

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

**RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA PARA
ROTAÇÃO DE CULTURAS EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO DE
LONGA DURAÇÃO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ**

**Renan Costa Beber Vieira
(Tese de Doutorado)**

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

**RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA PARA
ROTAÇÃO DE CULTURAS EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO DE
LONGA DURAÇÃO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ**

RENAN COSTA BEBER VIEIRA
Engenheiro Agrônomo (UFSC)

Tese de Doutorado apresentada
como um dos requisitos à obtenção do
grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Maio, 2014

HOMOLOGAÇÃO

Aos meus pais
Deli e Roque

dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Cimélio Bayer, pela amizade, orientação, oportunidade e toda confiança dedicada neste trabalho.

À Pesquisadora Sandra Mara Vieira Fontoura, ao Técnico Renato Moraes, à Cooperativa Agrária Agroindustrial e aos funcionários da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, por proporcionar a realização deste trabalho.

Aos Professores João Mielniczuk e Ibanor Anghinoni, pelos ensinamentos e orientações na elaboração do projeto desta pesquisa.

Aos Professores Carlos Alberto Ceretta, Carlos Alberto Bissani e Ibanor Anghinoni pela colaboração e sugestões na discussão do exame de qualificação.

Aos professores Volnei Pauletti, Paulo Ernani e Ibanor Anghinoni pelas valiosas contribuições na arguição desta tese.

Ao Professor John Kovar e ao técnico Jay Berkey do USDA por aceitar a proposta de realização do Doutorado Sanduíche junto ao National Laboratory for Agriculture and the Environment - USDA - Iowa State University, bem como pela acolhida e orientação nas atividades de laboratório durante os sete meses em Ames, IA.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Manejo do Solo, pós-docs, doutorandos, mestrandos e bolsistas de iniciação científica.

Aos colegas do Departamento de Solos e do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS.

Ao técnico do Laboratório de Manejo e Biogeoquímica Ambiental, Tonho, e ao secretário Jader, pelos auxílios sempre providenciais.

À UFRGS, pelo ensino de qualidade e gratuito.

Ao CNPq e a CAPES pela concessão das bolsas de estudo.

Aos professores do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelos conhecimentos repassados.

À minha família que sempre esteve ao meu lado apoiando em todas as oportunidades, pela compreensão, estímulo, exemplos de vida.

A todos que de alguma forma ou outra colaboraram para que este trabalho se concretizasse.

...o meu Muito obrigado!

RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA E POTÁSSICA PARA ROTAÇÃO DE CULTURAS EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ^{1/}

Autor: Renan Costa Beber Vieira
Orientador: Cimélio Bayer

RESUMO

O estado do Paraná não dispõe de um sistema de recomendação de adubação para rotação de culturas em sistema plantio direto, utilizando recomendações para cada cultura individual. Em especial, a região Centro-Sul destaca-se pelo alto potencial produtivo, com rendimentos superiores a 3,5 t ha⁻¹ de soja e 11 t ha⁻¹ de milho, porém, carente em estudos que suportem a recomendação de fertilizantes para esses altos rendimentos. Dessa forma, o trabalho visa elaborar um sistema de recomendação de adubação fosfatada e potássica para a rotação de culturas envolvendo soja, milho, cevada e trigo, em solos em sistema plantio direto de longa duração na região Centro-Sul do Paraná. Para isso, 47 experimentos com adubação fosfatada e 47 experimentos com adubação potássica foram utilizados. Os rendimentos relativos das culturas e os teores de P e de K no solo foram relacionados, obtendo os teores críticos e as classes de disponibilidade. Para a estimativa das doses nas classes de disponibilidade Baixa e Média utilizou-se para o fósforo as curvas de resposta à adubação, seguindo a filosofia de suficiência (adubação de cultura). Para o potássio, as doses foram baseadas no incremento do teor no solo com as doses de potássio, utilizando a filosofia de correção-manutenção. Nas classes de disponibilidade Alta e Muito alta, as doses foram baseadas na exportação pelos grãos. As culturas de inverno foram mais exigentes e determinaram o teor crítico para a rotação de culturas de 8 mg dm⁻³ de fósforo e de 0,23 cmol_c dm⁻³ de potássio na camada de amostragem de 0-20 cm. As doses de fósforo e potássio recomendadas para soja, milho, trigo e cevada em solos em sistema plantio direto de longa duração são superiores às atuais recomendações de adubação para o Estado. Embora adotada a filosofia de suficiência/adubação de cultura para recomendação de adubação de fósforo em solos abaixo do teor crítico, estima-se que as doses recomendadas para as culturas elevam o teor de fósforo no solo ao teor crítico após um ciclo da rotação de culturas (três anos). A adubação potássica para a cultura da soja em solos com teores altos e muito altos não aumenta o rendimento de grãos desta cultura, podendo apresentar retornos negativos. Nesta situação, a adubação potássica referente à reposição da exportação pelos grãos pode ser reduzida ou transferida parcialmente para a cultura de inverno.

^{1/} Tese de Doutorado 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. (81 p.) – Maio, 2014. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq, CAPES e Cooperativa Agrária (PR).

PHOSPHORUS AND POTASSIUM RECOMMENDATION FOR CROP ROTATION IN OXISOLS UNDER LONG TERM NO-TILLAGE IN THE SOUTH CENTRAL REGION OF PARANÁ STATE, BRAZIL^{2/}

Author: Renan Costa Beber Vieira
Adviser: Cimélio Bayer

ABSTRACT

The Paraná State has lack in the fertilizer recommendation system for crop rotation under no-till system using recommendations for each single crop. In particular, the South-Central region stand out by high yield potential, over 3.5 t ha⁻¹ of soybean and 11 t ha⁻¹ of corn, however, lacking in the studies that support the fertilizer recommendation to this high yield. Thereby, the study aims to develop a phosphorus and potassium recommendation system for crop rotation with soybean, corn, barley and wheat in soil under long-term no-tillage system at the South-Central region of Paraná State. For this, 47 trials with phosphorus fertilization and 47 with potassium fertilization were used. The relative crop yields and the soil test value of P and K were related, obtaining the critical levels and the availability categories. To estimate the doses in the categories Low and Medium for phosphorus we used the curves of fertilization crop response, following the philosophy of nutrient sufficiency approach (crop fertilization). For potassium, the doses were based on the increase of soil content with doses of potassium, using the philosophy of build-maintenance approach. In the categories High and Very high levels, the doses were based in the content of nutrient removed with harvest. Winter crops were more demanding in nutrients and conditioned the critical levels for crop rotation of 8 mg dm⁻³ of phosphorus and 0.23 cmol_c dm⁻³ of potassium in 0-20 cm soil layer sampled. The recommended doses of phosphorus and potassium for soybean, corn, wheat and barley in soils under long term no-tillage system are higher than current fertilizer recommendations used in Paraná State. Although used the philosophy of nutrient sufficiency (crop fertilization) for phosphorus recommendation in soils below the critical level, it is estimated that the recommended doses for crops raise the level of phosphorus in the soil to the critical level after a cycle of crop rotation (three years). Soybean potassium fertilization in soils with High and Very high levels does not increase the yield of this crop, and may have negative returns. In this situation, the potassium fertilization regarding the replacement of the removal nutrient in the grain can be reduced or partially transferred to the winter crop.

^{2/} Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (81 p.) – May, 2014. This work had financial support from CNPq, CAPES and Cooperativa Agrária (PR).

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Sistema plantio direto e a dinâmica de nutrientes	3
2.2. Sistema de recomendação de adubação: estudos de calibração	5
2.3. Sistema de recomendação de adubação: filosofias de adubação	6
2.4. Recomendações de adubação no Paraná	8
2.5. Características da região Centro-Sul do Paraná	11
3. HIPÓTESES	13
4. OBJETIVOS	14
4.1. Geral	14
4.2. Específicos	14
5. MATERIAL E MÉTODOS	15
5.1. Descrição dos experimentos	15
5.2. Coletas de solo e análises	18
5.3. Determinação do rendimento relativo das culturas	19
5.4. Consolidação da curva de calibração	19
5.5. Faixas e classes de disponibilidade, curvas de resposta e estimativa de doses	21
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6.1. ESTUDO 1: Calibração de fósforo no solo com o extrator Mehlich-1 e recomendação de adubação fosfatada para soja, milho, trigo e cevada	23
6.1.1. Rendimento de grãos das culturas e teores de fósforo no solo	23
6.1.2. Consolidação da curva de calibração de fósforo	29
6.1.3. Faixas e classes de disponibilidade de fósforo do solo	32
6.1.4. Doses de fósforo para as culturas	35
6.2. ESTUDO 2: Calibração de potássio no solo com o extrator Mehlich-1 e recomendação de adubação potássica para soja, milho, trigo e cevada	46
6.2.1. Rendimento de grãos das culturas e teores de potássio no solo	46
6.2.2. Consolidação da curva de calibração de potássio	52
6.2.3. Faixas e classes de disponibilidade de K no solo	55
6.2.4. Doses de potássio para as culturas	59
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Preço médio de grãos das culturas e dos fertilizantes no período de outubro de 2008 a setembro de 2013.....22
2. Rendimentos relativos de soja, milho, trigo, cevada e aveia branca nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de P_2O_5 aplicadas na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de fósforo a cada safra.24
3. Teores de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de P_2O_5 aplicadas em superfície na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de fósforo a cada safra.25
4. Teores de fósforo disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de soja e milho nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de P_2O_5 em diferentes safras e locais.27
5. Teores de fósforo disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de trigo e cevada nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de P_2O_5 em diferentes safras e locais.28
6. Classe de disponibilidade de P, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de soja e milho, em função das doses de P_2O_5 nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.....36
7. Classe de disponibilidade de P, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de trigo e cevada, em função das doses de P_2O_5 nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.37
8. Teor de P disponível (Mehlich-1) no solo, equações de ajuste do incremento no rendimento de grãos referentes à figura 8, doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) nas diferentes classes de disponibilidade.40
9. Dose média de P_2O_5 recomendada para soja, milho, trigo e cevada sob sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade para os Latossolos da região Centro-Sul do Paraná.42
10. Dose média de P_2O_5 aplicada além da exportação pelos grãos de soja, milho, cevada e trigo nas classes de disponibilidade e o total aplicado no ciclo de rotação de culturas trienal.45

11. Rendimentos relativos de soja, milho, trigo, cevada e aveia branca nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de K ₂ O aplicadas na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de potássio a cada safra.....	47
12. Teores de potássio disponível (Mehlich-1) no solo nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de K ₂ O aplicadas em superfície na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de potássio a cada safra.....	48
13. Teores de potássio disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de soja e milho nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de K ₂ O em diferentes safras e locais.....	50
14. Teores de potássio disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de trigo e cevada nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de K ₂ O em diferentes safras e locais.....	51
15. Quantidade de potássio a ser adicionada ao solo para a adubação de correção do solo	61
16. Classe de disponibilidade de K, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de soja e milho, em função das doses de K ₂ O nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.....	63
17. Classe de disponibilidade de K, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de trigo e cevada, em função das doses de K ₂ O nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.....	64
18. Teor de K disponível (Mehlich-1) no solo, equações de ajuste do incremento no rendimento de grãos, doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) nas diferentes classes de disponibilidade.	65
19. Dose média de K ₂ O recomendada para soja, milho, trigo e cevada sob sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade para os Latossolos da região Centro-Sul do Paraná.....	69
20. Fracionamento da dose de correção de potássio no solo na sequência de dois cultivos, para as culturas de soja, milho, trigo e cevada sob sistema plantio direto, nos Latossolos da região Centro-Sul do Paraná.....	72

