

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ADUBAÇÃO PARA A SOJA EM TERRAS BAIXAS DRENADAS NO
RIO GRANDE DO SUL**

Anderson Vedelago
(Dissertação de Mestrado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ADUBAÇÃO PARA A SOJA EM TERRAS BAIXAS DRENADAS NO
RIO GRANDE DO SUL**

ANDERSON VEDELAGO

Engenheiro Agrônomo (FAI – Faculdades)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil

Agosto de 2014

(Ficha Catalográfica)

ANDERSON VEDELAGO
Engenheiro Agrônomo (FAI – Faculdades)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: __/__/____
Pela Banca Examinadora

Homologado em: __/__/____
Por:

IBANOR ANGHINONI
Professor Orientador
PPG-Ciência do Solo

CLÁUDIA ERNA LANGE
Co-orientadora
Oryza & Soy Pesquisa e Consultoria

CARLOS ALBERTO BISSANI
Departamento de Solos/UFRGS

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JR.
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo

ANDRÉ LUIS THOMAS
Departamento de Plantas de Lavoura
Agronomia/UFRGS

PEDRO SELBACH
Diretor da Faculdade de
Agronomia

PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA
Departamento de Plantas de Lavoura
Agronomia/UFRGS

MADALENA BOENI
Pesquisadora em Manejo e
Conservação do solo/Fepagro

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ibanor Anghinoni pela orientação, amizade, espírito de grupo e confiança nas pessoas. Agradeço pela oportunidade de convívio, pelo exemplo de dedicação profissional e contribuições para a Ciência do Solo.

À co-orientadora Cláudia Erna Lange pela orientação, críticas, sugestões ao trabalho, amizade e pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao PPG Ciência do Solo pela estrutura e pela formação recebida.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz e à Fundação IRGA pela oportunidade de conciliação temporária das atividades profissionais e o curso de mestrado.

Aos professores do Departamento de Solos da UFRGS pelos ensinamentos e pela oportunidade de amadurecimento profissional e pessoal.

Aos professores Cláudio Mário Mundstock e Paulo Regis Ferreira da Silva, consultores do IRGA, pelos ensinamentos, convívio, amizade, incentivo e exemplo de dedicação profissional.

Aos ex-pesquisadores da Fundação IRGA que atuaram na Estação Experimental do Arroz e aos extensionistas do IRGA pelos ensinamentos, amizade e convívio, em especial a Daniel Grohs pela postura profissional e firmeza quando necessário.

Aos produtores, bolsistas, estagiários e técnicos agrícolas do IRGA pela colaboração, dedicação, amizade e rigor durante a condução dos experimentos.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Solos da UFRGS pelo convívio, ensinamentos, amizade e pelos momentos de distração.

À Industrial KF Ltda pelo apoio logístico e empréstimo da semeadora para a implantação dos experimentos.

Aos meus pais, Antoninho e Palmira e aos meus irmãos Marivane e Elisandro, pelo amor, amizade, incentivo e liberdade.

À minha companheira Ana Welter, pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo durante o curso.

ADUBAÇÃO PARA A SOJA EM TERRAS BAIXAS DRENADAS NO

RIO GRANDE DO SUL¹

Autor: Anderson Vedelago
Orientador: Ibanor Anghinoni
Co-orientadora: Cláudia Erna Lange

RESUMO

A soja tornou-se uma cultura de destaque nas terras baixas da metade sul do Rio Grande do Sul e as recomendações de adubação fosfatada e potássica para essa cultura estão embasadas em pesquisas realizadas em terras altas da metade norte do Estado, sendo estes solos distintos daqueles das terras baixas. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a resposta da soja à adubação fosfatada e potássica aplicadas na semeadura e avaliar a adequação das atuais recomendações de adubação para o cultivo de soja em terras baixas da metade Sul do Estado. Foram conduzidos quatro experimentos para avaliar a resposta da soja ao fósforo e quatro ao potássio. Os tratamentos foram doses de 0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de ambos, P₂O₅ e de K₂O, aplicadas na semeadura da soja. Para a avaliação da adequação das atuais recomendações de adubação foram conduzidos dois experimentos, com adubação para expectativa de colheita de 0, 2, 3, 4 e 6 Mg ha⁻¹, em função da análise do solo. A soja apresentou alta produtividade de grãos e alta resposta à aplicação, tanto de fósforo como de potássio. As doses de máxima eficiência econômica de fósforo (113 kg de P₂O₅ ha⁻¹) e de potássio (122 kg de K₂O ha⁻¹) foram próximas às doses de máxima eficiência técnica, devido à relação favorável de preços da soja e do adubo. As atuais recomendações de adubação para a soja necessitam de adequações para as terras baixas, principalmente em situações de baixa e média produtividade, fato que provoca balanço negativo, tanto de fósforo como de potássio.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, (71p.). Agosto de 2014.

SOYBEAN FERTILIZATION IN DRAINED LOWLAND SOILS OF RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL²

Author: Anderson Vedelago
Adviser: Ibanor Anghinoni
Co-adviser: Cláudia Erna Lange

ABSTRACT

Soybean has become a prominent crop in lowlands areas of the South of Rio Grande do Sul State and phosphate and potassium recommendations for this crop are grounded on research in the highlands soils of the North of Rio Grande do Sul (Brazil), with distinct characteristic from lowland soils. The objectives of this study were to evaluate the response of soybean to phosphorus and potassium fertilizer, applied at sowing time, and to evaluate the adequacy of fertilizer recommendations for soybean in lowlands soils. Four experiments were conducted to evaluate the soybean response to different rates of phosphorus and four of potassium. The used rates were: 0, 30, 60, 120 and 180 kg of both, P_2O_5 ha⁻¹ and K_2O . For the evaluation of current fertilizer recommendations, two experiments were conducted with fertilization for yield expectation of 0, 2, 3, 4 and 6 Mg ha⁻¹. Soybean productivity and response to phosphorus and potassium application was high. The most efficient economic doses for phosphorus (113 kg P_2O_5 ha⁻¹) and potassium (122 kg ha⁻¹ K_2O) were close to the most efficient technical doses, due to favorable soybean and fertilizer price relation. The fertilizer recommendations for soybean require adjustments for lowlands soils, especially in situations of low and medium yields that cause a negative balance of both phosphorus and potassium.

² M.Sc. Dissertation in Soil Science – Graduate Program in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (71p.) August, 2014.

SUMÁRIO

Pág.

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	4
2.1. Características dos solos de terras altas do Rio Grande do Sul	4
2.2. Características dos solos de terras baixas do Rio Grande do Sul	4
2.3. Alterações eletroquímicas provocadas pelo alagamento do solo durante o cultivo de arroz irrigado.....	6
2.4. Adubação nitrogenada e fixação biológica de nitrogênio na soja	7
2.5. Dinâmica do fósforo no solo e na planta e resposta a sua aplicação	10
2.6. Dinâmica do potássio no solo e na planta e resposta a sua aplicação	12
3. ESTUDO 1 - RESPOSTA DA SOJA À ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA NA SEMEADURA EM TERRAS BAIXAS DRENADAS	14
3.1. Introdução	14
3.2. Material e Métodos	15
3.2.1. Escolha dos locais	15
3.2.2. Características dos solos utilizados.....	16
3.2.3. Delineamento experimental, tratamentos e dimensão das parcelas....	17
3.2.4. Manejo empregado nos experimentos.....	18
3.2.5. Amostragens e determinações	18
3.2.5.1. Teor de nutrientes nas folhas	18
3.2.5.2. Rendimento de grãos e seus componentes	19
3.2.5.3. Análises químicas do solo	19
3.2.5.4. Balanço de fósforo e potássio no solo e exportado pelos grãos de soja	19
3.2.5.5. Doses de máxima eficiência técnica e econômica de fósforo e potássio	20
3.2.6. Análises estatísticas	20
3.3. Resultados e Discussão.....	21
3.3.1. Rendimento e componentes do rendimento de grãos de soja em função de doses de fósforo	21
3.3.2 Dose de fósforo de máxima eficiência técnica e econômica	25
3.3.3. Teor de fósforo no tecido foliar da soja.....	27
3.3.4. Exportação e balanço de fósforo na cultura e no solo após a colheita da soja	29
3.3.5. Rendimento de grãos e componentes do rendimento de grãos de soja em função de doses de potássio	31
3.3.6. Dose de máxima eficiência técnica e econômica de potássio	35
3.3.7. Teor de potássio no tecido foliar da soja	37
3.3.8 Exportação e balanço de potássio na cultura e no solo após a colheita da soja	39
3.4. Conclusões	42

4. ESTUDO 2 - ADEQUAÇÃO DAS ATUAIS RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA PARA A SOJA EM TERRAS BAIXAS	43
4.1. Introdução	43
4.2. Material e Métodos	44
4.2.1. Escolha dos locais	44
4.2.2. Características dos solos utilizados.....	45
4.2.3. Delineamento experimental, tratamentos e dimensão das parcelas....	45
4.2.4. Manejo empregado nos experimentos.....	46
4.3. Amostragens e determinações	47
4.3.1. Teor de nutrientes nas folhas no período reprodutivo	47
4.3.2. Rendimento de grãos	47
4.3.3. Componentes do rendimento	47
4.3.4. Análises químicas do solo	48
4.3.5. Balanço de fósforo e potássio no solo e exportado pelos grãos de soja	48
4.4. Análises estatísticas	48
4.5. Resultados e Discussão	49
4.6. Conclusões	59
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	60
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
7. REFERÊNCIAS	62
8. APÊNDICES	68

RELAÇÃO DE TABELAS

Pág.

Tabela 1. Atributos químicos, teor de matéria orgânica e argila dos solos utilizados nos experimentos.....	16
Tabela 2. Interpretação da classe textural, do teor de fósforo, da CTC $pH_{7,0}$ e do teor de potássio dos solos utilizados nos experimentos.....	16
Tabela 3. Dose de máxima eficiência técnica (DMET), rendimento de grãos de soja obtido com a dose de máxima eficiência técnica (Rend DMET), dose de máxima eficiência econômica (DMEE) e incremento no rendimento de grãos de soja pela adição de fósforo nos diferentes locais. Safra 2012/13.....	25
Tabela 4. Exportação e balanço de fósforo pelos grãos de soja dos quatro experimentos em função de doses de P_2O_5 . Safra 2012/13.....	28
Tabela 5. Estoque inicial e final de P no solo (camada 0 – 20 cm) após cultivo de soja em função de doses de P_2O_5 na adubação de semeadura nos diferentes locais. Safra 2012/13	30
Tabela 6. Dose de máxima eficiência técnica (DMET), rendimento de grãos de soja obtido com a dose de máxima eficiência técnica (Rend DMET), dose de máxima eficiência econômica (DMEE) e incremento no rendimento de grãos de soja pela adição de potássio. Safra 2012/13.....	35
Tabela 7. Exportação e balanço de potássio pelos grãos de soja dos quatro experimentos em função de doses de K_2O . Safra 2012/13.....	37
Tabela 8. Estoque inicial e final de K no solo (camada 0 – 20 cm) após cultivo de soja em função de doses de potássio na adubação de semeadura nos diferentes locais. Safra 2012/13.....	40
Tabela 9. Atributos químicos, teor de matéria orgânica e argila dos solos utilizados nos experimentos (Julho de 2012).....	43
Tabela 10. Interpretação da classe textural, do teor de fósforo, da CTC $pH_{7,0}$ e do teor de potássio dos solos utilizados (CQSF RS/SC, 2004).....	43
Tabela 11. Doses de fósforo e potássio para os níveis de adubação de acordo com a expectativa de colheita (CQFS RS/SC, 2004). Safra 2012/13.....	44
Tabela 12. Teor de fósforo do solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas seguindo as recomendações da CQFS RS/SC, (2004).....	51
Tabela 13. Balanço de fósforo e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeirinha. Safra 2012/13.....	52
Tabela 14. Balanço de fósforo e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeira do Sul. Safra 2012/13.....	52
Tabela 15. Estoque de fósforo disponível na camada 0 a 20 cm do solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004) em diferentes locais	53
Tabela 16. Teor de potássio do solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas seguindo as recomendações da CQFS RS/SC, (2004).....	54
Tabela 17. Balanço de potássio e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeirinha. Safra 2012/13.....	55
Tabela 18. Balanço de potássio e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeira do Sul. Safra 2012/13.....	56

Tabela 19. Estoque de potássio disponível no solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC (2004).....	56
--	----

RELAÇÃO DE FIGURAS

Pág.

- Figura 1:** Rendimento de grãos de soja em terras baixas em função de doses de fósforo aplicadas na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$)..22
- Figura 2:** Número de legumes em plantas de soja em terras baixas em função de doses de fósforo aplicadas na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).....24
- Figura 3:** Número de grãos por planta de soja em terras baixas em função de doses de fósforo aplicadas na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).....25
- Figura 4:** Teor de fósforo no tecido foliar da soja no florescimento submetida a doses de fertilizante fosfatado aplicadas na semeadura em terras baixas. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. ^{NS} Não significativo ($p > 0,05$);.....28
- Figura 5:** Teor de fósforo no solo (Mehlich 1) após a colheita da soja submetida a doses de P_2O_5 na adubação de semeadura em terras baixas. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$); ^{NS} Não significativo30
- Figura 6:** Rendimento de grãos de soja em terras baixas em função de doses de potássio, na safra 2012/13. (A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel). *Significativo ($p < 0,05$).....32
- Figura 7:** Imagens de parcelas com doses de potássio na semeadura em Cachoeirinha. A: testemunha; B, C e D com 30, 60 e 120 kg de $K_2O\ ha^{-1}$, respectivamente.....33
- Figura 8:** Número de legumes em plantas de soja em terras baixas em função de doses de potássio aplicadas na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).....34
- Figura 9:** Número de grãos em plantas de soja em terras baixas em função de doses de potássio aplicadas na semeadura, na safra 2012/13 A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).35
- Figura 10:** Teor de potássio no tecido foliar da soja no período reprodutivo em função de doses de fertilizante potássico aplicado na semeadura em terras baixas. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$); ^{NS} Não significativo38
- Figura 11:** Teor de potássio no solo ($mg\ dm^{-3}$) após a colheita da soja submetida a doses de K_2O na adubação de semeadura em terras baixas.. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).....40

Figura 12: Rendimento de grãos de soja em terras baixas em função de níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. *Significativo ($p < 0,05$).....	49
Figura 13: Número de legumes em plantas de soja em terras baixas submetidas a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. *Significativo ($p < 0,05$).	51
Figura 14: Número de grãos em plantas de soja em terras baixas em função do nível de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. *Significativo ($p < 0,05$).....	52
Figura 15: Teor de fósforo no tecido foliar da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. ^{NS} Não significativo ($p > 0,05$).	52
FIGURA 16: Teor de potássio no tecido foliar da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. ^{NS} Não significativo ($p > 0,05$).	56
Figura 17: Peso de grãos de soja submetida a doses de fósforo na semeadura em terras baixas. Safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel.....	68
Figura 18: Peso de grãos de soja submetida a doses de potássio na semeadura em terras baixas. Safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel.	69
Figura 19: Peso de grãos de soja submetida a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, 2004. Safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul.....	70

1. INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul é um dos principais estados produtores de soja do Brasil e a metade sul foi a primeira região a cultivar essa oleaginosa na América Latina. Apesar disso, as principais regiões produtoras de soja estão na metade norte do RS, devido à colonização das terras e também pelas características dos solos favoráveis para essa cultura. Os solos hidromórficos da metade Sul são historicamente utilizados para o cultivo de arroz irrigado por inundação e pela pecuária de corte.

Nos últimos anos, está ocorrendo um aumento considerável de áreas cultivadas com soja em rotação ao arroz irrigado em terras baixas, que passou de 66 mil hectares na safra 2011/12 para aproximadamente 300 mil hectares na safra 2012/13. Este aumento de área é impulsionado pela necessidade de alternativas eficientes de controle de plantas daninhas nas lavouras de arroz irrigado, especialmente o arroz vermelho resistente aos herbicidas do Sistema Clearfield®.

Outro fator importante de impulso remete à sustentabilidade financeira das propriedades, que são beneficiadas pela diversificação de culturas e de renda, intensificando o uso das terras, das máquinas e da mão-de-obra, com diminuição de custos por unidade de grãos produzidos. Também influencia nesse aumento de área cultivada na metade sul, o esgotamento da possibilidade de expansão para novas áreas na metade norte, uma vez que a soja já ocupa praticamente seu potencial máximo de cultivo naquela região.

O sucesso no cultivo de soja em rotação com o arroz irrigado é dependente de um adequado manejo do solo e da cultura. A soja não é resistente ao excesso hídrico, sendo este o principal fator de estresse às plantas, que gera instabilidade produtiva e/ou baixa produtividade. O excesso

hídrico em solos de várzea é um fator que demanda precauções e adequações para o cultivo de espécies de sequeiro.

Os solos de terras altas do RS têm sua gênese majoritariamente de basalto (Planalto), de granito (Serra do Sudeste) e, em menor extensão, de arenito. Destes materiais de origem, formaram-se os Latossolos (principalmente), Nitossolos, Argissolos e Cambissolos. Todas estas classes apresentam como característica peculiar, boa drenagem, retenção de água e agregação. Os solos cultivados com arroz irrigado, por sua vez, são formados, em sua maioria, por sedimentos, originando solos com baixa capacidade de infiltração de água, o que pode afetar negativamente o desenvolvimento da soja.

Os solos cultivados com arroz irrigado são predominantemente ácidos quando não estão sob alagamento, sendo que a maioria apresenta pH em água abaixo de 5,0; os teores de matéria orgânica e fósforo disponível, principalmente, são baixos (três boletins técnicos – IRGA: Anghinoni et al., 2004; Boeni et al., 2010; Vedelago et al., 2012), o que pode limitar a nutrição das plantas.

Durante o cultivo do arroz irrigado, o solo permanece mais de 100 dias alagado o que promove uma série de alterações eletroquímicas provocadas pelo metabolismo microbiano. As principais alterações são aumento do pH, diminuição do potencial redox e aumento da disponibilidade de ferro, manganês, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, entre outros nutrientes, o que contribui para a melhoria da nutrição e da produtividade dessa cultura (Ponnamperuma, 1972). Tais modificações não ocorrem durante o cultivo da soja, com solo oxidado. Diante disso, é necessário adequar as condições de acidez do solo e o fornecimento de nutrientes para a soja nas terras baixas, visto que a dinâmica no solo é distinta durante o crescimento dessas duas culturas.

A rotação de culturas é uma prática de interesse, pois diferentes culturas apresentam necessidades nutricionais distintas e contribuem diferentemente com os resíduos vegetais, melhorando a fertilidade do solo quando cultivados em manejos conservacionistas.

A adequada nutrição é um dos pontos fundamentais para garantir o crescimento e o desenvolvimento da soja, sobretudo em ambientes com

estresses frequentes, como é o caso dos solos de terras baixas. Limitações nutricionais podem acarretar em insucesso da rotação de culturas, o que impacta negativamente em todo o processo produtivo, financeiro e ambiental da propriedade rural.

Os objetivos desta pesquisa são determinar a resposta da soja à adubação fosfatada e potássica aplicadas na semeadura em terras baixas no Rio Grande do Sul e verificar se as atuais recomendações de adubação para o cultivo de soja são adequadas a essa cultura nesses solos.

2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1. Características dos solos de terras altas do Rio Grande do Sul

Os principais solos de terras altas cultivados com soja no RS situam-se majoritariamente na metade norte e, em uma porção menor, no sudoeste do Estado. Esta província é formada por uma sucessão de pacotes de rochas vulcânicas, que são originadas por um magma resfriado na superfície da crosta terrestre. As principais rochas são basaltos e riolitos da Formação Serra Geral e localmente por arenitos (Streck et al., 2008).

Na região do Planalto Médio, o relevo predominante é suave ondulado a ondulado. As principais classes de solos são os Latossolos e os Nitossolos. Os Argissolos ocorrem predominantemente em terras altas da Depressão Central, originados do granito. Caracterizam-se por serem solos profundos, bem drenados, com alto teor de argila e óxidos de ferro, principalmente nos Latossolos (Streck et al., 2008). Ocorrem também na metade norte, os Cambissolos e os Chernossolos. Os processos pedogenéticos mais atuantes são a ferralitização e a lessivagem, característicos de solos bem drenados e profundos.

2.2. Características dos solos de terras baixas do Rio Grande do Sul

Os solos cultivados com arroz irrigado são predominantemente de várzea. Localizam-se nas planícies de rios e lagoas e seu desenvolvimento ocorreu a partir de sedimentos (Klamt et al., 1985). Tais sedimentos apresentam grande heterogeneidade em sua composição granulométrica e

mineralógica e, por este motivo, os solos apresentam grande variação na sua aptidão de uso, com reflexos no cultivo da soja nesses ambientes. Isto pode ser atribuído, em parte, ao fato de que as regiões arroyeiras do Estado se encontram sobre as quatro províncias geomorfológicas existentes no Rio Grande do Sul: Planalto, Depressão Periférica, Escudo Sul-Riograndense e Planície Costeira (Streck et al., 2008). Essa significativa variabilidade tem influência direta sobre o seu manejo e o das culturas, sobretudo em culturas de sequeiro como a soja.

As terras baixas são encontradas principalmente na metade sul do RS e ocorrem em grandes extensões na região das planícies costeiras, principalmente junto às lagoas. São também encontrados nas planícies de rios na Depressão Central (Sinós, Taquari, Caí e Jacuí) e Campanha (Ibicuí, Santa Maria e Quaraí) (Klamt et al., 1985). A principal característica desses solos é a má drenagem ou o hidromorfismo. A intensidade de hidromorfismo pode ser verificada pela coloração do solo, sendo a cor acinzentada, ou gleizada, um indicativo de máximo hidromorfismo. Já a coloração brunada (marrom) ou avermelhada, indica diminuição do caráter hidromórfico. As terras baixas localizados em cotas mais altas e em desnível, em geral, têm melhores condições de drenagem (Klamt et al., 1985).

Os solos de várzea representam cerca de 20% da área total do Estado. A classe dos Planossolos (incluindo Gleissolos associados) é a mais representativa (56% do total de áreas de várzea), seguindo-se, em ordem decrescente, dos Chernossolos (16,1%), dos Neossolos (11,6%), dos Plintossolos (8,3%), dos Gleissolos (7,1%) e dos Vertissolos (0,9%) (Pinto et al., 2004).

A formação desses solos ocorreu a partir de sedimentos fluviolacustres, lagunares e marinhos da Planície Costeira (Litoral e parte da Encosta do Sudeste) e de sedimentos aluvionares oriundos de rochas sedimentares e basálticas da Depressão Periférica e Planalto (parte da Depressão Central, Campanha e Missões) (Pinto et al., 1999). Devido à origem diversa e à intensidade de fluxo de transporte, esses sedimentos são muito heterogêneos em relação à composição mineralógica e granulométrica. Isso resulta na formação de solos com grandes variações nos atributos físicos, químicos e mineralógicos (Pinto et al., 1999) predominando solos com teor de

argila menor do que 25% (Boeni et al., 2010) e com teor de matéria orgânica Baixa ou Muito Baixa (Vedelago et al., 2012).

