípios de estatística**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2012. 255 p.
MARTINS, S. M. et al. Genetic parameters and breeding strategies for high levels of iron and zinc in *Phaseolus vulgaris* L. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 15, n. 2, p. 1-11, 2016.

MAZIERO, S. M.; RIBEIRO, N. D.; STORCK, L. Simultaneous selection in beans for architecture, grain yield and minerals concentration. **Euphytica**, Wageningen, v. 205, n. 1, p. 369-380, 2015.

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

MENSACK, M. M. et al. Evaluation of diversity among common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from two centers of domestication using "omics" technologies. **BMC Genomics**, London, v. 11, p. 1-33, 2010.

MESQUITA, F. R. et al. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1114-1121, 2007.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Consumo de feijão no Brasil. Disponível em :<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camarassetoriaistematicas/documentos/camaras-setoriais/feijao/anos-anteriores/consumo-de-feijao-no-brasil-15.pdf/view>. Acesso em: 1 jun. 2017.

MONTEIRO, T. H.; VANNUCCHI, H. Funções Plenamente Reconhecidas de Nutrientes Ácido Fólico. **International Life Sciences Institute do Brasil**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 1-24, 2010.

MORAES, M. F. et al. **Práticas agronômicas para aumentar o fornecimento de nutrientes e vitaminas nos produtos agrícolas alimentares**. In: Simpósio Brasileiro de Agropecuária sustentável, 2009, Viçosa. Anais...Viçosa, MG: UFV, 2009. P. 299-312.

MORAIS, N. M. et al. Selection of common bean land cultivars based on agronomic performance, cooking time, and mineral concentration. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 3, p. 1255-1266, 2016.

NESTEL, P. et al. Biofortification of staple food crops. **Journal of Nutrition**, Rockville, v. 136, n. 4, p. 1064-1067, 2006.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Table*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). New York: ONU, 2017. 53 p.

OOMAH, B. D. et al. Phytic acid, phytase, minerals, and antioxidant activity in Canadian dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. **Journal Agriculture Food Chemetry**, München, v. 56, n. 23, p. 11312-11319, 2008.

PACHÓN, H. et al. Iron, Zinc, and Protein Bioavailability Proxy Measures of Meals Prepared with Nutritionally Enhanced Beans and Maize. **Journal of Food Science**, Raleigh, v. 74, n. 5, p. 148-155, 2009.

PEREIRA FILHO, N. A. **Teste Monte Carlo de normalidade univariado**. 2013. 74 f. Tese (Genética e Melhoramento de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2013.

PEREIRA, H. S. et al. BRS Esteio - Common bean cultivar with black grain, high yield potential and moderate resistance to anthracnose. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 13, n. 4, p. 373-376, 2013.

PEREIRA, H. S. et al. Genetic variability for iron and zinc content in common bean lines and interaction with water availability. **Genetic and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 13, n. 3, p. 6773-6785, 2014.

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.

PEREIRA, T. et al. Diversidade no teor de nutrientes em grãos de feijão crioulo no Estado de Santa Catarina. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 477-485, 2011.

PEREZ-MASSOT, E. et al. The contribution of transgenic plants to better health through improved nutrition: opportunities and constraints. **Genes and Nutrition**, London, v. 8, n. 1, p. 29-41, 2013.

PETRY, N. et al. Genetic reduction of phytate in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds increases iron absorption in young women. **The Journal of Nutrition**, Rockville, v. 143, n. 8, p. 1219-1224, 2013.

PETRY, N. et al. Review: The Potential of the Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) as a Vehicle for Iron Biofortification. **Nutrients**, Switzerland, v. 7, n. 2, p. 1144-1173, 2015.

PFEIFFER, W. H.; MCCLAFFERTY, B. Harvest plus: breeding crops for better nutrition. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 3, p. 88-95, 2007.

PIMENTEL, A. J. B. et al. Estimação de parâmetros genéticos e predição de valor genético aditivo de trigo utilizando modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 11, p. 882-890, 2014.

PINHEIRO, C. et al. Diversity of seed mineral composition of *Phaseolus vulgaris* L. germplasm. **Journal of Food Composition and Analysis**, Beltsville, v. 23, n. 4, p. 319-325, 2010.

POSSOBOM, M. T. D. F. et al. Genetic control of iron concentration in Mesoamerican and Andean common bean seeds. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 5, p. 383-391, 2015.

PRASAD, R. Micro Mineral Nutrient Deficiencies in Humans, Animals and Plants and 6 Their Amelioration. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, India - Section B: Biological Sciences, Allahabad, v. 82, n. 2, p. 225-233, 2012.

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, n. 1, p. 24-32, 2009.

RAMALHO, M. A. et al. **Genética na Agropecuária**. 5. ed. Lavras: UFLA, 2012. 566 p.

RAMIREZ-CARDENAS, L.; LEONEL, A. J.; COSTA, N. B. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 200-213, 2008.

REDDY, N. R., SATHE, S. K., SALUNKHE, D. K. Phytates in legumes and cereals. **Advances in Food Research**, New York, v. 28, n. 1, p.1-92, 1982.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

RIBEIRO, N. D. et al. Combined selection for grain yield, cooking quality and minerals in the common bean. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 4, p. 869-877, 2013b.

RIBEIRO, N. D. et al. Evaluation of special grains bean lines for grain yield, cooking time and mineral concentration. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 4, n. 1, p. 15-22, 2014b.