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Filosofias de recomendação de adubação de “suficiência/de cultura” vs. “correção e manutenção”. Adaptado de Leikam et al. (2003)..... 7
2. Localização dos experimentos de fósforo e potássio instalados em 2008 na área de abrangência da Cooperativa Agrária (em verde) na região Centro-Sul do Paraná..... 16
3. Localização dos experimentos de resposta de soja e milho à adubação fosfatada e potássica na área de abrangência da Cooperativa Agrária (em verde) na região Centro-Sul do Paraná..... 17
4. Localização dos experimentos de resposta de trigo e cevada à adubação fosfatada e potássica na área de abrangência da Cooperativa Agrária (em verde) na região Centro-Sul do Paraná..... 18
5. Teor crítico de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, para as culturas de aveia branca, trigo, cevada, soja e milho. ** Significativo ($p < 0,01$)..... 30
6. Faixas e classes de disponibilidade de fósforo do solo (Mehlich-1) para a rotação de culturas com soja, milho, trigo e cevada, nas camadas de 0-20 e 0-10 cm em Latossolos ($> 600 \text{ g kg}^{-1}$ de argila) em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. 33
7. Retorno líquido da adubação fosfatada em diferentes teores de P disponível e preços de grãos. Cotação de soja, milho, trigo e cevada de R\$ 789, R\$ 355, R\$ 522 e R\$ 496 t^{-1} (a), e de R\$ 552, R\$ 249, R\$ 366 e R\$ 347 t^{-1} (b), respectivamente. Cotação do fertilizante fosfatado de R\$ 1654 t^{-1} de P_2O_5 34
8. Incremento médio no rendimento de grãos de soja, milho, trigo e cevada com as doses de fósforo em diferentes classes de disponibilidade. 39
9. Estimativa de doses de fósforo para as culturas de soja, milho, trigo e cevada para cada classe de disponibilidade de P no solo. 41
10. Teor crítico de potássio disponível (Mehlich-1) no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, para as culturas de aveia branca, trigo, cevada, soja e milho ($0,01 \text{ cmol}_c \text{ K dm}^{-3}$ corresponde a $3,91 \text{ mg K dm}^{-3}$). ** Significativo ($p < 0,01$)..... 53
11. Faixas e classes de disponibilidade de potássio no solo (Mehlich-1) para a rotação de culturas com soja, milho, trigo e cevada, nas camadas de 0-20 e 0-10 cm em Latossolos ($\text{CTC}_{\text{pH}7,0} > 15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná..... 56

12. Retorno líquido da adubação potássica em diferentes teores de K disponível e preços de grãos. Cotação de soja, milho, trigo e cevada de R\$ 789, R\$ 355, R\$ 522 e R\$ 496 t⁻¹ (a), e de R\$ 552, R\$ 249, R\$ 366 e R\$ 347 t⁻¹ (b), respectivamente. Cotação do fertilizante potássico de R\$ 1258 t⁻¹ de K₂O.58
13. Teor de potássio disponível no solo após sete meses da aplicação das doses de K₂O na implantação dos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói.60
14. Variação nos teores de potássio no solo ao longo dos anos sem a adição de K e com a reaplicação a cada safra de 60 kg K₂O ha⁻¹; e exportação de K₂O pelos grãos nos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói.68

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem crescido no cenário mundial de produção de grãos, ocupando a posição de segundo maior produtor mundial de soja na safra 2012/13 (81,5 milhões de toneladas e rendimento médio de 2,9 t ha⁻¹) e terceiro maior produtor mundial de milho (81,5 milhões de toneladas e rendimento médio de 5,2 t ha⁻¹) (Conab, 2014). Dentro da produção nacional de grãos, o estado do Paraná se destaca como maior produtor de milho e segundo maior de soja.

A Cooperativa Agrária está situada na região Centro-Sul do Paraná, em uma altitude média de 800 a 1200 m. Composta por 582 cooperados e 1001 colaboradores, abrange uma área de 107 mil hectares (Agrária, 2012). Nos cultivos de verão, predomina a cultura da soja (74 mil hectares) e do milho (33 mil hectares), proporcionando uma produção de 265 mil toneladas de soja e 369 mil toneladas de milho. No inverno, as principais culturas são o trigo e a cevada, com 26 e 30 mil hectares semeados e produção de 83 e 114 mil toneladas, respectivamente (Agrária, 2012).

Dentre os principais fatores de sucesso da região na produção de grãos destacam-se as características de clima e solo que, aliado à alta tecnologia, confere produtividades médias de lavouras superiores a 3,5 t ha⁻¹ de soja e 11 t ha⁻¹ de milho. Apesar das altas produtividades de grãos obtidas, tanto na região Centro-Sul, como no estado do Paraná, a recomendação de adubação ainda é incipiente, não havendo um sistema de recomendação de fertilizantes para o sistema de rotação de culturas.

A análise de solo é a ferramenta mais utilizada atualmente para as recomendações de adubação para as culturas de grãos. Entretanto, o uso eficiente da análise de solo está condicionado à calibração dos valores obtidos pelo método analítico com o rendimento das culturas no campo, o que pode variar entre as regiões, principalmente pelas características diferenciadas de clima, solo e manejo de culturas. Uma adequada recomendação de doses de fertilizantes é fundamental para a alocação correta dos fertilizantes, o que gera economia de insumos e aumento da produtividade, maior eficiência técnica e econômica do capital investido, bem como redução nos impactos ambientais (Wendling et al., 2008).

Atualmente, o manejo de adubação na região Centro-Sul do Paraná é baseado em publicações e indicações técnicas isoladas para cada cultura (Embrapa, 2011a, b, 2013), ou ainda são utilizadas as recomendações de outros estados como do RS e SC (Sociedade..., 2004) e de SP (Raij et al., 1997), que foram desenvolvidas em solos e climas distintos. Além disso, a maioria destas recomendações tem a base experimental da década de 80 e 90, em solos manejados sob preparo convencional e com rendimento das culturas muito inferior aos rendimentos médios obtidos atualmente, podendo não representar a relação entre os atributos do solo e a resposta das culturas na região Centro-Sul do Paraná.

Dessa forma, fica evidente que as informações existentes para a recomendação de fertilizantes no estado do Paraná são aquém da demanda, principalmente, considerando a necessidade de recomendações de adubação para o sistema de rotação de culturas e não para culturas isoladamente. Também, considerando as altas produtividades obtidas na região Centro-Sul do Paraná, existe a necessidade do desenvolvimento de um sistema de adubação direcionado para atender as suas particularidades.

Em função desse cenário, buscou-se, através da parceria com a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), agregar informações a partir de experimentos de calibração e de resposta das culturas à adubação fosfatada e potássica em diferentes locais, visando à recomendação de adubação de fósforo e potássio para o sistema de rotação de culturas, amplamente utilizado na região, com soja, milho, trigo e cevada, em solos em sistema plantio direto há mais de 20 anos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema plantio direto e a dinâmica de nutrientes

A área agrícola cultivada em sistema plantio direto (SPD) teve grande expansão no Brasil a partir da década de 90, atingindo 32 milhões de hectares, o que corresponde a 70 % da área cultivada com culturas anuais produtoras de grãos (MAPA, 2009). No estado do Paraná, maior produtor nacional de milho e segundo maior produtor de soja (IBGE, 2011), aproximadamente 90 % da área cultivada com essas culturas são conduzidas em SPD (Agrosoft, 2009).

A adoção do SPD em substituição ao preparo convencional promove alterações na dinâmica dos nutrientes, principalmente na camada superficial do solo. Enquanto no preparo convencional há uma uniformidade da fertilidade do solo na camada arável (0-20 cm) devido ao revolvimento periódico (Bayer & Mielniczuk, 1997), nos solos em SPD verifica-se uma estratificação dos nutrientes no perfil do solo, com maior concentração em camadas superficiais (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000; Ciotta et al., 2002; Costa et al., 2009).

O SPD tem influência direta na dinâmica do P no solo, quando comparado a sistemas onde o solo é mobilizado mecanicamente. Sob as mesmas condições de manejo da fertilidade, os solos em SPD apresentam teores analíticos de P maiores do que solos manejados com aração e gradagens (Ciotta et al., 2002; Albuquerque et al., 2005; Costa et al., 2009), refletindo no maior teor crítico de P para solos em SPD (Schlindwein &

Gianello, 2008). Duas características principais condicionam a menor adsorção de P, e conseqüente, maior disponibilidade em solos em SPD: a) o não revolvimento do solo, reduzindo o contato entre o íon fosfato e a superfície dos óxidos (Sousa & Volkweiss, 1987; Eltz et al., 1989); e b) o incremento de matéria orgânica que, através dos ácidos orgânicos, compete com o íon fosfato pelos sítios ativos dos óxidos (Andrade et al., 2003; Guppy et al., 2005; Anghinoni, 2007).

A disponibilidade de K também é modificada em solos em SPD, principalmente em função da sua maior adsorção eletrostática pela fase sólida decorrente do aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) nos solos em SPD (Mielniczuk, 2005). Em solos com maior CTC, o teor de K disponível em análise do solo necessário para o adequado desenvolvimento das culturas é maior (Silva & Meurer, 1988). Por isso, algumas recomendações de adubação potássica, que abrangem diferentes tipos de solos, utilizam este critério para a diferenciação dos solos e adequação das doses em função da distinta disponibilidade de K relacionada com a CTC (Vitosh et al., 1995; Sociedade..., 2004).

As alterações que ocorrem na dinâmica dos nutrientes em solos em SPD, sobretudo pelo incremento de matéria orgânica no solo, modificam a relação solo-planta, bem como os parâmetros bases para o manejo da adubação, sugerindo a necessidade de estudos de calibração de nutrientes em solos em SPD, visando adequar as recomendações de adubação para esse sistema de manejo (Schlindwein & Gianello, 2004).

Cabe destacar que, durante os primeiros anos em SPD, o solo está em fase de reagregação e rearranjo da estrutura, não apresentando ainda os efeitos benéficos do SPD, como o acúmulo de MOS, o incremento da CTC e o aumento das formas lábeis inorgânicas e orgânicas de P (Sá, 2004). À medida que o solo é conduzido em SPD ao longo dos anos (fases de consolidação e manutenção), os fluxos de carbono e nitrogênio aumentam, elevando a CTC, o armazenamento de água no solo e a ciclagem dos nutrientes.

Dessa forma, a análise cronológica da dinâmica dos nutrientes nas fases de evolução do SPD auxilia no entendimento da baixa resposta das culturas à adubação fosfatada e potássica observada em solos em SPD de longa duração (Sá, 2004; Anghinoni, 2007; Wendling et al., 2008). Este

contexto condiciona à necessidade de uma nova abordagem da fertilidade do solo e da recomendação de nutrientes para os solos conduzidos em SPD de longa duração. Nessa condição, o manejo da adubação por cultura é suprimido em favor do conceito de adubação do sistema, mantendo assim, a alta ciclagem dos nutrientes no solo pela manutenção da fertilidade baseada na exportação das culturas.

