



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

BRUNA TROVO CANIZELLA

**EFICIÊNCIA DE USO DE MAGNÉSIO POR CULTIVARES DE  
FEIJOEIRO**

---

Londrina  
2014

BRUNA TROVO CANIZELLA

**EFICIÊNCIA DE USO DE MAGNÉSIO POR CULTIVARES DE  
FEIJOEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira.

Londrina  
2014

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

C223e Canizella, Bruna Trovo.  
Eficiência de uso de magnésio por cultivares de feijoeiro / Bruna Trovo  
Canizella. – Londrina, 2014.  
78 f. : il.

Orientador: Adônis Moreira.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de  
Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia, 2014.  
Inclui bibliografia.

1. Feijão – Nutrição – Teses. 2. Magnésio no solo – Teses. 3. Nutrientes –  
Absorção (Fisiologia). 4. Minerais na nutrição de plantas – Teses. 5. Solos –  
Fertilidade – Teses. I. Moreira, Adônis. II. Universidade Estadual de  
Londrina. Centro de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU 635.652

BRUNA TROVO CANIZELLA

**EFICIÊNCIA DE USO DE MAGNÉSIO POR CULTIVARES DE  
FEIJOEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Agronomia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adônis Moreira  
EMBRAPA SOJA/UEL – Londrina – PR

---

Dra. Larissa Alexandra Cardoso Moraes  
EMBRAPA SOJA/UEL – Londrina – PR

---

Prof. Dr. Marco Antonio Nogueira  
EMBRAPA SOJA/UEL – Londrina – PR

Londrina, 26 de fevereiro de 2014.

*DEDICO*

*Aos meus pais, Reginaldo e Lina, e minha irmã Danielle, pelo apoio, força, incentivo e amor. Sem eles nada disso seria possível.*

## AGRADECIMENTOS

Durante esses dois anos só tenho a agradecer a todos que passaram pelo meu caminho e que com certeza deixaram um pouco de si. É muito difícil transformar sentimentos em palavras, mas serei eternamente grata a vocês, pessoas imprescindíveis para a realização e conclusão deste trabalho.

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por sempre me conceder sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

À minha família, obrigada por depositarem em mim a confiança para todas as horas.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela oportunidade oferecida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adônis Moreira, por acreditar que eu era capaz e pela orientação. Mesmo sem me conhecer você abriu as portas. Só tenho a agradecer aos seus ensinamentos, orientações, palavras de incentivo, paciência e dedicação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da Bolsa de Pós-Graduação e a Embrapa Soja (CNPSo) por todo apoio logístico para realização deste trabalho.

À Dra. Larissa Alexandra Cardoso Moraes e ao Dr. Marco Antonio Nogueira, pelos ensinamentos e sugestões na melhoria da qualidade deste trabalho.

Aos meus amigos Adriély, Ana Carolina, Ana Clara, Esmeralda, Gilberto e Ítalo, por sempre acreditarem em mim e pelo incentivo.

Aos colegas do Laboratório de Solos e Tecido Vegetal da Embrapa Soja, Adilson, Amanda, Carlos, Donizete, Esmael, Jhessica, Joviano, Juliana, Mariana, Mariana Turcatto, Mariluci, Meilyn, Paulo, Regina e Smaylla, por me receberem tão bem, me ajudarem e participarem direta e indiretamente deste trabalho.

Ao Haoan, que esteve comigo em todos os momentos.

E a todos aqueles que me ajudaram direta ou indiretamente a concluir este trabalho.

## RESUMO

O feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) é um dos componentes mais importantes na alimentação para a maioria da população brasileira. É uma planta exigente em nutriente e suscetível à deficiência hídrica durante a floração e na formação das vagens. Devido ao seu pequeno e pouco profundo sistema radicular, a planta precisa de nutrientes à disposição, no tempo e local adequados. Um dos processos fundamentais para o desenvolvimento e produção das plantas é a fotossíntese e a disponibilidade de magnésio (Mg), que impõe limites sobre este processo. Respostas distintas de cada cultivar e o fornecimento adequado de Mg para o feijoeiro podem contribuir para o incremento da produtividade e valor nutritivo dos grãos, no entanto, existem poucos estudos sobre a capacidade do solo em fornecer nutrientes e comportamento das plantas em diferentes concentrações de Mg. A eficiência do uso do Mg na seleção de cultivares de feijoeiro pode contribuir para o aumento da produtividade, estado nutricional e qualidade dos grãos. O aumento do conteúdo de Mg na planta pode diminuir, por efeito de inibição interiônica, a concentração de outros cátions hidrossolúveis que se encontram associados, principalmente, a ânions orgânicos de baixo peso molecular. Não se sabe se os teores desses compostos nos resíduos das culturas são modificados pelo aumento da aplicação de Mg no solo. O objetivo deste trabalho foi estudar a resposta do feijoeiro à fertilidade do solo e avaliar a produção, estado nutricional, componentes fisiológicos e teores de cátions hidrossolúveis no tecido vegetal do feijoeiro em função do Mg aplicado ao solo. Foram estudadas as cultivares BRS Estilo, IAPAR 81, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG) e IPR Tangará cultivadas em Neossolo Quartzarênico distrófico com cinco doses de Mg (0, 50, 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>, fonte MgCl<sub>2</sub>). Este trabalho contempla três artigos intitulados: (a) Resposta de cultivares de feijoeiro à aplicação de magnésio no solo, (b) Eficiência do uso de magnésio por cultivares de feijoeiro para produção, componentes fisiológicos e estado nutricional das plantas (c) Cátions hidrossolúveis na matéria seca do feijoeiro e balanço de íons no solo em resposta a aplicação de magnésio. Os teores dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) nas folhas e nos grãos tiveram respostas distintas entre cultivares, a cultivar IPR 81 apresentou maior taxa de remobilização de nutrientes para grãos, sendo fator importante nos estudos de biofortificação. Altas concentrações de Mg prejudicaram a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e grãos da cultivar IPR Tangará, sendo o inverso observado para as demais cultivares. As cultivares apresentaram respostas distintas em relação às doses de Mg e concentrações foliares de P, Ca, S e B. Os teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> hidrossolúveis foram influenciados pelas doses de Mg, assim como o balanço de íons da capacidade de troca de cátions (CTC) e nas relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo.

**Palavras-chave:** Absorção de nutrientes. Cátions hidrossolúveis. Eficiência de uso de Mg. Fotossíntese. *Phaseolus vulgaris*. Produção de grãos. Produção de matéria seca da parte aérea.

CANIZELLA, B. T. **Use efficiency of magnesium in common bean cultivars.** 78 p.  
Dissertation (Master's Degree in Agronomy) - State University of Londrina, Londrina, 2014.

## ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is one of the most important components in power for most of the Brazilian population. It's a demanding plant for nutrients and is susceptible to water stress during flowering and pod formation. Due to its small root system, the plant needs nutrients available in appropriate time and place. One of the fundamental processes for the development and yield of plants is photosynthesis and magnesium (Mg) availability imposes limits on this. Different responses of each cultivar and adequate supply of Mg can contribute to increase the productivity and nutritive value of the grains, however, there are few studies on the capacity of soil to provide nutrients and plant behavior use different of Mg concentration. The efficiency of Mg use in the selection of common bean cultivars can contribute to increase the productivity, nutritional status and quality of grains. Increasing the Mg content in the plant may decrease the effect of interionic inhibition, with the concentration of other water-soluble cations that are associated primarily with low molecular weight organic anions; it is not known whether the levels of these components in crop residues are modified by increasing the Mg application in the soil. The aim of this work was to study the response of common bean to soil fertility and assess, yield, nutritional status, physiological components and water-soluble cations concentration in plant tissue. The cultivars BRS Estilo, IAPAR 81, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG) and IPR Tangará grown in an Ustixix Quatzipsamment with five Mg rates (0, 50, 100, and 200 mg kg<sup>-1</sup>, MgCl<sub>2</sub> sources) were studied. The dissertation includes three manuscripts entitled: (a) Common bean cultivars response to soil magnesium application, (b) Common bean cultivars evaluation for yield, physiological components, nutritional status, and magnesium use efficiency and (c) Water-soluble cations in dry weight yield on common bean and balance of ions in soil in response to magnesium application. The nutrient content in leaves and grains (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, and Zn) had different responses among cultivars. The cultivar IAPAR 81 showed the highest remobilization of nutrients to grains, being an important factor in studies of biofortification. High concentrations of Mg decreased the dry weight yield (DWY), and grains of cultivar IPR Tangará but, the inverse was observed for the other cultivars. The cultivars showed different responses to available Mg in soil, and P, Ca, S, and B concentrations in leaves. The soluble Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, and Mn<sup>2+</sup> were influenced by Mg application, as well as the balance of ion on cations exchange capacity of (CEC) and the Ca/Mg, Ca/K, and Mg/K ratio in the soil.

**Keywords:** Dry weight yield. Grain yield. Mg use efficiency. *Phaseolus vulgaris*. Photosynthesis. Uptake of nutrients. Water-soluble cations.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Escala fenológica do feijoeiro comum .....	15
--	----

### ARTIGO A

<b>Tabela 1</b> – Atributos químicos do solo em resposta as doses de Mg e cultivares de feijoeiro .....	28
<b>Tabela 2</b> – Matéria seca total (MSPA), produção de grãos (G), relação grãos/MSPA, número de vagens e de grãos por vagem em função das doses de Mg e cultivares de feijoeiro .....	29
<b>Tabela 3</b> – Taxa fotossintética, condutância estomática, concentração de CO <sub>2</sub> , taxa respiratória, teor de clorofila e açúcares solúveis totais nas cultivares de feijoeiro em respostas as doses de Mg aplicadas .....	32
<b>Tabela 4</b> – Teores de N, P, K, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn na folha diagnóstico (3 <sup>o</sup> e 4 <sup>o</sup> folíolo a contar do ápice) nas cinco cultivares de feijoeiro em função das doses de Mg. ....	33
<b>Tabela 5</b> – Teores de N, P, K, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos nas cinco cultivares de feijoeiro em função das doses de Mg.....	34

### ARTIGO B

<b>Tabela 1</b> – Mg trocável no solo e produção de matéria seca total da parte aérea (MSPA) das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg <sup>-1</sup> ) e alta (100 mg kg <sup>-1</sup> ) concentração de Mg .....	45
<b>Tabela 2</b> – Atributos químicos do solo de cada cultivar de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg <sup>-1</sup> ) e alta (100 mg kg <sup>-1</sup> ) concentração de Mg .....	46
<b>Tabela 3</b> – Taxa fotossintética, concentração de CO <sub>2</sub> , condutância estomática, taxa respiratória, teores de clorofila e açúcares solúveis totais das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0mg kg <sup>-1</sup> ) e alta (100mg kg <sup>-1</sup> ) concentração de Mg.....	48
<b>Tabela 4</b> – Concentração de Mg nas folhas diagnóstico (3 <sup>o</sup> e 4 <sup>o</sup> trifólio a contar do ápice da planta) e dos grãos nas cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg <sup>-1</sup> ) e alta (100 mg kg <sup>-1</sup> ) concentração de Mg .....	51

<b>Tabela 5</b> – Resultados da análise foliar (3 <sup>o</sup> e 4 <sup>o</sup> trifólio a contar do ápice da planta) e dos grãos (N, P, K, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg <sup>-1</sup> ) e alta (100 mg kg <sup>-1</sup> ) concentração de Mg.....	52
<b>Tabela 6</b> – Eficiência agronômica (EAMg), fisiológica (EFMg), recuperação (ERMg), índice de eficiência (IEMg) e utilização (EUMg) das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg <sup>-1</sup> ) e alta (100mg kg <sup>-1</sup> ) concentração de Mg.....	53

## ARTIGO C

<b>Tabela 1</b> – Teores de cátions hidrossolúveis no extrato vegetal de cinco cultivares de feijoeiro.....	64
<b>Tabela 2</b> – Saturação de Ca, Mg e K na CTC e relação Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo sob cinco cultivares de feijoeiro .....	69

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO A

- Figura 1** – Efeito das doses de Mg sobre o teor do nutriente no solo (a) e na planta (b) nas cinco cultivares de feijão ..... 27

### ARTIGO B

- Figura 1** – Resposta das cultivares de feijoeiro à baixa ( $0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e alta ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) quantidade de Mg aplicado no solo ..... 50

### ARTIGO C

- Figura 1** – Relação entre as doses de Mg (a) e a produção de matéria seca total (b) com o Mg hidrossolúvel da MSPA das cinco cultivares de feijoeiro ..... 66
- Figura 2** – Relação entre o Mg disponível no solo (a) e na folha (b) com o Mg hidrossolúvel da MSPA das cinco cultivares de feijoeiro ..... 67
- Figura 3** – Relação entre o teor de Mg na folha e as doses de Mg e a produção de grãos (g/vaso) com Mg hidrossolúvel MSPA das cinco cultivares de feijoeiro ..... 68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	14
2.1	CULTURA DO FEJJOEIRO	14
2.1.1	Aspectos Gerais	14
2.1.2	Estádios Fenológicos	15
2.1.3	Exigências Nutricionais	15
2.2	MAGNÉSIO	16
2.2.1	Magnésio no Solo	16
2.2.2	Magnésio na Planta	17
	REFERÊNCIAS	19
<b>3</b>	<b>ARTIGO A – RESPOSTA DE CULTIVARES DE FEJJOEIRO À APLICAÇÃO DE MAGNÉSIO NO SOLO</b>	21
3.1	RESUMO	21
3.2	ABSTRACT	21
3.3	INTRODUÇÃO	22
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.6	CONCLUSÕES	35
3.7	AGRADECIMENTOS	35
	REFERÊNCIAS	35
<b>4</b>	<b>ARTIGO B – EFICIÊNCIA DE USO DE MAGNÉSIO POR CULTIVARES DE FEJJOEIRO PARA PRODUÇÃO, COMPONENTES FISIOLÓGICOS E ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS</b>	39
4.1	RESUMO	39
4.2	ABSTRACT	39
4.3	INTRODUÇÃO	40
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	41
4.4.1	Local e Características do Solo	41
4.4.2	Delineamento Estatístico, Adubação e Coleta das Plantas	42

4.4.3	Colheita e Análises Laboratoriais.....	42
4.4.4	Análise Estatística .....	43
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
4.6	CONCLUSÕES.....	53
4.7	AGRADECIMENTOS .....	53
	REFERÊNCIAS .....	54

<b>5</b>	<b>ARTIGO C – CÁTIONS HIDROSSOLÚVEIS NA MATÉRIA SECA DO FEIJOEIRO E BALANÇO DE ÍONS NO SOLO EM RESPOSTA A APLICAÇÃO DE MAGNÉSIO .....</b>	<b>57</b>
5.1	RESUMO .....	57
5.2	ABSTRACT .....	57
5.3	INTRODUÇÃO.....	58
5.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	59
5.4.1	Local e Características do Solo .....	59
5.4.2	Delineamento Estatístico, Adubação e Coleta das Plantas.....	59
5.4.3	Colheita e Análises Laboratoriais.....	60
5.4.4	Análise Estatística .....	61
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	61
5.6	CONCLUSÕES.....	70
5.7	AGRADECIMENTOS .....	70
	REFERÊNCIAS .....	70

	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A</b> – Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro ‘IPR Campos Gerais (CG)’ em função das doses de magnésio .....	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE B</b> – Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro ‘BRS Estilo’ em função das doses de magnésio.....	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE C</b> – Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro ‘BRS Ametista’ em função das doses de magnésio.....	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE D</b> – Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro ‘IAPAR 81’ em função das doses de magnésio .....	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE E</b> – Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro ‘IPR Tangará’ em função das doses de magnésio .....	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) é dos componentes mais importantes na alimentação para a maioria da população brasileira; o grão é fonte protéica e energética, além de carboidratos, vitaminas, minerais, fibras e compostos com ação antioxidante, que podem reduzir a incidência de doenças.

O Brasil é o maior produtor mundial desta leguminosa, com destaque para o Estado do Paraná, que produziu 28,2%, na safra 2012/2013 (CONAB 2013). Apesar da sua posição de destaque no agronegócio brasileiro, houve uma redução da área cultivada, devido às boas perspectivas de outras culturas, como a soja (*Glycine max L.*) e o milho (*Zea mays L.*), aliado a comercialização instável e aos riscos climáticos.

Essa leguminosa é exigente em nutrientes e suscetível à deficiência hídrica durante a floração e formação das vagens. Devido ao seu pequeno sistema radicular, a planta precisa de nutrientes à disposição durante todo o seu ciclo. Os elevados teores de proteínas nos grãos estão associados aos altos custos energéticos para formação das sementes, que explicam parcialmente seus menores rendimentos em comparação a outras leguminosas. A biomassa da parte aérea, o índice de colheita e os dias para maturação constituem os três componentes fisiológicos com maior influência na produção de grãos.

Existem aproximadamente 40 tipos de feijão, divididos em grupos: feijão ‘preto’, ‘carioca’ e ‘especial’. No Brasil, 52% da área cultivada são semeados com o grupo ‘carioca’. Cada cultivar possui um comportamento próprio, assim, a introdução de novas cultivares com características agrônômicas desejáveis vêm aumentando. Atualmente, o melhoramento genético do feijoeiro tem dado maior ênfase à obtenção de cultivares do grupo comercial ‘carioca’, pela maior demanda do mercado.

Um dos processos fundamentais para o desenvolvimento e produção das plantas é a fotossíntese, estando diretamente relacionada com a clorofila, da qual o magnésio (Mg) é constituinte. É por meio da fotossíntese que a planta obtém energia para crescer e produzir. O Mg é o elemento central na clorofila; essencial para os cloroplastos, atuando como co-fator e ativador de enzimas envolvidas na fixação do CO<sub>2</sub>. A sua deficiência pode afetar outros processos metabólicos além da fotossíntese, como a respiração e absorção de nutrientes. O nitrogênio (N) e o fósforo (P) são os macronutrientes mais limitantes ao crescimento do feijoeiro; porém, a carência de Mg determina, com frequência, atraso da fase reprodutiva, diminuição da produção de matéria seca total da planta e maior acúmulo de amido nas folhas de plantas deficientes. A disponibilidade do Mg pode ser afetada pela

presença de outros íons, podendo ocorrer interações positivas ou negativas entre os íons disponíveis, afetando assim a disponibilidade ou absorção dos mesmos.

Baixos teores de Mg no solo podem limitar a produção de grãos e de biomassa; sendo assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a influência de doses de Mg (fonte  $MgCl_2$ ) sobre a produtividade, componentes de produção, atributos químicos do solo, estado nutricional, eficiência de uso do nutriente, cátions hidrossolúveis na matéria seca da parte aérea (MSPA), balanço de íons no complexo de troca de cátions (CTC), teor de açúcares solúveis e aspectos fisiológicos (fotossíntese, concentração de  $CO_2$ , transpiração e condutância estomática) na cultura do feijoeiro.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CULTURA DO FEIJOEIRO

#### 2.1.1 Aspectos Gerais

O feijoeiro pertence à classe *Dicotyledoneae*, família *Fabaceae* (*Leguminosae*), gênero *Phaseolus* e espécie *Phaseolus vulgaris* L., sendo um produto tradicional na alimentação da população brasileira. Sob o ponto de vista nutricional, o feijão apresenta elevado conteúdo proteico, grande teor de fibra alimentar, alto conteúdo de carboidratos complexos e vitaminas do complexo B, além de possuir conteúdo calórico, mineral e vitamínico (RIOS et al., 2003). De acordo com dados do MAPA (2014), o consumo do produto pela população brasileira, em média, chega a 19 quilos *per capita*.

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão, e o Estado do Paraná produziu 28,2%, na safra 2012/2013. Houve redução de 15,5% da área, em relação à safra passada, com cultivo de 210,2 mil hectares (CONAB, 2013). Apesar da sua posição de destaque no agronegócio brasileiro, houve uma redução da área cultivada, devido às boas perspectivas de outras culturas (como soja e milho), comercialização instável e riscos climáticos aliados à cultura. Apenas uma pequena quantidade do feijão produzido é exportada. No ano de 2012, 4,4 mil toneladas do grão foram enviadas para comercialização no exterior; entre os principais grupos, o carioca, o preto, o caupi ou feijão de corda (*Vigna unguiculata*) e o rajado (MAPA, 2013).

O Brasil produz feijão praticamente o ano todo devido às suas condições climáticas, sendo que o plantio é feito ao longo do ano, em três épocas (YOKOYAMA, 2000). A primeira safra, ou safra das águas, ocorre entre agosto e dezembro; a segunda safra, ou da seca, ocorre entre janeiro e abril; e a terceira safra, ou de inverno, é realizada de maio até julho ou agosto, dependendo da região. Como é uma cultura muito sensível ao ambiente e às condições climáticas, deve-se considerar a época de plantio, principalmente, quando é feita sem irrigação. Existem aproximadamente 40 tipos de feijão, divididos em grupos: feijão preto, carioca e especial. No Brasil 52% da área cultivada é semeada com o grupo carioca.

O feijoeiro possui alta variabilidade para cor, tamanho e forma da semente. No Brasil, o feijão mais consumido é o tipo carioca, com consumo praticamente restrito ao país; seguido do feijão preto e do feijão de corda, consumido principalmente na Região Norte e Nordeste. Nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e sul e leste dos Estados do

Paraná, Rio de Janeiro, sudeste de Minas Gerais e sul do Espírito Santo, o feijão preto é o mais consumido. O feijão do tipo carioca é aceito em praticamente todo o País, sendo os Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná os maiores consumidores (YOKOYAMA, 2000).

### 2.1.2 Estádios Fenológicos

Para elaboração de recomendações técnicas e de manejo da cultura do feijoeiro, recomenda-se o uso de uma escala fenológica, que considera os eventos fisiológicos que ocorrem durante todo o ciclo vegetativo da cultura (FANCELLI; DOURADO NETO, 2007).

**Tabela 1** – Escala fenológica do feijoeiro comum.

<b>Estádio</b>	<b>Descrição</b>
<b><i>Fase vegetativa</i></b>	
<b>V0</b>	Germinação/emergência
<b>V1</b>	Cotilédones ao nível do solo
<b>V2</b>	Folhas primárias expandidas
<b>V3</b>	Primeira folha trifoliolada
<b>V4</b>	Terceira folha trifoliolada
<b><i>Fase reprodutiva</i></b>	
<b>R5</b>	Botões florais
<b>R6</b>	Abertura da primeira flor
<b>R7</b>	Aparecimento das primeiras vagens
<b>R8</b>	Primeiras vagens cheias
<b>R9</b>	Modificação da cor das vagens (ponto de maturidade fisiológica)

### 2.1.3 Exigências Nutricionais

O feijoeiro é muito exigente em nutrientes e sensível a fatores climáticos, como baixa umidade do solo, temperaturas alta ou baixa, ventos fortes, além de ser suscetível a pragas e doenças. O pequeno e limitado sistema radicular é uma das limitações da própria arquitetura da planta (ARAUJO et. al., 1996). Em função dessa exigência em nutrientes e limitação da arquitetura da planta, trabalhos como os de Moura et al. (2013) e Araújo & Teixeira (2011) buscaram novas cultivares que apresentaram porte mais ereto e maior tolerância ao acamamento, características essas, que podem minimizar a incidência de doenças, aumentando o desempenho das plantas ou adaptando-as a ambientes específicos.