RIBEIRO, N. D. et al. Genetics of phosphorus content in common bean seeds. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 250-256, 2011.

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. 48, n. 10, p. 1368-1375, 2013a.

RIBEIRO, N. D. et al. Selection of common bean lines with high grain yield and high grain calcium and iron concentrations. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 1, p. 77-83, 2014a.

RIOS, S. A. et al. Biofortificação: culturas enriquecidas com micronutriente pelo melhoramento genético. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 6, p. 713-718, 2009.

RODRIGUES, D. G. **Estatística básica. Econometria básica**. Clube de autores: Edição Digital. 1. ed. 2015. 120 p.

ROOHANI, N.; HURREL, R.; SCHULLIN, R. Zinc and its importance for human health: An integrative review. **Journal of Research in Medical Sciences**, Isfahan, v. 18, n. 2, p. 144-157, 2013.

ROSA, S. S. et al. Potential for increasing the zinc content in common bean using genetic improvement. **Euphytica**, Wageningen, v. 175, n. 1, p. 207-213, 2010.

SALEH, S. M.; ABOU-SHEEL, S. M.; ABOU-HADID, A. F. Prediction and adaptation of dry bean yield under climate change conditions. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, Islamabad, v. 8, n. 2, p. 147-153, 2012.

SALTZMAN, A. et al. Biofortification: Progress toward a more nourishing future. **Global Food Security**, Washington, v. 2, n. 1, p. 9-17, 2013.

SCHLEMMER, U. et al. Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. **Molecular Nutritional Food Research**, Foster, v. 53 n. 2, p. 330-375, 2009.

SILOCHI, R. M. H. Q. et al. Nutritional technological characterization and secondary metabolites in stored carioca bean cultivars. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 24, p. 2102-2111, 2016.

SILVA, A. et al. Teor de fitato e proteína em grãos de feijão em função da aplicação de pó de basalto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 147-152, 2011.

SILVA, C. A. et al. Chemical composition as related to seed color of common bean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 12, n. 1, p. 132-137, 2012.

SILVA, C. A. et al. Genetic variability protein and mineral content in common bean lines (*Phaseolus vulgaris* L.). **Annual Report of the Bean Improvement Cooperative**, Fort Collins, v. 53, n. 1, p. 144-145, 2010.

SILVA, C. A.; ABREU, A. F. B.; RAMALHO, M. A. P. Genetic of zinc and iron concentration in common beans seeds. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 8, n. 11, p. 1001-1008, 2013.

SILVA, H. D.; FERREIRA, D. F.; PACHCECO, C. A. P. Avaliação de quatro alternativas de análise de experimentos em látice quadrado, quanto à estimação de componentes de variância. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 117-123, 2000.

SINGH, S. P. et al. Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). **Economic Botany**, New York, v. 45, n. 3, p. 379-396, 1991.

SOBOTKA, L.; ALLISON, S.; STANGA, Z. Basics in clinical nutrition: Water and electrolytes in health and disease. **Sustainable Agriculture**, Luxemburgo, v. 3, n. 6, p. 259-266, 2008.

STECKLING, S. De M. et al. Genetic diversity and selection of common bean lines based on technological quality and biofortification. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017.

TALUKDER, Z. I. et al. Genetic diversity and selection of genotypes to enhance Zn and Fe content in common bean. **Canadian Journal of Plant Science**, Saskatchewan, v. 90, n. 1, p. 49-60, 2010.

TEIXEIRA, R. K. S. et al. Implications of early selection for grain colour on iron and zinc content and productivity of common bean. **Plant Breeding**, Bonn, v. 134, n. 2, p. 193-196, 2015.

THEOBALD, H. Dietary calcium and health. **British Nutrition Foudation**, London, v. 1, n. 30, p. 237-277, 2005.

THOMPSON, B.; AMOROSO, L. **Improving Diet and Nutrition. Food- Based Approaches**. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI, India, 2014. 454 p.

TORREZAN, R.; FRAZIER, R. A.; CRISTIANINI, M. Efeito do tratamento sob alta pressão isostática sobre os teores de fitato e inibidor de tripsina de soja. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 28, n. 2, p. 179-186, 2010.

TRYPHONE, G. M.; NCHIMBI-MSOLLA, S. Diversity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes in iron and zinc contents under screenhouse conditions. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 5, n. 8, p. 738-747, 2010.

VENCOVSKY, R. **Genética quantitativa**. In: KERR, W. E. Melhoramento e genética. 1. ed. São Paulo: Melhoramento, 1969. p. 17-38.

WANDER, A. E. Cenário nacional e novas oportunidades de mercado. Embrapa Arroz e Feijão: Santo Antônio de Goiás. Disponível em:< https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/166101/1/CNPAF-2017-conafep292.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2017.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, Hoboken, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009.

WORTHINGTON, M. et al. Genetic composition and spatial distribution of farmer-managed Phaseolus bean plantings: an example from a Village in Oaxaca, Mexico. **Crop Science**, Madison, v. 52, n. 4, p. 1721 - 1735, 2012.

ZEMOLIN, A. E. et al. Genetic parameters of iron and zinc concentrations in Andean common bean seeds. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 38, n. 4, p. 439-446, 2016.

ZILIO, M. et al. Phenotypic diversity of nutrients and anti-nutrients in bean grains grown in different locations. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 4, p. 526-534, 2017.