2.2. Sistema de recomendação de adubação: estudos de calibração

A calibração tem por objetivos definir os teores críticos, as classes de fertilidade ou de disponibilidade do nutriente e as doses dos nutrientes para serem aplicadas, quando necessárias (Cantarutti et al., 2007). Com a calibração, busca-se o relacionamento matemático do teor do nutriente no solo e a resposta da planta à adição do nutriente.

A análise do solo realizada por método calibrado a campo, através da relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor do nutriente no solo, é uma forma rápida, eficiente e de baixo custo, amplamente utilizada para o diagnóstico da fertilidade do solo e definição da quantidade de nutrientes recomendados para uma determinada probabilidade de resposta de uma cultura (Schlindwein & Gianello, 2004).

Em um estudo de calibração, a primeira etapa é a obtenção da curva de calibração. Para isso, é necessária a condução de experimentos com doses crescentes do nutriente em estudo em diferentes locais, cultivando-os por vários anos e com várias culturas. A partir da relação entre os rendimentos relativos das culturas e os teores de nutrientes no solo, escolhe-se um modelo matemático que se ajuste aos pontos da curva de calibração. Neste tipo de estudo, tem-se utilizado principalmente equações exponenciais, com destaque para a equação de Mitscherlich (Sociedade..., 2004; Cubilla et al., 2007; Wendling et al., 2008; Schlindwein et al., 2011).

Baseado na curva de calibração ajustada pela equação escolhida, o teor crítico do nutriente no solo é obtido, o qual é definido como o teor do nutriente no solo que proporciona o máximo rendimento econômico da cultura, que tem sido considerado como o rendimento relativo de 90 %. Na sequência

da calibração, o solo é enquadrado em classes de fertilidade, que variam de acordo com o detalhamento da recomendação. A determinação das classes de fertilidade (faixas de teores de disponibilidade de nutrientes no solo) é importante, pois elas definem a probabilidade de resposta das culturas à adubação. Normalmente, a curva de calibração é dividida nas classes de disponibilidade Baixa, Média e Alta, que apresentam probabilidade de resposta alta, média e baixa, respectivamente, à aplicação do nutriente.

2.3. Sistema de recomendação de adubação: filosofias de adubação

A segunda etapa do estudo de calibração tem por objetivo estimar as doses de fertilizantes em cada classe de disponibilidade de nutrientes no solo. Tradicionalmente, existem duas distintas filosofias para realizar a recomendação de adubação: 1) a filosofia de “suficiência de nutrientes” e 2) a filosofia de “construção e manutenção”.

A filosofia de suficiência, também definida como “adubação de cultura” (Comissão..., 1989), tem como objetivo aplicar doses do nutriente a cada cultivo, visando rendimentos próximos à máxima eficiência econômica (MEE). Para isso, a dose é estimada de acordo com a resposta da cultura em função do nível do nutriente no solo, maximizando a rentabilidade em curto prazo, o alto retorno por kg de nutriente aplicado e o baixo risco de aplicação excessiva de nutrientes, entretanto, assumindo um risco de perda de rendimento (Figura 1)(Leikam et al., 2003; Mallarino, 2009). Em geral, essa filosofia é mais adequada para solos com alta capacidade de reter P em formas não disponíveis para as culturas (Mallarino, 2009).

Recomendações de adubação pela filosofia de suficiência/adubação de cultura são baseadas em experimentos a campo de calibração de análise do solo em longo prazo. Para reduzir o efeito das variabilidades no retorno econômico pela variação dos preços, as recomendações nessa filosofia geralmente são desenvolvidas para obter 90 a 95 % do rendimento máximo (Leikam et al., 2003). A resposta das culturas e as doses de nutrientes aplicadas são maiores em solos com baixos teores de nutriente, enquanto que

a recomendação de nutriente decresce para zero quando o teor do nutriente no solo aumenta para o nível de suficiência (Figura 1).

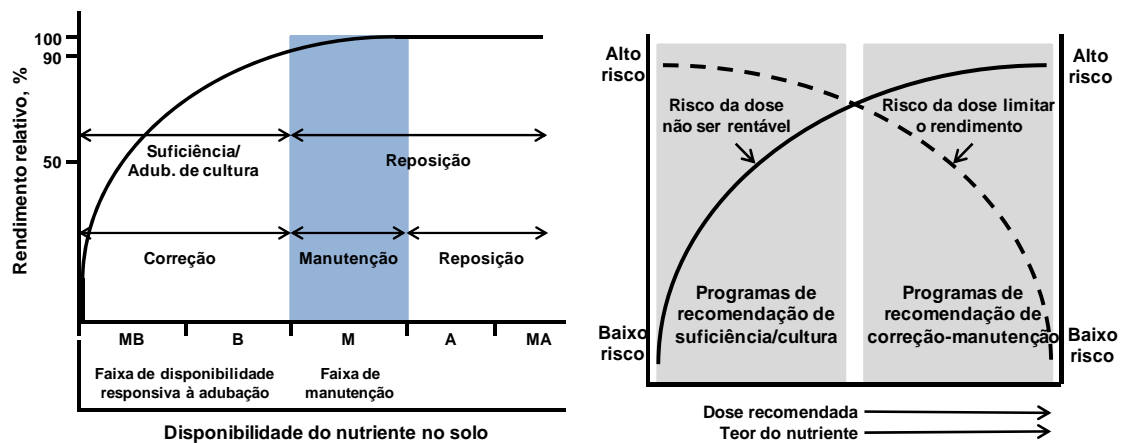


FIGURA 1. Filosofias de recomendação de adubação de “suficiência/de cultura” vs. “correção e manutenção”. Adaptado de Leikam et al. (2003).

A segunda filosofia de adubação é baseada no conceito de “construção e manutenção” dos teores de nutriente no solo e tem como objetivo o rendimento das culturas próximo à máxima eficiência técnica (MET) (Comissão..., 1989; Leikam et al., 2003). Em solos com baixo teor do nutriente, a adubação “corretiva” é a recomendada no primeiro cultivo, visando elevar o teor do nutriente ao teor crítico. Ao atingir o teor crítico almejado, a recomendação de adubação visa manter os teores no solo na faixa de disponibilidade adequada através da adubação de “manutenção” nos anos seguintes (Figura 1).

A recomendação de adubação pela filosofia de “correção e manutenção” não propõe a obtenção dos melhores retornos econômicos em curto prazo, mas sim tenta minimizar a possibilidade do teor do nutriente no solo estar limitando a produtividade das culturas, proporcionando retorno econômico em longo prazo (Leikam et al., 2003). Dessa forma, quando o teor do nutriente está abaixo do teor crítico, as doses recomendadas são geralmente muito maiores que as sugeridas pela filosofia de suficiência/adubação de cultura.

Cada filosofia de recomendação de adubação tem suas vantagens e desvantagens, demonstradas na figura 1. Basicamente, existem dois riscos que afetam a decisão das doses de P ou K a serem aplicadas. O primeiro risco é

que a quantidade do nutriente aplicado é maior que a requerida pelas culturas, reduzindo a rentabilidade. O segundo é que a disponibilidade do nutriente no solo e adicionada pela adubação é menor que a requerida pelas culturas, limitando a produtividade e a rentabilidade.

Em diferentes regiões produtoras de grãos mundiais, as recomendações de adubação dividem-se entre a filosofia de nível de suficiência, de construção e manutenção ou então, a combinação de ambas. Nos estados de Iowa e Kansas - EUA, principal região mundial produtora de milho ("*corn belt*"), as recomendações de adubação são baseadas nas duas filosofias combinadas (Leikam et al., 2003; Sawyer et al., 2011).

No Brasil, a filosofia de construção e manutenção, pela facilidade da matemática de construção das doses através da avaliação da necessidade de nutriente para elevar uma unidade do teor no solo, é adotada em grande parte dos estudos (Schlindwein & Gianello, 2008; Embrapa, 2011a, b; Schlindwein et al., 2011). Esta filosofia também é adotada nos estudos recentes de recomendação fosfatada e potássica para as culturas de grãos no Paraguai (Cubilla et al., 2007; Wendling et al., 2008).

Dentre os sistemas de recomendação de fertilizantes nas diferentes regiões brasileiras, a adubação corretiva é adotada no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Sociedade..., 2004), Minas Gerais (Ribeiro et al., 1999) e Cerrado (Sousa & Lobato, 2004). A filosofia de suficiência/adubação de cultura baseada em curvas de resposta das culturas ao fertilizante em solos com disponibilidade do nutriente abaixo do teor crítico é utilizada basicamente no estado de São Paulo (Raij et al., 1997), apesar de que, algumas recomendações mesclam as duas filosofias para recomendação, utilizando doses de reposição de nutrientes para solos acima do teor crítico (Ribeiro et al., 1999; Sociedade..., 2004).

2.4. Recomendações de adubação no Paraná

O estado do Paraná não possui um sistema de recomendação de adubação englobando rotação de culturas, apenas indicações e recomendações técnicas obtidas através de pesquisas com cada cultura separadamente. Além disso, as pesquisas são pouco detalhadas quando

comparado às recomendações de adubação de São Paulo (Raij et al., 1997) e Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Sociedade..., 2004).

Para a cultura do trigo, a indicação da quantidade a aplicar de P e K é baseada apenas no teor do nutriente no solo (Embrapa, 2011b), não considerando a sua classe textural para o P e a sua $CTC_{pH7,0}$ para o K, sendo utilizado os teores críticos de 9 mg dm^{-3} de P e $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K. Para a cultura do milho, existe apenas a sugestão de adubação de Oliveira (2003) para solos com teor de argila acima de 360 g kg^{-1} , a qual indica o teor crítico de P de $4,5 \text{ mg dm}^{-3}$ e de K de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Entretanto, mediante a pequena quantidade de resultados em solos em sistema plantio direto, a recomendação de adubação ainda é realizada utilizando a recomendação do RS e SC (Sociedade..., 2004) e de SP (Raij et al., 1997) pois, dentre as recomendações, estes são os que contemplam solos e climas com maior semelhança às condições das regiões produtoras de grãos paranaenses.

A cultura da soja, devido sua grande importância econômica envolvida, é a cultura que possui a recomendação mais evoluída e detalhada dentre as cultivadas no Estado. A recomendação indica que as doses de P e K sejam aplicadas de acordo com o teor do nutriente no solo. Em solos com teores de argila acima de 400 g kg^{-1} , o teor crítico de P para a cultura da soja é de 6 mg dm^{-3} e de K é $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Embrapa, 2011a). Para solos com teor de argila inferior a 400 g kg^{-1} , a Embrapa (2011a) sugere utilizar a recomendação indicada para o arenito Caiuá, que deriva da recomendação de P e K para os solos do Cerrado (Sousa & Lobato, 1996). Nesta recomendação, o teor crítico para solos com teor de argila inferior a 200 g kg^{-1} é 18 mg P dm^{-3} e 14 mg P dm^{-3} para solos com 200 a 400 g kg^{-1} de argila e, a aplicação de potássio somente é recomendada para solos com teor de argila superior a 200 g kg^{-1} , com teor crítico de $0,13 \text{ cmol}_c \text{ K dm}^{-3}$.