Souza et al. (2011), estudando a folha diagnóstica para avaliar o estado nutricional do feijoeiro, concordaram com outros trabalhos ao mostrar que a cultura é exigente em nutrientes, devido ao seu pequeno e pouco profundo sistema radicular e ao ciclo curto, que varia de 80 a 100 dias.

Por ser uma leguminosa que produz grãos com alto teor de proteínas, o feijoeiro é mais exigente em N do que outras plantas, necessitando da disponibilidade contínua e adequada deste para todo seu desenvolvimento vegetativo, e também, para formação das vagens e sementes. Apesar de absorver pouco P, sabe-se que teores adequados desse elemento no solo são indispensáveis para garantir o desenvolvimento normal das plantas e boa produção de sementes. Ao contrário do P, o feijoeiro absorve grandes quantidades de potássio (K), nutriente que participa da composição de partes da planta, assumindo papel importante na resistência à seca. O cálcio (Ca) e o Mg também são fundamentais para o desenvolvimento da cultura: o Ca fortalece as raízes da planta, enquanto o Mg participa na composição da clorofila, desempenhando papel muito importante na fotossíntese (CANECHIO FILHO, 1973).

A absorção de nutrientes varia de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura, intensificando-se no florescimento e na formação dos grãos. Por isso, além da quantidade absorvida de nutrientes, deve ser considerada também a sua concentração nos diferentes estádios de desenvolvimento. Segundo Malavolta (2006), as necessidades de macronutrientes das culturas seguem a ordem crescente  $N > K > Ca > P = Mg = S$ . Porém, isso não ocorre no feijoeiro, que segue a seguinte ordem, também crescente,  $N > Ca > K > Mg > P$ . A exigência por micronutrientes da cultura segue a ordem:  $B > Zn > Fe > Mn > Cu$ .

## 2.2 MAGNÉSIO

### 2.2.1 Magnésio no Solo

A origem primária do Mg são as rochas ígneas e os principais minerais que o contêm são biotita, dolomita, clorita, serpentina e olivina, que também são componentes de rochas metamórficas e sedimentares (RAIJ, 2011). Esse nutriente faz parte da estrutura de minerais de argila, ocorrendo em illita, vermiculita e montmorilonita. Quanto maior for o grau de intemperismo no solo, menor a ocorrência deste elemento, até restar somente Mg trocável adsorvido ao solo ou imobilizado na vegetação. O Mg possui uma particularidade, que é a possibilidade de formas não trocáveis converterem-se em trocáveis.

O Mg aparece no solo em diferentes formas: minerais primários, carbonatos e sulfatos, matéria orgânica, trocável e solúvel. De acordo com Malavolta (2006), a principal fonte natural são as rochas eruptivas, sedimentares e metamórficas. Na agricultura, esse nutriente é fornecido na forma de calcário, principalmente, no dolomítico (>13% de Mg), mas também pode ser fornecido às plantas como sulfato de Mg ( $MgSO_4$ ), Óxido de Mg ( $MgO$ ) e Magnesita ( $MgCO_3$ ) (Raij, 2011).

A reciclagem do Mg não contribui para uma adição líquida desse nutriente no solo, mas sim uma contribuição para manter as quantidades do elemento no solo (MALAVOLTA, 2006). Pode ocorrer também uma adição de Mg na camada arável quando as raízes exploram camadas mais profundas de solo, trazendo, os nutrientes para a superfície por meio do transporte destes para a parte aérea.

Assim como Ca e o enxofre (S), o Mg é considerado um macronutriente secundário na adubação devido a sua quantidade aplicada, embora nenhum nutriente deva ser considerado secundário. A utilização de calcários com baixas concentrações de Mg pode ocasionar situações de deficiências, facilmente evitadas, já que não despertam o interesse direto do setor comercial (RAIJ, 2011).

O Mg disponível para as plantas é o que está presente na solução do solo e o adsorvido no complexo de troca do solo, na forma de  $Mg^{2+}$  (FERNANDES, 2006). A absorção desse nutriente ocorre desde que haja contato do elemento com as raízes da planta, seja por fluxo de massa ou interceptação radicular.

### 2.2.2 Magnésio na Planta

O Mg participa na estrutura, na regulação enzimática e em muitos processos da vida da planta. Quase todas as enzimas fosforilativas dependem da presença de Mg, que forma uma ponte entre o ATP (adenosina trifosfato) ou o ADP (adenosina bifosfato) e a molécula da enzima. A transferência de energia desses dois compostos é fundamental nos processos da fotossíntese, respiração, reações de síntese de compostos orgânicos e absorção iônica (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012).

Este elemento é um ótimo ativador enzimático; é, portanto, envolvido em numerosos processos fisiológicos e bioquímicos que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. O papel do Mg como átomo central da molécula de clorofila é talvez sua função mais conhecida, sendo a sua deficiência associada com o desenvolvimento de clorose na folha, tipicamente internerval (CAKMAK; KIRKBY, 2008; FAGERIA, 2009)

Hermans e Verbruggen (2005) estimam que a clorofila represente 15 e 20% do conteúdo da folha. A concentração Mg nos compartimentos dessa molécula é modulada pela transição da luz e tem um efeito regulador na atividade das enzimas que atuam no ciclo de Calvin. O teor de Mg na planta impõe limites sobre a fotossíntese, e também atua como cofator e ativador de enzimas envolvidas na fixação de CO<sub>2</sub>.

De acordo com Malavolta (2006), a necessidade de Mg para um ótimo crescimento das plantas está na faixa de 1,5 a 3 g kg<sup>-1</sup> da matéria seca da folha diagnóstico. Os solos com deficiência mais frequentes de Mg situam-se em três grandes grupos: solos com baixos teores de Mg trocável, solos ácidos e solos com alto teor de K trocável. Deon (2007) descreveu os sintomas de deficiência desse nutriente: inicialmente a falta de Mg causa uma cor verde-pálido nas bordas das folhas, passando para clorose marginal nas folhas mais velhas; e com o decorrer do tempo, a clorose avança para dentro, entre as nervuras. O amarelecimento começa pelas folhas basais e, com o aumento dos sintomas de deficiência, as folhas jovens também são atingidas.

A deficiência de Mg em plantas é um problema generalizado para a produtividade, afetando a qualidade na agricultura, podendo ser provocada por baixa quantidade do elemento nas reservas do solo, mas também pode ser induzida pela dificuldade das raízes para assimilar Mg<sup>2+</sup>, devido ao desequilíbrio da inibição competitiva da absorção de Ca<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> (HERMANS et al., 2004). Embora os sintomas de deficiência de Mg sejam bem documentados em plantas, muitos efeitos fisiológicos primários da disponibilidade de Mg permanecem desconhecidos (HERMANS; VERBRUGGEN, 2005).

Hermans et al. (2004) estudaram a deficiência de Mg na beterraba açucareira e mediram mudanças nos conteúdos de outros nutrientes, de açúcares e nas variáveis fotossintéticas relacionadas à atividade dos fotossistemas I e II. Os estudos mostraram uma mudança no teor de nutrientes das raízes e um acúmulo de sacarose no início do desenvolvimento das folhas. O aumento no teor de sacarose foi seguido por modificações do aparelho fotossintético, com respostas a serem observadas no nível dos dois fotossistemas.

Hermans e Verbruggen (2005) utilizaram *Arabidopsis thaliana* para caracterizar o desenvolvimento dos sintomas de deficiência induzida de Mg, início das respostas fisiológicas de crescimento e concentração de açúcares. Esse estudo demonstrou um aumento da concentração de açúcares solúveis devido a uma menor exportação de sacarose nas folhas fonte ocorrendo também um aumento no teor de amido, forma de armazenamento de açúcar nas plantas. O acúmulo de açúcares nas folhas pode resultar na regulação negativa

dos genes da fotossíntese e, por conseguinte, representar o declínio da concentração de clorofila e atividade fotossintética.

#### REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a produção de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.137-146, 2012.
- ARAUJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba, Potafos, 1996. 100p.
- CAKMAK, I.; KIRKBY, E.A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, v.133, p.692-704, 2008.
- CANECHIO FILHO, V. **Cultura de feijão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 15p.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos: safra 2012/2013**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2013. p.14-20
- DEON, M.D.; **Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva**. 2007. 71p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FAGERIA, N.K. **The use of nutrients in crop plants**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 430p.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de feijão**. Piracicaba. Agronômica Ceres, 2007. 26p.
- FERNANDES, M.S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432p.
- HERMANS, C.; JOHNSONS, G. N.; STRASSER, R.J.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v.220, p.344-355, 2004.
- HERMANS, C.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v.56, p.2153-2161, 2005.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MAPA, **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Brasília, 2013. Disponível: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/feijao/saiba-mais>>. Acesso em: Janeiro de 2014.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press. 2012. 651p.

MOURA, M. M.; CARNEIRO, P. C. S.; CARNEIRO, J. E. S.; CRUZ, C. D. Potencial de caracteres na avaliação da arquitetura de plantas de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.417-425, 2013.

RAIJ, B. van **Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 266p.

RIOS, A.O.; ABREU, C.M.P.; CORRÊA, A.D. Efeito da estocagem e das condições de colheita sobre algumas propriedades físicas, químicas e nutricionais de três cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.23, p.39-45, 2003.

SOUZA, H.A.; HERNANDES, A.; ROMUALDO, L.M.; ROZANE, D.E.; NATALE, W.; BARBOSA, J. C. Folha diagnóstica para avaliação do estado nutricional do feijoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.1243-1250, 2011.

YOKOYAMA, L.P.; STONE, L.F. **Cultura do feijoeiro no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 8p.

### 3 ARTIGO A – RESPOSTA DE CULTIVARES DE FEIJOEIRO À APLICAÇÃO DE MAGNÉSIO NO SOLO

#### 3.1 RESUMO

O fornecimento adequado de magnésio (Mg) para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) de acordo com as exigências de cada cultivar contribui para o incremento da produtividade e valor nutritivo dos grãos. No entanto, existem poucos estudos sobre a capacidade do solo em fornecer o nutriente e o comportamento das plantas em diferentes concentrações de Mg. Neste trabalho foi estudada a resposta do feijoeiro sobre a fertilidade e do solo, produção, estado nutricional e componentes fisiológicos ao Mg aplicado no solo. Para isso foi conduzido um experimento em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5×4, com três repetições. As cultivares BRS Estilo, IAPAR 81, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG) e IPR Tangará foram cultivadas em Neossolo Quartzarênico distrófico com cinco doses de Mg (0, 50, 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>, fonte MgCl<sub>2</sub>). As cultivares de feijoeiro e as doses de Mg influenciaram significativamente os atributos químicos do solo. A taxa fotossintética, condutância estomática, transpiração, concentração de CO<sub>2</sub> e açúcares solúveis totais apresentam com a produção de grãos de feijoeiro e matéria seca da parte aérea (MSPA). Os teores dos nutrientes nas folhas e nos grãos tiveram respostas distintas entre cultivares. A cultivar IAPAR 81 apresenta maior taxa de remobilização de N, P, Mg, S, B, Cu e Zn para grãos sendo um fator importante nos estudos de biofortificação.

**Palavras-chave:** Componentes de produção. Componentes fisiológicos. Estado nutricional. Fertilidade do solo. *Phaseolus vulgaris*. Produção.

#### 3.2 ABSTRACT

### COMMON BEAN CULTIVARS RESPONSE TO SOIL MAGNESIUM APPLICATION

Adequate supply of magnesium (Mg) for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) according to cultivars exigencies contribute to increase yield and nutritive value of grains. However, there are few studies on the ability of soil to provide nutrients and plant behavior in different Mg concentrations. In this study, the response of common bean on yield, dry weight yield (DWY), soil fertility, nutritional status, and physiological components according to Mg applied in soil were studied. The completely randomized design in a 5×4 factorial scheme, with three replicates was used. BRS Estilo, IAPAR 81, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG) and IPR Tangará cultivars were grown in an Typic Quatzipsamment with five Mg rates (0, 50, 100, and 200 mg kg<sup>-1</sup>, source MgCl<sub>2</sub>). The soil chemical properties were significantly influenced by the cultivars and rates Mg. The photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration, CO<sub>2</sub> concentration, and total soluble sugars had correlations with grains and DWY. The nutrient content in leaves and grains had different responses among cultivars. The cultivar IAPAR 81 showed higher remobilization of N, P, Mg, S, B, Cu, and Zn to grain being an important factor in studies of biofortification.

**Keywords:** Nutritional status. *Phaseolus vulgaris*. Physiological components. Soil fertility. Yield.

### 3.3 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um alimento tradicional na dieta da maioria dos brasileiros (FAGERIA et al., 2011), sendo excelente fonte energética e proteica, além de possuir fibras, vitaminas, carboidratos e minerais. Devido a seu ciclo curto e grande exigência nutricional, o feijoeiro é uma planta sensível a fatores edafoclimáticos, além de ser muito suscetível ao ataque de doenças e pragas (ZUCARELLI, 2011).

As diferenças de comportamento das plantas diante da carência ou excesso de um dado nutriente sugerem um efeito do controle genético na nutrição. No caso do feijoeiro, devido suas características anatômicas, caracterizado pelo seu pequeno sistema radicular (SACRAMENTO et al., 1999; FAGERIA et al., 2011), os nutrientes devem estar prontamente disponível às plantas para que as mesmas expressem todo seu potencial produtivo (SOUZA et al., 2011).

Por ser cultivado em todo o Brasil em épocas, condições de clima e solos distintos (BURATO et al., 2007), as cultivares de feijoeiro são selecionadas para cada localidade ou região, respondendo diferentemente às condições climáticas, disponibilidade hídrica e de nutrientes. Com isso, a busca por novas cultivares de feijoeiro leva em consideração vários fatores, como exigência nutricional e arquitetura da planta. Moura et al. (2013) e Araújo e Teixeira (2011) relatam que plantas com porte mais ereto e folhas menores apresentam menor acamamento, melhor eficiência fotossintética e maior resistência ao estresse hídrico.

No caso do estado nutricional, face às variáveis concentrações dos nutrientes no solo e na rizosfera (SACRAMENTO et al., 1999), o processo de absorção difere em cada fase de desenvolvimento da planta e se intensifica no período de floração e na formação e enchimento dos grãos (MALAVOLTA, 2006). Entre os nutrientes essenciais, um dos menos estudados é o Mg (CAKMAK; YAZICI, 2010), que desempenha papel-chave na fotossíntese e como ativador enzimático, estando envolvido em vários processos bioquímicos e fisiológicos das plantas (CAKMAK; KIRKBY, 2008). Com isso, sua deficiência afeta a produtividade e a qualidade das plantas, interferindo no crescimento e desenvolvimento vegetal (HERMANS et al., 2004).

A principal fonte de Mg e a mais utilizada na agricultura é o calcário, sendo indispensável a sua aplicação em solos ácidos, como os dos trópicos, sua principal função é diminuir a acidez, neutralizar o alumínio (Al) trocável e fornecer cálcio (Ca) e Mg para as plantas (ROSOLEM et al., 1992). No entanto, dependendo do tipo de calcário, a concentração

pode variar significativamente (ALVAREZ VENEGAS; RIBEIRO, 1999), tendo de menos de 5% de MgO (calcítico) ou mais de 13% de MgO (dolomítico) na sua composição. Em termos de absorção, na rizosfera, a planta absorve o Mg, preferencialmente, por interceptação radicular e fluxo de massa (MALAVOLTA, 2006). No entanto, altas concentrações, principalmente, dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e potássio ( $\text{K}^+$ ) na solução do solo podem acarretar em efeitos de inibição por competirem pelos mesmos carreadores iônicos de natureza enzimática e com número limitado de sítios de ligação (BERGMAN, 1992; MARSCHNER, 2012).

Devido a existência de poucos estudos relacionados ao efeito do Mg na produção, fertilidade do solo, estado nutricional e componentes fisiológicos e fitotécnicos das plantas de feijoeiro, o objetivo deste trabalho foi avaliar as respostas de cinco cultivares à aplicação de Mg no solo na forma de  $\text{MgCl}_2$ .

#### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação da Embrapa Soja, localizada no Município de Londrina, Estado do Paraná, sob as coordenadas geográficas de 23°11'39" LS e 51°10'40" LW. Utilizou-se um Neossolo Quartzarênico distrófico, de textura arenosa (86 g  $\text{kg}^{-1}$  de argila e 870 g  $\text{kg}^{-1}$  de areia), coletado no Município de Três Lagoas, Estado do Mato Grosso do Sul (20°45'04" LS e 51°40'42" LW) <http://pt.wikipedia.org/wiki/Oeste>, na profundidade de 0-20 cm, com os seguintes atributos químicos: pH ( $\text{CaCl}_2$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ) = 4,4, matéria orgânica do solo – MOS = 12,3 g  $\text{kg}^{-1}$ , fósforo – P (extrator Mehlich 1) = 3,0 mg  $\text{kg}^{-1}$ , P (extrator resina) = 5,0 mg  $\text{kg}^{-1}$ , K (resina) = 0,1  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ , Ca (resina) = 0,1  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ , Mg (resina) = 0,3  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ , alumínio – Al ( $\text{KCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$ ) = 0,3  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ , acidez potencial –  $\text{H}+\text{Al}$  = 3,1  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ , enxofre –  $\text{S}-\text{SO}_4^-$  = 6,0 mg  $\text{kg}^{-1}$ , capacidade de troca de cátions – CTC = 3,6  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ , saturação por bases – V = 6,0%, boro – B (água quente) = 0,18 mg  $\text{kg}^{-1}$ , cobre – Cu (Mehlich 1) = 0,5 mg  $\text{kg}^{-1}$ , ferro – Fe (Mehlich 1) = 73,0 mg  $\text{kg}^{-1}$ , manganês – Mn (Mehlich 1) = 18,4 mg  $\text{kg}^{-1}$  e zinco – Zn (Mehlich 1) = 0,4 mg  $\text{kg}^{-1}$ . Empregou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 4×5, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos de quatro doses de Mg (0, 50, 100 e 200 mg  $\text{kg}^{-1}$ , fonte  $\text{MgCl}_2$ ) e cinco cultivares de feijoeiro do grupo carioca [BRS Estilo, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG), IPR Tangará e IAPAR 81].

Foram colocados 3,0  $\text{dm}^3$  de terra fina seca ao ar (TFSA) passada em peneira de malha de 2,0 mm em vasos de barro. Dois meses antes do plantio, a acidez foi

corrigida com carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) para elevar a saturação por bases a 70%. Exceto o Mg, as adubações com nitrogênio (N), P, K, S, B, cobalto (Co), Cu, Fe, molibdênio (Mo), Mn, níquel (Ni) e Zn foram feitas de acordo com Moreira et al. (2011), adaptadas de Allen et al. (1976) para experimentos conduzidos em condições de casa de vegetação [ $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{N-CO}(\text{NH}_4)_2$ ,  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  de (K)-KCl;  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de (P)-fosfato monoamônio (MAP),  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{B-H}_3\text{BO}_3$ ;  $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Cu-CuSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Mo-Na}_2\text{Mo}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Fe-FeSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Co-CoCl}_2$ ;  $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Ni-NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Mn-MnSO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn-ZnSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$  e  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{S-K}_2\text{SO}_4$ ]. Trinta dias após o plantio, também foi feita uma adubação por cobertura com  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{K-K}_2\text{SO}_4$  e  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{N-}[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ .

As plantas foram irrigadas diariamente com água desionizada para compensar as perdas por evapotranspiração e para manter o solo próximo de 70% do volume total de poros (CASSEL; NIELSEN, 1986). Dez sementes escarificadas foram semeadas por vaso e após o desbaste foram deixadas duas plantas uniformes.

O terceiro e o quarto folíolos a contar do ápice (MALAVOLTA, 1992) foram amostrados no início do florescimento no estágio R1 (FAGERIA et al., 2011), enquanto os grãos foram coletados no final do ciclo, os quais foram secos em estufa de circulação forçada a  $65 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , e pesado para obtenção da produção por vaso. Posteriormente, estes foram moídos para determinação dos teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn na parte aérea (MALAVOLTA et al., 1997). Nos mesmos folíolos antes da coleta, também foi realizada a leitura SPAD (MINOLTA CAMERA Co., 1989), valor convertido em teor de clorofila ( $\text{mg m}^{-2}$ ) pela equação  $\hat{y} = 16,033 + (7,5774 \times \text{SPAD})$  (FRITSHI; RAY, 2007) e, concomitantemente foram determinadas a taxa fotossintética ( $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), taxa respiratória ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), açúcares solúveis totais ( $\text{mg g}^{-1}$ ) e a condutância estomática ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Para extração dos açúcares solúveis totais (AST), 200 mg do tecido seco e moído do terceiro e quarto trifólio foram incubados três vezes com 10 mL de etanol 80%, levados em banho-maria a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 15 minutos e centrifugados a  $925 \text{ g}$  por 15 min. No sobrenadante foi feita a determinação dos AST pelo método colorimétrico da antrona (YEMM; WILLIS, 1954), utilizando glicose ( $60 \text{ mg mL}^{-1}$ ) como padrão. Depois da colheita, amostras de solo foram retiradas de cada vaso para determinação do índice pH (cloreto de cálcio), P disponível, K disponível, Ca trocável, Mg trocável, S- $\text{SO}_4^-$  disponível, Al trocável, H+Al, CTC, saturação por bases (V%), B disponível, Cu disponível, Fe disponível, Mn disponível e Zn disponível, conforme metodologias descritas em Embrapa (1997).

Os resultados de produção de matéria seca total da parte aérea (MSPA), fertilidade do solo, componentes fisiológicos e o estado nutricional das plantas foram submetidos ao teste de normalidade (HICKS, 1973), e posteriormente, foram realizadas a análise de variância (ANOVA), teste F e comparação de contraste de médias com Scott-Knott a 5% de probabilidade.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de Mg apresentaram efeitos significativos sobre o índice pH, CTC, Zn disponível, S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> disponível e acidez potencial (H+Al) do solo (Tabela 1). Para a CTC, devido o Mg ser constituinte das bases trocáveis, o aumento dessa variável com o incremento das doses foi confirmado. No caso do índice pH, como a fonte utilizada nos tratamentos foi o MgCl<sub>2</sub> e no processo de dissociação dessa molécula no solo não ocorre liberação de íons OH<sup>-</sup> e o cloreto apresentando reação neutra (MIHOPOULOS et al., 2000), esperava-se ausência de efeito das doses de Mg, no entanto, independente das cultivares, houve reposta linear ( $\hat{y} = 4,70 + 0,002 * x$ ,  $R^2 = 0,56 - p \leq 0,05$ ). Moreira et al. (2005), ao estudarem os efeitos da relação Ca e Mg sobre os atributos químicos do solo, verificaram, que mesmo utilizando o MgCO<sub>3</sub> como fonte, não houve efeito do incremento de Mg sobre o índice pH do solo.