Devido à gênese e ao alagamento durante o cultivo de arroz irrigado, as terras baixas apresentam menores teores de óxidos quando comparados aos solos predominantes na metade norte do RS (terras altas) (Gonçalves et al., 2011). No RS três milhões de hectares desses solos possuem infra-estrutura de drenagem e irrigação implantadas para cultivo de arroz irrigado (Pinto et al., 2004). Estima-se que aproximadamente dois milhões de hectares desses solos têm potencial de uso para o cultivo da soja.

2.3. Alterações eletroquímicas provocadas pelo alagamento do solo durante o cultivo de arroz irrigado

O alagamento provoca uma série de alterações eletroquímicas no solo devido à atividade microbiana, pois os microrganismos anaeróbicos passam a utilizar compostos oxidados do solo como receptores de elétrons, ocasionando um ambiente de redução e acúmulo de CO₂. A difusão de oxigênio no perfil do solo alagado é muito lenta, 10.000 vezes menor na água do que no ar. Desta forma, encontra-se oxigênio difundido somente na superfície do solo e um ambiente anóxico abaixo desta camada (Ponnamperuma, 1972). Há oxigênio também na rizosfera do arroz, devido ao transporte que ocorre nos aerênquimas.

O material orgânico do solo é a fonte de energia e nutrientes para os microrganismos heterotróficos. A fração da matéria orgânica (lábil ou recalcitrante) e o seu teor no solo condicionam a intensidade da atividade microbiana no solo alagado (Schmidt et al., 2009). Devido às quantidades em que ocorrem no solo e aos seus potenciais de redução, os principais compostos oxidados que se reduzem são nitrato, óxidos mangânicos, óxidos férricos, sulfato (Sousa et al., 2012) e produtos intermediários da decomposição da matéria orgânica.

O acúmulo de CO₂ diminui o pH do solo e a redução de compostos oxidados aumenta o pH, pelo consumo de prótons no processo (Vahl & Lopes, 1998). De maneira geral, o alagamento do solo causa o aumento no pH até valores próximos de 6,0 a 6,5, permanecendo estável a partir de 30 dias após o

alagamento (Sousa et al., 2010). A partir de reações de redução, junto com o pH aumenta a disponibilidade de vários elementos (Ponnamperuma, 1972). O Fe^{3+} e o Mn^{4+} dos óxidos são reduzidos para Fe^{2+} e Mn^{2+} , aumentando sua concentração na solução (Vahl, 1991).

O processo de redução do solo também afeta o potencial redox (Eh), sendo esse uma medida do estado de redução do solo e quanto menor for o seu valor maior é a presença de substâncias reduzidas. A disponibilidade de nutrientes para a cultura do arroz irrigado por inundação é afetada pelas alterações no Eh, sendo determinantes as formas estáveis do nitrogênio (N) no solo e a sua disponibilidade (Sousa et al., 2010).

A solubilidade do fósforo (P), avaliada pela concentração na solução, aumenta no início do alagamento até 20 a 40 dias após. O aumento inicial é atribuído à redução dos fosfatos férricos para a forma ferrosa, que é mais solúvel; liberação de fosfato ocluso, pela redução dos óxidos de Fe; deslocamento do fosfato adsorvido na superfície de argilas e óxidos de Fe e Al por ânions orgânicos a HCO_3^- acumulados no solo alagado; e hidrólise dos fosfatos de Fe e Al (Vahl, 1999). Por esses motivos, para a interpretação do teor de P do solo para a cultura do arroz irrigado, não há separação em classes texturais (CQFS RS/SC, 2004; SOSBAI, 2012).

O cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o potássio (K), embora não estejam diretamente envolvidos nas reações de oxirredução, também têm seus teores alterados, pois, com a redução do solo, são deslocados dos sítios de troca pelo Fe^{2+} e Mn^{2+} , aumentando a concentração na solução do solo (Vahl, 1991). Dessa forma, esses cátions em solos inundados apresentam comportamento que depende também da cinética de liberação do ferro, do manganês e das demais alterações do solo decorrentes do alagamento (Britzke, 2010).

2.4. Adubação nitrogenada e fixação biológica de nitrogênio na soja

O nitrogênio (N) é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura da soja, sendo fornecido às plantas pela decomposição dos resíduos e da matéria orgânica do solo, pela simbiose com bactérias do gênero

Bradyrhizobium e por adubos nitrogenados. Segundo Hungria et al. (2000), a soja necessita de 80 kg de N para produzir uma tonelada de grãos. De acordo com esses autores, a demanda de N pela planta é suprida entre 65 e 85% pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) e os restantes 15 a 35% são fornecidos pela mineralização do material orgânico do solo. A decomposição de resíduos de culturas antecessoras constitui outra fonte de N à soja, porém, quando a cultura antecessora for uma poácea (gramínea) a contribuição é limitada (Fiorin et al., 1998).

Mesmo que não se considere o teor de matéria orgânica do solo para as recomendações de adubação para a soja (CQFS, 2004), ocorre uma contribuição de suprimento de nitrogênio pelo solo. Entretanto, cabe salientar que os solos cultivados com arroz irrigado, em sua maioria, apresentam baixos teores de matéria orgânica, sendo que 75% deles apresentam teor Baixo (Vedelago et al., 2012).

A efetividade do processo de FBN é dependente de vários fatores ligados à planta, ao *Bradyrhizobium* e ao manejo dado ao solo e à lavoura. Para favorecer a FBN, é fundamental realizar corretamente a inoculação das sementes, seguindo as Indicações...(2012). A FBN reflete as condições ambientais e de manejo em que as plantas estão impostas. Todo e qualquer estresse afeta primeiramente o processo de FBN, antes mesmo de afetar a planta.

Em condições ambientais adversas, é frequente a ausência de nodulação nas raízes da soja cultivada em terras baixas. Esse fato pode estar ligado à perda de energia pelas plantas, sobretudo em condições de excesso hídrico, e a mudanças fisiológicas provocadas pelos estresses. Dessa forma, a soja reverte sua prioridade de gasto energético para a sobrevivência da espécie, impactando negativamente na nodulação e FBN (Thomas & Costa, 2010).

O estresse hídrico é um dos principais fatores que afetam a nodulação na soja em terras baixas. A falta de água diminui a sobrevivência de bactérias, a formação e a longevidade dos nódulos e a sua funcionalidade. A deficiência hídrica diminui a FBN e, após a passagem do estresse, a sua efetividade não será completa e poderá não ocorrer (Thomas & Costa, 2010).

O excesso hídrico (lâmina de água no solo ou saturação prolongada) é um fator que compromete o fornecimento de N às plantas via FBN. Isto ocorre devido à falta de oxigênio nos nódulos das raízes para a manutenção da respiração aeróbica e o suprimento de ATP para a atividade da enzima nitrogenase (Loureiro et al., 1988). O excesso de umidade também inibe a nodulação e a FBN por provocar alterações na composição e na quantidade de proteínas e aminoácidos e na atividade das enzimas nitrato redutase e glutamina sintetase. Essas são enzimas-chave na redução do nitrato e assimilação de amônio que influenciam o balanço de nitrogênio e são drasticamente afetadas por esse estresse (Liao & Lin, 2001).

A medida mais adequada para evitar a ocorrência de excesso hídrico é estabelecer um sistema de drenagem da lavoura que não permita a permanência de lâmina de água ou a saturação prolongada do solo, sendo a semeadura em camalhões uma alternativa eficiente de mitigação (Beecher et al., 2005).

O pH do solo afeta a simbiose, tanto se for abaixo do desejável quanto acima. A etapa mais sensível à acidez do solo em relação à nodulação é a fase inicial da nodulação, incluindo a fase de exsudação de flavonóides pela leguminosa e síntese dos fatores *nod* pela bactéria (Hungria & Vargas, 2000).

A efetividade da FBN é um fator indispensável para a obtenção de altos rendimentos de grãos de soja. Essa forma de fornecimento de N para a soja é a mais barata e ambientalmente adequada. Apesar das terras baixas apresentarem alguns fatores limitantes ao processo de FBN, quando empregado um manejo adequado do solo e da cultura, não há limitações nutricionais decorrentes da deficiência de N. Com manejo adequado, é possível alcançar altos rendimentos de grãos, tanto em pesquisas quanto em lavouras, o que torna a soja rentável e adequada ao sistema de rotação de culturas.

2.5. Dinâmica do fósforo no solo e na planta e resposta a sua aplicação

O fósforo (P) é o macronutriente menos absorvido e exportado nos grãos de soja. Apesar disso, geralmente é o nutriente que apresenta a maior limitação à obtenção de altos rendimentos em solos oxidados pelo baixo teor e pela dinâmica complexa em solos tropicais e subtropicais (Vitti & Trevisan, 2000). Esse nutriente desempenha importante função nas plantas, sobretudo na divisão celular dos ápices da parte aérea e raízes, na sua reprodução e metabolismo.

Solos bem drenados frequentemente apresentam baixa disponibilidade de P, devido à formação de compostos estáveis de alta energia de ligação e baixa solubilidade (complexos de esfera interna) com a fase sólida mineral do solo, principalmente com óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Sposito, 2008). Já em ambientes sazonalmente alagados existe alternância nas condições de oxidação e de redução, que determina modificações intensas na fase sólida mineral do solo e na sua dinâmica com elementos reativos (Ponnamperuma, 1972; Guilherme et al., 2000).

A deficiência desse nutriente diminui o crescimento das plantas e o potencial de rendimento, pelo menor crescimento e maior aborto de flores. Com o desenvolvimento da planta, a deficiência de P se manifesta em arroxamento das folhas, na menor formação e retenção de legumes, culminando com menor rendimento de grãos (Vitti & Trevisan, 2000). A deficiência de P também poderá comprometer a fixação biológica de nitrogênio (Thomas & Costa, 2010).

Diferentemente do que ocorre no solo, o P apresenta grande mobilidade nas plantas, com translocação em direção aos tecidos novos e, na sequência, aos grãos. Os grãos constituem a parte da planta com a maior concentração desse nutriente. Nas folhas de soja, os teores adequados situam-se entre 0,26 e 0,50 % da massa seca (Raij et al., 1997) e a exportação nos grãos de soja é equivalente a 14 kg de P_2O_5 por tonelada de grãos produzidos (CQFS RS/SC, 2004).

O acúmulo de P nas plantas de soja ocorre principalmente entre os estádios V10 e R6 (a escala está detalhada no apêndice). Nessa fase, a soja acumula aproximadamente 70 a 80 % do P nelas contido. Após o estádio R5, o

P é rapidamente translocado para os legumes e grãos em desenvolvimento. Na fase de colheita, aproximadamente 75 % do P absorvido pela planta se encontra nos grãos (Ciampitti, et al., 2012).

O P é o macronutriente com a menor mobilidade no solo, podendo formar um gradiente de concentração em uma distância de apenas 3 cm no período de 121 dias (Souza & Volkweiss, 1987). Diante disto, a adubação no sulco de semeadura é indicada principalmente quando o teor de P do solo for Baixo ou Muito baixo (CQFS RS/SC, 2004). Nestes casos, a colocação de fosfato solúvel próximo à linha de semeadura pode aumentar a eficiência de uso pelas plantas, devido ao menor contato com os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, comumente presentes em solos intemperizados e com pH baixo (Souza & Volkweiss, 1987; Kray et al., 1998). Quando os teores de P no solo se encontram nas classes Médio e Alto, a adubação a lanço tem apresentado eficiência semelhante à em sulco (Klepker & Anghinoni, 1995; Weithölter et al., 1998; Ceretta & Pavinato, 2003). Os solos cultivados com arroz irrigado apresentam uma baixa disponibilidade de P para a cultura da soja, sendo que na média das regiões arrozeiras do RS, 44 % das amostras apresentaram teor de P interpretado como Muito baixo e 30 % como Baixo. Apenas 13 % das amostras apresentaram teor de P acima do crítico, em um levantamento realizado por Vedelago et al., (2012).

A capacidade de adsorção de fósforo nos solos de terras baixas é menor do que a dos solos de terras altas do RS, mas assim mesmo, é variável entre os solos, proporcionando um comportamento distinto quanto à disponibilidade desse nutriente para a cultura do arroz irrigado (Ranno, 2004). Em experimentos para avaliar a resposta da soja à adubação fosfatada aplicada na semeadura em Planossolo Háplico (de várzea) no Rio Grande do Sul, Londero (2012) não obteve incremento no rendimento de grãos por duas safras consecutivas. Os componentes do rendimento de grãos também não foram alterados pela adubação e a massa seca da parte aérea sofreu tendência de diminuição com a adição do adubo fosfatado em ambas as safras. Tal comportamento está relacionado com o teor de P disponível do solo que estava classificado como Alto (CQFS RS/SC, 2004), em que a probabilidade de resposta da soja à sua adição é baixa ou nula.

2.6. Dinâmica do potássio no solo e na planta e resposta a sua aplicação

O potássio (K) é um dos nutrientes mais abundantes nos solos, podendo atingir concentrações de 0,3 a 30 g kg⁻¹. O mesmo encontra-se majoritariamente na estrutura dos minerais primários e secundários. Uma pequena fração encontra-se na forma disponível às plantas, podendo estar ligado às cargas elétricas negativas (K trocável) ou na solução do solo (Sparks, 2000).

Os teores de K na matéria seca das folhas da soja situam-se entre 1,7 e 2,5 % (Raij et al., 1997). A principal consequência da sua deficiência é a redução da taxa de crescimento das plantas, mesmo antes do aparecimento de sintomas visuais (Wendling, 2004). Eles ocorrem em situações mais severas de deficiência, predominantemente em manchas amarelas (cloróticas) a partir das bordas das folhas mais velhas, chegando à necrose, como também na maturação desuniforme, retenção foliar, legumes verdes e chochos e grãos pequenos, enrugados e deformados (Borkert et al., 2004).

O K é um nutriente com grande mobilidade no sistema solo-planta. A movimentação na planta é facilitada porque o K se encontra nos tecidos em maior proporção na forma iônica, não sendo constituinte de compostos estruturais, diferentemente dos outros elementos (Malavolta, 2005), podendo ser redistribuído no perfil pelo fluxo de água e por reciclagem pelas plantas. Assim, a variabilidade vertical e horizontal dos teores de K disponível normalmente é menor do que a do P disponível (Anghinoni & Salet, 1998; Schlindwein & Anghinoni, 2000).

A exportação de K pelos grãos é maior na soja (20 kg K₂O Mg⁻¹) do que no arroz irrigado (4,0 kg K₂O Mg⁻¹) (CQFS RS/SC, 2004). Desta forma, para obter altos rendimentos e manter a fertilidade do solo em sistemas de cultivo que incluem a soja, deve-se prever a adequada fertilização potássica. Historicamente no RS, a soja tem sido a principal exportadora de K do solo e, com os aumentos de rendimento de grãos, esse fato tem se agravado (Amado et al., 2010).

Em levantamento realizado por Vedelago et al. (2012) nas regiões arrozeiras do Rio Grande do Sul evidenciou-se que aproximadamente a

metade (46 %) dos teores estavam na classe Alto e Muito alto de K disponível no solo para a cultura da soja (CQFS RS/SC, 2004). Entretanto, os solos das regiões costeiras à Laguna dos Patos apresentaram somente 32 a 37 % nessas classes de disponibilidade desse nutriente. As regiões arroyeiras que apresentaram as maiores quantidades de teores de K disponível nas Classes Alto e Muito alto foram a Campanha e a Depressão Central, com 50 e 54 %, respectivamente.

Apesar do exposto, estudos conduzidos no Sul do Brasil têm demonstrado pequenas respostas das culturas à aplicação de K em ensaios em vasos. Esses resultados podem ser interpretados com base na capacidade das reservas de K do solo de manter o equilíbrio com a solução, atendendo às necessidades das plantas (Meurer & Anghinoni, 1993; Brunetto et al., 2005).

Em Planossolo Háplico, avaliado em duas safras consecutivas, ocorreu resposta da soja à adubação potássica aplicada na semeadura até 60 kg ha⁻¹ no primeiro ano (Lodero, 2012). Na safra seguinte, apesar das diferenças numéricas, não houve significância ($p > 0,05$) no aumento de rendimento pelas doses de K₂O. O peso de grãos foi o único componente do rendimento que sofreu influência positiva pelo aumento das doses de K nesse trabalho.

3. ESTUDO 1 - RESPOSTA DA SOJA À ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA NA SEMEADURA EM TERRAS BAIXAS DRENADAS

3.1. Introdução

O cultivo de soja em rotação ao arroz irrigado no Rio Grande do Sul (RS) está crescendo de forma significativa nos últimos anos (IRGA, 2014). Esta rotação é necessária para auxiliar no controle de plantas daninhas e também beneficiar o sistema produtivo orizícola. Com essa rotação, ocorre aumento da capacidade produtiva do solo e da qualidade do arroz, além de diminuição de custos com preparo do solo. Os primeiros relatos do cultivo de soja em rotação com o arroz irrigado no RS são de 1946, quando foi iniciada a experimentação visando à adaptação dessa leguminosa em solos propensos ao excesso hídrico (Bernardes, 1946).

O sucesso da soja cultivada em rotação com o arroz irrigado é dependente de vários fatores intrínsecos ao seu manejo em solos que oferecem risco de excesso hídrico. Esse excesso ocorre devido às condições naturais de formação dos solos de terras baixas, o que determina uma baixa capacidade de infiltração de água no perfil do solo e o seu acúmulo em superfície é prejudicial para as culturas de sequeiro (Pinto et al., 1999; Thomas, 2004). A adequada nutrição é um fator indispensável para a construção da produtividade da soja, sobretudo em condições de estresses às plantas.

Os solos do Rio Grande do Sul apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P) para as culturas anuais. Rheinheimer et al. (2001) constataram que 79 % das mais de 150.000 amostras analisadas pelos laboratórios da Rede Oficial dos Laboratórios de Análises de Solos (ROLAS) do RS e SC apresentaram teor de P abaixo do suficiente. Um levantamento realizado por Vedelago et al., (2012), com 20.221 amostras de solos analisadas no período

de 2009 a 2011 proveniente das regiões arrozeiras do RS, indicou que 74 % delas apresentam teor de P nas classes Muito baixo ou Baixo para a cultura da soja, conforme CQFS RS/SC (2004). Nesse levantamento apenas 13 % das amostras encontraram-se com teor de P acima do crítico.

Quanto ao potássio (K), os solos do RS apresentam uma maior disponibilidade para a soja comparativamente ao P (Rheinheimer et al., 2001). Contudo, os solos cultivados com arroz irrigado apresentam grandes variações regionais na disponibilidade desse nutriente para a soja (Vedelago et al., 2012), com destaque para as regiões arrozeiras da Fronteira Oeste e as Planícies Costeiras, que apresentam alta frequência de amostras de solo interpretadas com disponibilidade Baixa ou Muito baixa de K.

A resposta da soja à adubação fosfatada e potássica em solos de terras baixas no Rio Grande do Sul é pouco conhecida. Os experimentos realizados para avaliar a resposta à adubação e que subsidiaram o surgimento e os avanços nas recomendações de adubação para a soja foram realizados em terras altas, principalmente na metade Norte do Estado e também em Santa Catarina, porém sem contemplar os solos de terras baixas (CQFS RS/SC, 2004). Esse fato pode levar a recomendações de adubação errôneas para a soja cultivada em terras baixas. O objetivo deste estudo foi determinar a resposta da soja à adubação fosfatada e potássica na semeadura em terras baixas no Rio Grande do Sul.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Escolha dos locais

Os locais escolhidos para a implantação dos experimentos representam diferentes tipos de solo, com disponibilidade de P e K variada e com histórico de cultivo de arroz irrigado por inundação.

Os experimentos foram instalados na Estação Experimental da empresa FM Canquerine, em Capivari do Sul (30°10'35" S; 50°26'08" O); na Estação Experimental do Arroz do IRGA, em Cachoeirinha (29°57'02" S; 51°06'57" O); na Subestação de Pesquisa do IRGA na Barragem do Capané, em Cachoeira do Sul (30°13'28" S; 52°56'34" O); e em área de lavoura comercial de propriedade de Rodrigo Mascarenhas, em São Gabriel (30°27'49"

S; 54°26'48" O). Dessa forma, os experimentos utilizados abrangeram três regiões arrozeiras: em Capivari do Sul e em Cachoeirinha, a Planície Costeira Externa; em Cachoeira do Sul, a Depressão Central; e em São Gabriel, a Campanha.

3.2.2. Características dos solos utilizados

O solo de Cachoeirinha é classificado como Gleissolo Háplico Distrófico típico; de Cachoeira do Sul, como Planossolo Háplico Eutrófico arênico (Unidade de Mapeamento Vacacaí); de Capivari do Sul, como Planossolo Háplico Distrófico espessarênico (Unidade de Mapeamento Palmares) e de São Gabriel, como Planossolo Háplico Eutrófico vertissólico (Unidade de mapeamento São Gabriel) (Streck et al., 2008). As principais características dos solos utilizados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos, teor de matéria orgânica e argila dos solos utilizados nos experimentos (Julho de 2012).

Local	pH (H ₂ O)	Saturação por bases	Matéria orgânica	Argila	P Mehlich 1	K Mehlich 1	CTC _{pH 7,0}
		%	-----g dm ⁻³ -----		-----mg dm ⁻³ -----		cmol _c dm ⁻³
Cachoeirinha	4,8	55	15	170	20,0	70	6,5
Capivari do Sul	4,9	26	18	140	5,6	49	8,3
Cachoeira do Sul	4,9	42	9	150	7,4	49	6,0
São Gabriel	5,1	50	18	170	4,4	64	21,6

Na Tabela 2 são apresentadas as interpretações da classe textural, conforme o teor de argila, a CTC_{pH 7,0}, ambas utilizadas para a interpretação do teor de fósforo e potássio respectivamente, e as classes do teor de fósforo e potássio dos solos utilizados nos experimentos.

Tabela 2. Interpretação da classe textural, do teor de fósforo, da CTC_{pH 7,0} e do teor de potássio dos solos utilizados nos experimentos (CQFS RS/SC, 2004).

Local	Classe Textural ¹	Fósforo	CTC _{pH 7,0} ²	Potássio
Cachoeirinha	4	Médio	Médio	Alto
Capivari do Sul	4	Muito Baixo	Médio	Médio
Cachoeira do Sul	4	Baixo	Médio	Médio
São Gabriel	4	Muito Baixo	Alto	Médio

¹Para a interpretação do teor de fósforo (<20% de argila); ²Para a interpretação do teor de potássio: Médio 5 a 15 cmol_c kg⁻¹; Alto >15 cmol_c kg⁻¹.