Além da recomendação de adubação para a cultura da soja isolada, há a recomendação para a soja em SPD em sucessão com culturas de safrinha ou de inverno, que foi desenvolvida a partir de vários estudos em solos no estado do Paraná (Lantmann et al., 1996). Nesta recomendação, preconiza-se a aplicação dos fertilizantes na cultura de inverno que, em geral, é mais exigente em fertilidade do solo. Assim, quando for realizada a devida adubação na cultura de inverno, na sucessão trigo/soja ou aveia/soja ou cevada/soja ou

milho safrinha/soja, e o teor de P na camada de 0-20 cm do solo estiver acima de $18,0 \text{ mg dm}^{-3}$ em solos com teor de argila inferior a 200 g kg^{-1} , 14 mg dm^{-3} em solos com teor de argila entre 200 e 400 g kg^{-1} e 9 mg dm^{-3} em solos com teor de argila superior a 400 g kg^{-1} , e o K estiver acima de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, em todos os tipos de solo, é possível suprimir a adubação com P e K na cultura da soja em SPD (Embrapa, 2011a). Contudo, Lantmann et al. (1996) destacam que a decisão final de adubar ou não a cultura da soja, após o cultivo anterior devidamente adubado, fica a critério do profissional da assistência técnica, conhecedor do histórico de uso e da fertilidade do solo da área.

Apesar de existir algumas recomendações de adubação para as culturas, tanto em teor crítico, classes de disponibilidade e doses para aplicar, grande parte delas são baseadas em experimentos conduzidos nas décadas de 80 e 90 (OCEPAR, 1987; Lantmann et al., 1996; Embrapa, 1999), a maioria em solos cultivados em preparo convencional e com potencial produtivo das culturas muito inferior ao atual. Portanto, além da necessidade do desenvolvimento de uma recomendação de adubação na amplitude de rotação de culturas, é necessária também a atualização das recomendações para o SPD, sobretudo de longa duração (“consolidado”), pois na região Centro-Sul do Paraná é o sistema de manejo do solo adotado predominantemente pelos produtores há mais de 20 anos.

No ano de 2007 foi criado o Núcleo Estadual do Paraná (NEPAR) da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, o qual objetiva congrega pesquisadores do Estado e desenvolver atividades científicas e de difusão de tecnologias, permitindo maior aproximação entre os profissionais de instituições de pesquisa, a discussão e o compartilhamento dos tópicos estudados, bem como traçar ações em conjunto no sentido de desenvolver pesquisas futuras (IAPAR, 2008).

A criação do NEPAR representa um avanço significativo no desenvolvimento de estudos e na difusão de tecnologias de pesquisa no estado do Paraná. Desde a sua primeira assembleia formal em 2008, o NEPAR já promoveu três Reuniões Paranaenses de Ciência do Solo (2009, 2011 e 2013), sempre com o objetivo de proporcionar aos profissionais de instituições públicas ou privadas de ensino, pesquisa ou extensão, de cooperativas, produtores e estudantes, a discussão de problemas, de resultados recentes de

pesquisa e de novas tecnologias relacionadas ao uso, manejo e conservação dos solos no Paraná. A partir da reunião das instituições de pesquisa da e discussão da Ciência do Solo no Estado, espera-se avançar no tópico referente ao manejo de nutrientes e recomendações de adubação para as culturas em solos em sistema plantio direto no Paraná.

2.5. Características da região Centro-Sul do Paraná

A região Centro-Sul do Paraná está localizada no terceiro planalto fisiográfico do Paraná, numa altitude de 800 a 1200 m. O clima é subtropical úmido, do tipo Cfb (Köppen), precipitação anual de 1960 mm ano⁻¹, sem estação seca e com geadas severas bastante frequentes. A média de temperatura dos meses mais quentes é 21 °C e dos meses mais frios é 13 °C.

Os solos da região são originados principalmente de basalto, da formação Serra Geral, predominando os Latossolos, em especial o Latossolo Bruno alumínico (Embrapa, 2006), argiloso, profundo, bem drenado, com alta saturação por alumínio em sua condição natural, associado ao relevo suave ondulado. Estes solos abrangem uma área de cerca de 1700 km² (Eltz et al., 1989), estando localizados predominantemente nos municípios de Guarapuava, Pinhão e Cândói.

A condição térmica da região associada à alta precipitação pluviométrica resultou em altas taxas de intemperismo. Assim, nesse solo observa-se a ocorrência de aproximadamente 70 g kg⁻¹ de óxidos de ferro (com aproximadamente 80 % de goethita) e 540 g kg⁻¹ de caulinita + gibbsita (com aproximadamente 74 % de gibbsita) na fração argila (610 g kg⁻¹) (Inda Junior et al., 2007). Esta constituição mineralógica confere ao Latossolo Bruno alumínico algumas características específicas, como a forte estabilidade de microagregados, resultante da interação dos óxidos com o carbono orgânico (Dick & Schwertmann, 1996; Inda Junior et al., 2007), alta capacidade de adsorção de P (Valladares et al., 2003) e CTC dependente da matéria orgânica do solo (Ciotta et al., 2003), a qual na região Centro-Sul é em média de 15 cmol_c dm⁻³.

As características de clima e de solo da região Centro-Sul do Paraná, aliadas ao emprego de alta tecnologia na agricultura, proporciona a esta região um alto potencial produtivo, evidenciado com rendimentos médios acima de $3,6 \text{ t ha}^{-1}$ de soja, $11,3 \text{ t ha}^{-1}$ de milho, $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ de trigo e $4,4 \text{ t ha}^{-1}$ de cevada (Agrária, 2012).

Estudos de fertilidade do solo e da dinâmica de P e K no solo em sistema plantio direto de longa duração na região Centro-Sul do Paraná foram desenvolvidos desde o ano 2008 por Fontoura et al. (2011) e Vieira (2010), com foco na definição da camada diagnóstica para amostragem e avaliação da fertilidade do solo e na obtenção de teores críticos de P e K para as culturas.

Na análise da camada diagnóstica para amostragem do solo, Fontoura et al. (2011) observaram relação similar entre o rendimento das culturas e os atributos de fertilidade do solo quando consideradas as camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade. Além disso, as alterações nos atributos do solo com a calagem e as adubações fosfatadas e potássicas superficiais não foram restritas à camada superficial de 0-10 cm, ocorrendo alterações significativas da calagem e da adubação na fertilidade da camada de 10-20 cm do solo. Desta forma, a amostragem do solo na camada de 0-20 cm foi definida como a mais adequada na avaliação da fertilidade de solos em plantio direto nessa região. A equivalência das camadas de 0-20 e 0-10 cm na avaliação da fertilidade de um Latossolo Bruno de Castro (PR) foi observada por Pauletti et al. (2009), sugerindo que em situações com teores altos de P e médios de K a camada de amostragem (0-20 ou 0-10 cm) não interfere na recomendação de adubação.

Com relação à definição dos teores críticos de P e K, Fontoura et al. (2011) observaram maior exigência de fertilidade pelas culturas de aveia branca, trigo e cevada em relação à soja e milho. Dessa forma, os autores agruparam as culturas por sua exigência de P e K e obtiveram os valores críticos para a rotação de culturas de $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de fósforo e de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de potássio para a camada de amostragem de 0-20 cm, bem como os teores críticos de $11,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de fósforo e $0,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de potássio para a camada de amostragem de 0-10 cm.

3. HIPÓTESES

- O teor de argila acima de 600 g kg^{-1} e o alto poder tampão de P pelo caráter oxídico nos solos da região Centro-Sul do Paraná proporcionam menor teor crítico de P e a recomendação de maiores doses de P_2O_5 que a atual recomendação para o Estado.

- O alto teor de matéria orgânica e a capacidade de troca de cátions ($\text{CTC}_{\text{pH}7}$) do solo resultam em maior teor crítico de K no solo que o atual recomendado para as culturas no Paraná.

- A alta expectativa de rendimento de grãos na região demandam doses de P e K maiores que a atual recomendação para as culturas no estado do Paraná.

4. OBJETIVOS

4.1. Geral

- Elaborar um sistema de recomendação de adubação fosfatada e potássica para a rotação de culturas envolvendo soja, milho, cevada e trigo, em solos em sistema plantio direto de longa duração na região Centro-Sul do Paraná.

4.2. Específicos

- Consolidar a curva de calibração e os teores críticos de fósforo e potássio obtidos pelo método Mehlich-1 na região de abrangência da Cooperativa Agrária.

- Estabelecer faixas e classes de disponibilidade para fósforo e potássio no solo.

- Obter as curvas de resposta das culturas à adubação fosfatada e potássica em função das classes de disponibilidade dos nutrientes no solo.

- Gerar uma recomendação da adubação fosfatada e potássica para a rotação de cultura em solos em sistema plantio direto de longa duração na região em estudo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Descrição dos experimentos

Este estudo foi desenvolvido por uma parceria entre o Departamento de Solos da UFRGS e a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), da Cooperativa Agrária Agroindustrial. Para atingir os objetivos propostos, 47 experimentos com fósforo e 47 experimentos com potássio foram utilizados, todos localizados na área de abrangência da Cooperativa Agrária, na região Centro-Sul do Paraná, em Latossolo Bruno com teor de argila superior a 600 g kg⁻¹ e capacidade de troca de cátions a pH 7,0 média de 15 cmol_c dm⁻³.

Três experimentos de calibração com doses de P e três com doses de K foram instalados em 2008, em Guarapuava, Pinhão (Reserva do Iguazú) e Cândói (Figura 2). No município de Guarapuava, os experimentos de P e K foram instalados na área experimental pertencente à FAPA, localizada em Colônia Vitória, no Distrito de Entre Rios. Em Pinhão e Cândói, os experimentos foram instalados em áreas disponibilizadas por produtores.

O delineamento desses experimentos de P e K foi de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas principais (9,6 x 10 m) foram adubadas com doses de super fosfato triplo (0, 80, 160, 320 e 640 kg P₂O₅ ha⁻¹) no experimento de fósforo e doses de cloreto de potássio (0, 80, 160, 320 e 640 kg K₂O ha⁻¹) no experimento de potássio, cuja aplicação foi realizada a lanço sem incorporação, antecedendo a semeadura das culturas no inverno de 2008, e visou à criação de níveis de fertilidade. As parcelas principais foram divididas em duas subparcelas (4,8 x 10 m) no verão 2008/09,

mantendo uma subparcela sem reaplicação do nutriente (P ou K) e a outra subparcela com reaplicações a cada safra de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 , nos experimentos de P e de K_2O , nos experimentos de K. Desta forma, obtiveram-se cinco níveis de fertilidade do solo a partir da aplicação das doses iniciais de P ou K.

Os resultados desses experimentos de calibração de P e K nos anos de 2008 e 2009 foram utilizados por Vieira (2010) no estudo dos teores críticos de P e K e foram agregados neste estudo aos resultados do período de 2010 a 2013, visando à consolidação dos teores críticos obtidos anteriormente.