Com relação o Zn e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> disponíveis no solo, a resposta significativa dessas duas variáveis aos tratamentos, possivelmente, se deve a maior ou menor eficiência na absorção, que estão associados a fatores genéticos que podem ter alterado a eficiência de uso dos nutrientes por cada cultivar (BALIGAR et al., 2001). Além disso, para o Zn disponível, também existem os efeitos de inibição Mg×Zn descritos por Moreira et al. (2003), que alteram a absorção desses dois nutrientes pelas plantas. Das variáveis analisadas, houve interação significativa entre doses × cultivares de feijoeiro somente para OH<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup> trocável (acidez potencial) do solo (Tabela 1). A hipótese desse resultado é que com o aumento da concentração de Mg<sup>2+</sup> na solução, pode ter havido o deslocamento do Al<sup>3+</sup> trocável nas argilas e formando complexos mais estáveis, o que acarretou em diminuição da concentração deste na solução do solo (CAIRES et al., 2000).

A equação de regressão entre as doses×teor de Mg trocável (Figura 1a) demonstraram que, independentemente da cultivar, após a colheita das plantas, somente na dose 200 mg kg<sup>-1</sup>, o teor de Mg no solo, obtido com o extrator KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>, ficou dentro da faixa indicada como média disponibilidade para o cultivo adequado das plantas (ALVAREZ VENEGAS; RIBEIRO, 1999). De acordo com Fageria e Souza (1991), para o

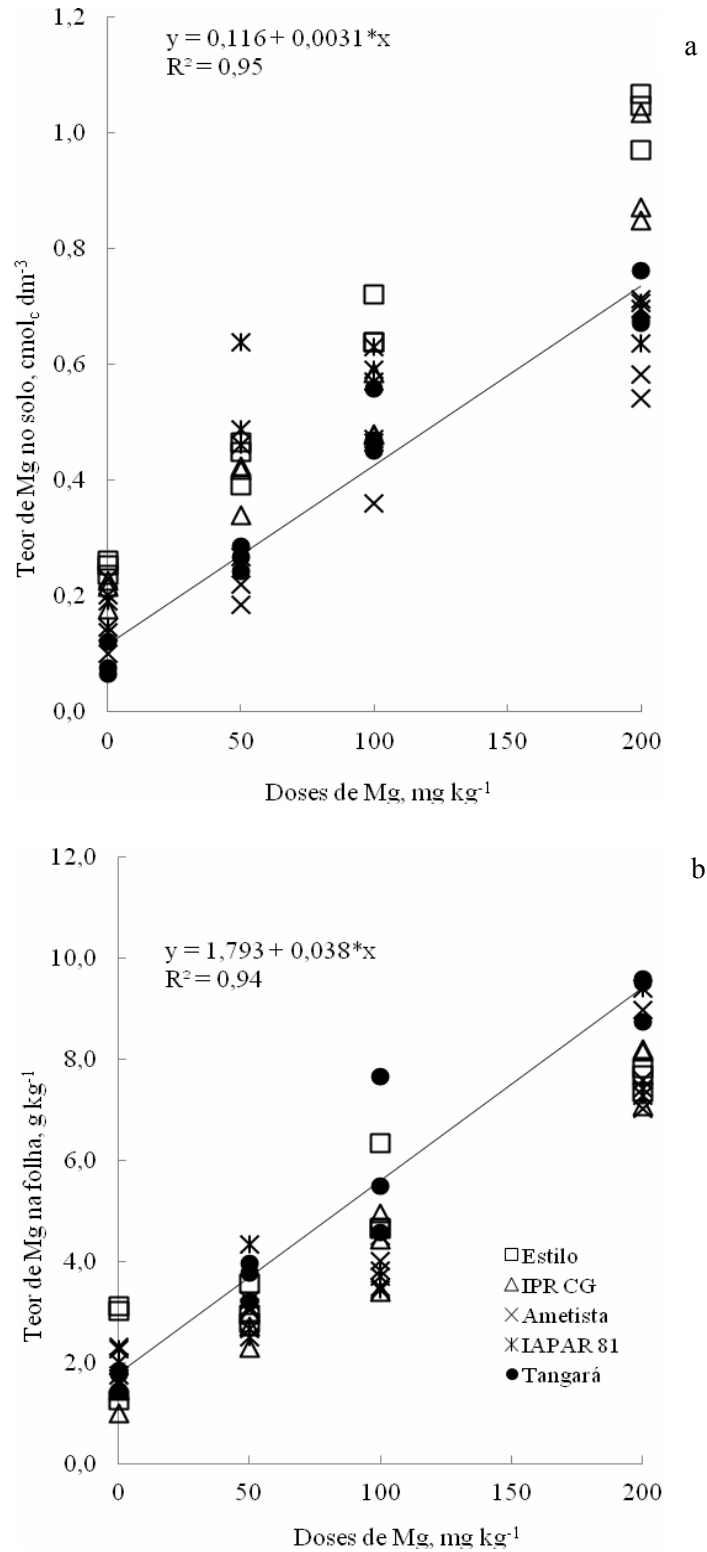
cultivo do feijoeiro, o nível crítico do Mg disponível em solos de cerrado obtido com o mesmo extrator deve ser de  $1,0 \pm 0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

Como esperado, os teores de Mg disponível no solo apresentaram correlação altamente significativa e positiva com as doses do elemento aplicado (Figura 1a), sendo o mesmo observado para os teores de Mg nas folhas (Figura 1b), que ficaram, na média das cultivares, entre  $1,8$  a  $9,4 \text{ g kg}^{-1}$ , valores acima do teor mínimo de  $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ , indicado como adequado por Malavolta et al. (1997) e Fageria et al. (2011) para o feijoeiro. A produção de matéria seca total da parte aérea (MSPA) foi influenciada pelas doses de Mg em todas as cultivares (Tabela 2), com efeito depressivo a partir da aplicação de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estes resultados são discordantes dos obtidos por Boaro et al. (1997), que verificaram efeitos positivos na produção de MSPA no feijoeiro com aplicação de quantidades elevadas do nutriente, o que também foi observado por Ford (1966) e Fageria et al. (1999).

Os mesmos efeitos positivos das doses também podem ser observados sobre a produção de grãos (G), relação G/MSPA, número de vagens por plantas (NGP) e grãos por vagem (NGV) nos quais apresentaram interação significativa entre cultivares  $\times$  doses de Mg (Tabela 2). Nas cultivares IPR CG, BRS Ametista e IPR Tangará, as maiores produtividades de grãos foram alcançadas com a dose de  $50 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto a BRS Estilo e a IAPAR 81 foi com aplicação de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mg (Tabela 2). De acordo com a equação de regressão ( $\hat{y} = 6,906 + 0,142 * x - 0,0007 * x^2$ ,  $R^2 = 0,48$ ,  $p \leq 0,05$ ), na média das cultivares, a maior produtividade foi de  $14,1 \text{ g/vaso}$ , obtida com aplicação estimada de  $101,4 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mg. Na média das doses, a cultivar com maior produção foi a IPR 81 ( $11,5 \text{ g/vaso}$ ) e menos produtiva a IPR Tangará ( $8,2 \text{ g/vaso}$ ), enquanto a BRS Estilo, BRS Ametista, IPR CG apresentaram valores intermediários.

Nas comparações entre cultivares, os maiores aumentos no NVP e NGV foram verificados na cultivar IPR 81, com incremento de 109 e 77% em relação ao controle ( $0 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mg), enquanto na cultivar IPR Tangará, foi de apenas 3,8 e 14,3%,

**Figura 1** – Efeito das doses de Mg sobre o teor do nutriente no solo (a) e na planta (b) nas cinco cultivares de feijão.



\*significativo a 5% de probabilidade

**Tabela 1** – Atributos químicos do solo em resposta as doses de Mg e cultivares de feijoeiro.

Doses de Mg mg kg <sup>-1</sup>	pH H <sub>2</sub> O	C g kg <sup>-1</sup>	P mg kg <sup>-1</sup>	K -----	Ca	Al cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	H+Al -----	CTC -----	V - % -	S-SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> -----	B -----	Cu -----	Fe mg kg <sup>-1</sup>	Mg -----	Zn -----
BRS Estilo															
0	4,74	7,23	147,16	0,07	1,23	0,09	3,70	5,35	28,98	2,91	0,30	2,11	99,48	28,60	9,04
50	4,99	7,35	175,36	0,08	1,20	0,00	3,53	5,25	32,92	2,20	0,32	2,89	125,40	30,88	10,15
100	5,08	8,96	120,25	0,09	1,26	0,00	3,35	5,36	37,59	3,22	0,30	4,47	93,74	33,60	14,47
200	5,24	7,45	160,13	0,07	1,25	0,00	3,11	5,46	43,02	4,16	0,40	2,82	94,97	29,85	10,29
Média	5,01	7,74	150,72	0,07	1,23	0,02	3,42	5,35	35,62	3,12	0,33	3,07	103,39	30,73	10,98
IPR CG															
0	4,66	8,12	140,28	0,08	0,89	0,14	3,95	5,27	22,51	2,95	0,40	3,40	106,27	29,91	11,21
50	4,66	7,30	145,76	0,07	0,92	0,14	3,65	5,18	26,85	3,59	0,45	3,15	100,59	25,73	11,23
100	5,01	7,20	160,69	0,09	1,23	0,14	3,22	5,19	35,03	3,51	0,34	2,66	125,84	32,22	9,13
200	5,20	6,97	151,85	0,10	1,08	0,00	2,98	5,08	41,20	2,09	0,37	2,14	96,71	30,92	12,24
Média	4,88	7,39	149,64	0,08	1,03	0,10	3,45	5,18	31,49	3,04	0,39	2,83	107,35	29,72	10,95
BRS Ametista															
0	4,75	7,67	154,23	0,07	1,04	0,11	3,94	5,34	24,31	4,17	0,29	3,00	104,30	28,11	13,20
50	4,69	6,46	123,74	0,05	0,78	0,05	3,59	4,69	22,41	2,61	0,19	2,24	102,58	27,36	12,53
100	5,06	6,10	141,83	0,07	0,81	0,02	3,11	4,45	29,55	4,07	0,46	3,08	93,64	25,34	12,64
200	4,97	6,12	135,81	0,06	0,82	0,00	3,28	4,77	31,18	2,13	0,27	3,28	112,51	19,48	10,92
Média	5,61	6,58	138,90	0,06	0,86	0,04	3,48	4,88	26,86	3,24	0,30	2,9	103,25	25,07	12,32
IAPAR 81															
0	4,71	7,07	124,37	0,07	1,01	0,14	3,48	4,86	25,38	4,03	0,37	2,45	109,62	29,64	8,81
50	4,71	8,48	104,27	0,08	1,00	0,11	3,61	5,33	29,96	2,25	0,35	3,11	107,36	31,61	8,18
100	4,74	7,68	153,27	0,05	0,89	0,14	3,58	5,26	29,33	4,92	0,32	2,84	123,56	34,57	13,95
200	4,89	7,30	114,77	0,07	0,84	0,00	3,40	4,99	31,85	4,50	0,52	4,42	107,70	29,68	13,32
Média	4,76	7,63	125,15	0,06	0,93	0,09	3,51	5,06	29,13	3,93	0,39	3,20	112,06	31,37	11,06
IPR Tangará															
0	4,62	6,38	135,45	0,06	0,75	0,17	4,42	5,48	16,46	2,14	0,39	2,37	115,85	31,46	8,49
50	4,78	6,26	124,16	0,04	0,81	0,10	3,21	4,42	25,30	1,69	0,35	1,85	102,58	26,43	8,18
100	4,80	7,38	141,42	0,07	0,95	0,11	3,82	5,45	27,85	2,24	0,35	3,57	98,46	27,71	10,94
200	4,97	7,57	153,74	0,06	0,91	0,14	3,34	5,14	32,43	3,17	0,37	3,46	102,50	30,11	9,99
Média	4,49	6,89	138,69	0,05	0,85	0,13	3,69	5,12	25,51	2,31	0,36	2,81	104,84	28,92	9,4
Teste F															
Cultivar (a)	3,63*	3,20*	3,80*	3,41*	8,15*	17,03*	1,28 <sup>NS</sup>	3,44*	11,87*	4,08*	1,25 <sup>NS</sup>	0,45 <sup>NS</sup>	0,87 <sup>NS</sup>	4,59	3,07*
Dose (b)	12,97*	0,45 <sup>NS</sup>	0,77 <sup>NS</sup>	0,69 <sup>NS</sup>	0,51 <sup>NS</sup>	17,91*	10,93*	1,59 <sup>NS</sup>	26,78*	4,31*	0,48 <sup>NS</sup>	2,60 <sup>NS</sup>	0,40 <sup>NS</sup>	1,35 <sup>NS</sup>	3,86*
a × b	1,04 <sup>NS</sup>	1,76 <sup>NS</sup>	2,93 <sup>NS</sup>	1,02 <sup>NS</sup>	0,99 <sup>NS</sup>	3,18*	1,97 <sup>NS</sup>	2,12 <sup>NS</sup>	1,40 <sup>NS</sup>	2,73 <sup>NS</sup>	1,09 <sup>NS</sup>	2,32 <sup>NS</sup>	2,17 <sup>NS</sup>	1,48 <sup>NS</sup>	2,43 <sup>NS</sup>
CV%	3,58	13,25	12,97	30,91	19,45	11,66	9,53	7,15	13,53	25,05	35,59	29,14	12,85	13,66	18,69

\*significativo a 5% de probabilidade. <sup>NS</sup> não significativo.

**Tabela 2** – Matéria seca total (MSPA), produção de grãos (G), relação grãos/MSPA, número de vagens e de grãos por vagem em função das doses de Mg e cultivares de feijoeiro.

Doses de Mg mg kg <sup>-1</sup>	Matéria seca total - MSPA ----- g/vaso -----	Grãos -----	G/MSPA	Vagens por planta ----- n -----	Grãos por vagem
BRS Estilo					
0	17,5	4,6	0,26	11,7	3,5
50	29,6	10,9	0,37	14,3	4,2
100	38,0	17,4	0,46	17,0	4,1
200	26,8	9,0	0,33	13,0	4,1
Média	28,0	10,5	0,35	14,0	3,97
IPR CG					
0	24,9	4,0	0,16	15,3	4,3
50	37,1	14,5	0,39	19,0	4,0
100	40,6	14,2	0,35	17,7	4,5
200	35,0	11,3	0,32	13,7	4,8
Média	34,4	11,0	0,30	65,7	4,4
BRS Ametista					
0	29,6	6,2	0,21	11,0	3,0
50	48,0	16,1	0,34	17,0	3,3
100	36,4	11,5	0,32	16,7	3,9
200	30,3	8,1	0,27	12,7	3,8
Média	36,1	10,5	0,28	14,3	3,5
IAPAR 81					
0	34,9	6,4	0,18	11,0	2,2
50	39,6	10,9	0,28	23,0	3,9
100	40,5	16,7	0,41	23,0	3,3
200	33,6	12,0	0,36	17,0	3,1
Média	37,2	11,5	0,30	18,5	3,1
IPR Tangará					
0	37,47	10,5	0,28	15,7	4,2
50	43,30	17,1	0,39	16,3	4,8
100	24,12	6,7	0,28	13,7	4,1
200	17,81	4,8	0,27	9,0	3,0
Média	30,67	8,2	0,30	13,6	4,0
Teste F					
Cultivar (a)	27,15*	3,11*	5,14*	7,95*	36,91*
Doses (b)	66,48*	117,66*	56,44*	8,16*	13,74*
a × b	22,51*	24,45*	17,41*	5,11*	9,49*
CV%	7,68	12,09	9,55	16,34	7,61

\*significativo a 5% de probabilidade. <sup>NS</sup> não significativo.

respectivamente. Conforme a equação de correlação  $\hat{y} = 9,12 + 0,589 * x$  ( $r = 0,70 - p \leq 0,05$ ), a produção de grãos (x) versus NVP ( $\hat{y}$ ) apresentou correlação significativa (Tabela 2), sendo o mesmo verificado por Fageria et al. (2012), no qual obteve incremento exponencial entre essas variáveis. Para a G/MSPA, NVP e NGV, Baligar et al. (2001) e Fageria et al. (2012) também reportaram efeitos significativos do estado nutricional das plantas sobre o incremento dessas três variáveis analisadas.

A taxa fotossintética, condutância estomática, concentração de CO<sub>2</sub> e taxa respiratória apresentaram interação significativa entre cultivares×doses de Mg (Tabela 3). Observou-se que exceto a cultivar IPR Tangará, houve tendência de incremento dessas variáveis com o aumento das doses de Mg, o que está de acordo com Malavolta (2006) e Cakmak e Yazici (2010), visto ser este elemento constituinte da molécula da clorofila, que são porfirinas magnesianas, nos quais ficam grande parte acumulados nos tilacóides participando da fotossíntese, respiração, regulação do pH celular, balanço cátion-ânion, absorção iônica e ativação da maioria das enzimas fosforilativas. Verificou-se que a taxa fotossintética ( $\hat{y}$ ) está diretamente relacionada com a produtividade de grãos, como pode ser demonstrado na correlação significativa obtida na equação:  $\hat{y} = 0,122 + 0,429 * x$  ( $r = 0,59 - p \leq 0,05$ ).

Houve efeito das doses de Mg sobre o teor de clorofila (Tabela 3), observou-se que, exceto na cultivar IPR Tangará, a aplicação de Mg aumentou os teores somente até dose 50 mg kg<sup>-1</sup>, porém, independente das doses e cultivares, ficou dentro dos níveis indicados como adequados por Soratto et al. (2004) para o feijoeiro. Trabalhos mostrando correlações significativas e positivas da leitura SPAD com o teor de clorofila (FRITSHI; RAY, 2007; UDDLING et al., 2007) sustentam a utilização dessa metodologia, No presente trabalho, mesmo o Mg sendo constituinte da molécula de clorofila, observou-se um efeito negativo das doses desse nutriente sobre o seu teor ( $\hat{y} = 295,65 - 0,293x$ ,  $R^2 = 0,58 - p \leq 0,05$ ). Tal resultado discordante pode estar relacionado à alta mobilidade do nutriente nos vasos condutores de seiva e aos efeitos de diluição descritos por Malavolta (2006) e Fageria et al. (2012). Cabe salientar, que apesar do Mg atuar como constituinte e também na síntese da molécula da clorofila, estudos relacionando essas variáveis são escassos (CAKMAK; YAZICI, 2010), sendo que no caso do feijoeiro, a maioria dos trabalhos relaciona os teores de clorofila está relacionada as concentrações foliares de N e produtividade (FURLANI JÚNIOR, 1996; SORATTO et al., 2004; SANT'ANA et al., 2010).

Os teores de açúcares solúveis (Tabela 3) tiveram correlação significativa com produção de MSPA [ $\hat{y} = 90,92 + 2,993 * x$ ,  $r = 0,52 - p \leq 0,05$ ], concordando com Hewitt et al. (1985), ao relatarem que a sacarose é translocada na planta para sustentar o seu crescimento. Na comparação entre as cultivares, na média das doses, tiveram a seguinte sequência de concentração: IAPAR 81 > BRS Ametista > IPR Tangará > IPR CG > BRS Estilo (Tabela 3). Observou-se que as doses de Mg não afetaram o transporte dos AST a partir das folhas fontes, possivelmente este efeito se deve ao aumento das taxas fotossintéticas com o incremento da aplicação de Mg (Tabela 3). Um aumento significativo de AST poderia ter um efeito repressor na atividade fotossintética caso o transporte via floema fosse impedido.

Na ausência da aplicação Mg verificou-se, nas cinco cultivares, sintomas visuais de deficiência no nutriente, o que foi confirmando pelos baixos teores foliares nesta dose (Figura 1b), que ficaram próximos de  $1,5 \text{ g kg}^{-1}$  indicada como limitante para o feijoeiro (FAGERIA et al., 2011). Somente os teores foliares de P e Ca foram significativamente influenciados pelas doses de Mg (Tabela 4). O aumento do teor de P deve estar relacionado a função do Mg como carregador do P para dentro da planta e da inter-relação desses dois íons nas reações de transferência de energia (BERGMAN, 1992). Para o incremento dos teores foliares de Ca, mesmo o teor abaixo do adequado (Tabela 4), a utilização do cloreto, que tem alta mobilidade na planta, como íon acompanhante do Mg na adubação pode ter auxiliado a entrada do  $\text{Ca}^{2+}$  pelos canais iônicos de absorção (MALAVOLTA, 2006), anulando com isso, os efeitos de inibição  $\text{Ca} \times \text{Mg}$  descritos em Malavolta et al. (1997).

De acordo com as faixas de interpretação descritas por Fageria et al. (2011), verificou-se que, na média, os teores foliares de N ( $32,95 \pm 9,70 \text{ g kg}^{-1}$ ), K ( $12,94 \pm 2,34 \text{ g kg}^{-1}$ ), Ca ( $13,29 \pm 3,29 \text{ g kg}^{-1}$ ) e Cu ( $4,31 \pm 0,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ficaram abaixo do adequado, enquanto os de P ( $3,32 \pm 0,53 \text{ g kg}^{-1}$ ), S ( $2,31 \pm 0,52 \text{ g kg}^{-1}$ ), B ( $47,62 \pm 8,44 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Fe ( $87,40 \pm 21,70 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Mn ( $135,03 \pm 42,69 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Zn ( $34,27 \pm 9,70 \text{ mg kg}^{-1}$ ) situaram-se dentro dos níveis críticos estabelecidos para o feijoeiro. Ao se compararem as cultivares, foram constatadas diferenças nos teores de N, P, Ca, S, B, Cu, Fe e Zn, sendo na média, os menores na cultivar IAPAR 81, enquanto os maiores variaram entre cultivares, sendo o N e Zn na BRS Ametista, P e Fe na IPR Tangará, K e Cu na IPR CG e Ca, S, B e Mn na BRS Estilo (Tabela 4). Tais resultados novamente corroboram Baligar et al. (2001) e Fageria et al. (2012) ao relatarem a influência de fatores genéticos na absorção de nutrientes.

Os teores de N, P, K, Mg e B nos grãos apresentaram interações significativas entre as doses de Mg  $\times$  cultivares de feijoeiro (Tabela 5). Na comparação com os teores foliares, semelhante ao observado por Fageria et al. (2008), os teores de N, P, Cu e Zn foram maiores nos grãos, sendo o inverso verificado para o K, Ca, Mg, B, Fe e Mn. Com relação às cultivares, houve diferenças significativas para as concentrações de Mg, S, B, Fe e Zn, enquanto no tratamento doses foi para os nutrientes Mg, S, B e Mn. Em termos comparativos, diferente do observado nas folhas diagnóstico, a IAPAR 81

**Tabela 3** – Taxa fotossintética, condutância estomática, concentração de CO<sub>2</sub>, taxa respiratória, teor de clorofila e açúcares solúveis totais nas cultivares de feijoeiro em respostas as doses de Mg aplicadas.