3.2.3. Delineamento experimental, tratamentos e dimensão das parcelas

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro repetições, com unidade experimental de 30 m² (seis linhas com espaçamento de 0,5 m e 10 metros de comprimento). Nos experimentos para avaliação da resposta da soja ao P, aplicou-se uma dose de 95 kg de K₂O ha⁻¹ (na forma de cloreto de potássio) em todas as parcelas, para uma expectativa de produtividade de 4 Mg ha⁻¹ de grãos de soja segundo CQFS RS/SC (2004), sendo 60 kg de K₂O ha⁻¹ aplicada na linha de semeadura e o restante a lanço antecedendo a semeadura. Os tratamentos de P₂O₅ foram: 0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹. A dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi parcelada, sendo 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ aplicada na linha de semeadura e o restante a lanço na superfície, antes da semeadura da soja, o que incorporou parcialmente no solo. A fonte de fósforo foi o super fosfato triplo.

Para avaliação da resposta da soja ao K, aplicou-se uma dose de P (na forma de super fosfato triplo) variável com a classe de disponibilidade para uma expectativa de produtividade de 4 Mg ha⁻¹ de grãos de soja (CQFS RS/SC, 2004), sendo aplicado na linha de semeadura. As doses foram 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹ em Cachoeirinha; 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ em Cachoeira do Sul; e 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹ em Capivari do Sul e São Gabriel. Os tratamentos de K₂O foram: 0, 30, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹. A dose máxima aplicada na linha de semeadura foi de 60 kg ha⁻¹ de K₂O, com aplicação do restante a lanço antes da semeadura para as doses maiores. A fonte de K₂O foi o cloreto de potássio.

3.2.4. Manejo empregado nos experimentos

Procedeu-se a aplicação de calcário para correção do pH do solo para 6,0 (CQFS RS/SC, 2004), que foi incorporado na camada de 0 a 20 cm, com exceção do experimento conduzido em São Gabriel. Neste local a área possuía histórico de cultivo de soja com boa nodulação e os teores de cálcio e magnésio estavam altos (4,1 e 2,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente).

A semeadura ocorreu de 28 de outubro a 30 de novembro de 2012. As cultivares de soja foram NA 5909 RG (Cachoeirinha e Capivari do Sul) e Fundacep 57 RR (Cachoeira do Sul e São Gabriel), de ciclo precoce e médio, respectivamente. A NA 5909 RG possui tipo de crescimento indeterminado e a Fundacep 57 RR, determinado. As sementes foram inoculadas antes da semeadura com produto comercial líquido, utilizando três doses por hectare. A população em todos os experimentos foi de aproximadamente 250 mil plantas por hectare (12 plantas por metro linear, com 0,5 m de distância entre linhas).

A semeadura foi realizada em microcamalhões para facilitar a drenagem após as chuvas e também possibilitar a suplementação hídrica por sulcos em períodos de deficiência hídrica. Em Cachoeirinha e em Cachoeira do Sul realizou-se duas suplementações hídricas (equivalente a 50 mm de chuva cada) durante o enchimento dos grãos. Em São Gabriel e em Capivari do Sul não houve a necessidade de suplementação hídrica.

O manejo dos experimentos seguiu as Indicações Técnicas para a Cultura da Soja para o RS e SC (2012), sempre evitando a competição com plantas daninhas e a ocorrência de pragas e doenças. Todas as pulverizações foram realizadas com equipamentos terrestres, com pontas de pulverização e vazão indicadas para cada defensivo (Indicações, 2012).

3.2.5. Amostragens e determinações

3.2.5.1. Teor de nutrientes nas folhas

A determinação do teor de nutrientes nas folhas (P e K) no florescimento foi realizada em 35 folhas com pecíolo por parcela, coletadas aleatoriamente, sempre do caule principal, sendo a terceira folha expandida, de cima para baixo (CQFS RS/SC, 2004) e analisadas no Laboratório de Análises

do Departamento de Solos da UFRGS. Nos ensaios de Cachoeirinha, Capivari do Sul e Cachoeira do Sul, as plantas estavam no estágio R1, enquanto em São Gabriel, a coleta foi realizada quando as plantas estavam no estágio R3 na escala de Ferh & Caviness (1977).

3.2.5.2. Rendimento de grãos e seus componentes

Para a determinação do rendimento, os grãos foram colhidos das duas linhas centrais com seis metros lineares em cada parcela, totalizando 6 m². A colheita foi manual e a trilha realizada em trilhadora estacionária e os grãos foram limpos e a umidade corrigida para 13 %. O número de legumes por planta e o número de grãos por planta foram obtidos com contagem em 10 plantas por parcela, coletadas fora da área colhida para a determinação do rendimento de grãos e também excluindo as bordaduras. O peso de grãos foi determinado utilizando a média de três amostras de 100 grãos retiradas dos grãos colhidos para avaliação do rendimento de grãos.

3.2.5.3. Análises químicas do solo

Além das análises efetuadas anteriormente à instalação dos experimentos (Tabela 1), análises básicas foram efetuadas em amostras compostas por quatro sub-amostras de solo, coletadas aleatoriamente na área útil da parcela na camada 0 a 20 cm, no momento da colheita da soja.

3.2.5.4. Balanço de fósforo e potássio no solo e exportado pelos grãos de soja

O balanço de P e K foi efetuado para cada uma das doses dos fertilizantes adicionados, considerando a média de rendimento de grãos de cada tratamento. Os cálculos foram efetuados com base na exportação pelos grãos de soja de 14 kg de P₂O₅ e 20 kg de K₂O por Mg de grãos (CQFS RS/SC, 2004)

No solo, o balanço foi calculado com a transformação dos dados de fósforo e potássio (mg dm³) contidos nas análises básicas de solo após a colheita da soja, em kg de P e K por hectare.

3.2.5.5. Doses de máxima eficiência técnica e econômica de fósforo e potássio

As doses de P_2O_5 e K_2O para o rendimento de grãos de máxima eficiência técnica (DMET) foram estimadas em cada experimento a partir da função de produção: $y = a+bx+cx^2$, conforme Grimm (1970), que ao derivar e igualar a zero, permite o cálculo do valor de x , que é a DMET. A dose de máxima eficiência econômica (DMEE) foi obtida a partir da função lucro (L), que leva em consideração a função de produção da soja considerando a quantidade dos nutrientes aplicados (Y), o preço de venda da soja (V), o custo do fertilizante (F1) e os custos fixos (Fo). Logo, o lucro líquido (L) corresponde à fórmula (Grimm, 1970):

$$L = (Vy) - Fo - F1x, \text{ ou seja:}$$

$$L = V(a+bx+cx^2) - Fo - F1x,$$

que, após derivar e igualar a zero, fornece o valor de x , que vem a ser a DMEE. Para o cálculo, utilizaram-se os valores de R\$ 1,10, R\$ 1,33 e R\$ 1,34 por kg de soja, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente (CONAB, 2013).

3.2.6. Análises estatísticas

A análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados ordinários foi empregada para avaliar o comportamento das variáveis dependentes: o rendimento de grãos e seus componentes, o teor de fósforo e potássio no tecido foliar e no solo após a colheita da soja em função das variáveis independentes: doses de P_2O_5 e K_2O . O modelo estatístico utilizado foi:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \xi_{ij},$$

onde X_i é a variável independente, K_2O ou P_2O_5 na dose i ; Y_{ij} é a observação j de cada uma das variáveis dependentes i de X ; β_0 é a média das variáveis dependentes quando a variável independente é zero; β_1 e β_2 são os

coeficientes angulares que descrevem a variação de Y em função de X na potência 1 e 2, respectivamente; e ξ_{ij} é o desvio da observação Y_{ij} em relação ao valor predito \hat{Y}_i . Os ajustes dos dados ao modelo foram avaliados pelo valor do coeficiente de determinação e da sua diferença do valor zero ao nível de significância de 5 %.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Rendimento e componentes do rendimento de grãos de soja em função de doses de fósforo

A resposta da soja à adubação fosfatada na semeadura foi alta em todos os solos (Figura 1). O rendimento de grãos apresentou função quadrática e os coeficientes de determinação foram significativos ($p < 0,05$) em todos os locais. A resposta à adubação era esperada, visto que os teores de fósforo estavam abaixo do teor crítico (Tabela 2), conforme CQFS RS/SC, (2004). A média do rendimento de grãos do tratamento testemunha nos quatro experimentos foi alta (em torno de $3,00 \text{ Mg ha}^{-1}$), superior à média do Estado na safra 2012/13, que foi $2,70 \text{ Mg ha}^{-1}$ (CONAB, 2014), indicando boas condições naturais para o desenvolvimento das plantas.

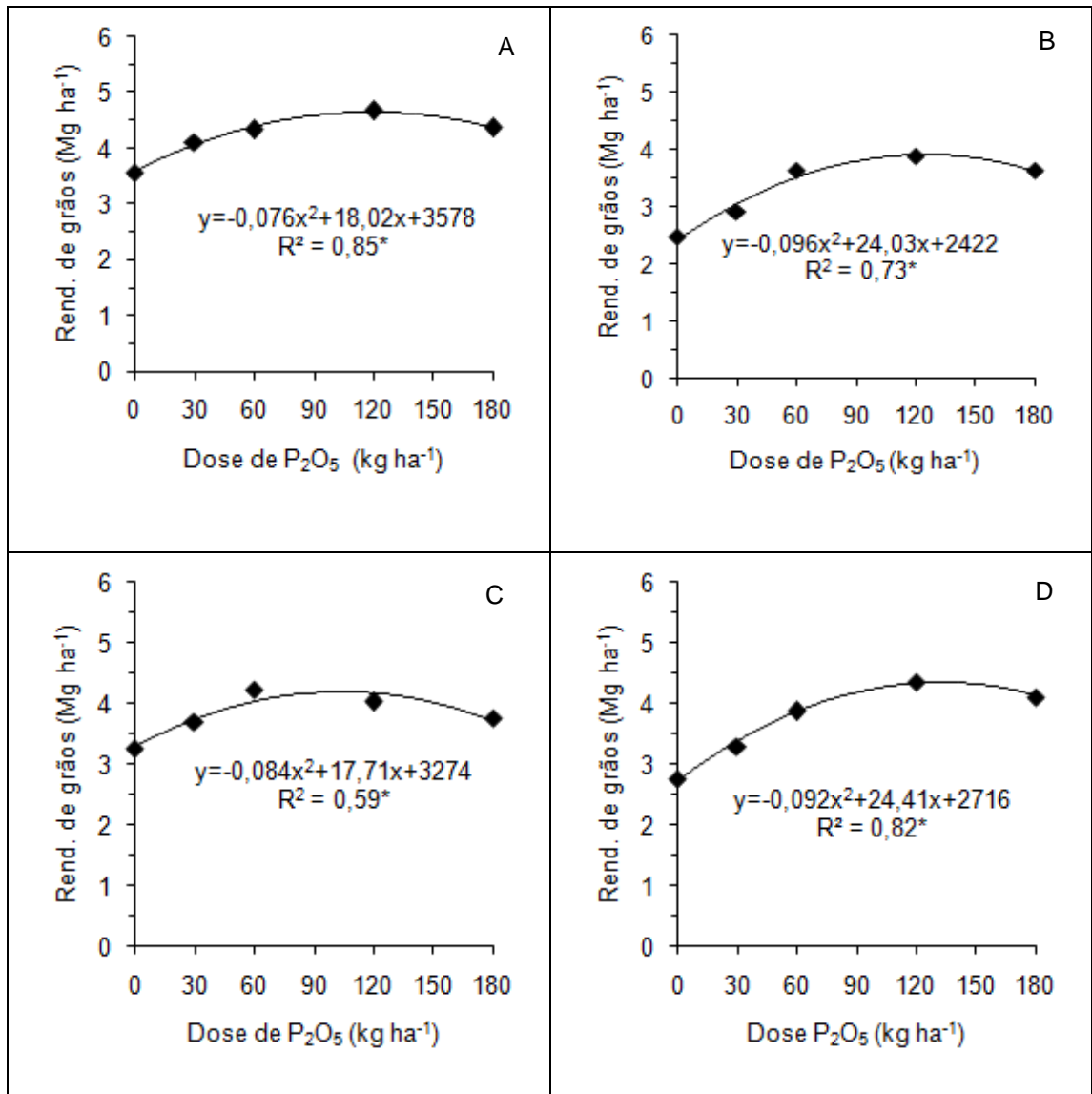


Figura 1: Rendimento de grãos de soja em terras baixas em função de doses de fósforo na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).

Em Cachoeirinha (Figura 1A), houve um alto incremento pela adubação ($1,07 \text{ Mg ha}^{-1}$), mesmo com o P estando na classe Médio. A alta produtividade da cultura e a alta resposta à adubação fosfatada ocorreram devido ao alto potencial produtivo da cultivar utilizada e também pelo manejo adequado empregado na condução do experimento. O incremento no rendimento de grãos pelo P em Cachoeira do Sul (Figura 1C) foi menor comparativamente aos demais locais, provavelmente por interferência negativa do adensamento no solo, advindo do histórico de frequente sistematização, revolvimento e cultivo de arroz irrigado e ausência de rotação de culturas. O baixo teor de matéria orgânica do solo (9 g dm^{-3}) (Tabela 1) é um indicativo do

uso intensivo do solo com arroz irrigado no sistema convencional de cultivo (arroz-soca).

A maior resposta em incremento no rendimento de grãos ocorreu em Capivari do Sul e em São Gabriel (1,50 e 1,66 Mg ha⁻¹, respectivamente) motivado pelo menor teor de P disponível do solo (Muito baixo). Essa resposta está de acordo com a lógica da calibração, que indica alta probabilidade de resposta à adição do P quando o solo está com baixo teor desse nutriente.

Corroborando a lógica da calibração, Londero (2012) não obteve resposta em rendimento de soja à adição de até 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹ em Planossolo Háplico da Depressão Central, em duas safras consecutivas, uma vez que o teor de P do solo se encontrava na classe Alto (CQFS RS/SC, (2004).

Os solos utilizados no presente trabalho possuem, por sua origem e formação, uma menor capacidade de adsorção de P comparativamente com os solos da metade Norte do Estado (Ranno, 2004). Este fato é relevante e impõe alterações na dinâmica do P nos solos de terras baixas comparativamente aos solos de terras altas e também justifica a alta produtividade do tratamento testemunha, mesmo com teores deste nutriente nas classes Baixo e Muito baixo. Além disso, a difusão do P pode ter sido facilitada pelo regime hídrico favorável e pela não ocorrência de deficiência hídrica nos experimentos devido às chuvas e também às suplementações hídricas realizadas em Cachoeirinha e em Cachoeira do Sul. A difusão é o principal mecanismo de transporte do P até as raízes e nas terras baixas este mecanismo pode ser facilitado pela maior disponibilidade hídrica (Barber, 1995; Costa et al., 2006).

O número de legumes por planta (Figura 2) também apresentou um aumento com as doses de P e, em todos os experimentos, o ajuste foi quadrático com coeficientes de determinação significativos ($p < 0,05$). O número de legumes por área ou por planta é o principal componente do rendimento de grãos de soja (Thomas & Costa, 2010).

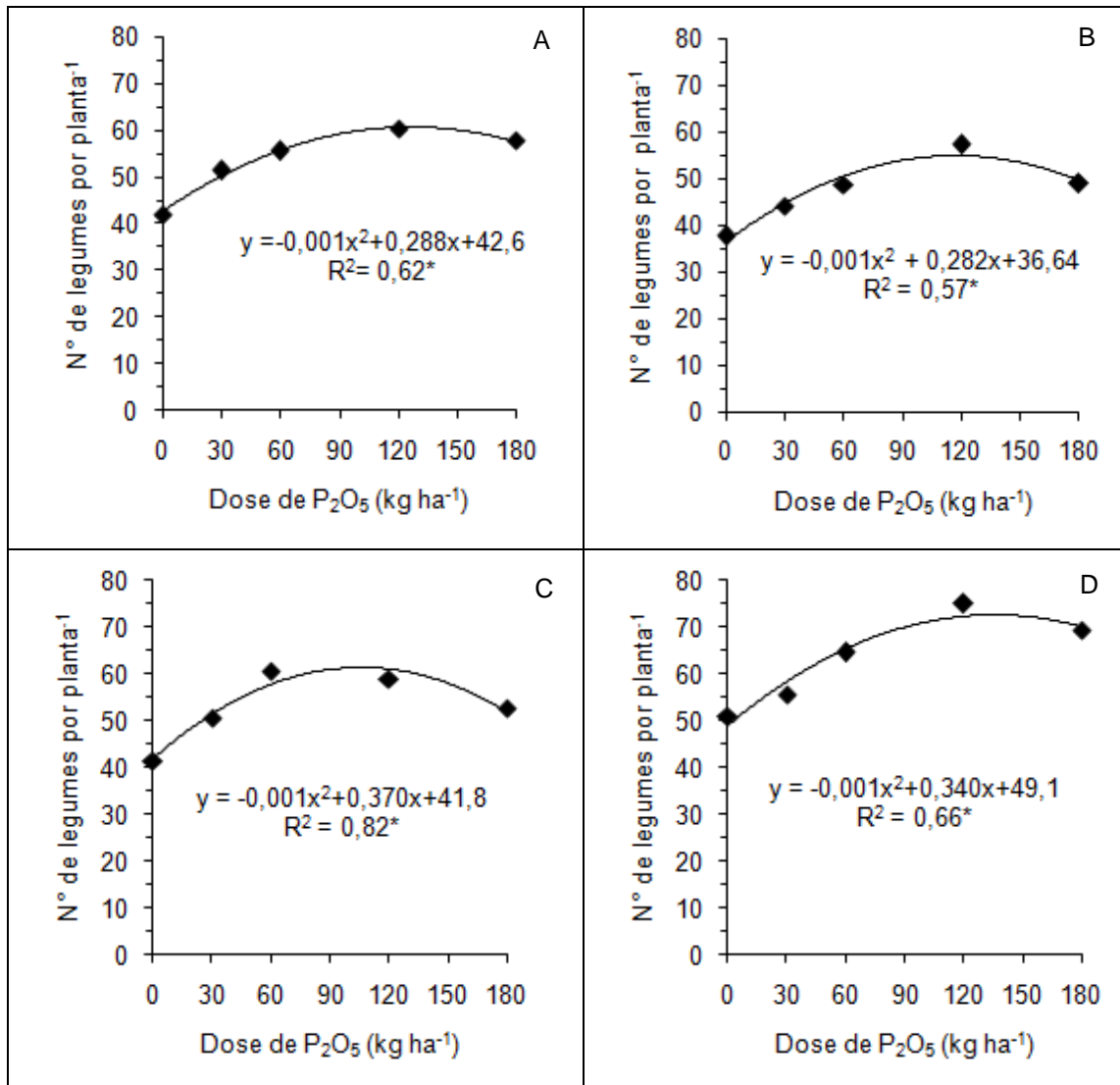


Figura 2: Número de legumes em plantas de soja em terras baixas em função de doses de fósforo na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).

No estudo de Londero (2012), os componentes do rendimento não foram alterados ($p > 0,05$). Há de se considerar nesse trabalho que, além do solo estar bem suprido de P, não foi realizada a suplementação hídrica e, em uma das safras, a semeadura foi realizada no mês de janeiro, fora do período recomendado para a semeadura da soja naquela região (Indicações, 2012), portanto, em condição adversa ao desenvolvimento da cultura.

O número de grãos por planta também aumentou com as doses de P aplicadas na semeadura (Figura 3). Em todos os experimentos, houve ajuste quadrático para essa variável e diferença significativa ($p < 0,05$). O aumento do número de grãos por planta é correlacionado com o aumento do número de

legumes, pois o número de grãos por legume, por ser uma característica de determinação genética, é o componente do rendimento que apresenta a menor variação em função do manejo (Thomas & Costa, 2010). O peso de grãos não foi afetado pelas doses de P e os resultados estão apresentados no apêndice (Figura 17).

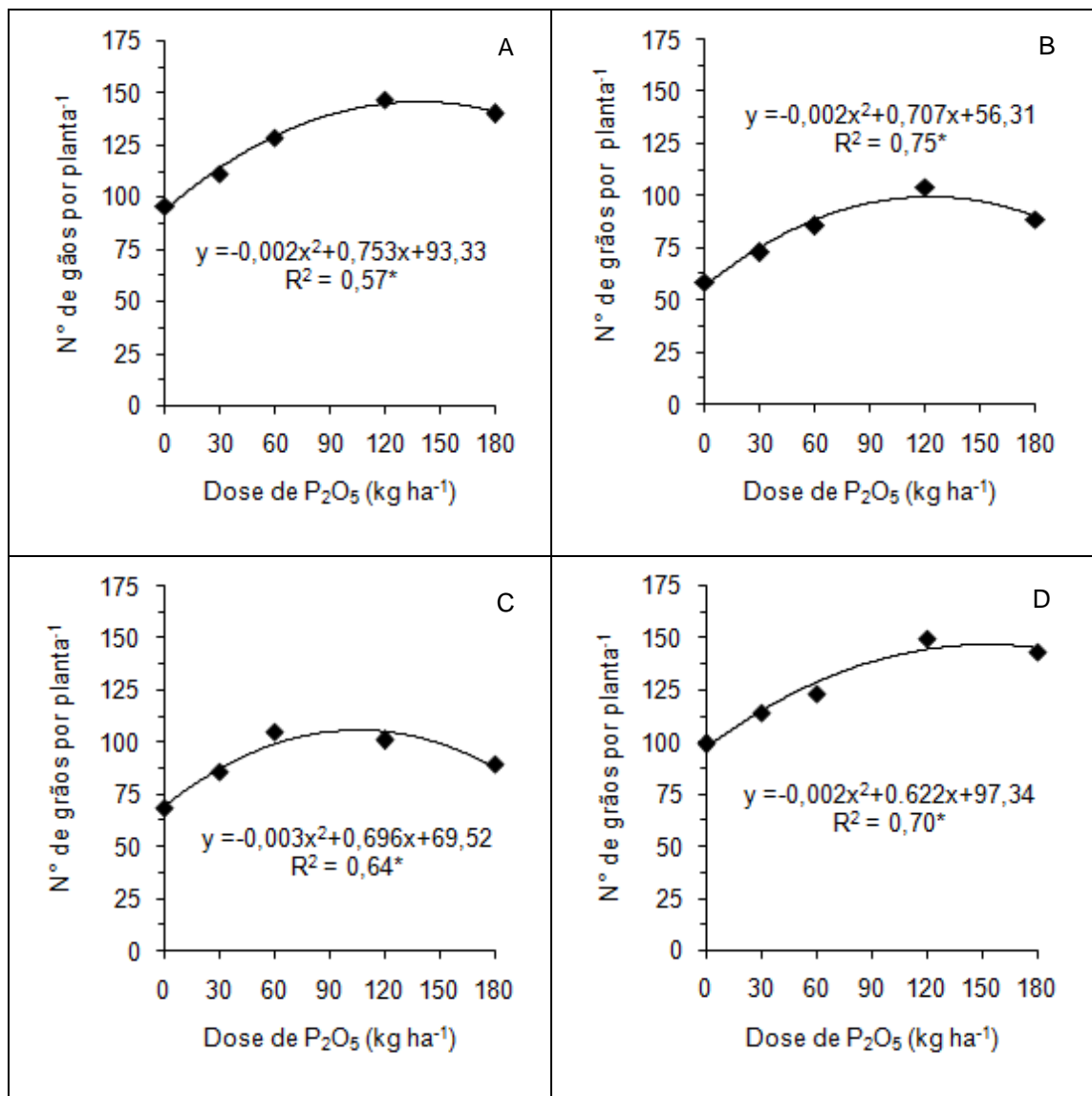


Figura 3: Número de grãos por planta de soja em terras baixas em função de doses de fósforo na semeadura, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).