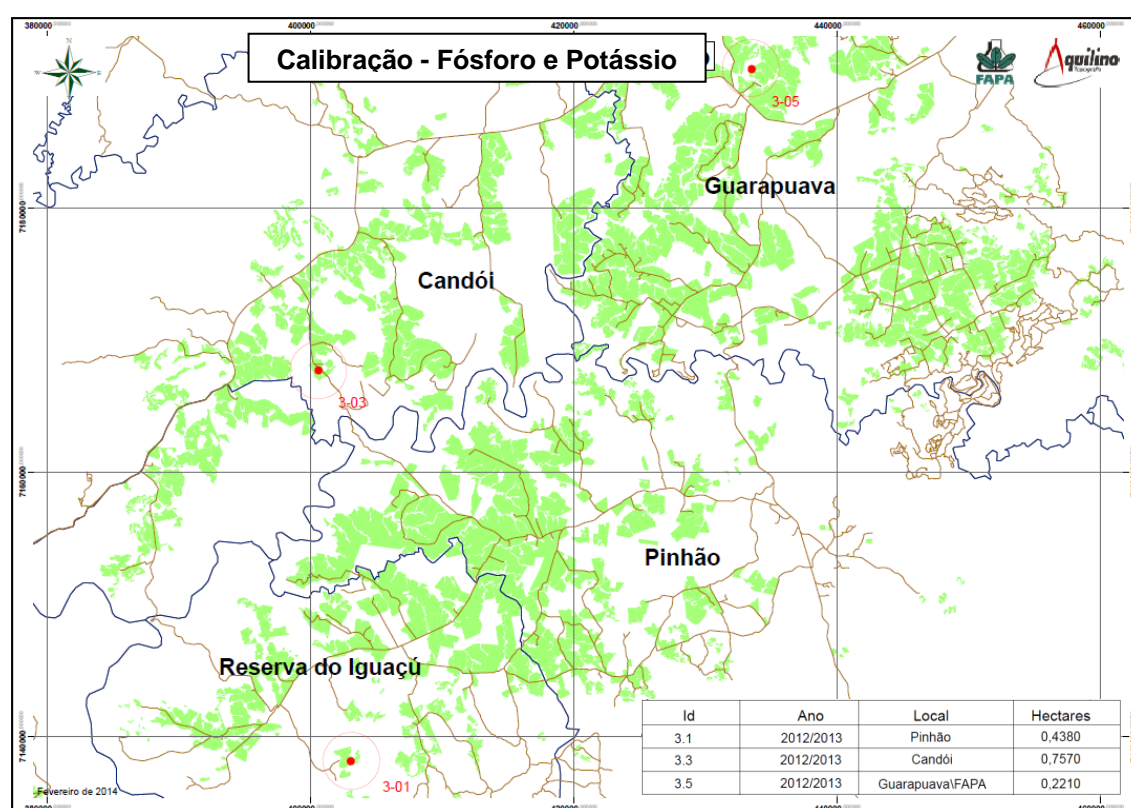


FIGURA 2. Localização dos experimentos de fósforo e potássio instalados em 2008 na área de abrangência da Cooperativa Agrária (em verde) na região Centro-Sul do Paraná.

Para a obtenção das curvas de resposta ao fertilizante, 44 experimentos com doses de P e 44 experimentos com doses de K foram conduzidos em diferentes locais na região Centro-Sul do Paraná, ao longo de dois anos agrícolas (2011, 2011/12, 2012 e 2012/13) (Figuras 3 e 4). Dentre estes, 11 experimentos foram conduzidos com soja, 10 com milho, 11 com cevada e 12 com trigo, tanto para P quanto para K. Todos os experimentos foram conduzidos em propriedades rurais de cooperados da Cooperativa

Agrária, sendo as áreas selecionadas de acordo com os teores de P ou K no solo, buscando solos com teores representativos da região e nas classes de disponibilidade “Baixa”, “Média” e “Alta”, previamente determinadas no período de 2008-2009.

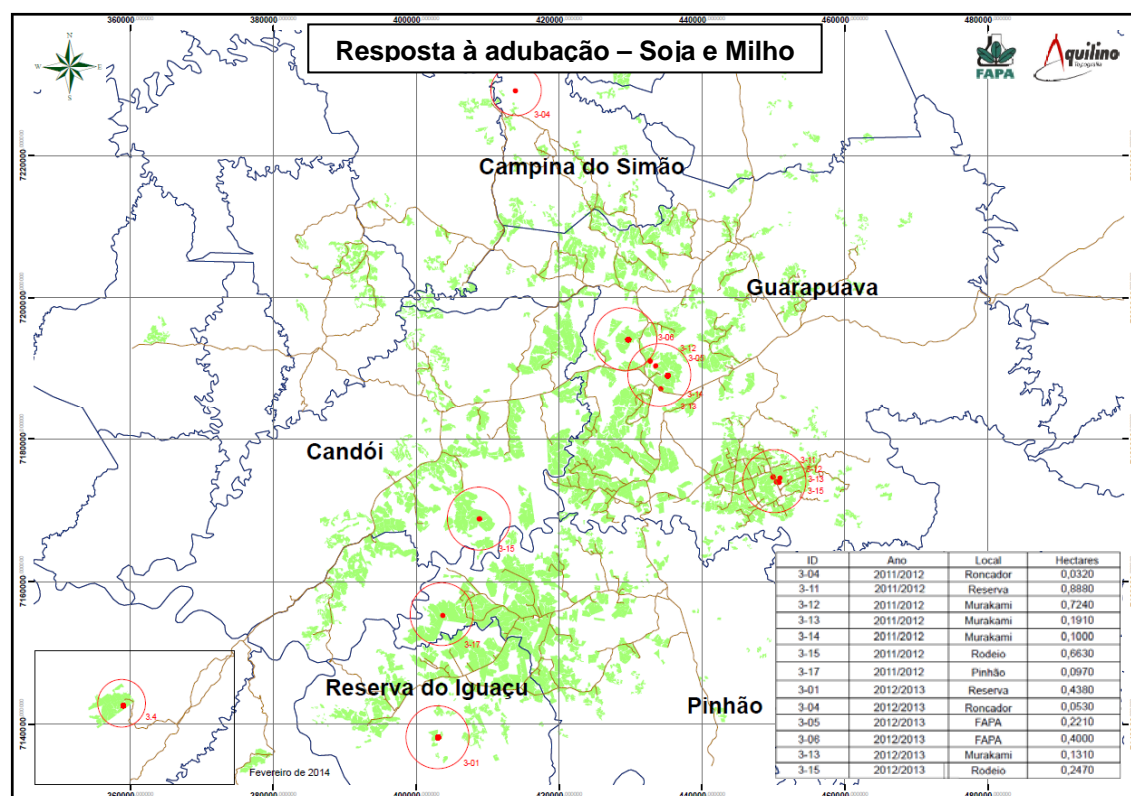


FIGURA 3. Localização dos experimentos de resposta de soja e milho à adubação fosfatada e potássica na área de abrangência da Cooperativa Agrária (em verde) na região Centro-Sul do Paraná.

O delineamento experimental foi blocos casualizados com 3 repetições, sendo aplicadas na linha de semeadura das culturas as doses de 0, 30, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅, nos experimentos de fósforo, e de K₂O, nos experimentos de potássio. Para os experimentos com soja e milho, as parcelas foram dimensionadas com 4 linhas de semeadura e 5 metros de comprimento, adotando o espaçamento de 0,40 m para soja e 0,80 m para milho. Para trigo e cevada, utilizaram-se 6 linhas de semeadura espaçadas de 0,17 m e 5 metros de comprimento. Para a colheita, desconsideraram-se as linhas de semeadura externas e 0,5 m de bordadura em cada extremidade da linha, totalizando uma área útil de 3,2 m² na cultura da soja, 6,4 m² na cultura do milho e 2,7 m² nas culturas de trigo e cevada.

O manejo da adubação dos demais nutrientes em todos os experimentos foi realizado conforme a recomendação para a cultura em cada safra (Embrapa, 2009; Fontoura & Bayer, 2009; Embrapa, 2011a, b).

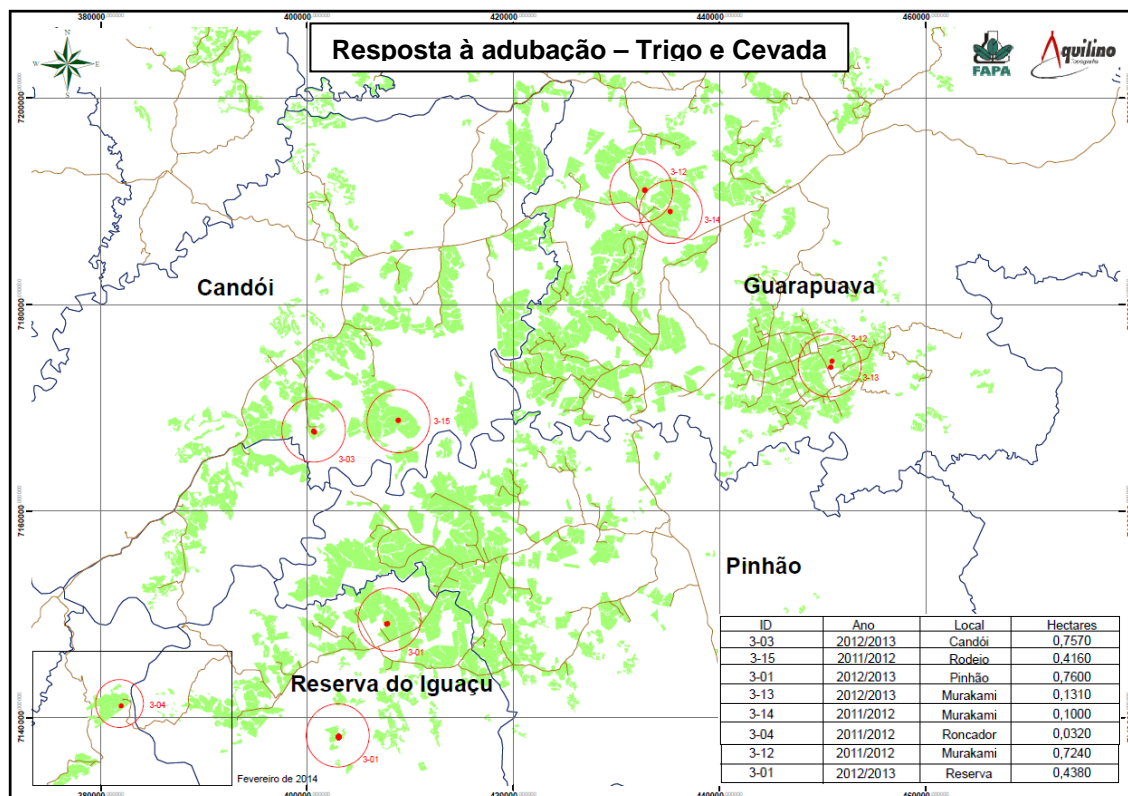


FIGURA 4. Localização dos experimentos de resposta de trigo e cevada à adubação fosfatada e potássica na área de abrangência da Cooperativa Agrária (em verde) na região Centro-Sul do Paraná.