Doses de Mg mg kg <sup>-1</sup>	Fotossíntese -- mmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> --	Condutância Estomática -- mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> --	Concentração de CO <sub>2</sub> -- mmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> --	Taxa respiratória -- mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> --	Clorofila -- mg m <sup>-2</sup> --	Açúcares solúveis -- mg g <sup>-1</sup> --
BRS Estilo						
0	7,67	0,16	230,67	2,78	264,91	87,52
50	10,62	0,13	203,44	2,39	288,65	163,46
100	16,96	0,33	242,22	4,56	269,54	129,69
200	16,97	0,39	255,75	4,95	229,67	196,31
Média	13,06	0,25	233,02	3,67	259,67	144,25
IPR CG						
0	17,61	0,41	254,15	4,81	258,55	179,43
50	17,37	0,43	258,64	5,20	291,81	173,63
100	19,71	0,57	272,42	6,18	258,76	250,87
200	15,85	0,37	265,17	5,01	229,55	225,69
Média	17,64	0,45	262,70	5,30	248,67	207,41
BRS Ametista						
0	13,77	0,28	248,43	4,88	297,20	163,71
50	17,16	0,45	248,38	5,52	313,66	220,81
100	17,02	0,60	273,56	6,43	275,64	256,08
200	19,17	0,59	261,55	6,55	241,80	143,49
Média	16,78	0,48	257,98	5,85	261,05	196,02
IAPAR 81						
0	9,57	0,17	235,11	3,39	259,14	215,27
50	13,84	0,30	244,14	4,70	287,39	161,71
100	16,52	0,48	268,50	6,77	277,45	285,52
200	13,29	0,50	279,26	6,76	213,30	171,80
Média	16,98	0,48	258,16	5,87	262,15	211,52
IPR Tangará						
0	16,44	0,56	276,37	7,58	322,12	174,13
50	15,15	0,42	265,06	6,75	309,62	225,80
100	11,22	0,47	285,30	8,08	260,19	218,01
200	6,67	0,18	269,54	4,44	252,20	166,85
Média	15,09	0,40	252,14	5,36	286,03	197,05
Teste F						
Doses (a)	20,26*	13,75*	23,53*	30,46*	4,93*	7,16*
Cultivar (b)	4,67*	9,77*	20,37*	15,58*	32,20*	8,50*
a×b	11,87*	7,04*	3,61*	7,60*	2,37 <sup>NS</sup>	3,04 <sup>NS</sup>
CV%	12,69	22,15	3,86	13,03	8,55	18,43

\*significativo a 5% de probabilidade. <sup>NS</sup>não significativo.

**Tabela 4** – Teores de N, P, K, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn na folha diagnóstico (3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> folíolo a contar do ápice) nas cinco cultivares de feijoeiro em função das doses de Mg.

Doses de Mg mg kg <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>				
BRS Estilo										
0	27,93	3,07	12,71	15,14	2,88	65,02	4,58	104,23	138,80	37,42
50	39,43	3,30	12,81	12,42	3,25	47,32	4,34	80,53	133,17	37,81
100	33,67	3,48	10,72	15,70	2,57	47,63	4,52	94,17	154,42	32,93
200	33,73	3,81	14,10	15,47	2,97	51,52	4,62	96,50	182,21	38,82
Média	33,69	3,41	12,58	14,68	2,91	52,87	4,51	93,85	152,15	36,74
IPR CG										
0	30,03	2,86	11,95	11,73	2,44	50,36	4,92	90,49	118,58	40,30
50	42,90	3,32	14,36	10,53	2,33	48,87	5,03	109,26	126,28	33,68
100	41,37	3,57	14,62	12,85	2,45	47,53	4,83	93,83	115,90	37,51
200	35,03	3,76	14,63	16,16	2,42	50,05	4,87	88,98	143,58	32,67
Média	37,33	3,37	13,98	12,81	2,41	49,20	4,91	95,64	126,08	36,04
BRS Ametista										
0	32,20	3,27	13,08	12,65	2,09	49,96	4,07	69,13	133,86	36,87
50	43,37	3,27	13,02	12,51	2,31	45,01	4,47	85,69	142,77	40,44
100	36,37	3,24	11,78	13,27	1,75	38,50	4,79	70,53	131,72	38,41
200	38,67	4,04	13,47	17,06	2,73	47,26	4,76	102,71	145,68	37,43
Média	37,65	3,45	12,83	13,87	2,22	45,18	4,52	82,01	138,50	38,28
IAPAR 81										
0	26,80	2,43	11,65	7,82	1,79	39,85	2,85	58,97	77,95	23,48
50	24,60	2,98	10,98	10,17	1,77	40,55	3,17	57,40	105,69	26,13
100	29,27	2,84	11,19	9,05	1,56	37,33	3,03	61,94	96,83	21,04
200	29,07	3,41	14,22	15,14	1,87	48,08	4,28	87,74	153,30	30,40
Média	27,43	2,91	12,01	10,54	1,74	41,45	3,33	66,51	108,44	25,26
IPR Tangará										
0	30,17	2,87	12,02	12,97	2,21	49,85	4,18	92,32	122,26	35,95
50	33,50	3,39	13,14	11,38	2,39	45,70	4,36	92,85	185,52	43,12
100	24,77	3,35	13,21	16,98	1,95	51,00	4,10	92,38	158,60	25,64
200	26,20	4,29	14,84	16,81	2,48	51,01	4,51	118,52	133,56	35,35
Média	28,66	3,47	13,30	14,53	2,25	49,39	4,28	99,01	149,98	35,01
Teste F										
Cultivar (a)	4,39*	4,72*	1,07 <sup>NS</sup>	6,34*	17,06*	4,26*	6,59*	5,81*	2,28 <sup>NS</sup>	3,71*
Doses (b)	2,18 <sup>NS</sup>	17,39*	2,25 <sup>NS</sup>	12,05*	2,83 <sup>NS</sup>	2,78 <sup>NS</sup>	1,02 <sup>NS</sup>	2,45 <sup>NS</sup>	1,69 <sup>NS</sup>	0,84 <sup>NS</sup>
a × b	0,78 <sup>NS</sup>	0,67 <sup>NS</sup>	0,46 <sup>NS</sup>	1,23 <sup>NS</sup>	0,93 <sup>NS</sup>	0,99 <sup>NS</sup>	0,43 <sup>NS</sup>	1,03 <sup>NS</sup>	0,66 <sup>NS</sup>	0,56 <sup>NS</sup>
CV%	23,89	11,44	18,45	17,61	14,36	15,48	18,59	21,30	30,80	27,14

\*significativo a 5% de probabilidade. <sup>NS</sup> não significativo.

**Tabela 5** – Teores de N, P, K, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos grãos nas cinco cultivares de feijoeiro em função das doses de Mg.

Doses de Mg mg kg <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg <sup>-1</sup>										
	BRS Estilo										
0	30,90	4,28	12,81	1,44	1,80	2,07	12,24	4,51	61,93	22,07	37,85
50	26,70	4,89	15,09	1,65	1,98	1,82	13,27	6,42	66,27	23,17	46,33
100	32,43	3,93	11,48	1,20	1,63	1,80	11,80	4,05	57,16	16,40	35,17
200	30,00	3,98	11,57	1,34	1,46	1,76	11,55	4,79	50,63	14,23	33,61
Média	30,00	4,27	12,73	1,40	1,72	1,86	12,21	4,94	58,99	18,97	38,24
	IPR CG										
0	29,03	3,92	10,65	1,62	1,29	1,90	13,96	4,08	47,35	31,34	40,45
50	25,57	3,88	11,00	1,34	1,55	1,65	10,25	6,08	52,48	30,63	44,31
100	32,47	4,57	14,76	1,40	2,12	1,95	11,08	6,20	58,67	21,54	47,58
200	33,65	4,16	12,73	1,30	1,88	1,84	8,50	5,28	48,36	12,31	42,66
Média	30,18	4,13	12,28	1,41	1,71	1,83	10,94	5,41	51,57	23,95	43,75
	BRS Ametista										
0	28,30	4,11	13,74	1,94	1,74	1,82	13,86	6,39	44,27	28,25	33,70
50	40,27	4,58	11,78	1,04	1,69	2,26	12,35	5,96	48,10	17,98	44,10
100	31,80	3,63	9,98	1,41	1,54	1,74	12,75	4,25	40,52	18,29	36,72
200	31,33	4,12	10,25	1,57	1,54	1,66	12,14	5,52	52,38	18,86	36,17
Média	32,90	4,11	11,43	1,49	1,63	1,87	12,77	5,53	46,31	20,84	37,67
	IAPAR 81										
0	34,80	4,73	12,77	1,25	1,67	2,45	12,90	5,52	54,96	23,13	49,53
50	33,30	3,99	11,40	1,08	1,70	1,98	11,45	3,97	53,57	17,56	40,26
100	32,43	4,12	11,25	1,69	1,76	1,99	15,03	6,44	55,39	22,06	45,98
200	32,73	4,63	11,34	1,83	1,78	2,02	14,11	7,62	64,39	20,18	55,25
Média	33,31	4,36	11,69	1,46	1,73	2,11	13,37	5,88	57,07	20,73	47,75
	IPR Tangará										
0	31,03	4,09	11,43	1,54	1,41	2,35	14,82	4,24	67,16	26,76	40,57
50	29,90	3,61	10,91	1,46	1,44	1,90	13,49	4,04	63,23	20,06	33,44
100	34,43	3,85	10,70	0,75	1,21	1,89	9,61	4,54	61,40	12,87	40,58
200	35,67	4,57	12,53	1,25	1,58	1,90	13,95	5,86	78,11	15,89	40,33
Média	32,75	4,03	11,39	1,25	1,41	2,01	12,96	4,67	67,47	18,89	38,73
Teste F											
Cultivar (a)	2,41 <sup>NS</sup>	0,88 <sup>NS</sup>	2,08 <sup>NS</sup>	0,64 <sup>NS</sup>	22,02*	2,63*	4,07*	1,43 <sup>NS</sup>	10,59*	1,72 <sup>NS</sup>	3,88*
Doses (b)	1,17 <sup>NS</sup>	0,80 <sup>NS</sup>	0,71 <sup>NS</sup>	1,49 <sup>NS</sup>	3,49*	3,80*	3,12*	1,10 <sup>NS</sup>	0,73 <sup>NS</sup>	9,93*	0,09 <sup>NS</sup>
a × b	2,87*	2,05*	3,83*	1,72 <sup>NS</sup>	16,47*	1,57 <sup>NS</sup>	3,28*	1,98 <sup>NS</sup>	1,67 <sup>NS</sup>	1,74 <sup>NS</sup>	1,41 <sup>NS</sup>
CV%	11,26	11,99	11,80	28,54	6,02	12,98	12,96	26,50	15,04	26,22	18,68

\*significativo a 5% de probabilidade. <sup>NS</sup> não significativo.

apresentou, na média das doses, os maiores teores de N, P, Mg, S, B, Cu e Zn nos grãos, quando comparada com a cultivar BRS Estilo, que apresentou o maior teor de K, BRS Ametista de Ca, IPR CG de Mn e IPR Tangará de Fe (Tabela 5). Tal resultado indica que a IPR 81 apresenta, no geral, maior capacidade remobilização para o principal dreno da planta, sendo este, um fator importante nos estudos de biofortificação alimentar (KING, 2002; WHITE; BROADLEY, 2009; BOUIS; WELCH, 2010).

### 3.6 CONCLUSÕES

1. Os atributos químicos do solo foram influenciados pelas cultivares de feijoeiro e doses de Mg.

2. Exceto o teor foliar de clorofila, a taxa fotossintética, condutância estomática, transpiração, concentração de CO<sub>2</sub> e açúcares solúveis totais têm relação direta com a produção de grãos e de MSPA do feijoeiro.

3. Independente da dose de Mg, as cultivares de feijoeiro apresentaram respostas distintas nos teores de nutrientes nas folhas e nos grãos.

4. A cultivar IAPAR 81 apresenta maior taxa de remobilização de N, P, Mg, S, B, Cu e Zn para grãos quando comparada com a BRS Estilo, BRS Ametista, IPR CG e IPR Tangará.

### 3.7 AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de Mestrado, a Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela oportunidade oferecida e à Embrapa Soja (CNPSo) pelo apoio logístico para realização dos experimentos e análises laboratoriais.

### REFERÊNCIAS

ALVAREZ VENEGAS, V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO A.C.; GUIMARÃES P.T.G.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1999. p.43-60.

ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba, POTAFOS, 1996. 100p.

- ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a produção de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.137-146, 2011.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.32, p.921-950, 2001.
- BERGMANN, W. **Nutrition disorders of plants; development, visual, and analytical diagnosis**. New York: Gustave Fischer Verlag, 1992. 741p.
- BOARO, C.S.F.; RODRIGUES, J.D.; PEDRAS, J.F.; RODRIGUES, S.D.; DELACHIAVE, M.E.A.; ONO, E.O. Produção de matéria seca de feijoeiros submetidos a diferentes níveis de magnésio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.965-970, 1997.
- BOUIS, H.E.; WELCH, R.M. Biofortification - A Sustainable Agricultural Strategy for Reducing Micronutrient Malnutrition in the Global South. **Crop Science**, v.50 p.S-20-S-32, 2010
- BURATTO, J.S.; MODA-CIRINO, V.; FONSECA JÚNIOR, N.S.; PRETE, C.E.C.; FARIA, R.F. Adaptabilidade e estabilidade produtiva em genótipos precoces de feijão no Estado do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, v.28, p.373-380, 2007.
- CAIRES, E F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.161-169, 2000.
- CAKMAK, I; KIRKBY, E.A. Role of magnesium in carbon partition and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, v.133, p.692-704, 2008.
- CAKMAK, I.; YAZICI, M. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crops**, v.94, p.23-25, 2010.
- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In. KLUTE, A., (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p.901-926.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: CNPS/EMBRAPA, 1997. 212p.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton: CRC Press, 2011. 560p.
- FAGERIA, N.K.; MOREIRA, A.; COELHO, A.M. Nutrient uptake in dry bean genotypes. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.43, p.2289-2302, 2012.
- FAGERIA, N.K.; SOUZA, M.R. Upland rice, common bean, and cowpea response to magnesium application on an Oxisol. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.17 e 18, p.1805-1816, 1999.
- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F.; MOREIRA, A. Liming and manganese influence on common bean, yield, nutrient uptake, and change in soil chemical properties of an Oxisol under no-tillage system. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.31, p.1723-1735, 2008.

FORD, E.M. Studies in the nutrition of apple rootstocks.III. Effects of level of magnesium on growth, form and mineral composition. **Annals of Botany**, v.30, p.639-655, 1966.

FRITSCHI, F.B.; RAY, J.D. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll *a/b* ratio. **Photosynthetica**, v.425, p.92-98, 2007.

FURLANI JUNIOR, E.; NAKAGAWA, J.; BULHÕES, L.J.; MOREIRA, J.A.A.; GRASSI FILHO, H. Correlação entre leituras de clorofila e níveis de nitrogênio aplicados em feijoeiro, **Bragantia**, v.55, p. 171-175, 1996.

HERMANS, C.; JOHNSONS, G.N.; STRASSER, R.J.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v.220, p.344-355, 2004.

HEWITT, J.D.; CASEY, L.L.; ZOBEL, R.W. Effect of day length and night temperature on starch accumulation and degradation in soybean. **Annals of Botany**, v.56, p.513-522, 1985.

HICKS, C.R. **Fundamental concepts in the design of experiments**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973. 349p.

KING, J.C. Evaluating the impact of plant biofortification on human nutrition. **The Journal of nutrition**, v.132, p.511S-513S, 2002

MALAVOLTA, E. **ABC of soil and plant analysis**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1992, 124p.

MALAVOLTA, E. **Manual of mineral nutrition of plants**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press. 2012. 651p.

MINOLTA CAMERA Co. **Manual for chlorophyll meter SPAD-502**. Osaka: Minolta, Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22p.

MIHOPOULOS, P.G.; SAYLES, G.D.; SUIDAM, M.T.; SHAH, J.; BISHOP, D.F. Vapor phase treatment of PCE in a soil column by lab-scale anaerobic bioventing. **Water Resource**, v.34, p.3231-3237, 2000.

MOREIRA, A.; CARVALHO, J.G.; EVANGELISTA, A.R. Relação cálcio e magnésio na fertilidade de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico cultivado com alfafa. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, p.786-794, 2005.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R.T. Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.95-101, 2003.

MOURA, M.M.; CARNEIRO, P.C.S.; CARNEIRO, J.E.S.; CRUZ, C.D. Potencial de caracteres na avaliação da arquitetura de plantas de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.417-425, 2013.

ROSOLEM, C.A.; MACHADO, J.R.; MAIA, I.G.; NAKAGAWA, J. Soybean response to soil magnesium. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.47-54, 1992.

SANT'ANA, E.V.P.; SANTOS, A.B.; SILVEIRA, P.M. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura SPAD e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.491-496, 2010.

SORATTO, R.P.; CARVALHO, M.A.C; ARF, O. Chlorophyll content and grain yield of common bean as affected by nitrogen fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.895-901, 2004.

SOUZA, H.A.; HERNANDES, A.; ROMUALDO, L.M.; ROZANE, D.E.; NATALE, W.; BARBOSA, J.C. Folha diagnóstica para avaliação do estado nutricional do feijoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.1243-1250, 2011.

UDDLING, J.; GERLAND-ALFREDSSON, J.; PIIKKI, K.; PLEIJEL, H. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. **Photosynthesis Research**, v.91, p.37-46, 2007.

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**, v.182, p.49-84, 2009.

ZUCARELLI, C.; PRANDO, A.M.; RAMOS JUNIOR, E.U.; NAKAGAWA, J. Fósforo na produtividade e qualidade de sementes de feijão carioca precoce cultivado no período das águas. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.32-38, 2011.

## 4 ARTIGO B – EFICIÊNCIA DE USO DE MAGNÉSIO POR CULTIVARES DE FEIJOEIRO PARA PRODUÇÃO, COMPONENTES FISIOLÓGICOS E ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS

### 4.1 RESUMO

A eficiência do uso do magnésio (Mg) na seleção de cultivares de feijoeiro pode contribuir para o aumento da produtividade, estado nutricional e qualidade dos grãos. Para isso, este estudo objetivou avaliar o comportamento de cultivares de feijoeiro no uso de Mg sobre a produtividade, fertilidade do solo, componentes fisiológicos e estado nutricional. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×5, com três repetições. Foram avaliados cinco cultivares [BRS Estilo, IPR Tangará, IPR Campos Gerais (CG), IAPAR 81 e BRS Ametista] mantidas em dois níveis de Mg [baixo (0 mg kg<sup>-1</sup>) e alto (100 mg kg<sup>-1</sup>)] em Neossolo Quartzarênico distrófico. A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e de grãos variou significativamente entre cultivares e doses de Mg. Alta concentração de Mg prejudicaram a produção de MSPA e grãos da cultivar IPR Tangará, o inverso foi observado para as demais cultivares. Os componentes fisiológicos estão diretamente relacionados com a produção de MSPA e grãos. As concentrações foliares de fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S) e boro (B) e nos grãos de S, B, ferro (Fe) e manganês (Mn) apresentaram diferenças entre as cultivares e interação doses e cultivares para o B indicando a presença de fatores genéticos na absorção dos nutrientes.

**Palavras-chave:** Componentes de produção. Componentes fisiológicos. Estado nutricional. *Phaseolus vulgaris*. Produção.

### 4.2 ABSTRACT

## COMMON BEAN CULTIVAR EVALUATION FOR YIELD, PHYSIOLOGICAL COMPONENTS, NUTRITIONAL STATUS, AND MAGNESIUM USE EFFICIENCY

The efficiency of use of magnesium (Mg) in the selection of common bean cultivars can contribute to increased productivity, nutritional status and quality of grains. This study aimed to evaluate the behavior of common bean cultivars in the Mg use efficiency on yield, soil fertility, physiological components, and nutritional status. The experimental design was completely randomized in a 2×5 factorial scheme with three replicates. Five common bean cultivars [BRS Estilo, IPR Tangará, IPR Campos Gerais (CG), IAPAR 81 and BRS Ametista] grown at two levels of Mg [low (0 mg kg<sup>-1</sup>) and high (100 mg kg<sup>-1</sup>)] in an Typic Quartzipisamment were used. The dry weight yield (DWY) and grains varied significantly among genotypes and Mg rates. High concentrations of Mg decreased DWY, and the cultivar IAPAR Tangará, whereas the opposite for the other cultivars was observed. The physiological components were directly related to the grain yield, and DWY. The foliar concentrations of phosphorus (P), calcium (Ca), sulfur (S) and boron (B), and concentration of S, B, Fe and Mn in grains showed differences between cultivars and interaction rates vs. cultivar to B, indicating the presence of genetic factors in uptake of nutrients.

**Keywords:** Nutritional status. *Phaseolus vulgaris*. Physiological components. Yield. Yields components.

### 4.3 INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade das culturas está diretamente relacionado ao fornecimento adequado de nutrientes (MORAES, 1988). A otimização na eficiência nutricional das plantas é fundamental para o aumento da produtividade com menor custo da produção, visto que no cultivo do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), os fertilizantes contribuem com cerca de 30% do custo total. Além dessa variável, o incremento da produtividade para patamares elevados também depende de outros fatores, como: genética do material, disponibilidade hídrica, controle de pragas e doenças, manejo do solo, espaçamento e uso adequado de cultivares para cada condição de plantio (FAGERIA, 1998; BALIGAR et al., 2001).

No aumento da eficiência na absorção de nutrientes deve-se selecionar cultivares específicas para cada condição edafoclimática. Após essa seleção, as mesmas devem ser utilizadas nos programas de melhoramento genético para incorporação das características fisiológicas positivas em outras cultivares agronomicamente promissoras (PONNAMPERUMA, 1976; FAGERIA; MORAIS, 1987). Dentre os elementos essenciais que atuam no desenvolvimento das plantas, Brown (1963) e Fageria e Morais (1987) verificaram que as cultivares apresentaram diferenças significativas na o Ca e o Mg absorção e utilização destes dois nutrientes.

No caso do Mg, este participa na síntese de clorofila como átomo central da molécula. A sua baixa disponibilidade afeta as taxas de fotossíntese e de crescimento, além de diversos processos fisiológicos e bioquímicos (ROSOLEM et al., 1992; HERMANS; VERBRUGGEN, 2005; CAKMAK; KIRKBY, 2008; FAGERIA, 2009). Dentre esses processos, uma das principais funções do Mg é atuar como cofator em quase todas as enzimas fosforilativas que atuam no metabolismo da planta (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012).