3.3.2 Dose de fósforo de máxima eficiência técnica e econômica

As doses de P₂O₅ de máxima eficiência técnica (DMET), o rendimento de grãos com a DMET, a dose de P₂O₅ de máxima eficiência

econômica e o incremento no rendimento de grãos pelo P são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Dose de máxima eficiência técnica (DMET), rendimento de grãos de soja obtido com a dose de máxima eficiência técnica (Rend DMET), dose de máxima eficiência econômica (DMEE) e incremento no rendimento de grãos de soja pela adição de fósforo nos diferentes locais. Safra 2012/13.

LOCAL	DMET	Rend. DMET	DMEE	Incremento
	kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹
Cachoeirinha	118	4,65	110	1,07
Capivari do Sul	125	3,90	119	1,50
Cachoeira do Sul	105	4,20	98	0,93
São Gabriel	133	4,30	126	1,62
MÉDIA	120	4,26	113	1,28

A DMET média dos quatro experimentos foi de 120 kg de P₂O₅ ha⁻¹, com rendimento de 4,26 Mg ha⁻¹ e incremento de grãos pelo fósforo de 1,28 Mg ha⁻¹. A DMEE de 113 kg de P₂O₅ ha⁻¹ foi próxima da DMET, motivada pela favorável relação preço da soja/preço do P. Em experimentos de calibração da adubação fosfatada em plantio direto no planalto do RS (Schlindwein & Gianello, 2005) constataram que, em média, a DMEE foi de 78 kg ha⁻¹ e a DMET em 121 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com rendimento de grãos próximo a 3,00 Mg ha⁻¹, com o teor Médio de P disponível.

Em Cachoeirinha, único local com teor de P disponível classificado como Médio, a DMET (Tabela 3) foi semelhante à encontrada por Schlindwein & Gianello, (2005) em plantio direto em terras altas. Já a DMEE foi maior em Cachoeirinha, também motivada pela relação preço da soja/preço do fertilizante fosfatado. Considerando que nos solos de várzea no RS há predominância das classes Muito baixo ou Baixo de teores de P (Vedelago et al., 2012), os resultados encontrados evidenciam a necessidade da adubação fosfatada ser adequadamente dimensionada, o que contribuirá para a obtenção de produtividades mais próximas do potencial produtivo da soja cultivada nesses solos, desde que o manejo seja adequado.

Outra diferença entre o presente estudo em relação àquele realizado em terras altas (Schlindwein & Gianello, 2005), está no rendimento das parcelas testemunhas, que foi de aproximadamente 2,40 Mg ha⁻¹, enquanto

que no presente estudo, a média do rendimento foi de 2,98 Mg ha⁻¹ (Tabela 4), sendo superior à média do Estado na safra 2012/13, que foi 2,70 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2014), e os rendimentos máximos foram próximos ou superiores a 4,00 Mg ha⁻¹. O incremento médio pelo P foi superior a 1,20 Mg ha⁻¹, sendo o dobro do incremento médio em plantio direto (0,6 Mg ha⁻¹) encontrado no estudo de Schlindwein & Gianello, (2005). Esses resultados evidenciam que os ensaios do atual estudo foram conduzidos em condições que possibilitaram a expressão do potencial de rendimento de grãos, sem a ocorrência de fatores limitantes extremos.

3.3.3. Teor de fósforo no tecido foliar da soja

Apesar da tendência apresentada, não houve efeito das doses de P₂O₅ no teor de P no tecido foliar. Em todos os experimentos o coeficiente angular é pequeno, próximo a zero e o coeficiente de determinação não foi significativo ($p < 0,05$).

Londero (2012) também não constatou aumento no teor de P no tecido foliar com o aumento das doses de P₂O₅ aplicadas na semeadura. Conforme mencionado anteriormente, naquele experimento também não houve incremento no rendimento de grãos pelo P justificado pelo teor na classe Alto de P do solo, porém, o teor foliar apresentou-se abaixo do suficiente (Sfredo et al., 1986; CQFS RS/SC, 2004; Harger, 2008).

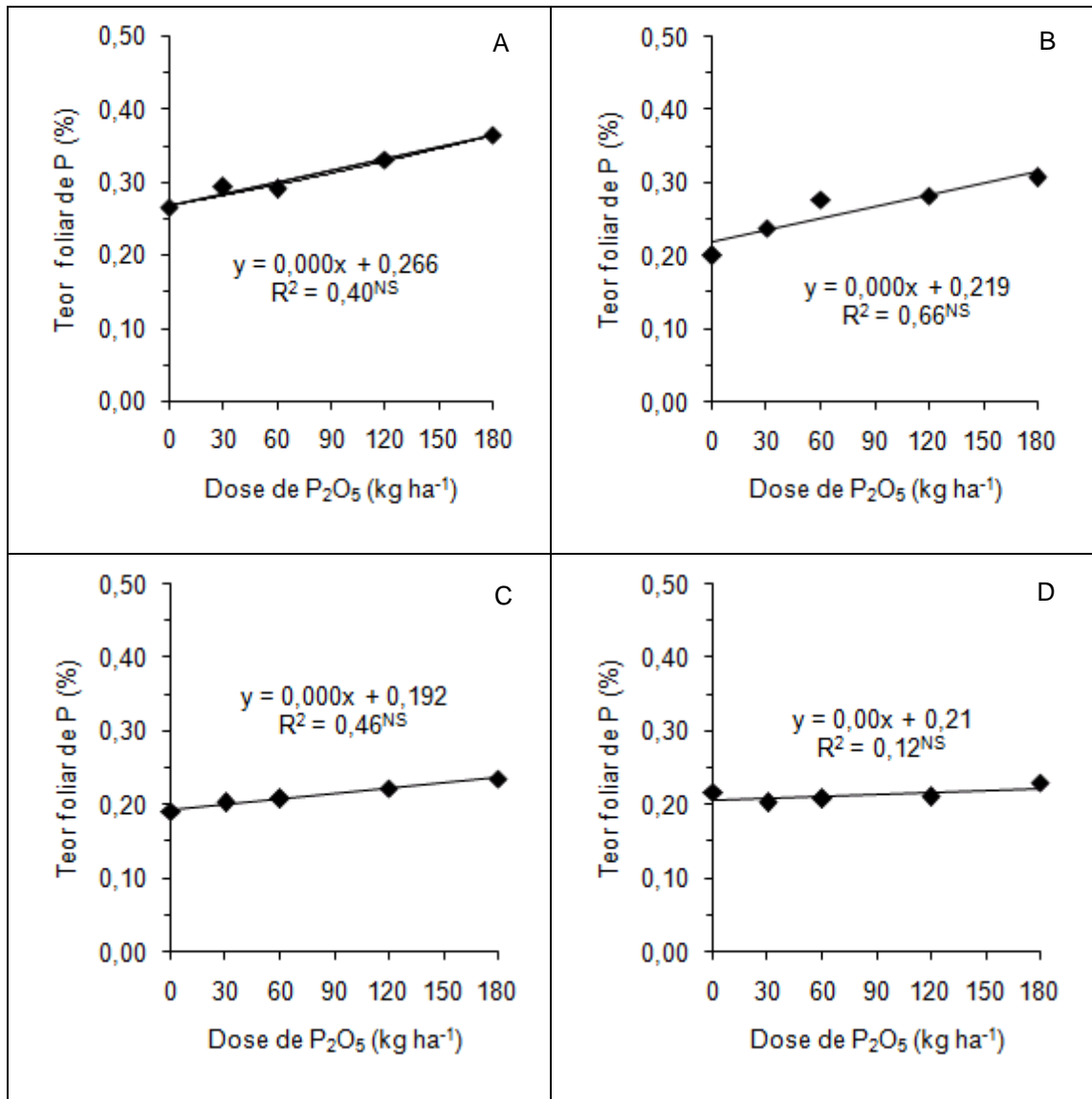


Figura 4: Teor de fósforo no tecido foliar da soja submetida a doses de fertilizante fosfatado na semeadura em terras baixas. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. ^{NS}Não significativo ($p > 0,05$).

Na literatura, há uma distinção na interpretação dos teores foliares de nutrientes entre a coleta de folhas com ou sem pecíolo, entre as cultivares com tipo de crescimento indeterminado e determinado e há, ainda, questionamentos para a definição da folha diagnóstica e dos padrões nutricionais. Diante disso, fica evidente que é necessário investigar com mais profundidade os teores padrão para fins de diagnose foliar (Harger, 2008).

Tendo como referência os padrões nutricionais adotados pela CQFS RS/SC (2004), com faixa de suficiência entre 0,26 a 0,5%, o teor de P no tecido foliar foi classificado como suficiente para todos os tratamentos em Cachoeirinha e em Capivari do Sul a partir da dose de 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Em

Cachoeira do Sul, com cultivar de crescimento determinado, os teores de P no tecido foliar apresentaram-se abaixo da faixa de suficiência em todos os tratamentos. Em São Gabriel, os teores foliares de P encontraram-se abaixo da faixa de suficiência, porém, há de se considerar que a coleta das folhas foi realizada após o período recomendado (R3) e isto pode ter influenciado os resultados.

3.3.4. Exportação e balanço de fósforo na cultura e no solo após a colheita da soja

A exportação de nutrientes pelos grãos de soja e o balanço entre a adição e exportação são importantes indicativos para o manejo da fertilidade do solo. O balanço de fósforo, considerando-se somente as entradas pela adubação e saídas nos grãos (Tabela 4) foi negativo com doses baixas, tendeu ao equilíbrio com doses médias (próximo de 60 kg de P_2O_5 ha⁻¹) e tornou-se positivo com doses altas. É importante considerar que nesse estudo o potencial produtivo foi alto.

Tabela 4. Exportação e balanço de fósforo pelos grãos de soja dos quatro experimentos em função de doses de P_2O_5 . Safra 2012/13.

P_2O_5		Balanço	Rendimento
Adicionado	Exportado ¹		
----- kg ha ⁻¹ -----			(Mg ha ⁻¹)
0	42	-42	2,98
30	49	-19	3,50
60	55	5	3,95
120	60	60	4,25
180	55	125	3,93

¹Exportado pelos grãos, com base em 14 kg de P_2O_5 por tonelada (CQFS RS/SC, 2004).

O teor de P disponível no solo após a colheita (Figura 5) aumentou com o aumento das doses aplicadas em dois locais (Capivari e Cachoeira do Sul), enquanto nos outros dois locais (Cachoeirinha e São Gabriel) não foi afetado. Esta variabilidade decorre do manejo empregado tradicionalmente no cultivo de arroz irrigado, que demanda constantes operações de preparo e

aplainamento da superfície do solo, associado à baixa mobilidade do fósforo, resultando em variabilidade horizontal e vertical no solo (Anghinoni & Salet, 1998; Schlindwein & Anghinoni, 2000).

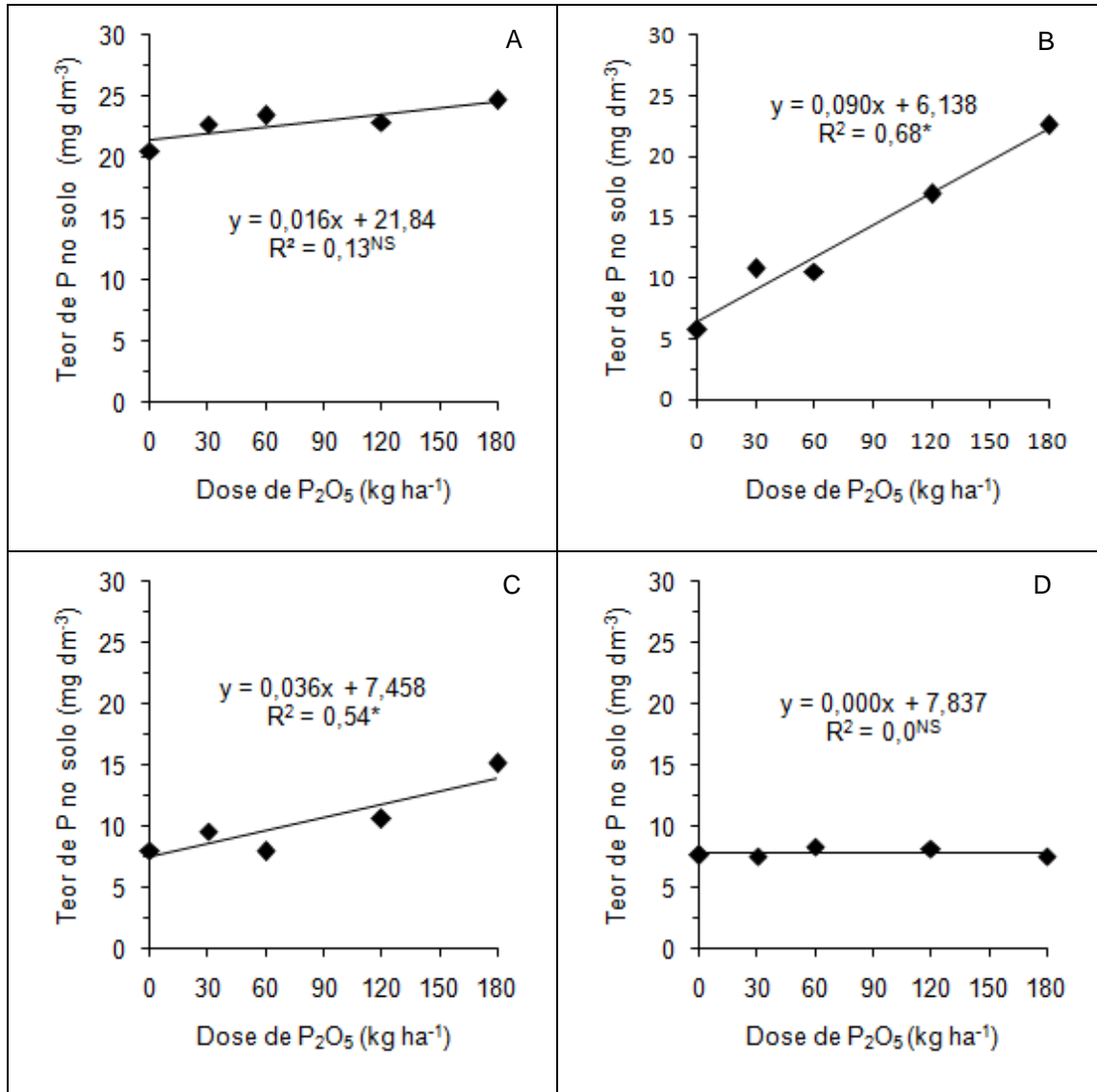


Figura 5: Teor de fósforo (Mehlich 1) no solo após a colheita da soja submetida a doses de P₂O₅ na adubação de semeadura em terras baixas. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$); ^{NS} Não significativo

No trabalho de Londero (2012), houve um aumento do teor de P do solo após dois anos consecutivos mantendo os mesmos tratamentos nas mesmas parcelas, que foi mais pronunciado a partir da dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Nesse trabalho, além do solo estar na classe Alto, houve também aumento no teor desse nutriente no tratamento testemunha, o que não era esperado, por sua remoção na colheita.

O balanço médio final na camada arável (0 – 20 cm) do solo dos quatro experimentos foi positivo para todas as doses desse nutriente (Tabela 5) indicando que, praticamente, não há perdas desse nutriente do sistema, apesar do escoamento superficial de água após as chuvas.

Tabela 5. Estoque inicial e final de P no solo (camada 0 – 20 cm) após cultivo de soja em função de doses de fósforo na adubação de semeadura nos diferentes locais. Safra 2012/13.

Local	Estoque inicial	P ₂ O ₅ aplicado (kg ha ⁻¹)				
		0	30	60	120	180
		-----P no solo (kg ha ⁻¹)-----				
Cachoeirinha	40	41	45	47	46	49
Capivari do Sul	11	12	22	21	34	45
Cachoeira do Sul	15	16	19	16	21	30
São Gabriel	9	15	15	17	16	15

3.3.5. Rendimento de grãos e componentes do rendimento de grãos de soja em função de doses de potássio

Houve aumento de rendimento de grãos de soja à adubação potássica nos quatro experimentos (Figura 6), com ajuste à função quadrática ($p < 0,05$). Considerando-se que o teor de K do solo era Alto em Cachoeirinha e Médio nos demais locais, as respostas da soja à aplicação de K nesses locais foram maiores do que esperado. Isto indica que as respostas da soja cultivada em terras baixas são mais evidentes daquelas obtidas em terras altas, conforme relatado por Schlindwein & Gianello (2005). É importante ressaltar também que tais respostas ocorreram a partir de produtividades altas nas parcelas testemunha: 3,60, 2,80, 2,50 e 3,00 Mg ha⁻¹, respectivamente, em Cachoeirinha, Capivari do Sul, Cachoeira do Sul e São Gabriel (Figura 6).

Da mesma forma, chama atenção a alta produtividade obtida nas doses mais altas de K, atingindo patamares de 4,85, 4,50, 3,90 e 3,50 Mg ha⁻¹, respectivamente, em Cachoeirinha, Capivari do Sul, Cachoeira do Sul e São Gabriel (Figura 6). A menor resposta à adubação potássica em São Gabriel deve-se, provavelmente, à contribuição de potássio não trocável presente nos argilominerais 2:1, pelo caráter vértico do solo, um Planossolo Háplico Eutrófico vertissólico (Sparks, 2000; Meurer & Anghinoni, 1993; Castilhos & Meurer, 2002) e a menor produtividade naquele experimento.

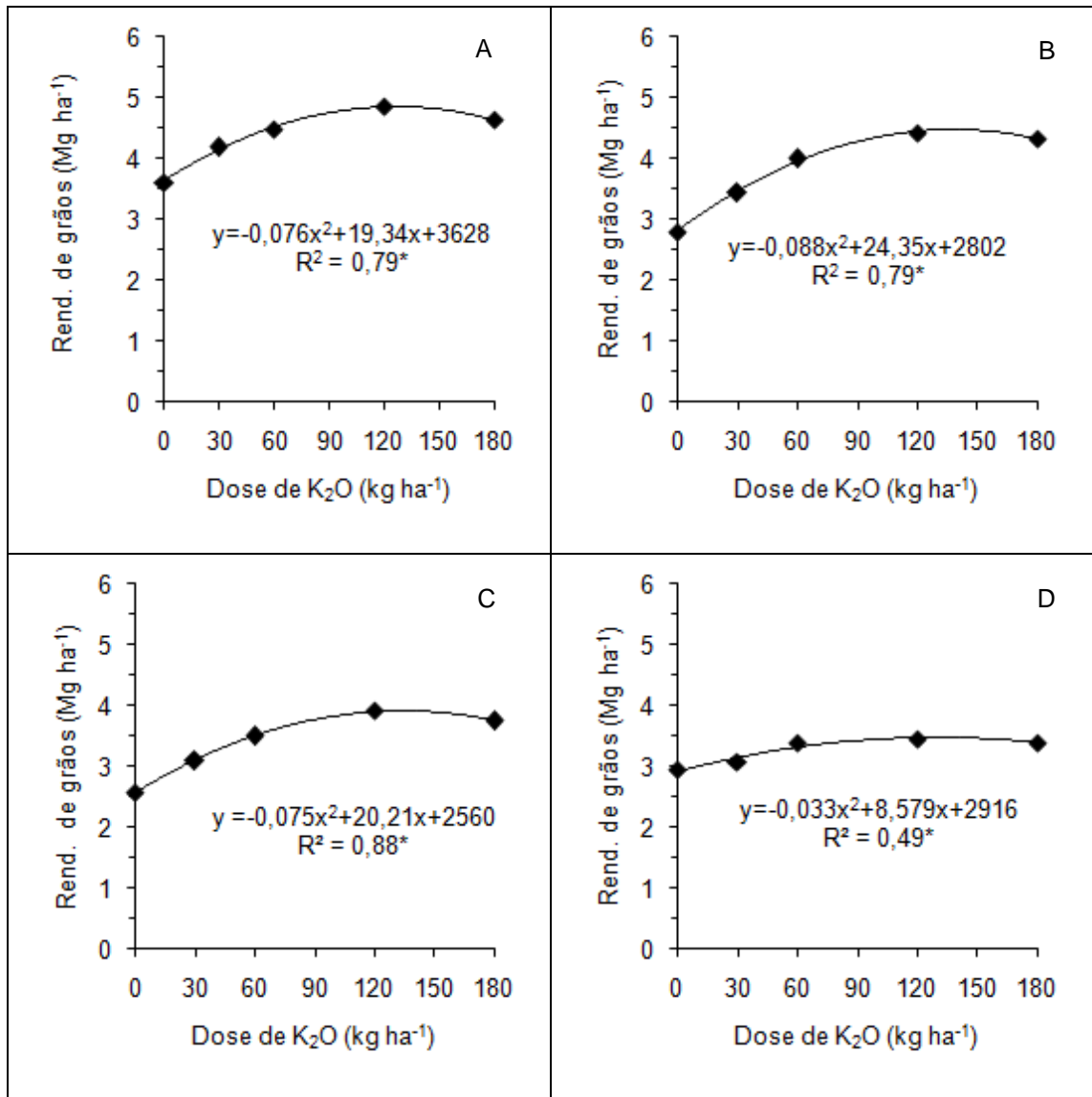


Figura 6: Rendimento de grãos de soja em terras baixas em função de doses de potássio aplicadas na semeadura. Safra 2012/13. (A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel). *Significativo ($p < 0,05$).

Na comparação com a resposta da soja a P (Figura 1), e a exemplo do observado por Snyder et al. (2013), em Arkansas (EUA), a resposta dessa cultura a K tem sido maior e mais frequente.

Essa magnitude de resposta à adubação potássica e produtividade de grãos não se manifesta em todos os genótipos de soja. A maior chance de resposta é encontrada nos genótipos com baixa estatura, entrenós curtos e com baixo índice de área foliar, como os utilizados nos experimentos. Caso contrário, a adubação não se traduz em aumento no rendimento de grãos, impactando negativamente no índice de colheita (Lange et al., 2014).