5.2. Coletas de solo e análises

Amostras de solo das camadas de 0-10 e 0-20 cm foram coletadas anualmente, no mês de maio, nos experimentos com doses de P e K instalados em 2008 em Guarapuava, Pinhão e Candói. Nos experimentos com curvas de resposta a P e K instalados de 2011 a 2012/13, o solo foi amostrado nas camadas 0-10 e 0-20 cm em toda a área experimental, anteriormente à semeadura de cada cultura. As coletas das amostras de solo foram realizadas com trado calador, utilizando a metodologia de coleta transversal à linha de semeadura (Sociedade..., 2004). Os teores de P e K disponíveis no solo foram determinados pelo método de Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995), o qual é um extrator duplo ácido (0,05 N HCl + 0,025 N H₂SO₄) utilizado em várias regiões brasileiras.

5.3. Determinação do rendimento relativo das culturas

Para os experimentos de calibração instalados em 2008, o rendimento relativo de grãos foi calculado atribuindo-se o valor de 100 para o maior rendimento de grãos da cultura na safra avaliada em cada experimento (considerando os tratamentos sem e com reaplicação), calculando o rendimento dos demais tratamentos proporcionais a este (Equação 1). Para os experimentos de resposta à adubação em cada safra, o rendimento relativo foi determinado utilizando a equação 1, considerando o rendimento máximo e o rendimento do tratamento sem adubação, a partir da função de produção ajustada pelas doses.

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem aplicação de fertilizante}}{\text{Rendimento de Máxima Eficiência Técnica}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Para o valor de rendimento máximo da cultura, no caso do ajuste de equações lineares com respostas positivas à aplicação do fertilizante, o valor de rendimento máximo foi o correspondente à maior dose utilizada; no caso de resposta negativa, o rendimento máximo foi o correspondente à dose zero do nutriente (intercepto da equação de regressão). Quando foram ajustadas funções de regressão de segundo grau, foi utilizada a técnica de derivação das funções para obtenção do valor de rendimento máximo.

5.4. Consolidação da curva de calibração

A curva de calibração foi obtida a partir da relação entre os valores de rendimento relativo de grãos das culturas nos tratamentos sem adição do nutriente e os respectivos teores no solo, determinados em análise anterior à semeadura (P e K disponível por Mehlich-1).

Para a consolidação das curvas de calibração e dos teores críticos no solo foram considerados os rendimentos relativos dos 6 experimentos instalados em 2008 (três de P e três de K) e dos 88 experimentos de resposta à adubação – soja, milho, trigo e cevada – instalados nas safras de 2011, 2011/12, 2012 e 2012/13 (44 de P e 44 de K).

Cabe destacar que a cultura da aveia branca foi incluída apenas na consolidação das curvas de calibração (teores críticos) e não nos experimentos de resposta à adubação para avaliação de retorno econômico e estimação de doses. Isso se deve porque essa cultura tem sido pouco utilizada pelos produtores nos últimos anos em razão do menor retorno econômico em relação às culturas de trigo e cevada

Dentre os resultados obtidos por Vieira (2010), os rendimentos que foram utilizados na curva de calibração foram das safras de 2008, 2008/09, 2009 e 2009/10, nos três experimentos de P e nos três de K. Dois experimentos de média duração com P e K (8 e 10 anos) utilizados por Vieira (2010) não foram inseridos neste estudo devido à grande variabilidade dos rendimentos relativos e uma superestimação da exigência das culturas, principalmente de K, decorrente do tratamento testemunha não receber adição de P e nem de K. Essa condição de não aplicação de P nem K possivelmente mascarou a variável limitante responsável pela resposta das culturas.

Para o ajuste da curva de calibração foi utilizado o programa de computação "TABLE CURVE 2D v 5". A equação utilizada para o ajuste dos dados foi a equação de Mitscherlich (Equação 2), que é uma equação exponencial forçada a alcançar o rendimento relativo de 100 % e tem sido amplamente utilizada em estudos de calibração (Cubilla et al., 2007; Villalba, 2008; Wendling et al., 2008; Schlindwein et al., 2011):

$$y = A(1 - 10^{-bx}) \quad (\text{Equação 2})$$

em que y representa o rendimento relativo (RR), A representa a produtividade máxima (100), b é o coeficiente de eficácia do elemento e x é o teor de fósforo (mg dm^{-3}) ou de potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) no solo.

O teor crítico na calibração foi definido como o valor do nutriente no solo para a estimativa de 90 % do rendimento máximo, como foi definido nos programas de adubação no RS e SC (Sociedade..., 2004), em razão de que normalmente se obtém rendimentos próximos a máxima eficiência econômica (MEE) em 90 % do rendimento relativo máximo.

5.5. Faixas e classes de disponibilidade, curvas de resposta e estimativa de doses

As faixas de disponibilidade de P e de K foram ajustadas a partir do teor crítico do nutriente, em que a metade do teor crítico delimita a classe de disponibilidade “Baixa” da “Média” e o dobro do teor crítico delimita a classe de disponibilidade “Alta” da “Muito alta”. Essas respectivas classes de disponibilidade correspondem às faixas de rendimentos relativos de, aproximadamente, 0 a 68 (Baixa), 68 a 90 (Média), 90 a 99 (Alta) e maior que 99 % (Muito alta).

Para cada cultura, os experimentos de resposta à adubação foram enquadrados dentro das classes estipuladas, de acordo com o teor do nutriente no solo na camada 0-20 cm, anterior à aplicação das doses. Em cada classe de disponibilidade, calculou-se a média dos rendimentos de grãos em cada dose, obtendo o incremento de grãos (kg ha^{-1}) em relação à dose zero. Os valores de incremento de grãos com as doses do nutriente foram ajustados utilizando equações polinomiais para cada cultura e em cada classe de disponibilidade. A partir desse ajuste, obteve-se a dose de máxima eficiência técnica (MET) e a dose de máxima eficiência econômica (MEE). Para a análise de MEE, utilizou-se o preço médio de grãos e dos fertilizantes (superfosfato triplo e cloreto de potássio) dos últimos cinco anos (outubro de 2008 a setembro de 2013) (Tabela 1).

A estimativa das doses de fósforo para as culturas nesse estudo combina aspectos de duas filosofias de recomendação de adubação, a filosofia de suficiência e a de construção e manutenção da fertilidade. Dessa forma, em solos onde a disponibilidade de P é Baixa e Média, as doses de fertilizantes foram definidas pela rentabilidade, ou seja, pelo uso de doses de máxima eficiência econômica, incrementando gradualmente os teores de nutrientes em direção à classe de disponibilidade Alta. Esse critério é importante para a adubação fosfatada, uma vez que o solo da região tem grande capacidade de adsorção de fósforo, o que exigiria um desprendimento monetário alto na adubação de correção para elevar o teor do solo ao nível crítico.

Para a estimativa das doses de potássio para as culturas em solos com disponibilidade Baixa e Média utilizou-se a filosofia de construção da

fertilidade do solo, a partir de doses de correção do solo visando elevar o teor de K no solo ao teor crítico. Para isso, avaliou-se o incremento no teor de K disponível no solo após sete meses da aplicação das doses de K nos três experimentos instalados em 2008 em Guarapuava, Pinhão e Cândói (Figura 2), determinando a necessidade de K_2O para elevar o teor de K no solo em $0,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os experimentos de resposta das culturas à adubação potássica (Figuras 3 e 4) foram utilizados como complemento na determinação das doses de recomendação de adubação potássica, a partir da análise econômica da aplicação de K em cada classe de disponibilidade.

Após o teor do nutriente no solo atingir a classe de fertilidade Alta, a adubação de manutenção objetiva manter a disponibilidade nessa classe, pela adição de doses de reposição do nutriente (exportação do grão) acrescidas de 20 % relativo às perdas por adsorção (P), lixiviação (K) e erosão (P e K) (Sociedade..., 2004).

TABELA 1. Preço médio de grãos das culturas e dos fertilizantes no período de outubro de 2008 a setembro de 2013

Produto	Preço médio	Valor de troca ¹	
		P ₂ O ₅	K ₂ O
	R\$ t ⁻¹		
Soja	789,25	2,1	1,6
Milho	355,25	4,7	3,5
Trigo	522,49	3,2	2,4
Cevada	496,00	3,3	2,5
Superfosfato triplo	761,00 (1654) ²		
Cloreto de potássio	754,70 (1258)		

¹ Relação entre o preço do nutriente e o preço de grãos das culturas (resultado expresso em kg de produto / kg de nutriente (P₂O₅ ou K₂O)); Um valor de 5 indica que o custo de 1 kg do nutriente equivale a 5 kg de grãos. ² O valor em parênteses representa a cotação em R\$ t⁻¹ de P₂O₅ ou K₂O. Fonte: (Agrolink, 2013) ; (Mundi, 2013a, b).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos em dois tópicos, que correspondem à calibração e recomendação de doses de fertilizantes para o fósforo e para o potássio.

6.1. ESTUDO 1: Calibração de fósforo no solo com o extrator Mehlich-1 e recomendação de adubação fosfatada para soja, milho, trigo e cevada

Nesta seção são apresentados os rendimentos de grãos das culturas e os correspondentes teores de P no solo, nos experimentos de calibração com doses de P_2O_5 para a criação de níveis de fertilidade e nos experimentos de resposta à adubação com doses de P_2O_5 na semeadura das culturas. A partir da análise conjunta desses dados realizou-se a consolidação da curva de calibração de P e do teor crítico para a rotação de culturas, bem como a definição das faixas de disponibilidade e a elaboração da recomendação de doses de P para as culturas de soja, milho, trigo e cevada.

6.1.1. Rendimento de grãos das culturas e teores de fósforo no solo

Os rendimentos de grãos das culturas nos experimentos de calibração de P instalados em 2008 são apresentados na tabela 2 e os respectivos teores de P no solo na tabela 3.

TABELA 2. Rendimentos relativos de soja, milho, trigo, cevada e aveia branca nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de P_2O_5 aplicadas na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de fósforo a cada safra.

Local do experimento	Safra	Rend. máximo ¹ kg ha ⁻¹	Rendimento relativo ²				
			Doses de correção, kg P_2O_5 ha ⁻¹				
			0	80	160	320	640
			----- % -----				
Soja							
Guarapuava	2010/11	3846	97	96	92	97	100
Guarapuava	2011/12	4188	92	92	96	92	94
Guarapuava	2012/13	5356	84	87	89	90	94
Pinhão	2010/11	4234	94	99	97	95	97
Pinhão	2011/12	4097	80	91	85	85	88
Pinhão	2012/13	4417	81	90	92	87	90
Candói	2009/10	4578	88	91	92	95	96
Candói	2011/12	4232	76	78	78	88	97
Candói	2012/13	4685	69	71	72	84	91
Milho							
Guarapuava	2009/10	15043	98	99	98	97	98
Pinhão	2009/10	14865	87	89	92	88	88
Candói	2010/11	15725	81	84	85	91	93
Trigo							
Pinhão	2010	4477	73	75	79	84	86
Cevada							
Guarapuava	2011	5361	89	88	92	97	97
Pinhão	2011	5723	80	94	90	93	98
Candói	2011	6030	42	50	49	72	84
Aveia branca							
Candói	2012	2869	62	65	61	70	82

¹ Rendimento de grãos referente ao tratamento que apresentou o maior rendimento de grãos em cada experimento e safra (considerando os tratamentos sem e com reaplicação de P); valor definido como RR = 100 %.