A disponibilidade de Mg no solo é feita, quase que exclusivamente por meio da aplicação de calcário, o qual, dependendo da fonte, que pode apresentar menos que 5% de MgO na composição (ALVAREZ VENEGAS; RIBEIRO, 1999), o que tem levado a problemas de deficiência em várias culturas (FAGERIA; SOUZA, 1991). Neste contexto, Hermans e Verbruggen (2005) e Hermans et al. (2004) verificaram que a deficiência de Mg afeta a exportação de sacarose, o que acarreta menor acúmulo de amido nas plantas, como verificado por Sacramento et al. (1999) e Boaro et al. (1997), houve diminuição no transporte de fotoassimilados da fonte para o dreno com diminuição significativa na produtividade.

Devido à grande importância do feijoeiro como alimento básico da população brasileira (ANDRADE et al., 2004), o melhoramento das culturas tem visado, preferencialmente a seleção de plantas para o maior rendimento de grãos e caracteres como resistência a estresses bióticos e abióticos (MURAOKA et al., 1993; ARAÚJO; TEIXEIRA, 2011). No entanto, deve-se considerar que desses processos de seleção, a eficiência de uso dos nutrientes é fator primordial para aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção de forma sustentável.

O objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade, estado nutricional e a eficiência agrônômica e de utilização dos nutrientes, teores foliares e nos grãos e os atributos químicos do solo em cinco cultivares de feijoeiro do grupo carioca cultivados em solos com baixa ( $0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e alta ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) concentração de Mg ( $\text{MgCl}_2$ ).

#### 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

##### 4.4.1 Local do Experimento e Atributos do Solo

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação da Embrapa Soja, localizada no Município de Londrina, Estado do Paraná, sob as coordenadas geográficas de  $23^{\circ}11'39''$  LS e  $51^{\circ}10'40''$  LW. Utilizou-se um Neossolo Quartzarênico distrófico, de textura arenosa ( $86 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $870 \text{ g kg}^{-1}$  de areia), coletado no Município de Três Lagoas, Estado do Mato Grosso do Sul ( $20^{\circ}45'04''$  LS e  $51^{\circ}40'42''$  LW) <http://pt.wikipedia.org/wiki/Oeste>, na profundidade de 0-20 cm, com os seguintes atributos químicos: pH ( $\text{CaCl}_2$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) = 4,4, matéria orgânica do solo (MOS) =  $12,3 \text{ g kg}^{-1}$ , P (extrator Mehlich 1) =  $3,0 \text{ mg kg}^{-1}$ , P (extrator resina) =  $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ , potássio –K (resina) =  $0,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , Ca (resina) =  $0,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , Mg (resina) =  $0,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , alumínio-Al (KCl  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) =  $0,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , acidez potencial –H+Al =  $3,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , enxofre – S- $\text{SO}_4^-$  =  $6,0 \text{ mg kg}^{-1}$ , capacidade de troca de cátions – CTC =  $3,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , saturação por bases –V = 6,0%, B (água quente) =  $0,18 \text{ mg kg}^{-1}$ , cobre-Cu (Mehlich 1) =  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , ferro-Fe (Mehlich 1) =  $73,0 \text{ mg kg}^{-1}$ , manganês-Mn (Mehlich 1) =  $18,4 \text{ mg kg}^{-1}$  e zinco-Zn (Mehlich 1) =  $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$ .

#### 4.4.2 Delineamento Estatístico, Adubação e Coleta das Plantas

Empregou-se o delineamento experimental inteiramente casualizados em esquema fatorial  $2 \times 5$ , com três repetições. Os tratamentos foram constituídos de duas doses de Mg [ $0 \text{ mg kg}^{-1}$  (baixo) e  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  (alto), fonte  $\text{MgCl}_2$ ] e cinco cultivares de feijoeiro do grupo carioca [BRS Estilo, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG), IPR Tangará e IAPAR 81].

Em vasos de barro, impermeabilizados internamente com ‘neutrol’, foram colocados  $3,0 \text{ dm}^3$  de terra fina seca ao ar (TFSA), passado em peneira de  $2,0 \text{ mm}$ . A acidez foi corrigida com carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) para elevar a saturação por bases a 70%. Exceto o Mg, as adubações com N, P, K, S, B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn foram feitas de acordo com Moreira et al. (2011), adaptadas de Allen et al. (1976) para experimentos conduzidos em casa de vegetação [ $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de N–ureia ( $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2)$ ),  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  de K–KCl;  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  de P–fosfato monoamônio (MAP),  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de B– $\text{H}_3\text{BO}_3$ ;  $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu– $\text{CuSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  de molibdênio (Mo)– $\text{Na}_2\text{Mo}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Fe– $\text{FeSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$  de cobalto (Co)– $\text{CoCl}_2\text{FeSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$  de níquel (Ni)– $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mn– $\text{MnSO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn– $\text{ZnSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$  e  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  de S– $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Trinta dias após o plantio também foi feita uma adubação por cobertura com  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de (K)– $\text{K}_2\text{SO}_4$  e  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  de (N)– $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ .

As plantas foram irrigadas diariamente com água desionizada, para compensar as perdas por evapotranspiração e para manter o solo próximo de 70% do volume total de poros (VTP) utilizando o método descrito por Cassel e Nielsen (1986). Após a escarificação foram semeadas dez sementes, que após o desbaste foram deixadas duas plantas uniformes.

#### 4.4.3 Colheita e Análises Laboratoriais

No estádio R1 (FAGERIA et al., 2011) foram coletados o terceiro e quarto trifólio a contar do ápice (folha diagnóstico) e secados em estufa de circulação forçada a  $65 \pm 2$  °C, e posteriormente moídos para determinação dos teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn na parte aérea (MALAVOLTA et al., 1997). Antes da coleta, no período da manhã, efetuou-se a medição indireta do teor de clorofila com o uso do medidor SPAD – 502 (MINOLTA CAMERA Co., 1989) no lóbulo mediano nas mesmas folhas, sendo os valores convertidos em teor de clorofila ( $\text{mg m}^{-2}$ ) com a equação  $= 16,033 + (7,5774 \times \text{SPAD})$

(FRITSHI; RAY, 2007). Em seguida nos mesmos folíolos, foram quantificadas a taxa fotossintética ( $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), concentração interna de gás carbônico -  $\text{CO}_2$  ( $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ) e taxa respiratória ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) com medidor de fotossíntese (LI-6400XT). Durante todo ciclo foram coletadas todas as folhas senescentes e no final do ciclo, juntamente com o caule, as vagens e os grãos foram pesados para determinação da produção de MSPA e de grãos por vaso.

Além da MSPA de cada cultivar foram determinados os componentes de produção (FAGERIA et al., 2014): índice de eficiência de Mg –IEMg, eficiência agrônômica de Mg–EAMg ( $\text{g g}^{-1}$ ), eficiência fisiológica de Mg –EFMg ( $\text{mg } \square \text{ g}^{-1}$ ), eficiência recuperação de Mg–ERMg (%) e eficiência utilização de Mg –EUMg ( $\square \text{ g g}^{-1}$ ).

Para extração dos açúcares solúveis totais (AST), 200 mg do tecido seco e moído do terceiro e quarto trifólio foram incubados três vezes com 10 mL de etanol 80%, levados em banho-maria a 80 °C durante 15 minutos e centrifugados a 925 g por 15 min. No sobrenadante foi feita a determinação dos AST pelo método colorimétrico da antrona (YEMM; WILLIS, 1954), utilizando glicose ( $60 \text{ mg mL}^{-1}$ ) como padrão.

No final do ciclo foram retiradas amostras de solo de cada vaso para determinação de pH em água, P disponível, K trocável, Ca trocável, Mg trocável, S- $\text{SO}_4^-$  disponível, Al trocável, H+Al, CTC, saturação por bases (V%), B disponível, Cu disponível, Fe disponível, Mn disponível e Zn disponível, conforme metodologias descritas em Embrapa (1997).

#### 4.4.4 Análise Estatística

Os resultados de produção de MSPA e de grãos, fertilidade do solo, componentes de produção e estado nutricional das plantas e teor do nutriente nos grãos foram submetidos ao teste de normalidade (HICKS, 1973), e posteriormente, foram realizadas a análise de variância (ANOVA), teste F, comparação de contraste de médias por Scott e Knott ( $p \leq 0,05$ ), regressão e correlação a 5% de significância (PIMENTEL GOMES, 2009).

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação significativa entre as doses de Mg  $\times$  cultivares de feijoeiro para o teor de Mg trocável no solo (Tabela 1). Verificou-se que na baixa concentração de Mg, a cultivar IPR Tangará apresentou ao final do ciclo os menores teores de Mg trocável,

enquanto na dose  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , as que tiveram menores valores foram IPR CG, BRS Ametista e IPR Tangará. Das cultivares avaliadas, nas duas concentrações de Mg, somente a IPR Tangará acarretou maior extração do nutriente no solo, o que equivale a uma diferença de 177,8% e 39,6% sobre a BRS Estilo – cultivar menos exigente (Tabela 1).

Considerando os atributos químicos do solo, além do Mg, mesmo com os efeitos interiônicos de inibição existente entre os íons (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012), quando se compara as duas doses de Mg (0 e  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ), apenas o índice pH foi significativamente influenciado pela aplicação de Mg (Tabela 2). O incremento do pH observado entre estes tratamentos pode estar associado à neutralização do  $\text{H}^+$  na solução do solo devido à substituição desse cátion nas argilas pelo  $\text{Mg}^{2+}$  no complexo de troca e do carbonato proveniente da aplicação de  $\text{CaCO}_3$  como corretivo da acidez do solo. Com relação ao  $\text{Cl}^-$ , de acordo com Mihopoulos et al. (2000) este íon apresenta caráter neutro, não alterando o pH do solo. Resultados semelhantes sobre o incremento da concentração de Mg no aumento do índice pH do solo cultivado com feijoeiro foram obtidos por Fageria & Souza (1991). No caso das cultivares, houve diferenças significativas nos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , Cu e Zn disponível no solo, com os maiores teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , independente da dose de Mg na cultivar IAPAR 81 ( $4,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e nos menores na IPR Tangará ( $2,1 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Para o Cu e Zn disponível, o maior teor foi verificado na BRS Estilo, enquanto o menor de Cu foi na mesma cultivar e o de Zn na IPR Tangará (Tabela 2). De acordo com as faixas de interpretação de fertilidade do solo descritas por Alvarez Venegas et al. (1999) para os mesmos extratores, na média dos tratamentos, os níveis de C, P, Cu, Fe, Mn e Zn no solo ficaram dentro da faixa considerada alta, a acidez potencial ( $\text{H}^+\text{+Al}$ ) e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  na indicada como média e o K, Ca e Al situaram na de baixa disponibilidade para o desenvolvimento adequado das plantas.

**Tabela 1** – Mg trocável no solo e produção de matéria seca total da parte aérea (MSPA) das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg<sup>-1</sup>) e alta (100 mg kg<sup>-1</sup>) concentração de Mg.

Cultivares	Mg trocável		MSPA	
	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----		----- g/vaso -----	
	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg
BRS Estilo	0,25aB	0,67aA	17,5dB	38,0aA
IPR CG	0,21aB	0,51bA	24,9cB	40,6aA
BRS Ametista	0,18aB	0,44bA	29,6bB	36,4aA
IAPAR 81	0,16aB	0,60aA	34,9aB	40,5aA
IPR Tangará	0,09bB	0,48bA	37,5aA	24,1bB
Média	0,18	0,54	28,3B	35,9A
Teste F				
Dose de Mg (a)	22,17*		24,41*	
Cultivar (b)	18,17*		13,31*	
a × b	8,94*		6,17*	
CV%	12,58		11,84	

\*Significativo a 5% de probabilidade. Médias seguidas por letras maiúsculas na mesma linha e minúsculas nas mesmas colunas diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Snott-Knott.

**Tabela 2** – Atributos químicos do solo de cada cultivar de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg<sup>-1</sup>) e alta (100 mg kg<sup>-1</sup>) concentração de Mg.

Cultivares	Dose Mg	pH	C	P	K	Ca	Al	H+Al	S-SO <sub>4</sub>	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		H <sub>2</sub> O	- g kg <sup>-1</sup> -	- mg kg <sup>-1</sup> -	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>						
BRS Estilo	Baixo	4,7	7,2	147,2	0,07	1,2	0,1	3,7	2,9	0,3	2,1	99,5	28,6	9,0
	Alto	5,1	9,0	120,3	0,09	1,3	0,0	3,4	3,2	0,3	4,5	93,7	33,6	14,5
IPR CG	Baixo	4,7	8,1	140,3	0,08	0,9	0,1	4,0	3,0	0,4	3,4	106,3	29,9	11,2
	Alto	5,0	7,2	160,7	0,09	1,2	0,1	3,2	3,5	0,3	2,7	125,8	32,2	9,1
BRS Ametista	Baixo	4,8	7,7	154,2	0,07	1,0	0,1	3,9	4,2	0,3	3,0	104,3	28,1	13,2
	Alto	5,1	6,1	141,8	0,07	0,8	0,0	3,1	4,1	0,5	3,1	93,6	25,3	12,6
IAPAR 81	Baixo	4,7	7,1	124,4	0,07	1,0	0,1	3,5	4,3	0,4	2,5	109,6	29,6	8,8
	Alto	4,7	7,7	153,3	0,05	0,1	0,1	3,6	4,9	0,3	2,8	123,6	34,6	14,0
IPRTangará	Baixo	4,6	6,4	135,5	0,06	0,8	0,2	4,4	2,1	0,4	2,4	115,9	31,5	8,5
	Alto	4,8	7,4	141,4	0,07	0,9	0,1	3,8	2,2	0,4	3,6	98,5	27,7	10,9
Média	Baixo	4,7	7,3	140,3	0,07	1,0	0,1	3,9	2,8	0,4	2,7	107,1	29,5	10,1
Média	Alto	4,9	7,5	143,5	0,07	0,9	0,1	3,4	4,0	0,4	3,3	107,0	30,7	12,2
Média <sup>(1)</sup>	Geral	4,8	7,4	141,9	0,07	0,9	0,1	3,7	3,4	0,4	3,0	107,1	30,1	11,2
Teste F														
Doses (a)		11,79*	1,15 <sup>NS</sup>	1,27 <sup>NS</sup>	0,95 <sup>NS</sup>	20,63 <sup>NS</sup>	2,9 <sup>NS</sup>	2,32 <sup>NS</sup>	3,33 <sup>NS</sup>	0,28 <sup>NS</sup>	0,49 <sup>NS</sup>	2,50 <sup>NS</sup>	1,99 <sup>NS</sup>	2,58 <sup>NS</sup>
Cultivares (b)		1,40 <sup>NS</sup>	2,12 <sup>NS</sup>	0,16 <sup>NS</sup>	0,64 <sup>NS</sup>	0,27 <sup>NS</sup>	2,59 <sup>NS</sup>	3,04 <sup>NS</sup>	10,56*	0,02 <sup>NS</sup>	4,99*	0,01 <sup>NS</sup>	1,00 <sup>NS</sup>	8,47*
a×b		0,74 <sup>NS</sup>	0,09 <sup>NS</sup>	3,16 <sup>NS</sup>	0,63 <sup>NS</sup>	1,92 <sup>NS</sup>	1,42 <sup>NS</sup>	1,18 <sup>NS</sup>	2,99 <sup>NS</sup>	0,69 <sup>NS</sup>	3,21*	1,86 <sup>NS</sup>	2,12 <sup>NS</sup>	1,43 <sup>NS</sup>
CV%		4,06	14,14	10,48	34,16	22,90	43,54	11,45	35,16	40,70	26,95	13,45	11,91	17,45

\*,<sup>NS</sup> Significativo e não significativo a 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>(1)</sup>Média das duas concentrações de Mg (0 e 100 mg kg<sup>-1</sup>).

As cultivares apresentaram comportamento diferencial na produção de matéria seca total da parte aérea (MSPA), verificou-se que a BRS Estilo, IPR CG, BRS Ametista e IAPAR 81 tiveram suas produções de MSPA aumentadas com aplicação de 100 mg kg<sup>-1</sup> de Mg, enquanto a IPR Tangará foi a única prejudicada pelo aumento da concentração de Mg no solo (Tabela 1). Dentro dos mesmos níveis de Mg, a cultivar menos exigente e com maior produção de MSPA foi a IPR Tangará, enquanto a BRS Estilo foi a menor. Já na dose 100 mg kg<sup>-1</sup>, o inverso foi observado, visto que a IPR Tangará foi a menos responsiva e a IPR CG obteve a maior produção de MSPA por vaso, no entanto, tais incrementos não foram convertidos em produção de grãos (Figura 1).

Inúmeros processos fisiológicos estão envolvidos no incremento ou diminuição da produção de MSPA, com incremento da dose de Mg, o que pode ser confirmado no presente trabalho com o aumento ou redução da taxa fotossintética e dos açúcares totais dentro das cinco cultivares estudadas (Tabela 3). Além desses fatores, essas diferenças de comportamento também podem ser atribuídas a uma possível diferença no grau de permeabilidade da membrana celular das raízes de cada cultivar, o que permitiu o Mg penetrar mais facilmente dentro ou entre as células para dentro das plantas.

Os efeitos dos tratamentos sobre a taxa fotossintética, concentração de CO<sub>2</sub>, condutância estomática, taxa respiratória, clorofila e açúcares solúveis totais (AST) nas cinco cultivares de feijoeiro demonstraram que as cultivares BRS Estilo, IPR CG, BRS Ametista e IAPAR 81 obtiveram as maiores taxas fotossintética, condutância estomática e AST quando cultivada com alta concentração de Mg, enquanto a IPR Tangará obteve taxas maiores de fotossíntese e condutância estomática quando cultivada com baixa concentração de Mg (Tabela 3). No caso da clorofila, diferente do observado por Hermans et al. (2004) com beterraba, mesmo o elemento fazendo parte da molécula central (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012), foi verificado maior acúmulo na baixa concentração de Mg apresentando relação inversa à fotossíntese (Tabela 3). Este resultado, possivelmente, deve estar relacionado à função do Mg na planta, atuando como ativador da rubisco, enzima responsável pela fixação do CO<sub>2</sub>, sendo que na carência do nutriente pode haver um acúmulo de clorofila na folha sem atua na fotossíntese, ficando este processo fisiológico severamente afetado (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA 2009).

**Tabela 3** – Taxa fotossintética, concentração de CO<sub>2</sub>, condutância estomática, taxa respiratória, teores de clorofila e açúcares solúveis totais das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0mg kg<sup>-1</sup>) e alta (100mg kg<sup>-1</sup>) concentração de Mg.

Cultivares	Taxa fotossintética		Concentração de CO <sub>2</sub>		Condutância estomática		Taxa respiratória		Clorofila		Açúcares solúveis totais	
	- mmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> -		-- mmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> --		-- mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> --		- mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> -		----- mg m <sup>-2</sup> -----		----- mg g <sup>-1</sup> -----	
	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg
BRS Estilo	7,67cB	16,96bA	230,67bA	242,22bA	0,16cB	0,33bA	2,78cB	4,56cA	264,91aA	269,54aA	87,52bB	129,69bA
IPR CG	17,61aA	19,71aA	254,15bA	272,42aA	0,41bB	0,57aA	4,81bA	6,18bA	258,55aA	258,76aA	179,43aB	250,87aA
BRS Ametista	13,77bB	17,02bA	248,43bA	273,56aA	0,28cB	0,60aA	4,88bA	6,43bA	297,20aA	275,64aA	163,71aB	256,08aA
IAPAR 81	9,57bB	16,00bA	235,11bA	268,50aA	0,17cB	0,46bA	3,39bA	6,77bA	259,14aA	277,45aA	215,27aB	285,52aA
IPR Tangará	16,44aA	11,22cB	276,37aA	285,30aA	0,56aA	0,47bB	7,58aB	8,08aA	322,12aA	260,19aA	174,13aB	218,01aA
Média	13,01A	16,18A	248,95A	247,15A	0,32B	0,49A	4,68A	6,40A	280,38A	268,32A	164,01B	228,03A
Teste F												
Doses	8,74*		6,95*		11,25*		5,28*		2,44 <sup>NS</sup>		7,63*	
Cultivar	12,48*		9,63*		6,87*		7,76*		3,02 <sup>NS</sup>		18,22*	
a × b	4,44*		2,27 <sup>NS</sup>		3,78 <sup>NS</sup>		2,12 <sup>NS</sup>		0,88 <sup>NS</sup>		5,47*	
CV%	10,81		8,52		15,75		13,33		11,30		17,04	

\*,<sup>NS</sup> Significativo e não significativo a 5% de probabilidade, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas na mesma linha e minúsculas na mesma coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Snott-Knott.

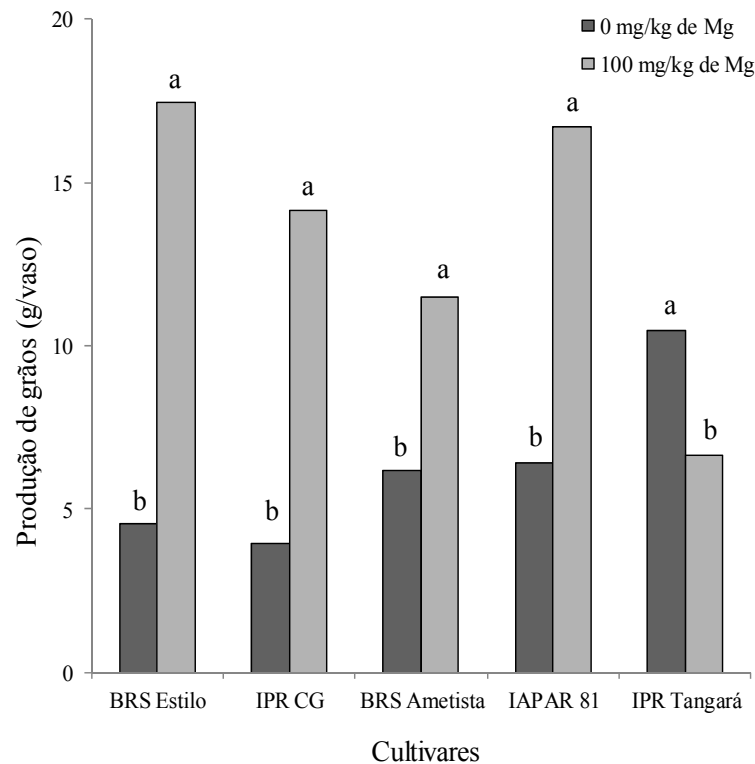
As quantidades de AST na folha apresentaram interação significativa entre os fatores. Na condição de baixa e alta concentração de Mg, somente a BRS Estilo diferiu estatisticamente das demais cultivares (Tabela 3). Semelhante ao observado nas variáveis fisiológicas, na média das cultivares, a aplicação de Mg acarretou em incremento de 39% na concentração de AST nas folhas em relação ao tratamento com baixo nível de Mg. As plantas de feijoeiro com deficiência foliar de Mg apresentaram inibição severa no transporte e remobilização de açúcares na planta (CAKMAK; YAZICI, 2010). Os mesmos autores relatam que o efeito do Mg no carregamento da sacarose no floema não é específico e não está associado a qualquer efeito secundário. Baixas concentrações em plantas deficientes devem estar relacionadas à menor quantidade de Mg-ATPase na planta, enzima essa, responsável em fornecer energia no transporte de sacarose no floema.