A resposta a K no rendimento de grãos é mais acentuada em situações onde é empregado um adequado manejo da cultura, especialmente quando não há limitação hídrica. Este fato proporciona às plantas uma grande capacidade de fixar legumes, que demandam maior quantidade de K para o enchimento dos grãos. As consequências da limitação nutricional de K se manifestam principalmente no terço superior das plantas (Figura 7). Este fato fica mais evidente em cultivares de soja com crescimento indeterminado, pois os nutrientes são demandados em maiores quantidades inicialmente na formação dos grãos do terço inferior e médio das plantas, fato que provoca o aparecimento da deficiência no terço superior.

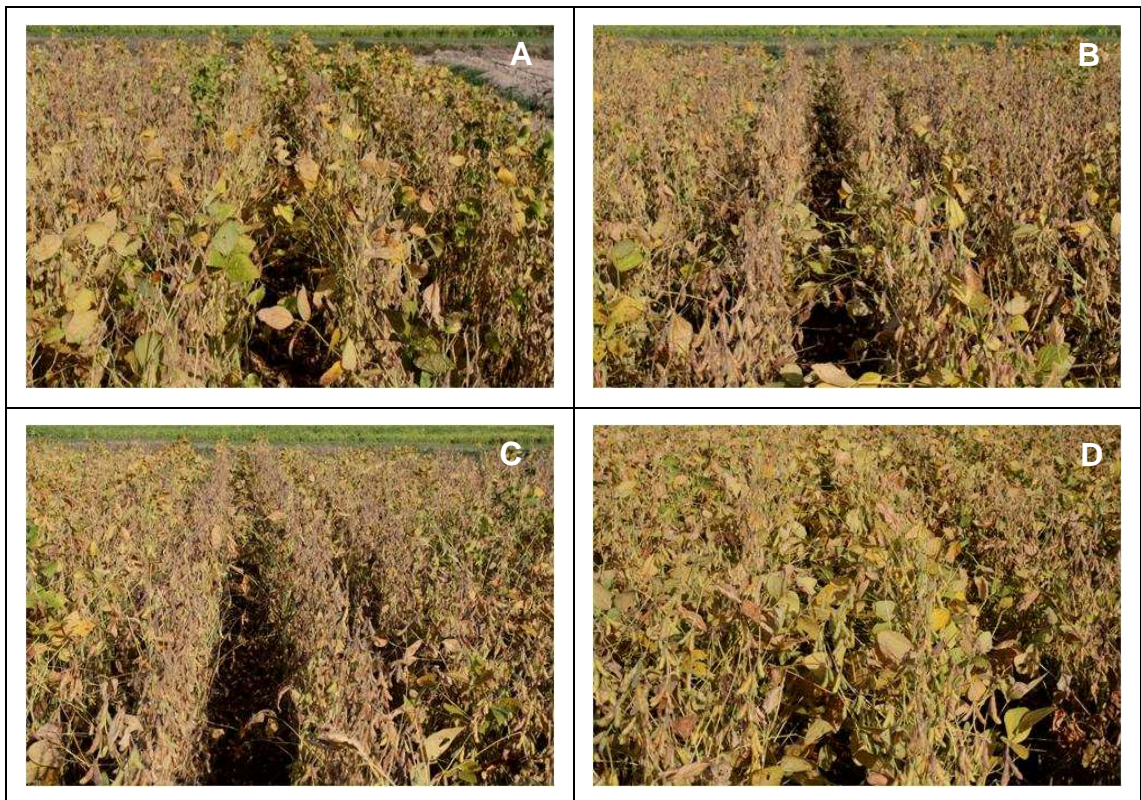


Figura 7: Imagens de parcelas com doses de potássio na semeadura em Cachoeirinha. A: testemunha; B, C e D com 30, 60 e 120 kg de K_2O ha^{-1} , respectivamente.

Na literatura do Paraná, entretanto, essa questão é controversa, pois, para Sfredo & Borkert (2004), a manifestação de sintomas visuais de deficiência de K ocorre no terço inferior da soja e para Oliveira Júnior et al. (2013) essa deficiência, a exemplo do presente trabalho, ocorre no terço superior.

Os componentes do rendimento da soja variaram com a aplicação do K. O número de legumes por planta (Figura 8) apresentou resposta quadrática, com coeficiente de determinação significativo ($p < 0,05$) em todos os locais. Os maiores incrementos foram verificados em Capivari do Sul e em Cachoeira do Sul, mas também em Cachoeirinha, com teor Alto de K no solo. Em São Gabriel, o incremento foi menor, pela menor produtividade e pela possível contribuição de K não trocável, como anteriormente citado.

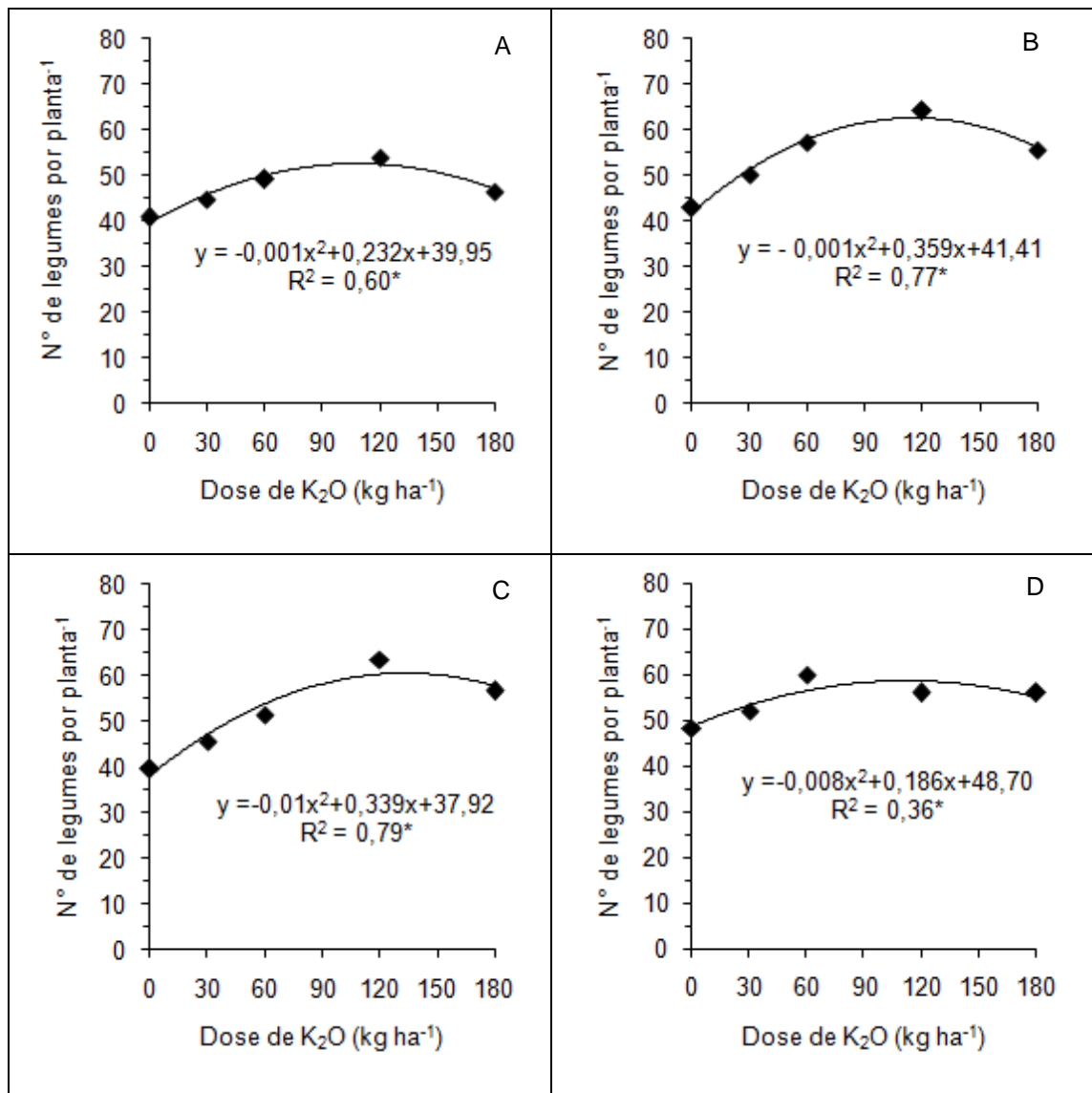


Figura 8: Número de legumes em plantas de soja em terras baixas em função de doses de potássio aplicadas na sementeira, na safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).

O número de grãos por planta (Figura 9) também foi afetado pela adubação potássica. Houve ajuste ao modelo quadrático, com coeficientes de

determinação significativos ($p < 0,05$) em todos os experimentos. Este componente do rendimento de grãos é associado ao número de legumes, e esses dois juntos explicam os aumentos no rendimento de grãos (Figura 6). O peso de grãos não sofreu alteração, sendo este apresentado no apêndice (Figura 18).

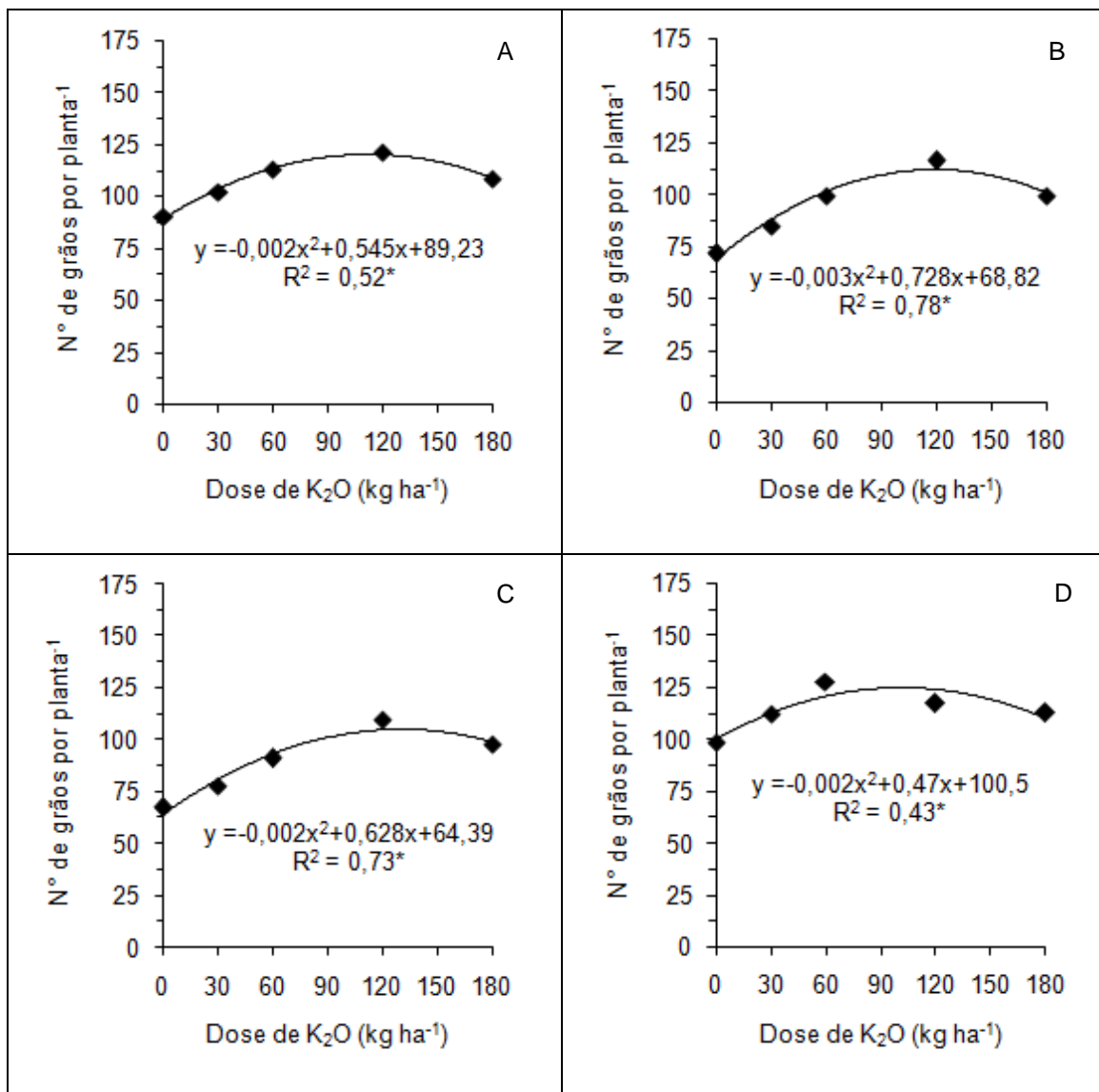


Figura 9: Número de grãos em plantas de soja em terras baixas em função de doses de potássio aplicadas na semeadura, na safra 2012/13 A: Cachoerinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).

3.3.6. Dose de máxima eficiência técnica e econômica de potássio

As doses de máxima eficiência técnica (DMET) e econômica (DMEE) para o potássio são apresentadas na Tabela 6. A DMET média foi de 132 kg de K₂O ha⁻¹, com incremento no rendimento de grãos pelo K de 1,21 Mg ha⁻¹ e a DMEE foi de 122 kg de K₂O ha⁻¹.

Tabela 6. Dose de máxima eficiência técnica (DMET), rendimento de grãos de soja obtido com a dose de máxima eficiência técnica (Rend DMET), dose de K₂O de máxima eficiência econômica (DMEE) e incremento no rendimento de grãos de soja pela adição de potássio. Safra 2012/13

Local	DMET	Rend. DMET	DMEE	Incremento
	kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹
Cachoeirinha	127	4,85	119	1,23
Capivari do Sul	138	4,50	131	1,68
Cachoeira do Sul	135	3,90	126	1,36
São Gabriel	130	3,50	111	0,56
MÉDIA	132	4,19	122	1,21

A variação, tanto da DMET como da DMEE, foi pequena entre os locais, pela similaridade de disponibilidade de K ao solo (Tabela 1). Os valores relativamente próximos dessas doses deve-se ao fato das condições favoráveis de custo do fertilizante potássico, mas especialmente do preço da soja. O experimento conduzido em São Gabriel apresentou a menor magnitude de resposta e a DMEE foi relativamente mais baixa. As maiores DMEE ocorreram em Capivari do Sul, seguido de Cachoeira do Sul (131 e 126 kg de K₂O ha⁻¹), estando relacionadas aos maiores incrementos de produtividade (1,68 e 1,36 Mg ha⁻¹) pela aplicação de K. Comparando os valores de DMEE (Tabela 6) com a recomendação da CQFS RS/SC (2004), que é de 95 kg de K₂O ha⁻¹ para expectativa de colheita de 4 Mg ha⁻¹ para teores de K do solo Médio ou Alto, observa-se que tais recomendações subestimam a quantidade de potássio a ser utilizada na adubação para a soja para alta produtividade em terras baixas. No presente estudo, a média de rendimento de grãos do tratamento testemunha dos quatro experimentos foi de 2,98 Mg ha⁻¹ e essa produtividade deve ser considerada na recomendação de adubação.

Em 28 safras de 17 locais no RS, Schindwein (2003) observou grande variabilidade de rendimento da soja, mesmo na ausência do fertilizante

potássico (variação de 1,41 a 3,67 Mg ha⁻¹). Esses resultados estão associados às diferenças nas características químicas e mineralógicas dos solos estudados, à eficiência de utilização do fertilizante, às condições meteorológicas e ao manejo da cultura. Ao utilizar os experimentos que apresentaram funções quadráticas de resposta à adição de K₂O, esse autor encontrou 182 kg ha⁻¹ de K₂O como DMET e o rendimento de grãos estimado foi de 2,70 Mg ha⁻¹, enquanto que a DMEE foi de 120 kg ha⁻¹ de K₂O e o rendimento de grãos estimado em 2,63 Mg ha⁻¹.

3.3.7. Teor de potássio no tecido foliar da soja

O teor de K no tecido foliar (Figura 10) aumentou em três dos quatro locais com a aplicação de fertilizante potássico na semeadura da soja. A exceção foi o experimento conduzido em São Gabriel, o qual, assim como citado anteriormente para o P, as folhas foram coletadas no estágio R3 (Fehr & Caviness, 1977) e em Capivari do Sul, apesar do aumento no teor de potássio o ajuste não foi significativo ($p > 0,05$).

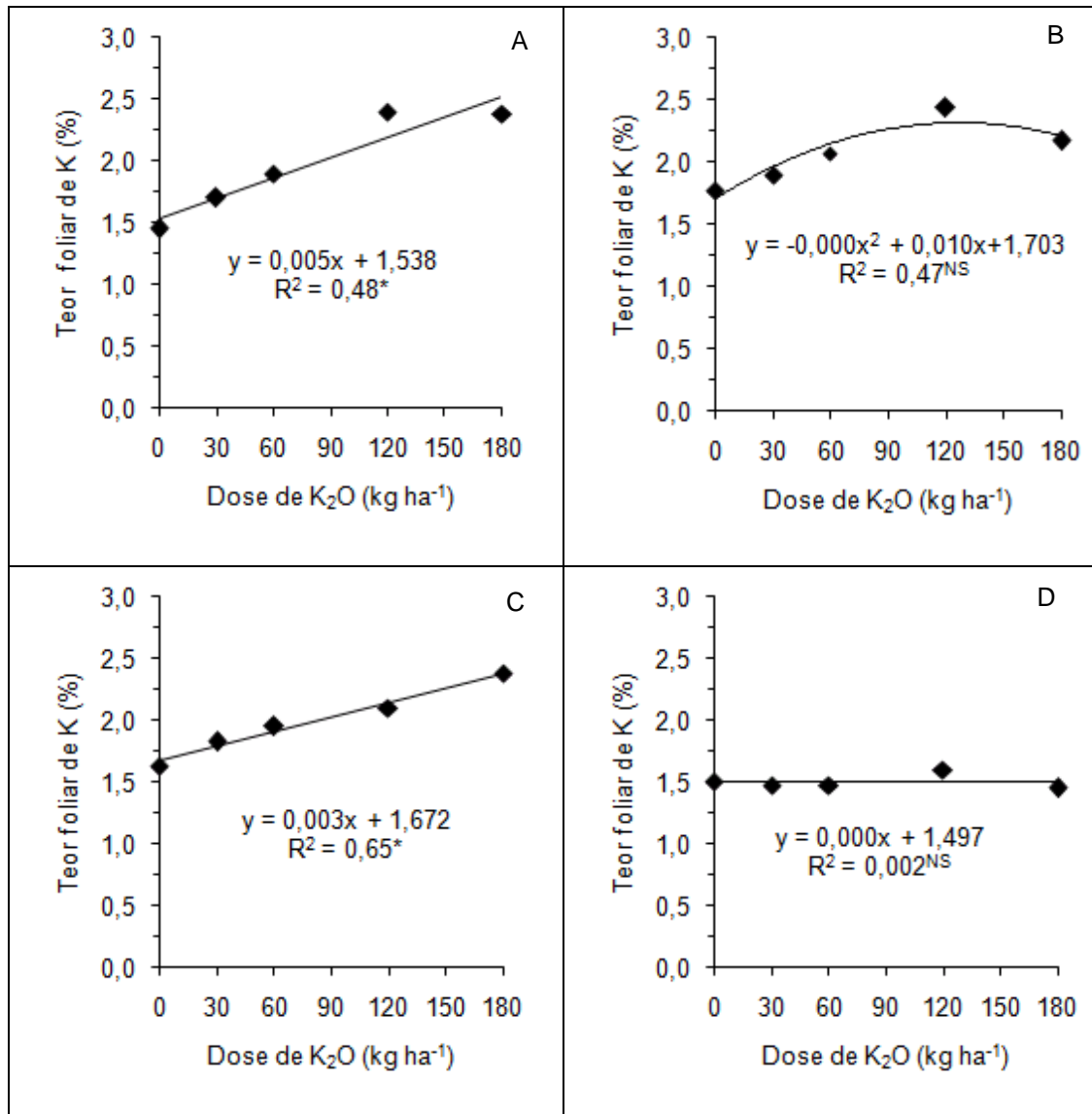


Figura 10: Teor de potássio no tecido foliar da soja no período reprodutivo em função de doses de fertilizante potássico aplicado na semeadura em terras baixas. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$); ^{NS}Não significativo

Os sintomas visuais de deficiência de K manifestaram-se no terço superior das plantas em Cachoeirinha, Capivari do Sul e em Cachoeira do Sul. Esses sintomas foram observados apenas nas doses baixas, que se refletiram no menor rendimento de grãos. Na literatura, praticamente não há diferenças na interpretação do teor de K no tecido foliar (CQFS RS/SC, (2004); Raji et al., (1997) e Harger, (2008) - adequado de 1,7 a 2,5 %). Considerando essa faixa de suficiência, Londero (2012) encontrou teor de K no tecido foliar suficiente somente com alta dose de K₂O. Entretanto, há uma série de fatores que podem alterar o teor de nutrientes no tecido foliar da soja e que dificultam o estabelecimento correto das faixas de interpretação. As principais limitações no

estabelecimento das faixas adequadas de teor de nutrientes no tecido foliar são advindas da variabilidade de tipos de solo, material de origem do solo, condições meteorológicas, manejo, cultivares, tipos de crescimento determinado e indeterminado e estágio fenológico para o diagnóstico (Raij, 1991; Malavolta et al., 1997; Borkert et al., 1994).

3.3.8 Exportação e balanço de potássio na cultura e no solo após a colheita da soja

A exportação de K pelos grãos de soja e o balanço nos quatro experimentos (Tabela 7) apresenta um comportamento semelhante comparativamente ao P anteriormente citado.

Tabela 7. Exportação e balanço de potássio pelos grãos de soja dos quatro experimentos em função de doses de K₂O. Safra 2012/13.

K ₂ O		Balanço	Rendimento
Adicionado	Exportado ¹		
----- kg K ₂ O ha ⁻¹ -----			Mg ha ⁻¹
0	60	-60	2,98
30	69	-39	3,45
60	77	-17	3,85
120	83	38	4,13
180	80	100	4,00

¹Exportado pelos grãos, com base em 20 kg de K₂O por tonelada (CQFS RS/SC, 2004).

Em virtude da alta produtividade dos experimentos e da alta exportação pelos grãos, o balanço é negativo na ausência e na adição de doses baixa e média (30 e 60 kg ha⁻¹) de K₂O. Para manter ou melhorar a fertilidade do solo é necessário atender a demanda de nutrientes das culturas, o que ocorreu somente com altas doses (120 e 180 kg ha⁻¹) de K₂O. Oliveira Júnior et al. (2013) encontraram resultados semelhantes em solos do Estado do Paraná, com balanço negativo de K na soja em lavouras e experimentos de alta produtividade com baixa adição de K.

O teor de K no solo após a colheita da soja (Figura 11) diminuiu em todos os locais no tratamento testemunha, comparativamente ao valor inicial (Tabela 2), fato esperado em função da exportação pelos grãos.