² Percentual do rendimento do tratamento em relação ao máximo obtido no experimento em cada safra.

TABELA 3. Teores de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de P_2O_5 aplicadas em superfície na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de fósforo a cada safra.

Local do experimento	Época de coleta	Camada	Fósforo disponível					
			Doses de correção, $kg P_2O_5 ha^{-1}$					
			0	80	160	320	640	
		cm	----- $mg dm^{-3}$ -----					
Guarapuava	Novembro 2008 ¹	0-10	17,9	22,5	34,1	40,8	74,5	
		0-20	14,3	16,7	21,0	34,1	39,3	
	Abril/2009 ¹	0-10	20,4	26,2	31,6	41,6	65,1	
		0-20	13,2	14,4	13,3	23,3	34,3	
	Abril/2010	0-10	12,7	12,1	13,7	17,9	28,2	
		0-20	10,4	10,4	11,5	16,5	19,1	
	Abril/2011	0-10	18,7	15,5	16,7	28,8	31,7	
		0-20	12,3	9,7	11,8	17,5	19,3	
	Abril/2012	0-10	18,1	16,8	22,3	23,3	32,1	
		0-20	12,5	11,6	14,5	15,1	19,9	
	Abril/2013	0-10	14,3	15,1	15,3	19,9	33,7	
		0-20	8,9	9,3	9,6	12,4	19,1	
	Pinhão	Novembro 2008	0-10	8,5	9,0	11,3	21,3	24,7
			0-20	5,4	6,5	8,9	11,0	14,0
		Abril/2009	0-10	7,9	9,4	8,9	11,2	14,9
			0-20	5,4	5,8	5,2	6,5	11,3
Abril/2010		0-10	7,8	8,8	9,0	12,1	20,1	
		0-20	6,8	7,1	7,4	9,0	12,2	
Abril/2011		0-10	6,9	7,6	8,4	9,1	11,9	
		0-20	6,0	6,4	6,8	7,9	10,4	
Abril/2012		0-10	7,4	7,1	8,6	8,2	9,4	
		0-20	6,3	6,2	6,9	6,8	7,2	
Abril/2013		0-10	7,1	7,9	7,5	11,6	11,3	
		0-20	6,0	6,5	5,8	8,3	8,3	
Candói		Novembro 2008	0-10	4,6	7,6	8,1	12,9	14,6
			0-20	4,9	7,3	7,7	8,3	11,7
		Abril/2009	0-10	4,5	5,2	9,6	11,1	17,3
			0-20	3,7	4,0	4,5	5,3	8,7
	Abril/2010	0-10	4,7	5,2	7,1	8,9	14,0	
		0-20	5,2	4,5	6,3	6,7	10,6	
	Abril/2011	0-10	5,0	4,7	7,1	9,1	15,7	
		0-20	4,1	3,7	5,0	6,3	9,6	
	Abril/2012	0-10	4,5	5,0	7,0	7,3	12,0	
		0-20	3,8	3,9	4,9	5,1	7,8	
	Abril/2013	0-10	5,0	4,9	5,5	6,0	7,8	
		0-20	3,9	3,7	4,0	4,4	5,3	

¹ Análises de solo referentes às coletas de novembro de 2008 e abril de 2009 publicadas em Vieira (2010).

O rendimento máximo das culturas verificado nos três experimentos de P confirma o alto potencial produtivo da região, atingindo valores médios de 4,4 t ha⁻¹ de soja, 15,2 t ha⁻¹ de milho, 4,4 t ha⁻¹ de trigo e 5,7 t ha⁻¹ de cevada, os quais são superiores aos rendimentos médios destas culturas na área de abrangência da Cooperativa Agrária (Agrária, 2012) e sugere que com o adequado manejo da adubação é possível elevar a produtividade das áreas agrícolas da região.

Dentre as três áreas experimentais, os menores rendimentos no tratamento sem adição de P foram observados nos experimentos em Candói e Pinhão e com as culturas de trigo, cevada e aveia branca. Esses resultados são justificados pelos menores teores de P no solo verificados nesses locais (Tabela 3) e a maior exigência de P por essas culturas (Embrapa, 2007, 2011a, b).

As doses iniciais do fertilizante fosfatado aplicadas a lanço na superfície do solo no início do experimento, em abril de 2008, incrementaram os teores de P no solo, principalmente na camada de 0-10 cm, como era esperado (Tabela 3). Sobretudo, o incremento foi maior nas áreas experimentais que possuíam o teor de P inicial alto (Guarapuava), a qual é a uma área com longo histórico de adubação fosfatada (+30 anos). Todos os tratamentos diminuíram o P disponível no solo com o tempo, visto a não reaplicação de P nessas parcelas e a exportação pelos grãos das culturas, potencializando os menores rendimentos relativos de grãos nas safras de 2011 e 2012 (Tabela 2).

Os rendimentos relativos nos experimentos de resposta à adubação de P instalados em cada local e em cada safra (2011, 2011/12, 2012 e 2012/2013), bem como a equação de ajuste em função das doses e os coeficientes de determinação são apresentados nas tabelas 4 e 5. As equações foram selecionadas de acordo com o maior coeficiente de determinação.

TABELA 4. Teores de fósforo disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de soja e milho nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de P_2O_5 em diferentes safras e locais.

Local do experimento	Camada		Safr	Equação de regressão polinomial	r^2	RR ¹	MET ²
	0-20	0-10					
	mg dm ⁻³					%	kg ha ⁻¹
Soja							
Candói	1,9	2,6	2011/12	$y = -0,0192(P_2O_5)^2 + 9,759(P_2O_5) + 2368$	0,96	66	3608
Pinhão	5,7	8,6	2011/12	$y = -0,0076(P_2O_5)^2 + 3,925(P_2O_5) + 2639$	0,84	84	3145
Murakami 1	5,8	14,6	2011/12	$y = -0,0134(P_2O_5)^2 + 5,563(P_2O_5) + 3637$	0,65	86	4215
Roncador	6,8	4,5	2011/12	$y = -0,0104(P_2O_5)^2 + 3,834(P_2O_5) + 3314$	0,43	90	3668
Murakami 2	8,1	13,0	2011/12	$y = -0,899(P_2O_5) + 4727$	0,48	100	4727
Guarapuava	18,6	16,5	2011/12	$y = 0,0121(P_2O_5)^2 - 3,345(P_2O_5) + 4671$	0,96	100	4671
Jaster	6,9	10,4	2012/13	$y = 5,050(P_2O_5) + 4541$	0,99	79	5753
Murakami 2	7,6	11,5	2012/13	$y = -0,0173(P_2O_5)^2 + 5,590(P_2O_5) + 5493$	0,98	92	5945
Roncador	9,5	8,4	2012/13	$y = -0,0096(P_2O_5)^2 + 5,106(P_2O_5) + 2696$	0,68	80	3375
Murakami 1	10,9	15,7	2012/13	$y = -0,0025(P_2O_5)^2 + 2,043(P_2O_5) + 2802$	0,49	87	3219
Guarapuava	12,0	14,5	2012/13	$y = 0,5164(P_2O_5) + 5541$	0,27	98	5665
Milho							
Roncador	4,4	4,4	2011/12	$y = -0,0832(P_2O_5)^2 + 30,830(P_2O_5) + 10572$	0,99	79	13428
Pinhão	6,7	5,5	2011/12	$y = -0,03(P_2O_5)^2 + 13,295(P_2O_5) + 12933$	0,71	90	14406
Murakami	9,1	11,4	2011/12	$y = -0,027(P_2O_5)^2 + 11,902(P_2O_5) + 14522$	0,77	92	15834
Guarapuava	11,2	12,4	2011/12	$y = -0,0817(P_2O_5)^2 + 20,859(P_2O_5) + 14703$	0,99	92	16034
Goioxim	3,2	5,2	2012/13	$y = -0,0815(P_2O_5)^2 + 27,445(P_2O_5) + 11791$	0,98	84	14102
Candói	3,7	8,4	2012/13	$y = -0,0755(P_2O_5)^2 + 29,860(P_2O_5) + 8818$	0,87	75	11770
Roncador	4,3	7,7	2012/13	$y = -0,0353(P_2O_5)^2 + 16,036(P_2O_5) + 15200$	0,95	89	17021
Murakami	7,1	22,9	2012/13	$y = -0,0400(P_2O_5)^2 + 17,644(P_2O_5) + 12368$	0,98	86	14314
Pinhão	7,7	9,6	2012/13	$y = -0,0313(P_2O_5)^2 + 14,995(P_2O_5) + 13590$	0,97	88	15386
Guarapuava	11,3	21,5	2012/13	$y = -0,0425(P_2O_5)^2 + 15,117(P_2O_5) + 14306$	0,99	91	15650

¹ Rendimento relativo de grãos do tratamento sem adição de P em relação ao rendimento de MET. ² Rendimento de grãos correspondente à máxima eficiência técnica (MET) estimada pela curva de ajuste do rendimento.

O teor de P no solo dos 44 experimentos de resposta à adubação variou de 1,2 a 18,6 mg P dm⁻³ (0-20 cm), contemplando uma ampla faixa de disponibilidade de P no solo, atingindo valores inferiores e superiores ao teor médio dos solos agrícolas da região de Guarapuava, que é de 7,5 mg P dm⁻³.

TABELA 5. Teores de fósforo disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de trigo e cevada nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de P_2O_5 em diferentes safras e locais.

Local do experimento	Camada		Safr	Equação de regressão polinomial	r^2	RR ¹	MET ²
	0-20	0-10					
	mg dm ⁻³					%	
Trigo							
Rodeio	1,2	2,0	2011	$y = -0,0268(P_2O_5)^2 + 10,427(P_2O_5) + 1436$	0,97	59	2450
Santana	6,5	6,0	2011	$y = -0,0084(P_2O_5)^2 + 4,579(P_2O_5) + 3816$	0,95	86	4440
Santa Clara	6,6	19,4	2011	$y = -0,0118(P_2O_5)^2 + 6,516(P_2O_5) + 3373$	0,98	79	4272
Campo Bonito	6,7	8,4	2011	$y = -0,0135(P_2O_5)^2 + 5,676(P_2O_5) + 4529$	0,85	88	5126
Santa Rita	8,0	17,2	2011	$y = -0,0319(P_2O_5)^2 + 12,622(P_2O_5) + 4441$	0,98	78	5689
Guarapuava	13,2	19,3	2011	$y = -0,0075(P_2O_5)^2 + 3,330(P_2O_5) + 4041$	0,51	92	4411
Pinhão 2	3,5	5,6	2012	$y = -0,0063(P_2O_5)^2 + 4,837(P_2O_5) + 2332$	0,90	72	3261
Roncador	3,8	4,8	2012	$y = -0,0245(P_2O_5)^2 + 8,943(P_2O_5) + 2283$	0,91	74	3099
Pinhão 1	4,1	8,6	2012	$y = -0,0091(P_2O_5)^2 + 3,704(P_2O_5) + 2791$	0,80	88	3168
Murakami 2	9,5	10,4	2012	$y = 3,156(P_2O_5) + 2666$	0,83	78	3423
Murakami 1	10,9	13,3	2012	$y = -0,0159(P_2O_5)^2 + 7,269(P_2O_5) + 2085$	0,98	72	2916
Guarapuava	10,9	41,6	2012	$y = 1,548(P_2O_5) + 3851$	0,83	91	4223
Cevada							
Rodeio	1,2	2,0	2011	$y = -0,0353(P_2O_5)^2 + 15,969(P_2O_5) + 574$	0,96	24	2294
Santana	6,5	6,0	2011	$y = -0,0172(P_2O_5)^2 + 6,870(P_2O_5) + 5033$	0,84	88	5541
Santa Clara	6,6	19,4	2011	$y = -0,0284(P_2O_5)^2 + 7,149(P_2O_5) + 5228$	0,96	92	5570
Campo Bonito	6,7	8,4	2011	$y = -0,0328(P_2O_5)^2 + 13,473(P_2O_5) + 5128$	0,85	79	6420
Santa Rita	8,0	17,2	2011	$y = -0,0095(P_2O_5)^2 + 2,522(P_2O_5) + 3235$	0,53	95	3235
Guarapuava	13,2	19,3	2011	$y = 0,264(P_2O_5) + 5029$	0,14	99	5029
Pinhão 2	3,5	5,6	2012	$y = -0,0432(P_2O_5)^2 + 16,607(P_2O_5) + 2687$	0,98	63	4283
Pinhão 1	4,1	8,6	2012	$y = -0,0198(P_2O_5)^2 + 6,701(P_2O_5) + 2474$	0,94	81	3041
Murakami 2	9,5	10,4	2012	$y = -0,0141(P_2O_5)^2 + 5,426(P_2O_5) + 3345$	0,84	87	3868
Murakami 1	10,9	13,3	2012	$y = -0,0349(P_2O_5)^2 + 8,683(P_2O_5) + 2199$	0,96	80	2739
Guarapuava	10,9	41,6	2012	$y = -0,0332(P_2O_5)^2 + 9,137(P_2O_5) + 4570$	0,78	88	5198