Os teores foliares de Mg indicam que as cultivares também apresentaram comportamentos distintos na baixa ou alta concentração de Mg (Tabela 4). Em todas as cultivares as maiores concentrações foram obtidas na dose 100 mg kg<sup>-1</sup>, com teor médio de 4,6 g kg<sup>-1</sup> de Mg, 142,1% superior a dose 0 mg kg<sup>-1</sup>. No geral, a BRS Estilo foi a que apresentou os maiores teores de Mg, tendo ficado, estatisticamente, dentro do grupo das cultivares com os maiores teores do nutriente, independentemente da dose aplicada (Tabela 4). Já nos grãos, não houve interação doses × cultivar, visto que nas duas concentrações de Mg aplicadas o teor médio foi de 1,6 g kg<sup>-1</sup> de Mg. A razão da não significância dos tratamentos ocorre, possivelmente, devido à grande mobilidade do Mg na planta, visto que o grão após o estágio R5 (FAGERIA et al., 2011) é o dreno principal, por isso, devido à menor produção verificada (Figura 1) e mesmo com menor teor foliar no estágio R1 no tratamento 0 mg kg<sup>-1</sup> de Mg, a maior parte do nutriente foi mobilizado para os grãos (MALAVOLTA, 2006).

O aumento da quantidade de Mg aplicada alterou significativamente os teores foliares de P, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, com incremento, na média do P, Fe e Mn e redução nos de Ca, S, B, Cu e Zn na planta. Com relação às cultivares, houve efeito dos tratamentos apenas para o P, Ca, S e B, sendo que em nenhum dos elementos houve interação dose × cultivar (Tabela 5). Para avaliação dos teores foliares, apesar das diferenças entre os níveis de Mg, verificou-se que, na média, P, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn ficaram dentro ou próximos das faixas tidas como adequadas por Malavolta et al. (1997) e Fageria et al. (2011), enquanto os teores de N e K situaram-se abaixo dos níveis críticos estabelecidos para o feijoeiro, que são de 30 a 50 g kg<sup>-1</sup> e 20 a 25 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Na comparação entre cultivares, foram constatadas diferenças significativas para os teores de P, Ca, S e B, com os

maiores de P e Ca na dose 100 mg kg<sup>-1</sup> nas cultivares IPR CG e BRS Ametista, respectivamente, S e B na BRS Estilo (0 mg kg<sup>-1</sup>) e os menores de P na IPR CG (0 mg kg<sup>-1</sup>) e na IAPAR 81 os de Ca e B na baixa e S na alta dose de Mg aplicada (Tabela 5). Estes resultados corroboram Fageria et al. (2012), ao relatarem resposta diferencial entre as cultivares de feijoeiro na absorção de nutrientes.

**Figura 1** – Resposta das cultivares de feijoeiro à baixa (0 mg kg<sup>-1</sup>) e alta (100 mg kg<sup>-1</sup>) quantidade de Mg aplicado no solo



\*efeito dos tratamentos dentro de cada cultivar seguida por letras distintas diferem entre si a 5% pelo teste de Snott-Knott.

Com relação aos teores dos nutrientes nos grãos (Tabela 5), houve resposta dos níveis de Mg apenas para o teor de Mn com redução de 30,8% com incremento das doses de Mg, enquanto as cultivares apresentaram significância somente com os teores de S, B e Fe. A ausência de resposta da maioria dos nutrientes dentro dos níveis de Mg pode estar associada com a maior produção na dose 100 mg kg<sup>-1</sup>, que pode ser responsável pelo efeito de diluição (FAGERIA et al., 2012). Devido ao grau de mobilidade dos nutrientes na planta (MALAVOLTA, 2006) e similar ao obtido por Fageria et al. (2011 e 2012) no feijoeiro, as concentrações de macronutrientes nos grãos, na média das doses de Mg foram na seguinte ordem N>K>P>S>Mg>Ca e dos micronutrientes foram Fe>Zn>Mn>B>Cu.

**Tabela 4** – Concentração de Mg nas folhas diagnóstico (3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> trifólio a contar do ápice da planta) e dos grãos nas cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg<sup>-1</sup>) e alta (100 mg kg<sup>-1</sup>) concentração de Mg.

Cultivares	Folha diagnóstico <sup>(1)</sup>		Grãos	
	Baixo Mg	Alto Mg	Baixo Mg	Alto Mg
	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
BRS Estilo	2,5aB	5,2aA	1,8aA	1,6cA
IPR CG	1,3aB	4,3bA	1,6bA	2,1aA
BRS Ametista	1,9aB	4,1bA	1,7aA	1,5cA
IAPAR 81	2,0aB	3,6bA	1,7aA	1,8bA
IPR Tangará	1,7aB	5,9aA	1,4bA	1,2dA
Média	1,9B	4,6A	1,6A	1,6A
Teste F				
Doses (a)	12,14*		2,17 <sup>NS</sup>	
Cultivares (b)	3,43*		5,17*	
a×b	5,11*		3,62 <sup>NS</sup>	
CV%	23,41		13,24	

\*. <sup>NS</sup> Significativo e não significativo a 5% de probabilidade, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas na mesma linha dentro da mesma variável e minúsculas na mesma coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Snott-Knott. <sup>(1)</sup>terceiro e quarto trifólio a contar do ápice.

Os índices de eficiência agrônômica (EAMg), fisiológica (EFMg), recuperação (ERMg), utilização (EUMg) e índice de eficiência (IEMg) das cultivares estão apresentados na Tabela 6. Foi possível observar que IAPAR 81 foi a cultivar com maior IEMg e a IPR CG menos eficiente. Já a cultivar BRS Ametista mostrou ser a com maior EFMg com maior produção biológica (grãos) por unidade de nutriente acumulado.

Para o índice de ERMg, as cultivares mais eficientes em acumular Mg por unidade do elemento aplicado foram BRS Estilo, IPR Campos Gerais e IAPAR 81, e a cultivar com menor índice a IPR Tangará. No índice de EAMg, o efeito do aumento da concentração de Mg indicou que a IPR Tangará foi a menos responsiva ao incremento da dose de Mg, o inverso foi verificado com a BRS Estilo (Tabela 6). Semelhante ao observado com a produção de grãos (Figura 1), dependendo da cultivar, é possível selecionar qual tipo de calcário com diferentes concentrações de Mg é o mais indicado para corrigir a acidez do solo e atuam como fonte de Mg para as plantas.

**Tabela 5** – Resultados da análise foliar (3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> trifólio a contar do ápice da planta) e dos grãos (N, P, K, Ca, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa (0 mg kg<sup>-1</sup>) e alta (100 mg kg<sup>-1</sup>) concentração de Mg.

Cultivares	Teor de Mg	g kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>				
		N	P	K	Ca	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Folha											
BRS Estilo	Baixo	27,9	3,1	12,7	15,1	2,9	65,0	4,6	104,2	138,8	37,4
	Alto	33,7	3,5	10,7	15,7	2,6	47,6	4,5	94,2	154,4	32,9
IPR CG	Baixo	30,3	2,1	12,0	11,7	2,4	50,4	4,9	60,5	118,6	40,3
	Alto	41,4	3,6	14,6	12,9	2,5	47,5	4,8	93,8	115,9	37,5
BRS Ametista	Baixo	32,2	3,3	13,1	12,7	2,1	50,0	4,1	69,1	133,9	36,9
	Alto	36,4	3,2	11,8	13,3	1,8	38,5	4,8	70,5	131,7	38,4
IAPAR 81	Baixo	26,8	2,4	11,7	7,8	1,8	40,0	2,9	59,0	78,0	23,5
	Alto	29,3	2,8	11,2	9,1	1,6	37,3	3,0	61,9	96,8	21,0
IPRTangará	Baixo	30,2	2,9	12,0	13,0	2,2	50,0	4,2	92,3	122,3	36,0
	Alto	24,8	3,4	13,2	17,0	2,0	51,0	4,1	92,4	158,6	25,6
Média		31,3	3,0	12,3	12,8	2,2	47,7	4,2	79,8	124,9	33,0
Teste F											
Doses (a)		1,15 <sup>NS</sup>	3,80*	0,48 <sup>NS</sup>	13,68*	9,20*	3,91*	7,04*	5,83*	4,03*	5,59*
Cultivar (b)		1,44 <sup>NS</sup>	10,61*	0,01 <sup>NS</sup>	5,02*	3,28*	4,78*	0,29 <sup>NS</sup>	0,01 <sup>NS</sup>	1,57 <sup>NS</sup>	2,11 <sup>NS</sup>
a × b		0,79 <sup>NS</sup>	0,96 <sup>NS</sup>	0,79 <sup>NS</sup>	0,91 <sup>NS</sup>	0,26 <sup>NS</sup>	1,26 <sup>NS</sup>	0,37 <sup>NS</sup>	0,16 <sup>NS</sup>	0,48 <sup>NS</sup>	0,57 <sup>NS</sup>
CV (%)		26,71	10,71	21,27	14,37	15,51	17,36	16,47	20,46	23,13	21,17
Grãos											
BRS Estilo	Baixo	30,9	4,3	12,8	1,4	2,1	12,2	4,5	61,9	22,1	37,9
	Alto	21,4	3,9	11,5	1,2	1,8	11,8	4,1	57,2	16,4	35,2
IPR CG	Baixo	40,3	3,9	10,7	1,6	1,9	14,0	4,1	47,4	31,3	40,5
	Alto	37,5	5,0	14,8	1,4	2,0	11,1	6,2	58,7	21,5	47,6
BRS Ametista	Baixo	36,1	4,1	13,7	1,9	1,8	13,9	6,4	44,3	28,3	33,7
	Alto	28,4	3,6	9,5	1,4	1,7	12,8	4,3	40,5	18,3	36,7
IAPAR 81	Baixo	23,5	4,7	12,8	1,3	2,5	12,9	5,5	55,0	23,1	49,5
	Alto	21,0	4,1	11,3	1,7	2,0	15,0	6,4	53,4	22,1	46,0
IPRTangará	Baixo	40,0	4,1	11,4	1,5	2,4	14,8	4,2	67,2	26,8	40,6
	Alto	25,6	3,9	10,7	0,8	1,9	9,6	4,5	61,4	12,9	40,6
Média		30,5	4,2	11,9	1,4	2,0	12,8	5,0	54,7	22,3	40,8
Teste F											
Doses (a)		1,02 <sup>NS</sup>	1,18 <sup>NS</sup>	1,38 <sup>NS</sup>	1,30 <sup>NS</sup>	2,57 <sup>NS</sup>	2,07 <sup>NS</sup>	2,23 <sup>NS</sup>	0,04 <sup>NS</sup>	8,06*	2,79 <sup>NS</sup>
Cultivar (b)		2,21 <sup>NS</sup>	1,27 <sup>NS</sup>	2,05 <sup>NS</sup>	2,68 <sup>NS</sup>	6,44*	8,85*	0,13 <sup>NS</sup>	7,82*	25,62*	0,08 <sup>NS</sup>
a × b		0,78 <sup>NS</sup>	1,52 <sup>NS</sup>	0,08 <sup>NS</sup>	1,70 <sup>NS</sup>	1,08 <sup>NS</sup>	5,91*	0,87 <sup>NS</sup>	1,43 <sup>NS</sup>	1,86 <sup>NS</sup>	0,49 <sup>NS</sup>
CV (%)		11,01	12,12	8,25	30,30	13,34	10,81	22,91	13,10	19,63	18,71

\*,<sup>NS</sup> Significativo e não significativo a 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>(1)</sup>Média das duas concentrações de Mg (0 e 100 mg kg<sup>-1</sup>)

**Tabela 6** – Eficiência agronômica (EAMg), fisiológica (EFMg), recuperação (ERMg), índice de eficiência (IEMg) e utilização (EUMg) das cinco cultivares de feijoeiro cultivadas com baixa ( $0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e alta ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) concentração de Mg.

Cultivares	EAMg --- $\text{g g}^{-1}$ ---	EFMg -- $\text{mg } \mu\text{g}^{-1}$ --	ERMg --- %---	IEMg	EUMg --- $\mu\text{g g}^{-1}$ ---
BRS Estilo	128,6a	0,64b	12,9a	0,71b	0,09a
IPR CG	101,9b	0,41b	10,2a	0,51b	0,07a
BRS Ametista	53,3c	0,83a	5,3b	0,63b	0,04b
IAPAR 81	103,0b	0,56b	10,3a	0,96 <sup>a</sup>	0,07a
IPR Tangará	-38,2d	0,56b	3,8b	0,62b	-0,02c
Média	69,7	0,60	8,5	0,69	0,05
CV%	17,2	15,4	12,4	16,1	18,3

Médias seguidas por letras minúscula na mesma coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Snott-Knott.

#### 4.6 CONCLUSÕES

1. A interação Mg e cultivares de feijoeiro tem efeito significativo sobre a produção de grãos, teor foliar e nos componentes de produção.

2. A produção de MSPA e de grãos da cultivar IPR Tangará foi prejudicada pela aplicação de altas quantidades de Mg, o inverso foi verificado com a BRS Estilo, IPR CG, BRS Ametista e IAPAR 81.

3. A fotossíntese, concentração de  $\text{CO}_2$ , condutância estomática, taxa respiratória e quantidade de açúcares totais estão diretamente relacionados com o teor de Mg e a produção de grãos do feijoeiro.

4. As cultivares apresentaram respostas distintas na concentração foliar de nutrientes.

5. No feijoeiro, as concentrações de macronutrientes nos grãos, na média das doses de Mg apresentaram a seguinte ordem  $\text{N} > \text{K} > \text{P} > \text{S} > \text{Mg} > \text{Ca}$ , enquanto dos micronutrientes foram  $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Cu}$ .

#### 4.7 AGRADECIMENTOS

Ao curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina (UEL), a CAPES pela bolsa concedida e aos funcionários da Embrapa Soja pelo apoio na condução do experimento e nas análises de solo e de planta.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, S.E.; TERMAN, G.L.; CLEMENTS, L.B. **Greenhouse techniques for soil-plant fertilizer research**. Muscle Shoals: Tennessee Valley Authority. 1976. 57p.
- ALVAREZ VENEGAS, V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO A.C.; GUIMARÃES P.T.G.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1999. p.43-60.
- ANDRADE, C.A.B.; PATRONI, S.M.S.; CLEMENTE, E.; SCAPIM, C.A. Nutritional quality and yield of cultivars under different fertilization level. **Ciência e Agrotecnologia**, v.28, p.1077-1086, 2004.
- ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a produção de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.137-146, 2011.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.32, p.921-950, 2001.
- BOARO, C.S.F.; RODRIGUES, J.D.; PEDRAS, J.F.; RODRIGUES, S.D.; DELACHIAVE, M.E.A.; ONO, E.O. Produção de matéria seca de feijoeiros submetidos a diferentes níveis de magnésio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.965-970, 1997.
- BROWN, J.C. Interaction involving nutrient elements. **Annual Review of Plant Physiology**, v.14, p.93-106, 1963.
- CAKMAK, I.; KIRKBY, E.A. Role of magnesium in carbon partition and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, v.133, p.692-704, 2008.
- CAKMAK, I.; YAZICI, M. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crops**, v.94, p.23-25, 2010.
- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A., (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.901-926.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: CNPS/EMBRAPA, 1997. 212p.
- FAGERIA, N.K. **The use of nutrients in crop plants**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 430p.
- FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. v.2, p.6-16, 1998.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton: CRC Press, 2011. 560p.
- FAGERIA, N.K.; MORAIS, O.T. Avaliação de cultivares de arroz na utilização de cálcio e magnésio em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.22, p.667-672, 1987.

FAGERIA, N.K.; MOREIRA, A.; COELHO, A.M. Nutrient uptake in dry bean genotypes. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.43, p.2289-2302, 2012.

FAGERIA, N.K.; SOUZA, C.M.R. Upland rice, common bean, and cowpea response to magnesium application on an Oxisol. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.22, p.1805-1816, 1991.

FRITSCHI, F.B.; RAY, J.D. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll *a/b* ratio. **Photosynthetica**, v.425, p.92-98, 2007.

HERMANS, C.; JOHNSONS, G.N.; STRASSER, R.J.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v. 220, p.344-355, 2004.

HERMANS, C.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v.56, p.2153-2161, 2005.

HICKS, C.R. **Fundamental concepts in the design of experiments**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973. 349p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press. 2012. 651p.

MIHOPOULOS, P.G.; SAYLES, G.D.; SUIDAM, M.T.; SHAH, J.; BISHOP, D.F. Vapor phase treatment of PCE in a soil column by lab-scale anaerobic bioventing. **Water Resource**, v.34, p.3231-3237, 2000.

MINOLTA CAMERA Co. **Manual for chlorophyll meter SPAD-502**. Osaka: Minolta, Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22p.

MORAES, J.F.V. Calagem e adubação. In: ZIMMERMANN, M.J.O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Eds.). **A cultura do feijoeiro; fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p.261-301.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N.K.; GARCIA y GARCIA, A. Effect of liming on the nutritional conditions and yield of alfalfa grown in tropical conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v.34, p.1107-1119, 2011.

MURAOKA, T; NEPTUNE, A.M.L; NASCIMENTO FILHO, V.F. Avaliação da disponibilidade de zinco e de manganês do solo para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.167-175, 1983.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo: Editora Nobel. 2009. 470p.

PONNAMPERUMA, F.N. Screening rice for tolerance to mineral stresses. In: WRIGHT, M.J. (Ed.). **Plant adaptation to mineral stress in problem soils**. Ithaca: Cornell University Agricultural Experiment Station, 1976. p.341-353.

ROSOLEM, C.A.; MACHADO, J.R.; MAIA, I.G.; NAKAGAWA, J. Respostas da soja ao magnésio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.16, p.47-54, 1992.

SACRAMENTO, L.V.S.; MARTINEZ, H.E.P.; MONNERAT, P.H.; OLIVEIRA, L.M. Absorção de magnésio por raízes destacadas de cultivares de tomateiro. **Scientia Agricola**, v.56, p.509-515, 1999.

YEMM, E.W.; WILLIS, A.J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v.57, p.508-514, 1954.

## 5 ARTIGO C - CÁTIONS HIDROSSOLÚVEIS NA MATÉRIA SECA DO FEIJOEIRO E BALANÇO DE IONS NO SOLO EM RESPOSTA A APLICAÇÃO DE MAGNÉSIO

### 5.1 RESUMO

O aumento do conteúdo de magnésio (Mg) na planta pode diminuir por efeito de inibição interiônica com a concentração de outros cátions hidrossolúveis que encontram associados, principalmente, a ânions orgânicos de baixo peso molecular. No entanto, não se sabe se os teores desses compostos nos resíduos das culturas são modificados pelo aumento da aplicação de Mg no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de Mg sobre os teores de cátions solúveis ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  e  $Zn^{2+}$ ) nos resíduos vegetais do feijoeiro. O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação com Neossolo Quartzarênico em delineamento inteiramente casualizados disposto em esquema fatorial  $4 \times 5$ , com três repetições. Os tratamentos foram constituídos de quatro doses de Mg (0, 50, 100 e 200  $mg\ kg^{-1}$ , fonte  $MgCl_2$ ) e cinco cultivares de feijoeiro do grupo carioca (BRS Estilo, BRS Ametista, IPR Campos Gerais, IPR Tangará e IAPAR 81). As doses de Mg influenciaram os teores de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  hidrossolúvel nos extratos de resíduo do feijoeiro. O  $Mg^{2+}$  solúvel apresentou correlação significativa com o teor foliar de Mg. As cultivares de feijoeiro apresentaram respostas distintas no balanço de íons da capacidade de troca de cátions (CTC) e nas relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo.

**Palavras-chave:** Componentes de produção. Estado nutricional. *Phaseolus vulgaris*. Produção.

### 5.2 ABSTRACT

#### WATER-SOLUBLE CATIONS IN DRY WEIGHT YIELD ON COMMON BEAN AND BALANCE OF IONS IN SOIL IN RESPONSE TO MAGNESIUM APPLICATION

The increase in the magnesium (Mg) content in plants may decrease the effect of interionic inhibiting with the concentration of other water-soluble cations that are associated mainly to low-weight organic anions molecular. However, it is known not to the levels of these compounds in crop residues are modified the increased of Mg application in the soil. The objective of this study was to evaluate the effects of application of the levels of Mg soluble cations ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , and  $Zn^{2+}$ ) in the common bean residues. The experiment was conducted in a greenhouse conditions with an Typic Quartzipsamment. A completely randomized design in a  $4 \times 5$  factorial scheme and three replicates was used. The treatments consisted of four Mg rates (0, 50, 100, and 200  $mg\ kg^{-1}$ , source  $MgCl_2$ ) and five common bean cultivars - Carioca Group (BRS Estilo, BRS Ametista, IPR Campos Gerais, IPR Tangará, and IAPAR 81). The Mg concentrations influenced the  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  and  $Mn^{2+}$  in water-soluble content in common bean residue. The soluble  $Mg^{2+}$  showed significant correlation with Mg contenting leaf. The cultivars showed different responses in the balance of ions from the cation exchange capacity (CEC) and the Ca/Mg, Ca/K, and K/K affinity in soil.

**Keywords:** Nutritional status. *Phaseolus vulgaris*. Production. Yields components.

### 5.3 INTRODUÇÃO

No Brasil, o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é um componente importante na rotação de culturas, sendo plantado, preferencialmente, como cultura principal de primeira safra ou em sucessão à soja (*Glycine max* L.) ou ao milho (*Zea mays* L.) em locais onde o inverno apresenta baixas temperaturas ou irrigado no inverno com períodos de estresses hídricos nas regiões de cerrado. Na safra brasileira de 2012/2013 foi produzido, aproximadamente, 2,8 milhões de toneladas de grãos por ano em área cultivada de 3,1 milhões de hectares, o que corresponde a uma produtividade média de 903 kg ha<sup>-1</sup> de feijão (CONAB, 2013).

Dos nutrientes usados no plantio ou em cobertura, pequena parte é exportada por meio dos grãos, o restante retorna ao solo na forma de resíduos vegetais (FAGERIA et al., 2012). Em sistemas de plantio direto (SPD), onde ocorre maior acúmulo desses materiais e menor revolvimento do solo, há redução da ação de microrganismos decompositores, que por sua vez, em condições hídricas adequadas liberam cátions hidrossolúveis, que são predominantemente constituídos de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como cítrico e málico, nos quais dentro da planta atuam na manutenção da eletronegatividade química ligando aos cátions básicos (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup>). Estes materiais liberam cátions hidrossolúveis que apresentam capacidade de elevação do índice pH e, conseqüente neutralização dos íons H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> trocáveis do solo (MIYAZAWA et al., 1993; SORATTO; CRUSCIOL, 2007).