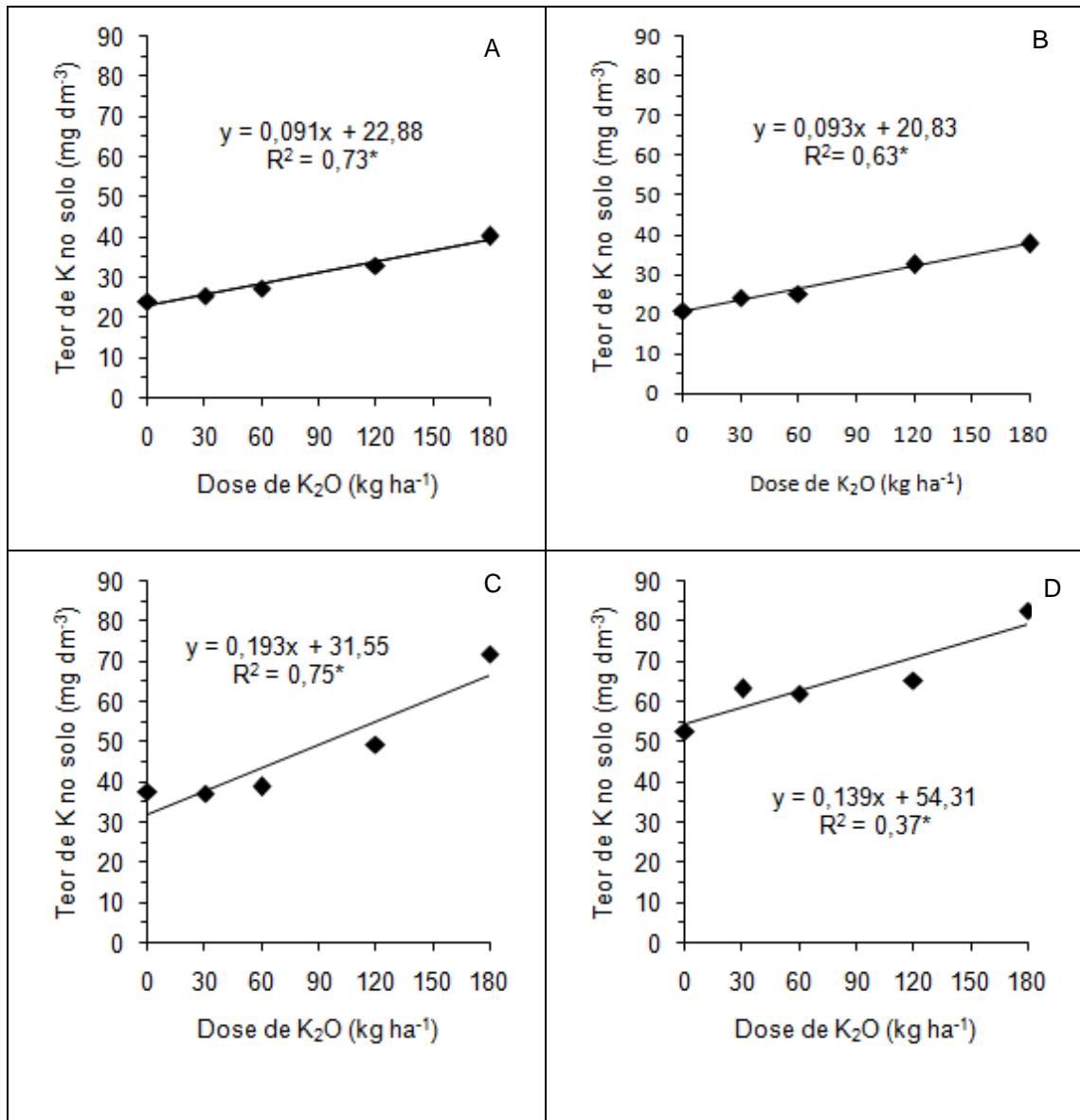


Figura 11: Teor de potássio no solo após a colheita da soja submetida a doses de K_2O na adubação de semeadura em terras baixas.. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel. *Significativo ($p < 0,05$).

A menor diferença entre o teor inicial (Tabela 1) e após a colheita (Figura 11) ocorreu em Cachoeira do Sul e em São Gabriel. Nesses locais provavelmente há uma maior taxa de reposição da fase sólida para a solução do solo em função da presença de argila 2:1, com K nas entrecamadas (Meurer & Anghinoni, 1993; Brunetto et al., 2005).

Aumento do teor de K em Planossolo do RS após dois anos de cultivo de soja, com reaplicação desse nutriente nas mesmas parcelas, foi observado por Loder (2012) a partir de 60 kg de K_2O ha⁻¹, mais evidente na camada de 0 - 5,0 cm.

O teor de K do solo após a colheita da soja diminuiu em Cachoeirinha e em Capivari do Sul comparativamente ao teor inicial mesmo com a aplicação de altas doses de K_2O , indicando haver perdas desse nutriente por lixiviação ou, mais provavelmente, por escoamento superficial com a água de drenagem. Essa diminuição do teor de K do solo após o cultivo de soja pode estar relacionado com a baixa capacidade de troca de cátions ($CTC_{pH\ 7,0}$) de parte dos solos utilizados neste estudo (Tabela 1), especialmente de Cachoeirinha e Cachoeira do Sul. Há também de considerar que o cultivo de soja em microcamalhões aumenta a velocidade e a eficiência da drenagem, o que pode maximizar as perdas de K em períodos de intensas precipitações pluviométricas. Soma-se a isto a marcha de absorção de nutrientes pela soja, a qual absorve aproximadamente 75 % do K necessário no seu desenvolvimento entre o início do florescimento e o final do enchimento dos grãos (Henderson & Kamprath, (1970) in Ciampitti et al., (2012). Desta forma, o K fica exposto às perdas por um longo período antes de ser absorvido e acumulado pela soja.

O estoque de K do solo foi afetado pelo cultivo de soja (Tabela 8) e sofreu diminuição independentemente da dose de K_2O aplicada na semeadura. A manutenção do nível do estoque inicial foi verificada somente nas duas maiores doses de K_2O em Cachoeira do Sul e São Gabriel.

Tabela 8. Estoque inicial e final de K no solo (camada 0 – 20 cm) após cultivo de soja em função de doses de potássio na adubação de semeadura nos diferentes locais. Safra 2012/13.

Local	Estoque inicial	K_2O aplicado (kg ha ⁻¹)				
		0	30	60	120	180
-----K no solo (kg ha ⁻¹)-----						
Cachoeirinha	140	48	51	54	66	80
Capivari do Sul	98	42	48	50	65	75
Cachoeira do Sul	98	75	74	77	99	144
São Gabriel	128	105	126	124	130	165

Esses dados evidenciam que há perdas de K durante o cultivo de soja em solos de terras baixas, motivado possivelmente pela baixa $CTC_{pH\ 7,0}$ dos solos utilizados e pela drenagem da água após as chuvas. As perdas desse nutriente podem ser minimizadas com o parcelamento da adubação e com a adoção de sistemas conservacionistas do solo que agreguem carbono e, por consequência, aumentem a CTC do solo.

3.4. Conclusões

1. A soja cultivada em terras baixas apresenta alta produtividade e alta resposta à aplicação de fósforo e de potássio na semeadura, que estão relacionadas ao número de legumes e número de grãos por planta.

2. Na média dos diferentes locais, a dose de máxima econômica para o fósforo ($113 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) e para o potássio ($122 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) foi próxima da dose de máxima eficiência técnica ($120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $132 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, respectivamente), em virtude da relação favorável dos preços da soja e dos adubos.

3. O teor e o estoque de fósforo do solo após a colheita da soja aumentam a partir das doses médias e altas, onde ocorre balanço positivo desse nutriente.

4. O teor e o estoque de potássio do solo após a colheita da soja diminuem comparativamente ao teor inicial, e somente aumentam na maior dose, onde ocorre balanço positivo desse nutriente.

4. ESTUDO 2 - ADEQUAÇÃO DAS ATUAIS RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA PARA A SOJA EM TERRAS BAIXAS

4.1. Introdução

O cultivo de soja em terras baixas está aumentando no Rio Grande do Sul, sendo cultivados na safra 2010/11 aproximadamente 66 mil hectares e mais de 300 mil hectares na safra 2013/14 (IRGA, 2014). As terras baixas, predominantemente solos de várzea, ocupam cerca de 5,4 milhões de hectares no RS e aproximadamente 3 milhões possuem infra-estrutura para irrigação e drenagem para o cultivo de arroz irrigado (Pinto et al., 2004). O arroz irrigado é cultivado anualmente em aproximadamente 1,1 milhão de hectares (CONAB, 2014) e a área remanescente é utilizada com pastagens espontâneas ou é mantida em pousio. É nesse cenário que a soja está se estabelecendo, tornando-se uma alternativa para o controle de plantas daninhas, intensificação do uso das terras, máquinas e mão-de-obra e também trazendo vantagens financeiras para a cadeia do agronegócio rio-grandense.

O cultivo de soja em terras baixas apresenta riscos de excesso hídrico às plantas devido à baixa condutividade hidráulica e também por inundação em períodos de alta pluviosidade (Klamt et al., 1985; Lange, 2008; Lange et al., 2013). Esse estresse pode ser evitado ou amenizado com a utilização de cultivares de soja com maior tolerância ao excesso hídrico e com práticas de manejo específicas para esses solos, com destaque para a drenagem e para a adubação. A adubação adequada é indispensável para as plantas expressarem seu potencial genético e, no caso de solos de terras baixas, proporcionar maior tolerância da soja ao estresse hídrico.

As recomendações de adubação para as culturas têm por objetivo auxiliar na tomada de decisão na utilização de fertilizantes em quantidade,

forma e época de aplicação, visando o aumento e manutenção dos teores de nutrientes no solo e a otimização dos retornos econômicos (CQFS RS/SC, 2004). Os experimentos que subsidiaram as atuais recomendações de adubação para a cultura da soja no Estado foram realizados em terras altas, principalmente na metade Norte do Rio Grande do Sul e também em Santa Catarina (CQFS RS/SC, 2004). Desse modo, os solos de terras baixas não foram contemplados naqueles estudos e sabe-se que as características físicas, mineralógicas, químicas, biológicas e o material de origem são distintos entre esses solos (Klamt et al., 1985; Pinto et al., 2004; Streck et al., 2008), o que pode afetar a resposta da cultura à adubação.

Em levantamento realizado por Vedelago et al. (2012), com 20.221 amostras de solos no período de 2009 a 2011 provenientes das regiões arrozeiras do RS, constatou-se que 74 % dos solos cultivados com arroz irrigado apresentam teor de P nas classes Muito Baixo ou Baixo para a cultura da soja. A baixa disponibilidade de fósforo para culturas de sequeiro é advinda da gênese dos solos de terras baixas, sendo oriundos de sedimentos com baixa quantidade de fósforo (Ranno, 2004).

O K disponível nos solos de terras baixas para a soja também apresenta restrições. Vedelago et al. (2012) constataram que 54 % dos solos analisados possuem teor de K abaixo do crítico estabelecido para a soja (CQFS RS/SC, 2004). Para o arroz irrigado, Boeni et al. (2010) verificaram que 67 % dos solos das regiões arrozeiras do RS apresentaram teor de K abaixo do crítico.

O objetivo deste estudo foi avaliar a aplicabilidade das atuais recomendações para a soja em terras baixas no Rio Grande do Sul.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Escolha dos locais

As áreas selecionadas para a implantação dos experimentos apresentaram histórico de cultivo de arroz irrigado por inundação e eram sistematizadas em nível. Dois experimentos foram instalados, um na Estação Experimental do Arroz do IRGA, em Cachoeirinha (29°57'02" S; 51°06'57" O) e

outro na Subestação de Pesquisa do IRGA na Barragem do Capané, em Cachoeira do Sul (30°13'28" S; 52°56'34" O).

4.2.2. Características dos solos utilizados

O solo de Cachoeirinha é classificado como Gleissolo Háplico Distrófico típico e o de Cachoeira do Sul, como Planossolo Háplico Eutrófico arênico (Unidade de Mapeamento Vacacaí) (Streck et al., 2008). Algumas características dos solos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9. Atributos químicos, teor de matéria orgânica e argila dos solos utilizados nos experimentos. (Julho de 2012).

Local	pH (H ₂ O)	Sat. por bases %	Matéria orgânica g dm ⁻³	Argila	P Mehlich 1 mg dm ⁻³	K Mehlich 1 mg dm ⁻³	CTC _{pH 7,0} cmol _c dm ⁻³
Cachoeirinha	5,1	53	18	160	10,5	67	5,9
Cachoeira do Sul	4,9	42	9	150	7,4	49	6,0

As classes texturais, de acordo com o teor de argila e a CTC_{pH 7,0}, utilizadas para a interpretação do teor de P e K respectivamente, e as respectivas interpretações constam na Tabela 10.

Tabela 10. Interpretação da classe textural, do teor de fósforo, da CTC_{pH 7,0} e do teor de potássio dos solos utilizados (CQSF RS/SC, 2004).

Local	Classe textural ¹	Fósforo	CTC _{pH 7,0} ²	Potássio
Cachoeirinha	4	Baixo	Médio	Alto
Cachoeira do Sul	4	Baixo	Médio	Médio

¹ Para a interpretação do teor de fósforo (< 20 % de argila); ² Para a interpretação do teor de potássio. (Médio entre 5,1 a 15 cmol_c kg⁻¹)

4.2.3. Delineamento experimental, tratamentos e dimensão das parcelas

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta de 6 linhas com 10 metros de comprimento e 0,5 m de espaçamento, totalizando uma área de 30 m², da qual, as 4 linhas centrais, excluídas 0,5 m de cada extremidade, constituíram a área útil da parcela, onde foram realizadas as determinações. Os tratamentos

consistiram de níveis de adubação aplicados na semeadura (Tabela 11) de acordo com expectativas de colheita de 2, 3, 4 e 6 Mg ha⁻¹ de grãos (CQFS RS/SC, 2004), além de um tratamento sem adubação (testemunha). O P, na forma de super fosfato triplo, foi aplicado integralmente na linha de semeadura para todos os tratamentos, enquanto que o K, na forma de cloreto de potássio, foi parcelado para os tratamentos com doses superiores a 60 kg K₂O ha⁻¹, sendo essa dose aplicada no sulco de semeadura e o restante a lanço antecedendo a semeadura.

Tabela 11. Doses de fósforo e potássio para os níveis de adubação de acordo com a expectativa de colheita (CQFS RS/SC, 2004). Safra 2012/13.

Níveis de adubação	Expectativa de colheita	Cachoeirinha		Cachoeira do Sul	
		P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
	-----Mg ha ⁻¹ -----	-----kg ha ⁻¹ -----			
0	Testemunha	0	0	0	0
1	2	50	45	50	45
1,5	3	65	70	65	70
2,0	4	80	95	80	95
3,0	6	110	145	110	145

4.2.4. Manejo empregado nos experimentos

Previamente à implantação dos experimentos, procedeu-se a aplicação de calcário para correção do pH do solo para 6,0 (CQFS RS/SC, 2004), que foi incorporado na camada de 0 a 20 cm com grade aradora. A semeadura dos experimentos foi realizada em microcamalhões para facilitar a drenagem após as chuvas e também possibilitar a suplementação hídrica por sulcos em períodos de deficiência hídrica. A suplementação hídrica (equivalente a 50 mm de chuva) foi realizada nos dois experimentos em dois momentos durante o período reprodutivo (formação de vagens e enchimento dos grãos).

A inoculação das sementes foi realizada com três doses por hectare de inoculante comercial líquido antes da semeadura, com uniformização manual.

A semeadura foi realizada em 05 e 13 de novembro de 2012 em Cachoeirinha e Cachoeira do Sul, respectivamente. As cultivares de soja utilizadas foram NA 5909 RG em Cachoeirinha e Fundacep 57 RR em

Cachoeira do Sul, de ciclo precoce e médio, e tipo de crescimento indeterminado e determinado, respectivamente. A população nos dois experimentos foi de aproximadamente 250 mil plantas por hectare (12 plantas por metro linear).

O manejo seguiu as Indicações Técnicas para a Cultura da Soja para o RS e SC (2012), sempre evitando a competição com plantas daninhas e a ocorrência de pragas e doenças. Todas as pulverizações foram realizadas com equipamentos terrestres, com pontas de pulverização e vazão indicadas para cada defensivo.

4.3. Amostragens e determinações

4.3.1. Teor de nutrientes nas folhas no período reprodutivo

Para a determinação do teor de P e K no tecido foliar no florescimento (R1) foram coletadas 35 folhas com pecíolo por parcela, de forma aleatória, sempre do caule principal, sendo a terceira folha expandida na escala de Ferh & Caviness (1977), (CQFS RS/SC, 2004) e analisadas no Laboratório de Análises do Departamento de Solos da UFRGS.

4.3.2. Rendimento de grãos

Para essa determinação, os grãos foram colhidos das duas linhas centrais de cada parcela com seis metros lineares, totalizando seis m². A colheita foi manual, a trilha realizada em trilhadora estacionária e os grãos foram limpos e a umidade corrigida para 13 %.

4.3.3. Componentes do rendimento

O número de vagens por planta e o número de grãos por planta foram obtidos com contagem em 10 plantas dentro da área útil de cada parcela. O peso de grãos foi determinado utilizando a média de três amostras de 100 grãos retiradas da massa usada para a avaliação do rendimento de grãos.

4.3.4. Análises químicas do solo

Além das análises efetuadas anteriormente à instalação dos experimentos (Tabela 9), análises básicas foram efetuadas em amostras compostas por quatro sub-amostras de solo coletadas aleatoriamente na área útil da parcela na camada 0 a 20 cm, no momento da colheita da soja.

4.3.5. Balanço de fósforo e potássio no solo e exportado pelos grãos de soja

O balanço foi efetuado a partir das doses dos nutrientes adicionadas, subtraindo a exportação pelos grãos de soja considerando-se o teor de 14 kg de P_2O_5 e 20 kg de K_2O por Mg de grãos. No solo, o balanço foi calculado com a transformação dos dados de fósforo e potássio ($mg\ dm^3$) contidos nas análises básicas de solo iniciais e após a colheita da soja em kg de P e K por hectare.

4.4. Análises estatísticas

Foi empregada a análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados ordinários para avaliar individualmente o comportamento das variáveis dependentes: rendimento de grãos e seus componentes, teor de fósforo e potássio no tecido foliar e no solo após a colheita da soja, em função da variável independente: (níveis de adubação para expectativas de colheita). O modelo estatístico utilizado foi:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \xi_{ij};$$

onde X_i é a variável independente (nível de adubação) na dose i ; Y_{ij} é a observação j de cada um dos níveis i da variável independente; β_0 é a média das variáveis dependentes quando a variável independente é zero (intercepto); β_1 e β_2 são os coeficientes angulares que descrevem a variação de Y em função de X , na potência 1 e 2, respectivamente; e ξ_{ij} é o desvio da observação Y_{ij} em relação ao valor predito \hat{Y}_i . Os ajustes dos dados aos modelos foram avaliados através do valor e da significância do coeficiente de determinação.

4.5. Resultados e Discussão

O rendimento de grãos de soja foi incrementado ($p < 0,05$) nos dois experimentos (Figura 12) pelos níveis de adubação. Em Cachoeirinha (Figura 12 A) o incremento no rendimento de grãos foi grande ($2,70 \text{ Mg ha}^{-1}$) mesmo havendo alto rendimento no tratamento testemunha ($3,30 \text{ Mg ha}^{-1}$), que atingiu $5,00 \text{ Mg ha}^{-1}$ com a adubação para alta expectativa de resposta à adubação. Esse alto rendimento de grãos foi atingido em função do adequado manejo do experimento e também pela suplementação hídrica realizada durante o enchimento de grãos.

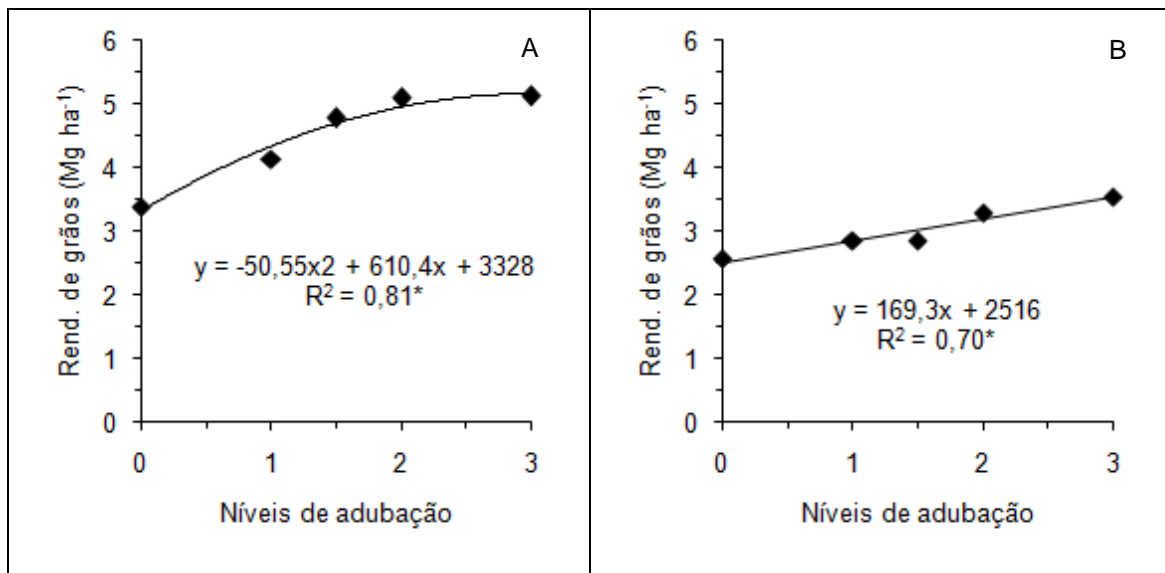


Figura 12: Rendimento de grãos de soja em terras baixas em função de níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. *Significativo ($p < 0,05$).

Em Cachoeirinha, ocorreu um ajuste quadrático para o rendimento de grãos e em Cachoeira do Sul o ajuste foi linear (Figura 12 A e B). O rendimento em Cachoeira do Sul foi menor comparativamente à Cachoeirinha, possivelmente pelo histórico de adequação (sistematização) e uso do solo (frequente revolvimento). A compactação do solo também pode ter influenciado a resposta da soja à adubação, fato citado por Marchesan et al. (2013) em terras baixas. Diante disso, fica evidenciado que a resposta das plantas à adubação não é influenciada apenas pelas condições químicas do solo, mas também por todas as interações existentes nesse sistema complexo,

envolvendo também as condições físicas e biológicas (Vezzani, 2001; Anghinoni et al., 2013) e o manejo empregado às plantas.