Dos cátions disponibilizados, devido à maior quantidade aplicada, os mais abundantes são o Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>, sendo que este último apresenta alta solubilidade do devido à formação de ligações de fácil reversibilidade (SILVA; LEMOS, 2008). No entanto, dependendo do tipo de solo e da intensidade de chuvas no período, pode também apresentar mobilidade no perfil do solo (ROSOLEM, et al., 2006; NEVES et al., 2009), acarretando em menor influência sobre possíveis reações químicas na camada superficial do solo (SORATTO; CRUSCIOL, 2007).

Na adubação, o Mg é aplicado preferencialmente na forma de MgCO<sub>3</sub> como componente de corretivos da acidez do solo, sendo sua concentração muito variável. No caso do uso do calcário calcítico, a sua composição apresenta teor inferior a 5% MgO (ALVAREZ VENEGAS; RIBEIRO, 1999), o que pode acarretar em deficiência nutricional, o que é agravado pelos efeitos interiônicos, como o antagonismo e as inibições competitiva e não competitiva entre os nutrientes pelos mesmos canais de absorção (YEO, 2007;

MARSCHNER, 2012) e o esgotamento do Mg no solo com a exportação do feijoeiro pelos grãos de 36% do nutriente aplicado (BARBOSA FILHO; SILVA, 2000).

Como o  $Mg^{2+}$  apresenta grande mobilidade nos vasos condutores de seiva, o que o torna facilmente translocado e remobilizado dentro das plantas (MALAVOLTA, 2006; EPSTEIN; BLOOM, 2005), o aumento do teor deste elemento na planta pode alterar a presença de outros cátions hidrossolúveis e a atividades destes com os ácidos orgânicos, com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de Mg sobre as concentrações de cátions hidrossolúveis no resíduo vegetal e o balanço e as relações de cátions trocáveis do solo cultivados com cinco cultivares de feijoeiro.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 Local e Característica do Solo

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação da Embrapa Soja, localizada no Município de Londrina, Estado do Paraná, sob as coordenadas geográficas de 23°11'39" LS e 51°10'40" LW. Utilizou-se um Neossolo Quartzarênico distrófico, de textura arenosa (86 g kg<sup>-1</sup> de argila e 870 g kg<sup>-1</sup> de areia), coletado no Município de Três Lagoas, Estado do Mato Grosso do Sul (20°45'04" LS e 51°40'42" LW) <http://pt.wikipedia.org/wiki/Oeste>, na profundidade de 0-20 cm, com os seguintes atributos químicos: pH (CaCl<sub>2</sub> 0,1 mol L<sup>-1</sup>) = 4,4, matéria orgânica do solo (MOS) = 12,3 g kg<sup>-1</sup>, fósforo -P (extrator Mehlich 1) = 3,0 mg kg<sup>-1</sup>, P (extrator resina) = 5,0 mg kg<sup>-1</sup>, potássio -K (resina) = 0,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, cálcio - Ca (resina) = 0,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, magnésio - Mg (resina) = 0,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, alumínio - Al (KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>) = 0,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, acidez potencial -H+Al = 3,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, enxofre - S-SO<sub>4</sub><sup>-</sup> = 6,0 mg kg<sup>-1</sup>, capacidade de troca de cátions - CTC = 3,6 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, saturação por bases - V = 6,0%, B (água quente) = 0,18 mg kg<sup>-1</sup>, cobre - Cu (Mehlich 1) = 0,5 mg kg<sup>-1</sup>, ferro - Fe (Mehlich 1) = 73,0 mg kg<sup>-1</sup>, manganês - Mn (Mehlich 1) = 18,4 mg kg<sup>-1</sup> e zinco - Zn (Mehlich 1) = 0,4 mg kg<sup>-1</sup>, cujos métodos de análise estão descritos em Embrapa (1997).

### 5.4.2 Delineamento Estatístico, Adubação e Coleta das Plantas

Empregou-se o delineamento experimental fatorial inteiramente casualizado em esquema 4×5, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos de quatro doses de

Mg (0, 50, 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>, fonte MgCl<sub>2</sub>) e cinco cultivares de feijoeiro do grupo carioca [BRS Estilo, BRS Ametista, IPR Campos Gerais (CG), IPR Tangará e IAPAR 81].

Foram colocados 3,0 dm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar (TFSA) passada em peneira de malha de 2,0 mm em vasos de barro. Dois meses antes do plantio a acidez foi corrigida com carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) para elevar a saturação por bases a 70%. Exceto o Mg, as adubações com N, P, K, S, B, Co, Cu, Fe, Mo, Mn, Ni e Zn foram feitas de acordo Moreira et al. (2011), adaptada de Allen et al. (1976) para experimentos conduzidos em condições de casa de vegetação [100 mg kg<sup>-1</sup> de N–CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O (ureia), 50 mg kg<sup>-1</sup> de (K)–KCl; 100 mg kg<sup>-1</sup> de (P)–fosfato monoamônio (MAP), 0,5 mg kg<sup>-1</sup> de (B)–H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; 1,5 mg kg<sup>-1</sup> de (Cu)–uSO<sub>4</sub>×7H<sub>2</sub>O; 0,1 mg kg<sup>-1</sup> de molibdênio (Mo)–Na<sub>2</sub>Mo<sub>4</sub>×2H<sub>2</sub>O; 2,5 mg kg<sup>-1</sup> de (Fe)–FeSO<sub>4</sub>×2H<sub>2</sub>O; 0,01 mg kg<sup>-1</sup> de cobalto (Co)–CoCl<sub>2</sub>; 0,01 mg kg<sup>-1</sup> de níquel (Ni)–NiSO<sub>4</sub>×6H<sub>2</sub>O; 5,0 mg kg<sup>-1</sup> de (Mn)–MnSO<sub>4</sub>×3H<sub>2</sub>O, (Zn)–ZnSO<sub>4</sub>×6H<sub>2</sub>O e 50 mg kg<sup>-1</sup> de (S)–K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]. Trinta dias após o plantio, também foi feita uma adubação por cobertura com 100 mg kg<sup>-1</sup> de (K)–K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 50 mg kg<sup>-1</sup> de (N)–[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>].

Os vasos foram irrigados diariamente com água desionizada para compensar as perdas por evapotranspiração e para manter o solo próximo de 70% do valor total de poros (CASSEL; NIELSEN, 1986). Dez sementes escarificadas foram semeadas por vaso e após o desbaste foram deixadas três plantas uniformes.

#### 5.4.3 Colheita e Análises Laboratoriais

No início do florescimento (estádio R1, FAGERIA et al. 2011) foram coletados o terceiro e quarto trifólio a contar do ápice (MALAVOLTA, 1992) e colocadas em estufa de circulação forçada a 65±2 °C. Em todos os vasos também foram coletadas diariamente as folhas senescentes, as quais foram pesadas juntamente com o colmo para obtenção da produção de matéria seca total – MST. No final do ciclo as vagens e os grãos também foram secos e pesados. As folhas e os grãos foram moídos para realização dos extratos para determinação dos teores totais de Mg (MALAVOLTA et al., 1997).

Para a determinação dos teores de cátions hidrossolúveis (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup>) das culturas anuais, foram coletadas amostras da MST e colocadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65±2 °C por 72 horas, sendo em seguida moídas em moinho tipo Willey. Para extração dos compostos hidrossolúveis, 1,0 grama do resíduo foi transferido para frascos de 100 mL, em seguida, adicionados 50 mL de água destilada, agitando-se por 240 minutos a uma velocidade de 11,2 g, com posterior

filtragem em papel-filtro qualitativo de filtragem rápida (SORATO & CRUSCIOL, 2007). De posse dos extratos vegetais, o mesmo foi guardado em geladeira a 4 °C. Posteriormente foi realizada a leitura dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Os resultados foram expressos em  $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$  de forma individual para cada elemento e também quantificado pela soma dos cátions analisados ( $\sum \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Mn}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ ).

No final do ciclo foram retiradas amostras de solo de cada vaso para determinação dos teores trocáveis de K, Ca, H+Al, Al, e Mg (EMBRAPA, 1997) e feita a quantificação das saturações por Ca  $[(\text{Ca}/\text{CTC}) \times 100]$ , Mg  $[(\text{Mg}/\text{CTC}) \times 100]$  e K  $[(\text{K}/\text{CTC}) \times 100]$  na CTC e determinadas as relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K trocáveis no solo.

#### 5.4.4 Análise Estatística

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade descrito em Hicks (1973), e, posteriormente, foram realizadas a análise de variância (ANOVA), teste F e regressão e correlação a 5% de probabilidade (PIMENTEL GOMES, 2009).

### 5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de Mg acarretou em aumento significativo nos teores hidrossolúveis de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , por outro lado, houve redução nos de  $\text{Cu}^{2+}$ , enquanto os teores de  $\text{K}^+$  e  $\text{Zn}^{2+}$  da matéria seca da parte aérea (MSPA) não foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 1 e Figura 1a). Os maiores teores de  $\text{Mg}^{2+}$  solúvel da MSPA nas cinco cultivares com o incremento das doses de Mg (Figura 1a) ocorreu devido à maior disponibilidade proporcional do elemento no solo e da grande mobilidade do mesmo na planta (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012).

Com relação aos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  solúveis na MSPA, os efeitos significativos ocasionados pelas doses de Mg podem estar associados ao incremento destas com a maior produção de matéria seca (MS) e a alta disponibilidade destes três elementos no solo, o que acarretou em maior quantidade dos elementos por volume de planta (MSPA), e, por conseguinte, de cátions hidrossolúveis. Na planta, estes cátions básicos estão associados a ácidos orgânicos de baixo peso molecular que atuam justamente na manutenção da eletro neutralidade química, o que também pode ser verificado com os ânions inorgânicos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$

,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^-$ ) no tecido vegetal, que atuam da mesma forma dos orgânicos, no entanto, apresentam teores poucos significativos (MIYAZAWA et al., 2000).

No caso do  $\text{Cu}^{2+}$  solúvel na MSPA, a diminuição nos teores pode ser devido à elevação da saturação por bases do solo a 70% com  $\text{CaCO}_3$ , e com sua posterior dissolução, elevou o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  disponível no solo, o que acarretou num antagonismo com o  $\text{Cu}^{2+}$  pelo mesmo sítio de absorção (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2009). Efeitos semelhantes de inibição também podem ser reportados aos íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Zn}^{2+}$ , visto que, no primeiro caso, é de conhecimento a presença de interação negativa entre o  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , neste caso, a não significância se deve, possivelmente, a aplicação em cobertura com  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , no qual deve ter minimizado os efeitos deletérios no processo de assimilação deste nutriente pelas plantas, que também foi verificado por Soratto e Crusciol (2007) com diferentes culturas anuais. Para o  $\text{Zn}^{2+}$ , mesmo havendo efeito de inibição com o Mg (MOREIRA et al., 2003), a quantidade aplicada do nutriente no solo no plantio, aparentemente, foi suficiente para minimizar este efeito.

Exceto o  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ , os teores dos cátions de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  e a SC hidrossolúveis apresentaram diferenças entre as cultivares de feijoeiro (Tabela 1 e Figura 1a). Na média, acompanhando os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  dissolvidos no extrato, a cultivar BRS Estilo também teve os maiores valores de SC, enquanto a IPR Tangará os menores (Tabela 1). A SC solúveis está diretamente relacionada à quantidade de ácidos orgânicos existentes na planta, portanto, os valores obtidos com essa variável podem ser utilizados como indicativo dos efeitos dos resíduos vegetais na química da solução do solo (MIYAZAWA et al., 2000; SILVA; LEMOS, 2008). Das doses de Mg aplicada, independente da cultivar, somente com 200  $\text{mg kg}^{-1}$  de Mg os teores foram semelhantes aos obtidos por Silva e Lemos (2008) com cinco cultivares de feijoeiro.

Com relação ao  $\text{Mg}^{2+}$ , na maior dose aplicada a cultivar IPR CG disponibilizou as maiores quantidades do elemento no extrato, o inverso foi observado na BRS Estilo (Figura 1a). Os maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  extraídos é um fator relevante no manejo do resíduo das culturas, visto o potencial destes íons como corretivo da acidez na camada superficial do solo (CASSIOLATO et al., 2000 e 2002). Além disso, outro fator verificado foi a interação significativa da SC entre as cultivares e as doses de Mg aplicada (Tabela 1), indicando a presença de respostas distintas das cultivares na absorção dos nutrientes (BALIGAR, et al., 2001; FAGERIA et al., 2012).

No caso das diferenças de comportamento entre as cultivares (Tabela 1 e Figuras 1a e 1b), os resultados corroboram Cassiolato et al. (2000) e Soratto e Crusciol

(2007), os quais também observaram respostas diferentes entre e dentro de uma mesma espécie na disponibilização de cátions hidrossolúveis nos extratos. Tal resultado é também um potencial indicativo da capacidade na seleção de cultivares com boa produtividade e que apresente uma palhada capaz de disponibilizar junto com os compostos orgânicos quantidades relevantes de cátions hidrossolúveis, como o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e, por conseguinte, imobilizando o  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$  disponíveis na solução do solo (CASSIONATO et al., 2000; MIYAZAWA et al., 2000). Na comparação entre as cultivares, a maior SC hidrossolúveis (Tabela 1) foi verificada na cultivar BRS Estilo, tendo sido na média das doses de Mg, 50,6% superior a IPR Tangará, enquanto as cultivares IAPAR 81, IPR CG e BRS Ametista apresentaram valores intermediários (Tabela 1).

No geral, os teores solúveis de  $\text{K}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  no feijoeiro (Tabela 1) foram inferiores aos verificados por Soratto e Crusciol (2007) e Castro et al. (2012) com feijoeiro, o inverso ocorreu com os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  na solução (Tabela 1 e Figura 1a), enquanto os de  $\text{Ca}^{2+}$  foram similares aos obtidos pelos mesmos autores. Com isso, os efeitos verificados na absorção dos cátions  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  disponíveis no solo (HAVLIN et al., 1998, MENGEL; KIRKBY, 2001) pode ter sido prejudicada devido às altas quantidades de  $\text{CaCO}_3$  usadas para a correção da acidez e também, devido ao incremento das doses de Mg aplicadas no solo.

O  $\text{Mg}^{2+}$  hidrossolúvel da MSPA teve correlação altamente significativa com o Mg disponível no solo e com o teor total do nutriente nas folhas e nos grãos (Figuras 2a, 2b e 3a), indicando o potencial do uso indireto desses valores na determinação dos teores hidrossolúveis de Mg no feijoeiro. No caso da correlação com o teor foliar (Figura 2b), os resultados positivos verificados concordam com Heinrichs e Malavolta (2001), ao relatarem a presença de alta mobilidade do  $\text{Mg}^{2+}$ , com extração em água de quantidades substanciais de elemento ( $188 \text{ mg L}^{-1}$ ) em amostras foliares de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil), tendo sido este valor inferior apenas ao do  $\text{K}^+$  ( $683 \text{ mg L}^{-1}$ ). Outra vantagem deste método, mesmo tendo apresentado um coeficiente inferior ao do teor foliar com as doses de Mg (Figura 3b), a extração de  $\text{Mg}^{2+}$  hidrossolúvel sem digestão nítrico-perclórica também se mostra eficiente pela sua simplicidade e seu elevado grau de solubilização.

**Tabela 1** – Teores de cátions hidrossolúveis no extrato vegetal de cinco cultivares de feijoeiro.

Cultivares	Doses	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	SC <sup>(3)</sup>
		----- mmolc kg <sup>-1</sup> -----						
IPR Tangará	0	25,82	157,83	0,11	0,17	1,18	0,47	216,42
	50	31,62	164,67	0,11	0,26	1,74	0,46	363,30
	100	33,38	282,50	0,10	0,22	1,93	0,45	615,80
	200	35,26	452,00	0,09	0,25	3,36	0,41	1045,53
Média <sup>1</sup>		31,52	264,25	0,10	0,23	2,05	0,45	571,51
Teste F		1,32 <sup>NS</sup>	8,03*	1,53 <sup>NS</sup>	1,63 <sup>NS</sup>	2,20 <sup>NS</sup>	0,15 <sup>NS</sup>	26,41*
IAPAR 81	0	31,49	185,67	0,10	0,13	1,61	0,43	341,65
	50	30,78	249,83	0,10	0,20	2,38	0,61	506,12
	100	32,31	341,33	0,10	0,08	2,50	0,50	716,28
	200	34,54	465,00	0,08	0,08	3,08	0,41	1038,47
Média <sup>1</sup>		32,90	301,50	0,10	0,18	2,42	0,50	648,08
Teste F		0,21 <sup>NS</sup>	6,23*	0,99 <sup>NS</sup>	3,58*	0,95 <sup>NS</sup>	1,66 <sup>NS</sup>	33,24*
IPR CG	0	28,72	208,17	0,10	0,15	1,46	0,43	348,47
	50	31,92	226,33	0,09	0,21	3,36	0,57	512,21
	100	37,03	461,00	0,08	0,16	3,26	0,34	932,14
	200	38,85	539,67	0,09	0,27	3,42	0,54	1248,48
Média <sup>1</sup>		31,47	309,50	0,09	0,20	2,14	0,45	642,59
Teste F		1,72 <sup>NS</sup>	11,78*	1,16 <sup>NS</sup>	3,32*	2,27 <sup>NS</sup>	2,39 <sup>NS</sup>	33,41*
BRS Estilo	0	33,11	141,50	0,09	0,17	1,15	0,36	319,43
	50	30,77	212,83	0,07	0,20	1,61	0,35	464,73
	100	32,71	218,50	0,06	0,15	1,86	0,28	534,41
	200	39,32	433,83	0,07	0,16	3,23	0,34	989,18
Média <sup>1</sup>		34,13	358,79	0,09	0,20	2,87	0,47	760,93
Teste F		1,09 <sup>NS</sup>	6,77*	1,05 <sup>NS</sup>	0,43 <sup>NS</sup>	2,04 <sup>NS</sup>	0,22 <sup>NS</sup>	35,87*
BRS Ametista	0	37,14	335,17	0,11	0,17	2,45	0,35	577,62
	50	31,38	206,83	0,09	0,16	1,85	0,40	439,05
	100	32,41	446,33	0,09	0,16	3,41	0,37	897,49
	200	34,45	444,83	0,08	0,19	4,46	0,40	1058,03
Média <sup>1</sup>		34,60	296,67	0,08	0,20	2,10	0,38	671,12
Teste F		0,51 <sup>NS</sup>	5,47*	2,79*	0,27 <sup>NS</sup>	3,33*	0,11 <sup>NS</sup>	23,17*
Média <sup>2</sup>		33,15	308,69	0,09	0,18	2,47	0,42	658,73
Teste de F								
Cultivar (a)		0,44 <sup>NS</sup>	4,32*	6,26*	6,12*	2,37 <sup>NS</sup>	3,50 <sup>NS</sup>	10,45*
Doses (b)		2,42 <sup>NS</sup>	33,01*	3,71*	3,29*	8,48*	1,56 <sup>NS</sup>	41,21*
a × b		0,61 <sup>NS</sup>	1,32 <sup>NS</sup>	0,95 <sup>NS</sup>	1,48 <sup>NS</sup>	0,58 <sup>NS</sup>	0,74 <sup>NS</sup>	3,38*
CV%		18,54	27,25	16,22	29,90	14,02	28,28	33,41

<sup>(1)</sup>Média de cada cultivar; <sup>(2)</sup>Média geral; <sup>(3)</sup>SB = soma de cátions incluindo o Mg, \*significativo a 5%, <sup>NS</sup>não significativo.

De modo geral, com relação ao solo, o balanço de íons na CTC (Tabela 2) mostrou, que, exceto para o Mg, a porcentagem da saturação de Ca e K ficaram, na média, bem abaixo de 65 a 85% e 2 a 5% indicados como adequados para que as plantas expressem

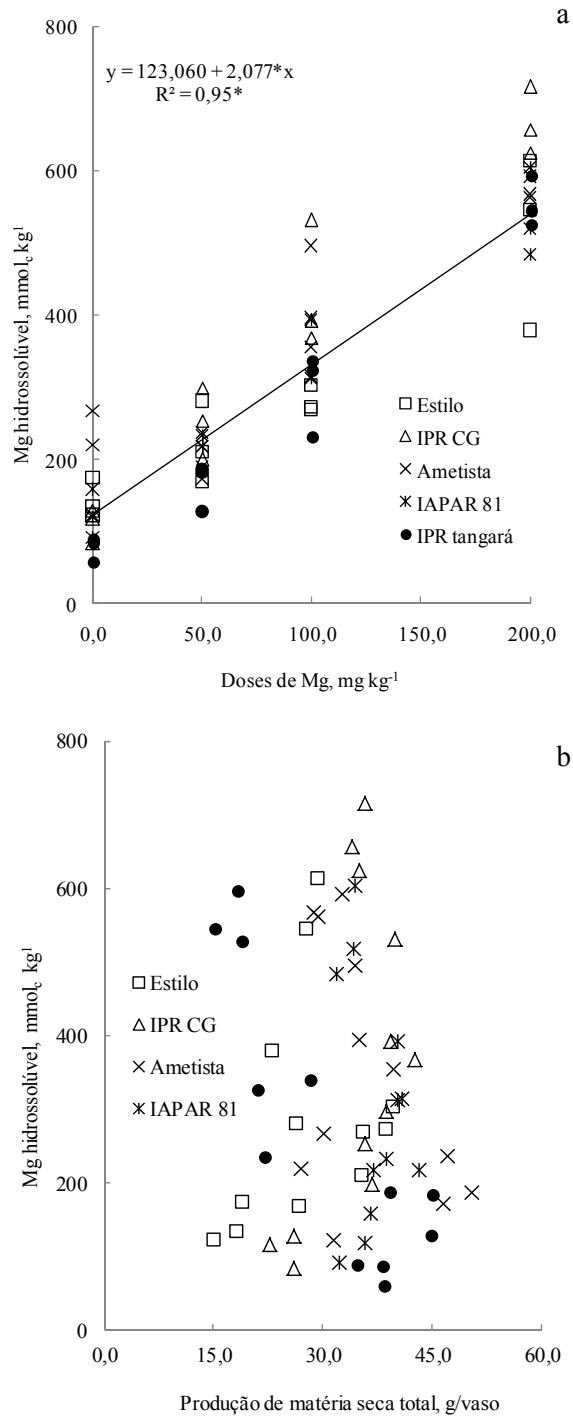
todo o seu potencial produtivo (ECKERT, 1987). Para o Mg, os valores ficaram próximo de 10 a 20% somente a partir da dose 100 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 2).

Na comparação das cultivares, houve efeito significativo dos tratamentos sobre as saturações de Ca e Mg, enquanto nas doses, apenas o Mg foi significativamente alterado, sendo que em nenhum dos casos estudados houve interação cultivar × dose. Fatores como, amostragem do solo no final do ciclo da cultura, quantidade elevada do nutriente absorvida e tipo de solo utilizado com alto teor de areia e baixo teor de MO podem ter influenciado estes resultados.

As relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo são apresentados na Tabela 2, A cultivar IPR Tangará apresentou, na média dos tratamentos, as maiores relações de Ca/K (16,46) e Mg/K (8,03) e a BRS Ametista de Ca/Mg (3,90), enquanto a IAPAR 81 teve as menores relações Ca/Mg (2,56) e Ca/K (12,30) e a IPR CG a de Mg/K (6,33). Destas relações, somente a do Mg/K apresentou interação significativa entre cultivares × doses, o que demonstra novamente as diferenças varietais existentes entre as cultivares na disponibilização, absorção e remobilização dos nutrientes nas plantas (FAGERIA et al., 2012).

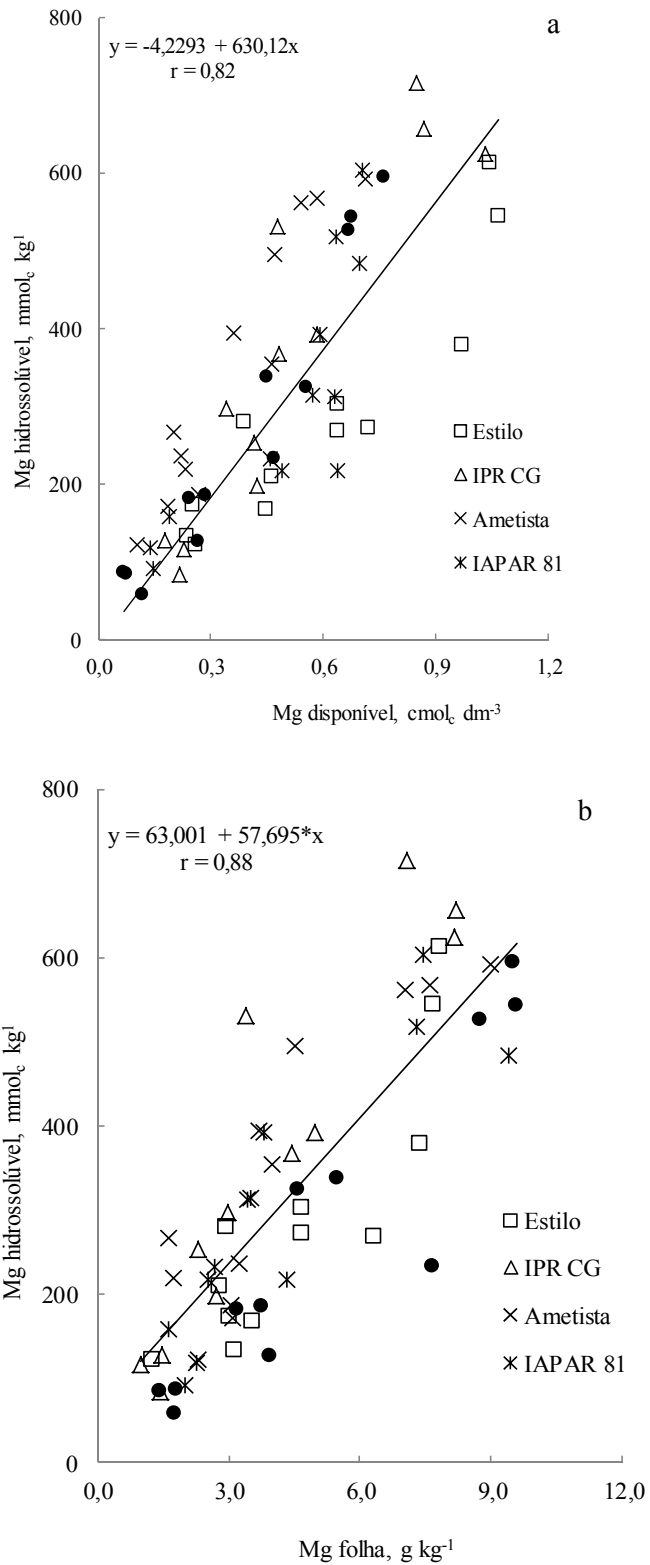
Historicamente, o estabelecimento das relações Ca:Mg, Ca:K e Mg:K ideais seriam de 6,5:1, 13:1 e 2:1, respectivamente (BEAR & TOTH, 1948). Mesmo com essas relações estabelecidas para as plantas há bastante tempo, não está claro a partir de que proporção destes elementos na CTC começa acarretar problemas no desenvolvimento do feijoeiro, principalmente, se forem consideradas as variações genéticas existentes dentro de cada planta (BALIGAR et al., 2001) em resposta à disponibilidade de cátions básicos, especialmente, nas condições de solos ácidos.

**Figura 1** – Relação entre as doses de Mg (a) e a produção de matéria seca total (b) com o Mg hidrossolúvel da MSPA das cinco cultivares de feijoeiro.



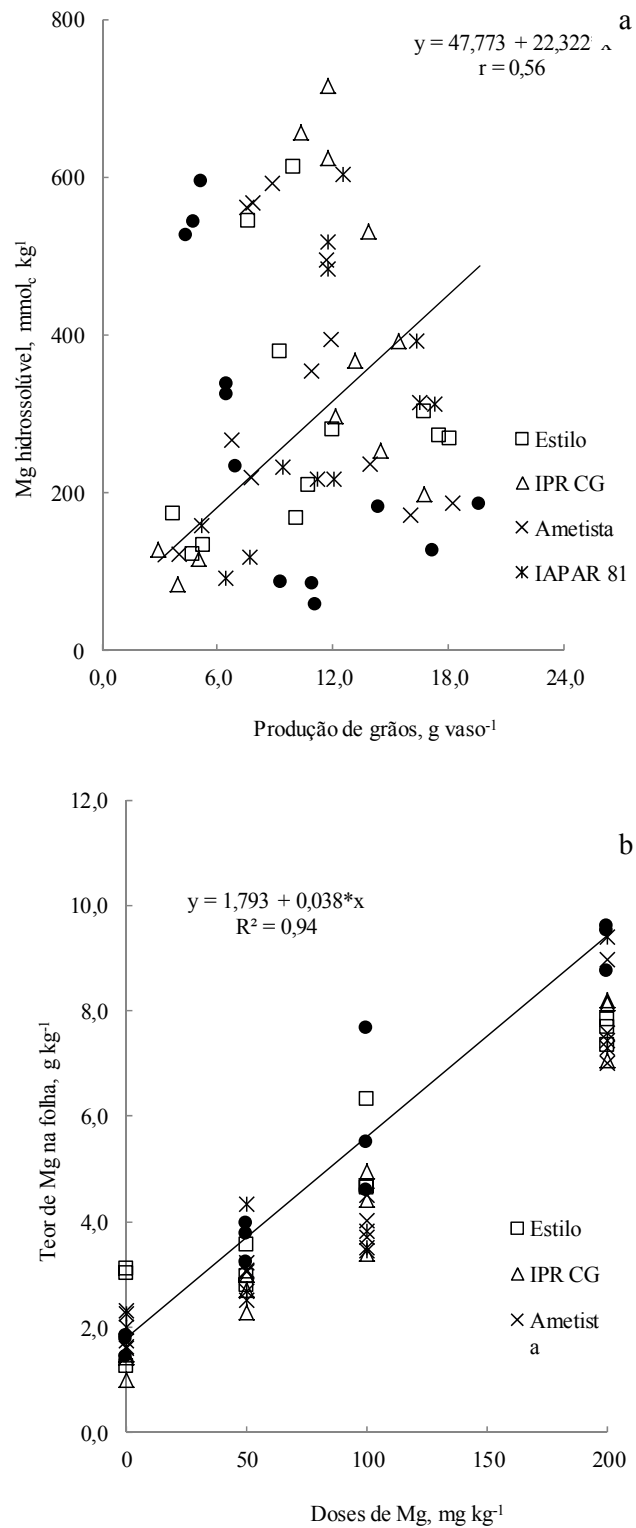
\*significativo a 5% pelo teste F.

**Figura 2** – Relação entre o Mg disponível no solo (a) e na folha (b) com o Mg hidrossolúvel da MSPA das cinco cultivares de feijoeiro.



\*significativo a 5% pelo teste F.

**Figura 3** – Relação entre o teor de Mg na folha e as doses de Mg e a produção de grãos (g/vaso) com Mg hidrossolúvel MSPA das cinco cultivares de feijoeiro.



\*significativo a 5% pelo teste F.

**Tabela 2** – Saturação de Ca, Mg e K na CTC e relação Ca/Mg, Ca/K e Mg/K no solo sob cinco cultivares de feijoeiro.

Cultivares	Doses	Sat. Ca	Sat. Mg	Sat. K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
		----- % -----					
IPR Tangará	0	23,01	4,67	1,30	4,91	17,85	3,67
	50	23,01	8,29	1,62	2,79	14,91	5,28
	100	23,41	12,40	1,77	1,89	14,67	7,67
	200	22,90	18,84	1,28	1,22	18,41	15,50
Média <sup>1</sup>		23,08	11,05	1,49	2,70	16,46	8,03
Teste F		2,14 <sup>NS</sup>	8,47*	3,18*	7,14*	1,07 <sup>NS</sup>	12,49*
IAPAR 81	0	17,01	3,93	1,57	4,36	12,65	2,99
	50	17,83	7,61	1,41	2,35	12,97	5,48
	100	23,38	9,87	1,78	2,34	12,73	5,69
	200	21,19	18,02	1,98	1,17	10,84	9,36
Média <sup>1</sup>		19,85	9,86	1,69	2,56	12,30	5,88
Teste F		2,94*	21,19*	2,99*	7,12*	2,21 <sup>NS</sup>	10,42*
IPR CG	0	19,72	3,26	1,32	6,53	15,06	2,47
	50	16,54	4,76	1,11	3,52	15,22	4,37
	100	18,21	9,69	1,64	1,89	13,66	7,46
	200	17,21	12,80	1,18	1,36	15,22	11,01
Média <sup>1</sup>		17,92	7,63	1,31	3,33	14,79	6,33
Teste F		0,97 <sup>NS</sup>	9,48*	2,02 <sup>NS</sup>	12,31*	0,74 <sup>NS</sup>	13,14*
BRS Estilo	0	20,71	3,24	1,43	6,38	14,60	2,28
	50	18,57	9,90	1,49	1,89	13,73	7,00
	100	16,94	11,36	1,02	1,49	16,50	11,11
	200	16,79	13,58	1,48	1,24	11,32	9,19
Média <sup>1</sup>		18,25	9,52	1,36	2,75	14,04	7,40
Teste F		5,12*	17,89*	2,13 <sup>NS</sup>	7,52*	0,95 <sup>NS</sup>	8,88*
BRS Ametista	0	13,71	1,64	1,11	9,26	13,20	1,47
	50	18,46	5,99	0,85	3,09	22,48	7,17
	100	17,50	9,03	1,32	1,94	13,41	6,91
	200	17,70	13,66	1,07	1,30	16,59	12,80
Média <sup>1</sup>		16,84	7,58	1,09	3,90	16,42	7,09
Teste F		3,21*	10,44*	0,32 <sup>NS</sup>	15,44*	0,07 <sup>NS</sup>	18,54*
Média <sup>2</sup>		19,19	9,13	1,37	3,05	14,80	6,95
Teste de F							
Cultivar (a)		2,14 <sup>NS</sup>	4,67*	4,18*	2,97 <sup>NS</sup>	0,89 <sup>NS</sup>	3,12*
Doses (b)		3,52 <sup>NS</sup>	15,17*	1,22 <sup>NS</sup>	9,07*	1,11 <sup>NS</sup>	14,85*
a × b		2,33 <sup>NS</sup>	3,17 <sup>NS</sup>	0,89 <sup>NS</sup>	2,43 <sup>NS</sup>	0,05 <sup>NS</sup>	8,82*
CV%		13,17	16,12	9,41	17,85	21,44	19,16

<sup>(1)</sup>Média de cada cultivar; <sup>(2)</sup>Média geral; <sup>(3)</sup>SB = soma de cátions incluindo o Mg, \*significativo a 5%, <sup>NS</sup> não significativo.

## 5.6 CONCLUSÕES

1. O conteúdo de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  hidrossolúveis na matéria seca da parte aérea (MPSA) foram influenciados pelas doses de Mg.
2. As cultivares apresentaram características distintas à disponibilização de cátions solúveis para imobilização de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$  trocáveis do solo.
3. A porcentagem da saturação de Ca e K ficaram, na média, bem abaixo de 65 a 85% e 2 a 5% indicados como adequados.
4. As relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K estão diretamente relacionadas a eficiência de uso de nutrientes de cada cultivar.
5. O teor de Mg hidrossolúvel apresentou correlação significativa com o teor de Mg total extraído com ácido nítrico-perclórico.

## 3.7 AGRADECIMENTOS

A CAPES pela bolsa de Mestrado, a Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela oportunidade oferecida e à Embrapa Soja pelo apoio logístico para realização dos experimentos e análises laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, S.E.; TERMAN, G.L.; CLEMENTS, L.B. **Greenhouse techniques for soil-plant fertilizer research**. Muscle Shoals: Tennessee Valley Authority. 1976. 57p.

ALVAREZ VENEGAS, V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO A.C.; GUIMARÃES P.T.G.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1999. p.43-60.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, v.32, p.921-950, 2001.

BARBOSA FILHO, M.P.; SILVA, O.F. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1317-1324, 2000.

BEAR, F.E.; TOTH, S.J. Influence of Ca on availability of other soil cations. **Soil Science**, v.65, p.69-75, 1948.

- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In. KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p.901-926.
- CASSIOLATO, M.E.; MEDA, A.R.; PAVAN, M.A., MIYAZAWA, M.; OLIVEIRA, J.C. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.43, p.533-536, 2000.
- CASSIOLATO, M.E.; MIYAZAWA, M.; MEDA, A.R.; PAVAN, M.A. A Laboratory Method to estimate the efficiency of plant extract to neutralize soil acidity. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.45, p.183-187, 2002.
- CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; MENEGALE, M.L.C. Ciclagem e silicatagem superficiais e a disponibilidade de cátions hidrossolúveis em culturas anuais e braquiária. **Revista Ciências Agronômicas**, v.43, p.740-748, 2012.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira; grãos – safra 2012-2013**. Brasília: CONAB, 2013. 28p.
- ECKERT, D.J. Soil test interpretation: basic cation saturation ratios and sufficiency levels. In: BROWN, J.R. (Ed.). **Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation**. Madison: Soil Science Society of America. 1987. p.53-64.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: CNPS/EMBRAPA, 1997. 212p.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants; principles and perspectives**. London: Sinauer, 2005. 380p.
- FAGERIA, N.K. **The use of nutrients in crop plants**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 430p.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton: CRC Press, 2011. 560p.
- FAGERIA, N.K.; MOREIRA, A.; COELHO, A.M. Nutrient uptake in dry bean genotypes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.43, p.2289-2302, 2012.
- FRITSCHI, F.B.; RAY, J.D. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll *a/b* ratio. **Photosynthetica**, v.425, p.92-98, 2007.
- HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. & BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Prentice Hall, 1998. 499p.
- HEINRICHS, R.; MALAVOLTA, E. Composição mineral do produto comercial da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Ciência Rural**, v.31, p.781-785, 2001.
- HICKS, C.R. **Fundamental concepts in the design of experiments**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973. 349p.
- MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press. 2012.651p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. **Principles of plant nutrition**. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.411-416, 1993.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & FRANCHINI, J.C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agronômicas**, v.92, p.1-8, 2000.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N.K.; GARCIA y GARCIA, A. Effect of liming on the nutritional conditions and yield of alfalfa grown in tropical conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v.34, p.1107-1119, 2011.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R.T. Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.95-101, 2003.

NEVES, L.S.; ERNANI, P.R.; SIMONETE, M.A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.25-32, 2009.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo: Editora Nobel. 2009. 470p.

ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1033-1040, 2006.

SILVA, T.R.B.; LEMOS, L.B. Efeito da calagem superficial em plantio direto na concentração de cátions hidrossolúveis na parte aérea de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1199-1207, 2008.

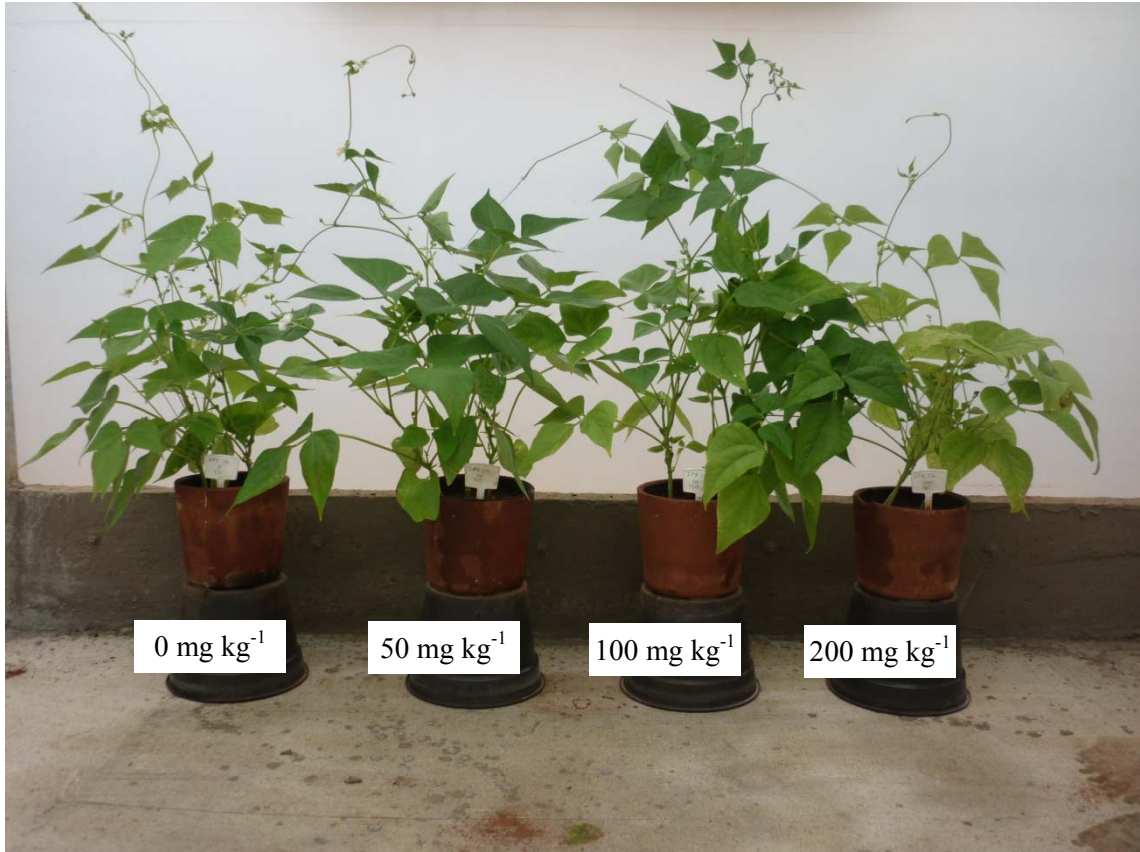
SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C. Cátions hidrossolúveis na parte aérea de culturas anuais mediante aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.81-90, 2007.

YEO, A.R. Mineral deficiency and toxicity. In: YEO, A.R.; FLOWERS, T.J. (Eds.). **Plant solute transport**. Oxford: Black well Publishing. 2007, p.290-313.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A**

Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro 'IPR Campos Gerais (CG)' em função das doses de magnésio



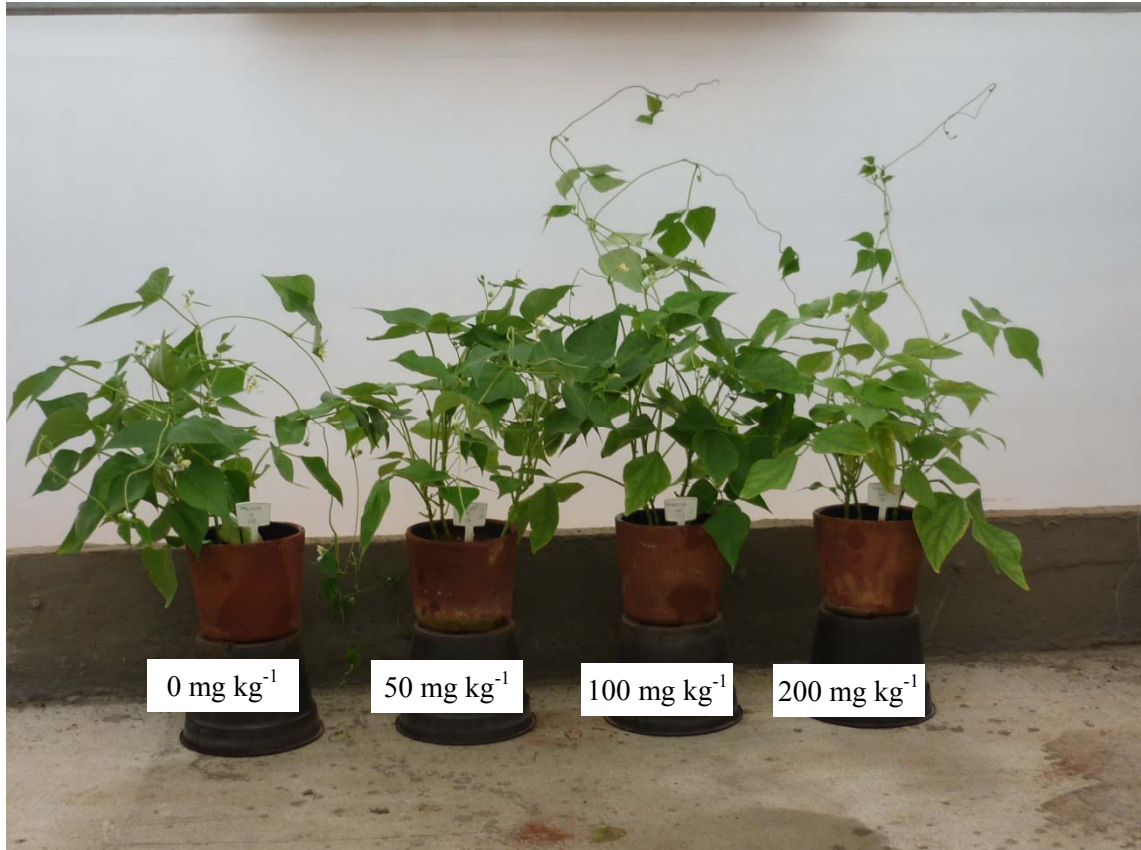
**APÊNDICE B**

Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro 'BRS Estilo' em função das doses de magnésio.



**APÊNDICE C**

Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro 'BRS Ametista' em função das doses de magnésio.



**APÊNDICE D**

Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro 'IAPAR 81' em função das doses de magnésio.



**APÊNDICE E**

Curva de resposta de crescimento da cultivar de feijoeiro 'IPR Tangará' em função das doses de magnésio.