A resposta da soja aos níveis de adubação foi alta em solos com teores na classe Médio, conforme a CFQFS RS/SC (2004), o que pode ser atribuído à menor capacidade de adsorção de P dos solos de terras baixas comparativamente com os solos da metade norte do Estado (Ranno, 2004). Além disso, a difusão do P deve ter sido facilitada pelo regime hídrico favorável e também pela suplementação hídrica (Costa et al., 2006; Barber, 1995). Os teores de K do solo estando nas classes Alto e Médio, em Cachoeirinha e em Cachoeira do Sul, indicam que a maior resposta deve ter sido ao P e menos devido ao K, que por sua vez deve ter favorecido a alta produtividade do tratamento testemunha.

Por outro lado, a resposta da soja à adubação fosfatada aplicada na semeadura em Planossolo Háplico da Depressão Central do Rio Grande do Sul (Londero, 2012) não foi consistente, mesmo que medida em duas safras consecutivas, o que foi atribuído ao teor de P no solo se encontrar na classe Alto (CQFS RS/SC, 2004). Esse autor obteve, entretanto, incremento ($p < 0,05$) pela aplicação de potássio na semeadura da soja, cujo teor se encontrava abaixo do crítico para essa cultura.

Em solos silte arenosos do estado do Arkansas (EUA), Snyder et al. (2013) verificaram a ocorrência de maior e mais freqüente resposta da soja ao potássio comparativamente ao fósforo. Além disso, esses autores afirmam ainda que na maioria dos solos silte arenosos daquele Estado pode ocorrer redução do rendimento de grãos mesmo sem aparentes fatores limitantes. Os resultados de rendimento de grãos obtidos no presente estudo permitem afirmar que as terras baixas (metade Sul) apresentam o mesmo potencial produtivo comparativamente aos solos de terras altas (metade Norte) do Rio Grande do Sul. As práticas de manejo do solo e da cultura precisam ser ajustadas para cada situação para favorecer a obtenção de alta produtividade e resposta da soja à adubação em ambos os ambientes.

O número de legumes por planta (Figura 13) apresentou ajustes matemáticos ($p < 0,05$) similares aos obtidos no rendimento de grãos. Isto porque o número de legumes por planta, segundo Thomas & Costa (2010) elucida o aumento no rendimento de grãos, acima citado. A adubação

proporciona uma melhor capacidade de fixar os legumes, fato citado na literatura principalmente para o P (Vitti & Trevisan, 2000; Rosolem & Tavares, 2006).

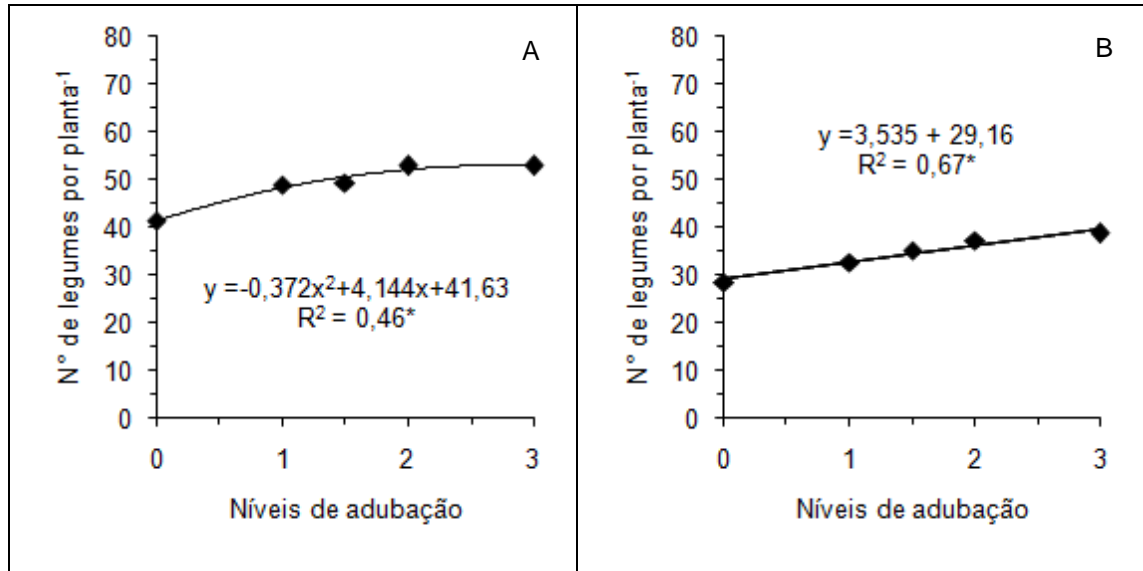


Figura 13: Número de legumes em plantas de soja em terras baixas submetidas a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. *Significativo ($p < 0,05$).

No estudo de Londero (2012), apesar da tendência de aumento de rendimento de grãos ($p > 0,05$) até a dose de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 , os componentes do rendimento não foram alterados pela adição desse nutriente em solo com teor de P acima do crítico, porém houve aumento ($p < 0,05$) no número de legumes por planta em resposta ao K aplicado na semeadura. Em experimento conduzido em vasos com solução nutritiva, Rosolem & Tavares (2006) registraram aumento no número de legumes, tanto cheios como também chochos, nas plantas nutridas com P a partir do florescimento comparativamente às plantas que não receberam a aplicação desse nutriente. A ausência de diferenças no número de grãos por legume, segundo Thomas & Costa (2010), deve-se a essa ser uma característica com alta influência genética.

O número de grãos por planta (Figura 14) apresentou comportamento semelhante ao número de legumes por planta, antes citado. O efeito é revelado pela significância dos coeficientes de determinação dos dois experimentos, indicando bom ajuste às funções quadrática e linear para Cachoeirinha e Cachoeira do Sul, respectivamente, em resposta aos níveis de

adubação aplicados na semeadura da soja. O peso de grãos não foi alterado e está apresentado no apêndice (Figura 19).

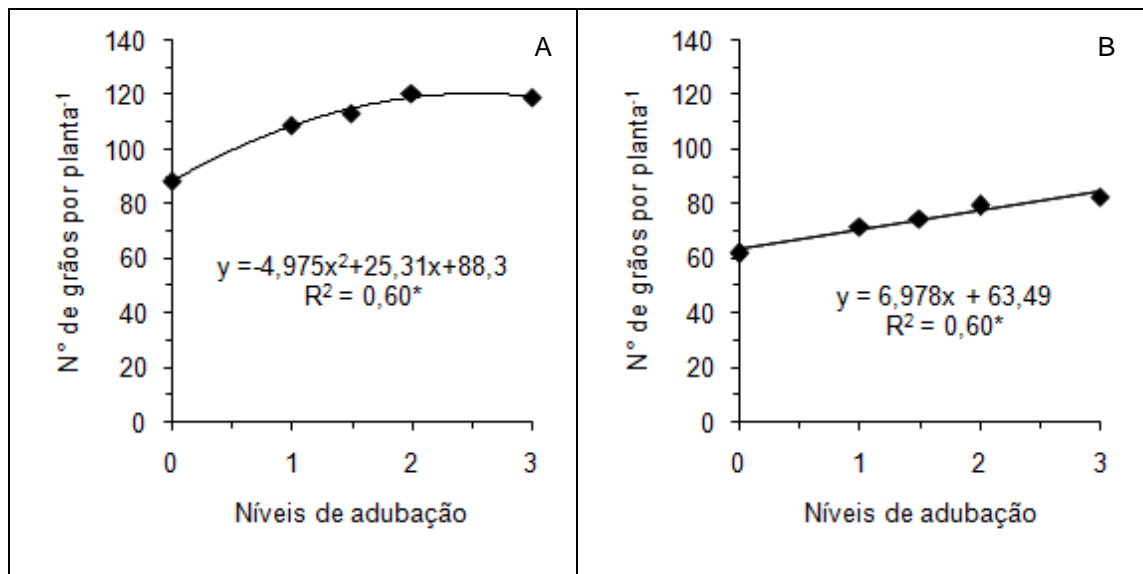


Figura 14: Número de grãos em plantas de soja em terras baixas em função do nível de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. *Significativo ($p < 0,05$).

O teor de P no tecido foliar (Figura 15) não sofreu alteração ($p > 0,05$) pelos níveis de adubação aplicados na semeadura da soja. Esses resultados corroboram com Londero (2012) em experimentos conduzidos em Planossolo Háplico no RS.

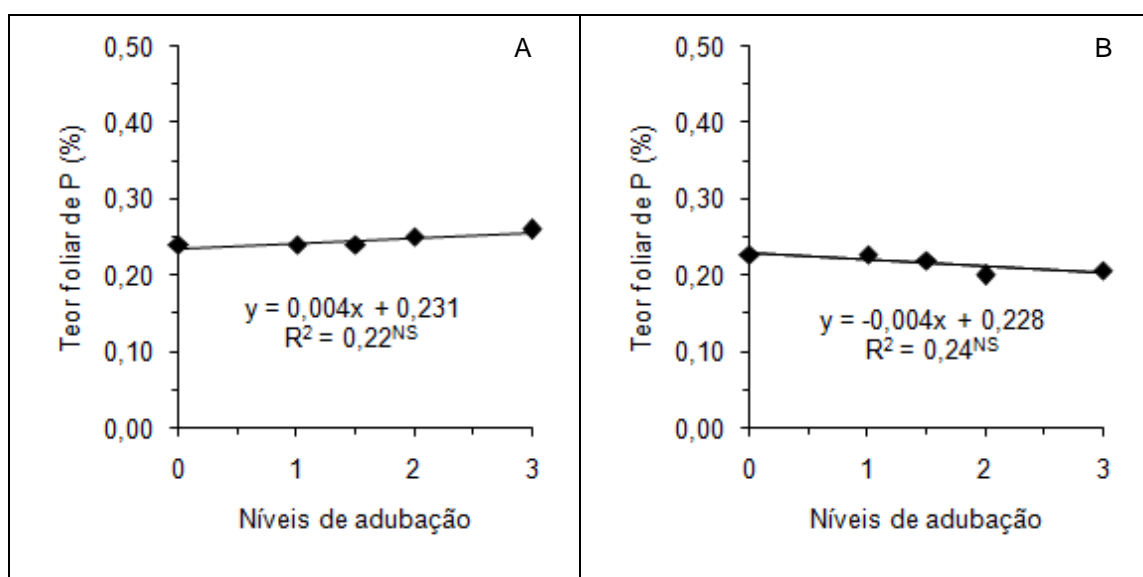


Figura 15: Teor de fósforo no tecido foliar no florescimento da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. ^{NS}Não significativo ($p > 0,05$).

Os teores foliares de P no florescimento apresentaram-se abaixo do suficiente de acordo com a CQFS RS/SC, (2004), porém os rendimentos de grãos de soja foram altos (Figura 10) o que indica que as plantas estavam bem supridas desse nutriente e que o atual padrão nutricional não é adequado para avaliar o estado nutricional dessa cultura. Alguns fatores, como o aumento da disponibilidade dos nutrientes pelo adequado suprimento de água, podem dificultar o estabelecimento das faixas de interpretação. Outras limitações no estabelecimento das faixas adequadas de teor de nutrientes no tecido foliar podem, eventualmente, advir da variabilidade dos solos, (material de origem, gênese e mineralogia), clima (temperatura e umidade), manejo (do solo e das culturas), cultivares de soja, (tipos de crescimento determinado e indeterminado) e estágio fenológico para o diagnóstico (Raij, 1991; Borkert et al., 1994; Malavolta et al., 1997), sugerindo a necessidade de pesquisas para a padronização de procedimentos para coleta e interpretação dos teores foliar de nutrientes.

O teor de P no solo em cada um dos níveis de adubação após a colheita da soja consta na Tabela 12. Observa-se que, em comparação com o teor de P disponível do solo antes da semeadura (10,5 e 7,4 mg dm⁻³, respectivamente em Cachoeirinha e Cachoeira do Sul), ocorreu uma diminuição no tratamento testemunha, especialmente em Cachoeirinha. Com o aumento da adubação ocorreu também um aumento do teor de P do solo, o que indica que as quantidades aplicadas excederam as exportadas pelos grãos e que o método Mehlich 1 foi sensível em detectá-las.

Tabela 12. Teor de fósforo do solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas seguindo as recomendações da CQFS RS/SC, (2004).

Expectativa de colheita ----Mg ha ⁻¹ ----	Cachoeirinha -----Teor de P (mg dm ⁻³)-----	Cachoeira do Sul
Testemunha	8,5	7,3
2,0	10,7	7,1
3,0	10,2	10,3
4,0	12,7	10,3
6,0	14,8	11,0

No trabalho de Londero (2012) também houve um aumento do teor de P do solo após dois anos consecutivos dos mesmos tratamentos no mesmo

local de avaliação. O aumento foi mais pronunciado a partir da dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Diferente em relação a este trabalho foi o aumento do teor de P do solo no tratamento testemunha, o que não seria esperado. Isso pode ter ocorrido em função da variabilidade espacial desse nutriente no solo (Anghinoni & Salet, 1998; Schindwein & Anghinoni, 2000) e pelo histórico de sistematização e aplainamento do solo que intensificam essa variabilidade espacial.

Nas Tabelas 13 e 14 consta o balanço de P e o rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação nos diferentes locais.

Tabela 13. Balanço de fósforo e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeirinha. Safra 2012/13.

Expectativa de colheita	Adicionado	Exportado ⁽¹⁾	Balanço	Rendimento
---Mg ha ⁻¹ ---	-----kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----			---Mg ha ⁻¹ ---
Testemunha	0	47	- 47	3,39
2,0	50	58	- 8	4,14
3,0	65	67	- 2	4,77
4,0	80	71	+ 9	5,09
6,0	110	72	+ 38	5,12

⁽¹⁾14 kg de P₂O₅ por tonelada (CQFS RS/SC, 2004).

Tabela 14. Balanço de fósforo e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeira do Sul. Safra 2012/13.

Expectativa de colheita	Adicionado	Exportado ⁽¹⁾	Balanço	Rendimento
---Mg ha ⁻¹ ---	-----kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----			---Mg ha ⁻¹ ---
Testemunha	0	36	- 36	2,57
2,0	50	40	+ 10	2,85
3,0	65	40	+ 25	2,86
4,0	80	46	+ 34	3,29
6,0	110	50	+ 60	3,55

⁽¹⁾14 kg de P₂O₅ por tonelada (CQFS RS/SC, 2004).

Observa-se que o rendimento de grãos foi alto, especialmente em Cachoeirinha, inclusive no tratamento testemunha, o que demanda uma adubação adequada para repor a exportação de P pelos grãos de soja. Nessa avaliação, como era de se esperar, ocorreu balanço negativo de fósforo no tratamento testemunha nos dois experimentos. Em Cachoeirinha, uma

condição de alta produtividade, ocorreu balanço negativo com adubação para expectativa de colheita de duas e equilíbrio para a de três Mg de grãos por hectare. Em Cachoeira do Sul, somente ocorreu balanço negativo no tratamento testemunha, em virtude da baixa resposta à adubação. Esses resultados indicam que é necessário monitorar o teor de P do solo com frequência e a adubação deve ser planejada para evitar a ocorrência de balanço negativo de nutrientes.

O estoque de P no solo (Tabela 15) indica que ocorreu diminuição no tratamento testemunha e aumento somente com adubação para alta expectativa de produtividade (4,0 e 6,0 Mg ha⁻¹) em Cachoeirinha e aumento a partir da dose para a expectativa de 3,0 Mg ha⁻¹ em Cachoeira do Sul. Portanto, a adubação para alta produtividade da soja em terras baixas resulta em aumento dos estoques de fósforo no solo, enquanto que para baixa produtividade o estoque diminui. O planejamento da adubação evita a diminuição dos teores e estoques de P do solo, e com isto mantém ou melhora a fertilidade em sistemas de culturas que incluem a soja.

Tabela 15. Estoque de fósforo disponível na camada 0 a 20 cm do solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, (2004) em diferentes locais.

Expectativa de colheita ----Mg ha ⁻¹ ----	Cachoeirinha ¹ ----- P (kg ha ⁻¹) -----	Cachoeira do Sul ²
Testemunha	17	14,6
2,0	21,5	14,2
3,0	20,5	20,6
4,0	25,4	20,6
6,0	29,6	22

¹Estoque antes da semeadura de 21 kg de P ha⁻¹. ²Estoque antes da semeadura de 14,6 kg de P ha⁻¹.

Apesar da tendência apresentada (Figura 16), o teor de K no tecido foliar da soja não foi alterado ($p>0,05$) pelos níveis de adubação potássica na semeadura. Em Cachoeirinha, mesmo com teor de K disponível do solo na classe Alto, o teor de K no tecido foliar no tratamento testemunha estava abaixo da suficiência, de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). Em Cachoeira do Sul, mesmo com teor de K disponível do solo na classe Médio, o teor de K no

tecido foliar não atingiu a classe de suficiência em nenhum dos níveis de adubação.

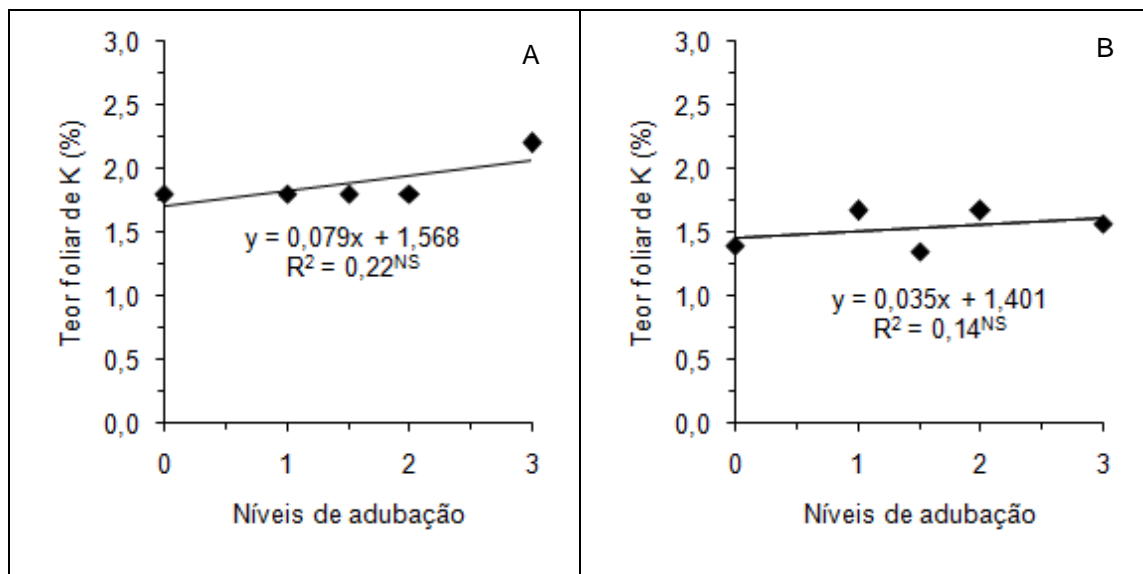


FIGURA 16: Teor de potássio no tecido foliar da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas de acordo com a CQFS RS/SC, (2004). A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul. ^{NS}Não significativo ($p > 0,05$).

O teor de K no solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação (Tabela 16) apresentou uma diminuição em comparação ao teor antecedendo a semeadura (67 e 49 mg dm⁻³, respectivamente para Cachoeirinha e Cachoeira do Sul), principalmente no experimento de Cachoeirinha, mesmo nos tratamentos com adubação para alta expectativa de resposta. Em Cachoeira do Sul a diminuição do teor de K foi menos pronunciada, havendo somente aumento com a adubação para expectativa de colheita de 6,00 Mg ha⁻¹ de grãos de soja.

Tabela 16. Teor de potássio do solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação em terras baixas seguindo as recomendações da CQFS RS/SC, (2004).

Expectativa de colheita	Cachoeirinha	Cachoeira do Sul
----(Mg ha ⁻¹)----	-----Teor de K (mg dm ⁻³)-----	
Testemunha	23	42
2,0	25	35
3,0	26	44
4,0	25	52
6,0	33	62

As diminuições dos teores de K, afora o exportado pela colheita resultam da alta mobilidade desse nutriente no solo, especialmente em solos com baixa capacidade de troca de cátions (CTC) em regiões com histórico de elevadas precipitações, como no presente caso. A aplicação na linha de semeadura e parcelamento do fertilizante potássico são estratégias que minimizam estas perdas e aumentam a eficiência da adubação potássica (Ciampitti, et al., 2012). Em solos de várzea, com baixa capacidade de infiltração de água no solo, é possível que as perdas de K pelo escoamento superficial e pela água de drenagem sejam mais acentuadas do que os solos de áreas altas. A semeadura em camalhões favorece a drenagem do solo, o que também pode aumentar as perdas de nutrientes após precipitações ou irrigações. Como a soja absorve aproximadamente 75 % do K necessário no seu desenvolvimento entre o início do florescimento e o final do enchimento dos grãos (Henderson & Kamprath, (1970) in Ciampitti et al., 2012), o K adicionado na semeadura fica por um período longo exposto à perda antes de ser absorvido e acumulado pelas plantas.

A alta produtividade da cultura também favoreceu a diminuição do teor de K do solo em função do balanço negativo em alguns tratamentos entre adição e exportação pelos grãos (Tabelas 17 e 18). No experimento conduzido em Cachoeirinha (Tabela 17), o balanço entre adição pelo fertilizante e exportação de K_2O pelos grãos foi negativo com adubação para expectativa de colheita até $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$. Em Cachoeira do Sul, o balanço foi negativo com a adubação para expectativa de colheita até $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$. Oliveira Júnior, et al. (2013) encontraram resultados semelhantes em solos do estado do Paraná, com balanço negativo de K na soja em lavouras e experimentos de alta produtividade. Entretanto, Londero (2012) registrou um aumento do teor de K do solo após dois anos de cultivo de soja reaplicando os mesmos tratamentos nas mesmas parcelas. A maior magnitude de aumento foi registrada com doses a partir de $60 \text{ kg de } K_2O \text{ ha}^{-1}$.

Tabela 17. Balanço de potássio e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeirinha. Safra 2012/13.

Expectativa de colheita	Adicionado	Exportado ⁽¹⁾	Balanço	Rendimento
---Mg ha ⁻¹ ---	----- kg ha ⁻¹ -----			---Mg ha ⁻¹ ---
Testemunha	0	68	-68	3,39
2,0	45	83	-38	4,14
3,0	70	95	-25	4,77
4,0	95	102	-7	5,09
6,0	145	102	+43	5,12

¹Exportado pelos grãos, com base em 20 kg de K₂O por tonelada (CQFS RS/SC, 2004).

Tabela 18. Balanço de potássio e rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação em Cachoeira do Sul. Safra 2012/13.

Expectativa de colheita	Adicionado	Exportado ⁽¹⁾	Balanço	Rendimento
---Mg ha ⁻¹ ---	----- kg ha ⁻¹ -----			---Mg ha ⁻¹ ---
Testemunha	0	51	-51	2,57
2,0	45	57	-12	2,85
3,0	70	57	13	2,86
4,0	95	66	29	3,29
6,0	145	71	74	3,55

¹Exportado pelos grãos, com base em 20 kg de K₂O por tonelada (CQFS RS/SC, 2004).

O estoque de K disponível no solo após a colheita da soja (Tabela 19) diminuiu em Cachoeirinha independentemente da dose de K₂O aplicada na semeadura. Em Cachoeira do Sul, o estoque aumentou em relação ao inicial somente com adubação para expectativa de colheita a partir de 4,0 Mg ha⁻¹. Esses resultados indicam que é necessário ajustar as recomendações de adubação potássica para a soja cultivada em terras baixas.

Tabela 19. Estoque de potássio disponível no solo após a colheita da soja submetida a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC (2004).

Expectativa de colheita	Cachoeirinha ¹	Cachoeira do Sul ²
-----Mg ha ⁻¹ -----	-----K no solo (kg ha ⁻¹)-----	
Testemunha	45	83
2	49	71
3	53	88
4	50	105
6	65	124

¹Estoque antes da semeadura de 134 kg de K ha⁻¹. ²Estoque antes da semeadura de 98 kg de K ha⁻¹.

4.6. Conclusões

1. Tanto o rendimento como a resposta da soja à adubação é alto nas terras baixas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

2. As recomendações de adubação para a soja em uso no Estado necessitam de ajustes para as terras baixas, sendo necessário aumentar as quantidades de fósforo e potássio para expectativas de rendimento baixo e médio.

3. Nessas expectativas de rendimento, apesar do balanço de fósforo ser positivo, seus teores no solo somente aumentam com a doses para expectativa de rendimento alto, havendo balanço positivo a partir da dose para expectativa de rendimento médio.

4. O teor e o estoque de potássio no solo somente aumentam com a dose para expectativa de rendimento muito alto, cujo balanço depende da resposta da soja à adubação.

5. CONCLUSÕES GERAIS

1. A soja cultivada em terras baixas apresenta alta produtividade e alta resposta à adubação fosfatada e potássica aplicadas na semeadura que está relacionada ao número de vagens e número de grãos por planta.

2. A resposta dessa cultura é maior à aplicação de potássio, comparativamente ao fósforo; com doses de máxima eficiência econômica (113 kg de P_2O_5 ha⁻¹ e 122 kg de K_2O ha⁻¹) sendo próximas das doses de máxima eficiência técnica, devido às relações favoráveis de preço da soja e dos fertilizantes.

3. Enquanto o teor e o estoque de fósforo no solo após a colheita aumentam com a aplicação do adubo fosfatado, o teor e o estoque de potássio diminuem em relação aos teores iniciais para as diferentes expectativas de colheita.

4. As recomendações de adubação em uso para a soja não aportam quantidades de fósforo e de potássio requeridas para expectativas de colheita baixa e média, mas são adequadas para alta expectativa.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo de soja em terras baixas no Rio Grande do Sul está passando por um processo de consolidação que traz benefícios à matriz produtiva e à sociedade gaúcha. O ajuste de manejo e de genótipos mais adaptados a esse ambiente mostra que é possível alcançar altas produtividades e a área disponível para a expansão do cultivo da soja nesses solos é grande.

Os resultados do presente estudo evidenciam que a soja cultivada em terras baixas responde, em termos de rendimento de grãos, aos atuais critérios de recomendação de adubação, embora estes tenham sido desenvolvidos em um ambiente de cultivo diverso ao de terras baixas. Entretanto, quando se considera o aporte de nutrientes no solo depois da cultura, fica claro que as atuais recomendações de adubação devem ser ajustadas, principalmente considerando as situações em que altas produtividades são alcançadas. Nessas condições, a quantidade de fósforo e potássio extraídos do solo e exportados nos grãos é grande, tendendo a um balanço negativo, principalmente em doses mais baixas dos fertilizantes.

O balanço negativo é mais intenso para o potássio, devido à maior exportação nos grãos e à maior facilidade de perdas do sistema, em função da alta mobilidade no solo e da predominância de solos com CTC baixa e média, reduzindo os estoques do solo. Tendo em vista a grande área de cultivo disponível e a consolidação do manejo da cultura nos solos de várzea, fica clara a importância de ser dada continuidade nessa linha de pesquisa, englobando mais tipos de solo e o manejo da adubação, principalmente a potássica para os solos com CTC Média e Baixa, além de estratégias de mitigação das perdas do sistema.

7. REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C.; SCHLEINDWEIN, J. A.; FIORIN, J. E. Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto. In: THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. **Soja: Manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 35-97.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2013. p. 325-380.

ANGHINONI, I. et al. **Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa, 2004. 51 p. (Boletim Técnico).

ANGHINONI, I.; SALET, L. R.; Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: NUERBERG, N. J. (Ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p. 27-52.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2. ed. Toronto: J. Willey, 1995. 414 p.

BEECHER, H. G. et al. Successful permanent raised beds in the irrigated farming systems of the Murrumbidgee and Murray valleys of New South Wales, Australia. In: EVALUATION AND PERFORMANCE OF PERMANENT RAISED BED CROPPING SYSTEMS IN ASIA, AUSTRALIA AND MEXICO, 2005, Canberra. **Proceedings...** Canberra: [s.n.], 2005. p. 129-143.

BERNARDES, B. C. **Melhoramento da rizicultura no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Oficinas Gráficas da Imprensa Local, 1946. 429 p.

BOENI, M. et al. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa, 2010. 38 p. (Boletim Técnico, 10).

BORKERT, C. M. et al. Seja o doutor da sua soja. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 66, jun. 1994.

BRITZKE, D. **Mineralogia e liberação de potássio em solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria,. Santa Maria, 2010.

BRUNETTO, G. et al. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 565-571, 2005.

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para o arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 977-982, 2002.

CERETA, C. A.; PAVINATO, P. S. Adubação em linha ou a lanço no plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 6., 2003, Ibiruba. **Trabalhos Publicados...** Passo Fundo: Aldeia Norte, 2003. p. 23-35.

CIAMPITTI, I.; GARCÍA, F.; BIANCHINI, A. La nutrición del cultivo de soja. In. BAIGORRI, H. E. J.; NAVARRO, L. R. D. (Ed.). **El cultivo de soja en Argentina**. Vicente López: Agroeditorial, 2012. 400 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**.

Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 10 jan. 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**.

Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=>>>. Acesso em: 15 maio 2014.

COSTA, J. P. V. et al. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 828-835, 2006.

EMBRAPA. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2012-2014**. 39ª Reunião de Pesquisa da Soja da Região Sul. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 142 p. (Documentos, 107).

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p.

FIORIN, J. E. et al. Fertilidade do Solo. In: FUNDACEP FECOTRIGO. **A soja em rotação de culturas no plantio direto**. Cruz Alta: Fundacep Fecotrigo, 1998. p. 35-96

GHILHERME, L. R. G. et al. Adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 27-34, 2000.

GONÇALVES, G. K. et al. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1633-1639, 2011.

- GRIMM, S. S. **Aspectos econômicos da adubação**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1970. 14 p. (Boletim Técnico, 6).
- HARGER, N. **Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em soja, definidas pelo uso do método DRIS, para solos de origem basáltica**. 2008. 88 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.
- HENDERSON, J. B.; KAMPRATH, E. J. Nutrient and dry matter accumulation by soybeans. Raleigh, North Carolina Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin, 1970. p. 27. In: CIAMPITTI, I.; GARCÍA, F.; BIANCHINI, A. La nutrición del cultivo de soja. In: BAIGORRI, H. E. J.; NAVARRO, L. R. D. (Ed). **El cultivo de soja en Argentina**. Vicente López: Agroeditorial, 2012. 400 p.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. Fixação biológica de nitrogênio com a cultura da soja. In: WORKSHOP NITROGÊNIO NA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 2000, Dourados. **Anais...** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2000. p. 51-75.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Serviços e informações: soja na várzea safra 2013/14**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140326151503soja_area_efetiva_safra_13_14.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2014.
- KLAMT, E.; KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P. **Solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1985. 43 p. (Boletim Técnico de Solos, 4).
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 395-401, 1995.
- KRAY, C. H.; SALET, R. L.; ANGHINONI, I. **Variabilidade horizontal e amostragem dirigida do solo no sistema plantio direto**. Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Porto Alegre: UFRGS, 1998. 6 p. (Relatório de Pesquisa).
- LANGE, C. E. Metodologia de avaliação da tolerância de genótipos de soja ao excesso hídrico. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 36., 2008, Porto Alegre. **Atas...** Fepagro: Porto Alegre, 2008.
- LANGE, C. E.; VEDELAGO, A.; STECKLING, C.; ROVERSI, T. Nova cultivar de soja TEC/IRGA 6070 RR desenvolvida para o cultivo em solos arrojados gaúchos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria-RS. **Anais...** Santa Maria: [s.n.], 2013. p. 1076-1079.
- LANGE, C. E.; VEDELAGO, A.; THOMAS, A. L. Potencial de rendimento de grãos de soja em solos de várzea do Rio Grande do Sul. In: THOMAS, A. L.;

LANGE, C. E. (Org.). **Soja em solos de várzea do Sul do Brasil**. Porto Alegre: Evangraf, 2014. p. 83–127.

LIAO, C. T.; LIN, C. H. Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. **Proceedings of the National Science Council**, v. 25, n. 3, p. 148-157, 2001.

LONDERO, G. T. **Resposta da soja a adubação em solo de várzea e efeito residual em arroz irrigado**. 2012. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

LOUREIRO, M. F.; JAMES, E. K.; FRANCO, A. A. Nitrogen fixation by legumes in flooded regions. In: **Ecophysiological strategies of xerophytic and amphibious plants in the neotropics**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1988. p. 195-233. v. 4. (Series Oecologia Brasiliensis).

MALAVOLTA, E. Potássio: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Ed.). **Potássio na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 179-230.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional da plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 377-382, 1993.

OLIVEIRA JUNIOR, A. et al. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 143, set. 2013.

PINTO, L. F. S. et al. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A. (Ed.). **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 11-35.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES, A. M. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2004. cap. 3, p. 75-96.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p. 29-96, 1972.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres: Potafos, 1991. 343 p.

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RANNO, S. K. **Estimativa da disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado em solos do Rio Grande do Sul**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado) Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

RHEINHEIMER, D. S. et al. **Situação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Solos, 2001. 41 p. (Boletim Técnico, 2).

ROSOLEM, C. A.; TAVARES, C. A. Sintomas de deficiência tardia de fósforo em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 385-389, 2006.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto**. 2003. 169 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 611-617, 2000.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Doses de máxima eficiência econômica de fósforo e potássio para as culturas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 85, p. 20-25, 2005.

SCHMIDT, F. et al. Resíduos de azevém na superfície de um Planossolo alagado e seus efeitos na solução do solo e em plantas de arroz. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2080-2086, 2009.

SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M. **Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja**: descrição dos sintomas e ilustrações com fotos. Embrapa Soja: Londrina, 2004. p. 44.

SFREDO, G. J. et al. **Soja, nutrição mineral, adubação e calagem**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1986. 51 p. (Documentos, 64).

SNYDER, C. et al. **Fertilization and liming practices**. Arkansas Soybean Handbook. Arkansas: University of Arkansas, Division of Agriculture, 2013. p. 21-26.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

SOSBAI. Rotação e sucessão de culturas em áreas de arroz irrigado. In: ARROZ IRRIGADO: RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS DA PESQUISA PARA O SUL DO BRASIL, REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 29., 2012, Gravatal, SC. **Anais...** Itajaí, SC: SOSBAI, 2012. p. 150-153.

SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (Reações de redox). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 5. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p. 177-200.

SOUZA, D. M. G.; VOLKWEISS, S. J. Relações do superfosfato triplo em grânulos com solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 1, p. 133-140, 1987.

SPARKS, D. L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMNER, M, E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 38-53.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2008. 329 p.

STRECK, E. D. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. **SOJA: manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 248 p.

THOMAS, A. L. **Modificações morfológicas e assimilação de nitrogênio em plantas de soja (Glycine max) com sistemas radiculares sob deficiência de O₂**. 2004. 76 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

VAHL, L. C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. 1991. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

VAHL, L. C.; LOPES, S. I. G. Nutrição de plantas. In: PESQUE, S. T. et al. (Ed.). **Produção de arroz irrigado**. Pelotas: UFPel, 1998. p. 149-206.

VEDELAGO, A. et al. **Fertilidade e aptidão de uso dos solos para o cultivo da soja nas regiões arroseiras do Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa, 2012. 46 p. (Boletim Técnico, 12).

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba,, n. 90, 2000, p. 1-16.

WEITHÖLTER, S. et al. Fósforo e potássio no solo no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p. 121-149.

WENDLING, A. **Recomendação de nitrogênio e potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

8. APÊNDICES

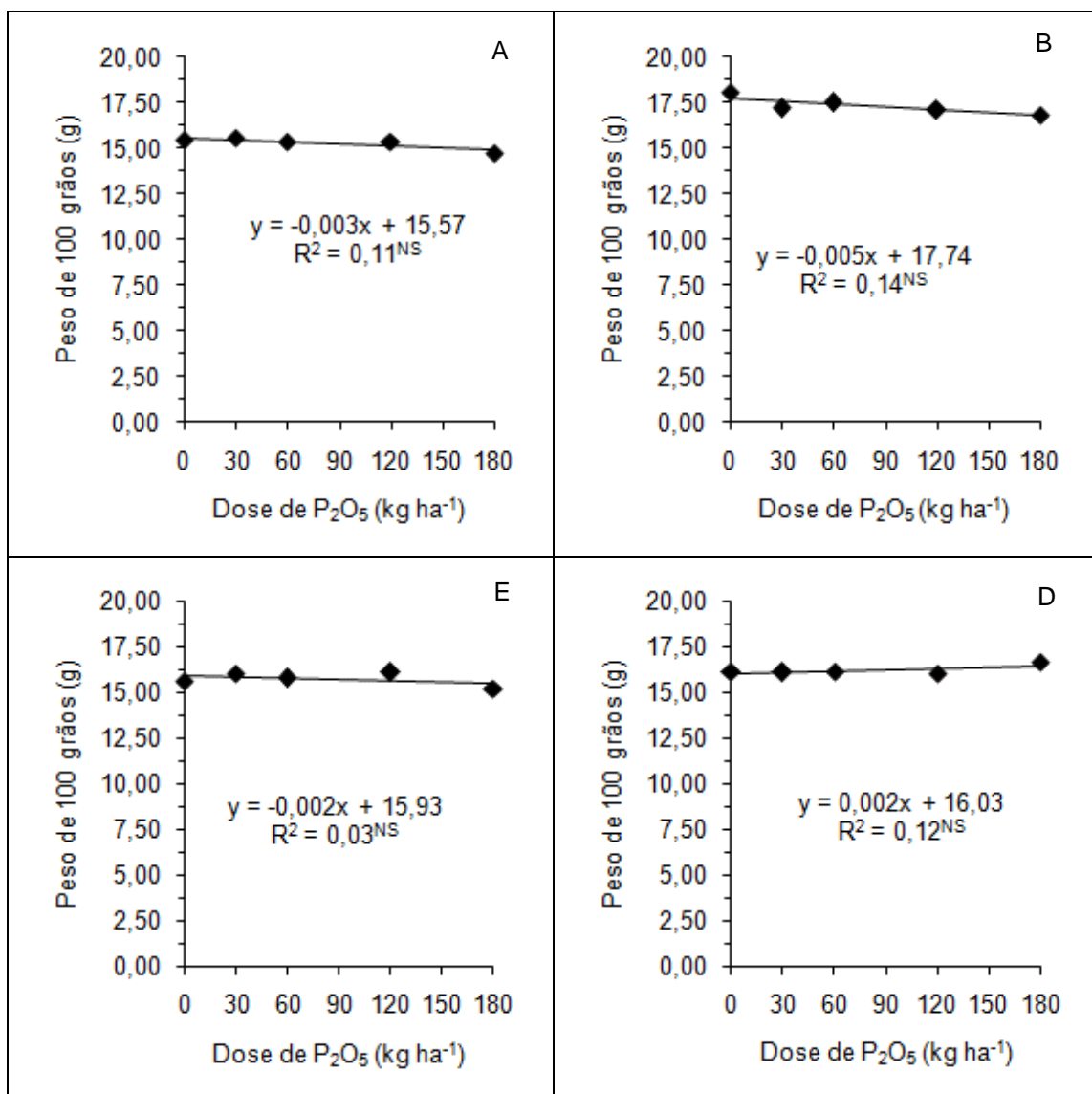


Figura 17: Peso de grãos de soja submetida a doses de fósforo na semeadura em terras baixas. Safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel.

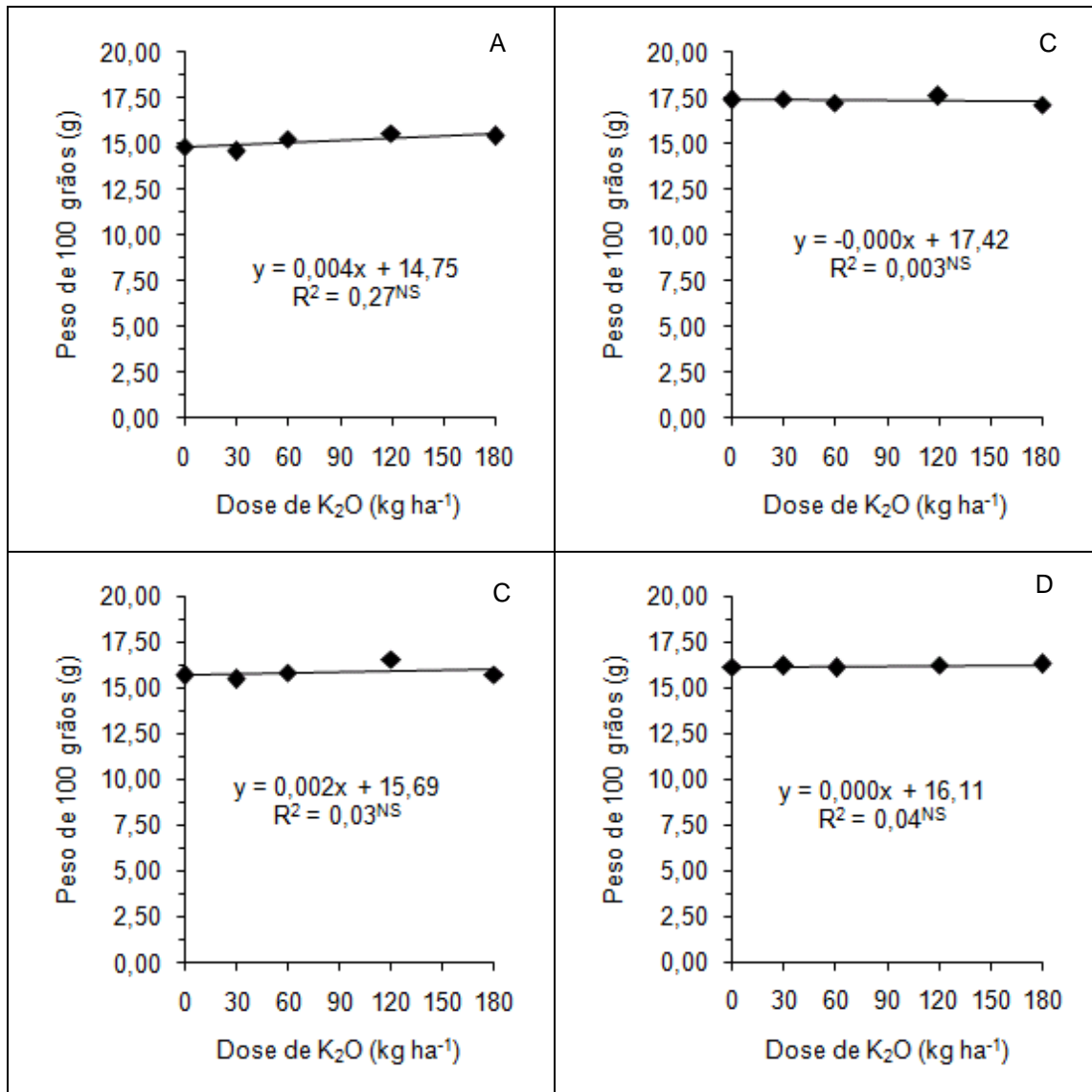


Figura 18: Peso de grãos de soja submetida a doses de potássio na semeadura em terras baixas. Safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Capivari do Sul; C: Cachoeira do Sul; D: São Gabriel.

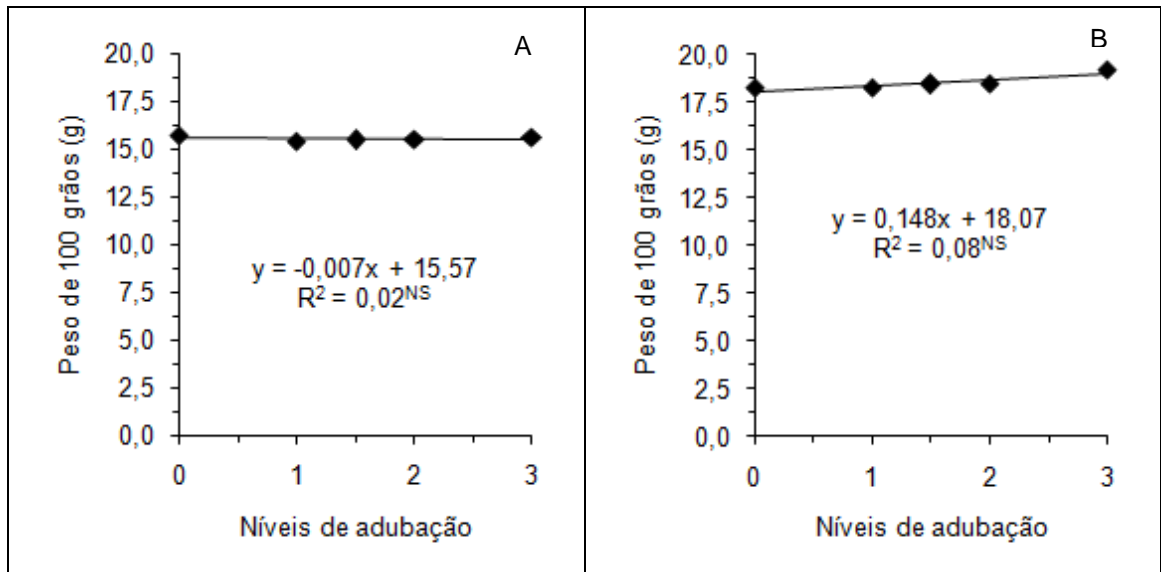


Figura 19: Peso de grãos de soja submetida a níveis de adubação de acordo com a CQFS RS/SC, 2004. Safra 2012/13. A: Cachoeirinha; B: Cachoeira do Sul.