¹ Rendimento relativo de grãos do tratamento sem adição de P em relação ao rendimento de MET. ²Rendimento de grãos correspondente à máxima eficiência técnica (MET) estimada pela curva de ajuste do rendimento.

Semelhantemente ao observado nos três experimentos instalados em 2008 (Guarapuava, Pinhão e Candói), os menores rendimentos relativos estiveram relacionados aos baixos teores de P no solo, o que indica que as variações no rendimento estiveram diretamente ligadas à variação do teor deste nutriente no solo. Os solos com menor disponibilidade de P também proporcionaram os maiores coeficientes de determinação da equação de ajuste dos dados, em razão da maior resposta às doses do fertilizante.

Os resultados da análise de solo dos experimentos de resposta à adubação sugerem haver diferença no histórico de manejo de adubação fosfatada anterior ao experimento, em virtude dos distintos teores de P na camada 0-10 e 0-20 cm (Tabela 4). Na maioria dos experimentos, o destacado gradiente de P no perfil do solo em sistema plantio direto foi observado, apresentando valores de P na camada de 0-10 cm muito superiores aos da camada de 0-20 cm, que decorrem do longo período em plantio direto, da ciclagem do P pelas culturas e de adubações fosfatadas a lanço. Porém, condição inversa foi observada em alguns experimentos, apresentando teores de P na camada de 0-20 cm semelhantes aos da camada de 0-10 cm, indicando um incremento de P na camada de 10-20 cm, o qual pode ocorrer com aplicações de fertilizantes fosfatados no sulco de semeadura, como reportado por Costa et al. (2010).

6.1.2. Consolidação da curva de calibração de fósforo

Os resultados de rendimento de grãos dos 44 experimentos de resposta à adubação e dos três experimentos de calibração (período compreendido entre os anos agrícolas de 2009/10 a 2012/13) foram agrupados aos resultados obtidos por Vieira (2010), no período de 2008 a 2009. Um total de 152 resultados de rendimentos foi utilizado nas curvas de calibração, correspondendo a 71 pontos de soja, 25 de milho, 18 de trigo, 32 de cevada e 6 de aveia branca.

As curvas de calibração, as equações de ajuste e os teores críticos de P, determinados para as camadas de 0-10 e 0-20 cm com o extrator Mehlich-1 são apresentados na figura 5. As culturas foram agrupadas em duas curvas de calibração distintas, conforme sua semelhança na resposta à adubação fosfatada, obtendo assim, um teor crítico para as culturas aveia branca, trigo e cevada, e outro para soja e milho. A curva de calibração foi realizada também com todas as culturas, visando à avaliação e comparação com estudos de calibração que desconsideraram esse critério de separação.

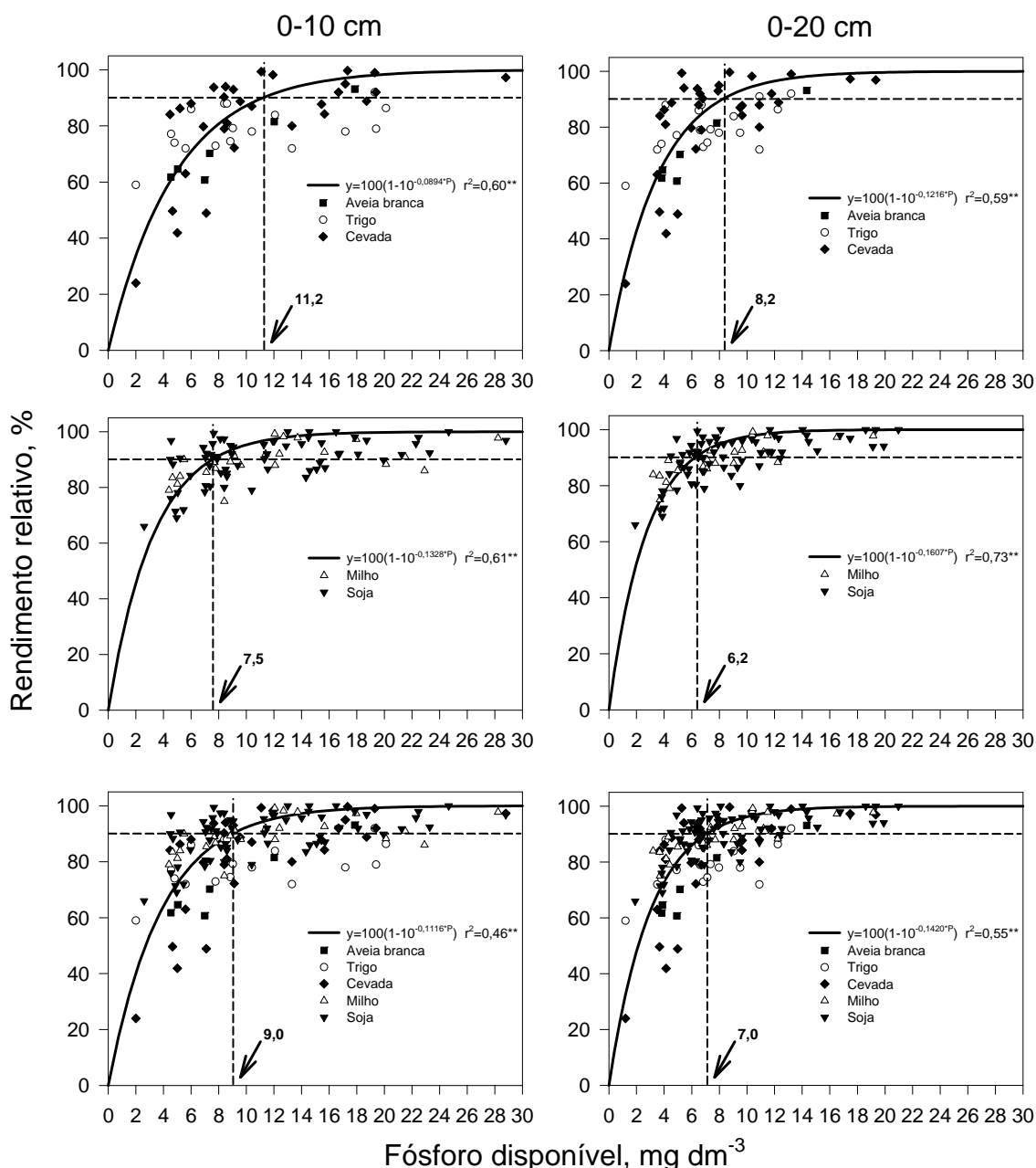


FIGURA 5. Teor crítico de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, para as culturas de aveia branca, trigo, cevada, soja e milho. ** Significativo ($p < 0,01$).

O ajuste dos dados pela equação de Mischerlich foi significativo em todos os grupos de culturas e camadas. Dentre os grupos de culturas, os maiores coeficientes de determinação (r^2) foram obtidos com as culturas de verão (soja e milho). Por sua vez, dentre as camadas de amostragem, melhor ajuste foi observado na camada 0-20 cm, tanto com o grupo de culturas de verão ($r^2=0,73$) quanto com todas as culturas ($r^2=0,55$). Essa característica corrobora com a informação da camada de 0-20 cm ser a mais indicada para amostragem de solo na região de Guarapuava.

Os teores críticos obtidos nas duas camadas de solo amostradas e para os grupos de culturas calibrados foram semelhantes aos valores obtidos por Vieira (2010). A maior divergência foi no teor crítico para os cereais de inverno (aveia, trigo e cevada), que foi superior neste estudo em $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0-10 cm e em $0,7 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0-20 cm. A inclusão de rendimentos de grãos dos experimentos conduzidos entre 2010 a 2012 contribuíram na consolidação das curvas, principalmente pelos experimentos com baixos teores de P no solo ($<6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ – 0-20 cm), os quais eram pouco frequentes no trabalho de Vieira (2010). Isso resultou em maiores coeficientes de determinação na calibração dos cereais de inverno, que subiram de 0,46 para 0,60 na camada de 0-10 cm e de 0,35 para 0,59 na camada de 0-20 cm.

As culturas de aveia, trigo e cevada foram mais exigentes em P que as culturas de verão, resultando em um teor crítico de $11,2$ e $8,2 \text{ mg dm}^{-3}$ para as camadas de 0-10 e 0-20 cm, respectivamente. Essa diferença de exigência das culturas é conhecida e considerada no manejo da adubação fosfatada no estado do Paraná (Lantmann et al., 1996), bem como é utilizada na definição de teores críticos de P em estados americanos como Michigan e Ohio (Vitosh et al., 1995). A maior exigência de P pelas culturas de inverno provavelmente está relacionada à menor disponibilidade hídrica nos meses de inverno na região Centro-Sul do Paraná, o que influencia a difusão, principal mecanismo de suprimento de P no solo.

Os teores críticos de P nos estados do RS e SC são diferenciados apenas pela classe textural do solo, sendo único para todas as culturas e inferior aos valores obtidos neste trabalho – 6 mg dm^{-3} para solos em sistema plantio direto com mais de 60 % de argila na camada de 0-10 cm (Sociedade..., 2004). Entretanto, em pesquisa recente para solos do RS com teores de argila maiores que 55 g kg^{-1} , Schlindwein e Gianello (2008) observaram teores críticos de P muito semelhantes aos valores obtidos neste trabalho, de $10,5 \text{ mg dm}^{-3}$ para a camada de 0-10 cm e $7,6 \text{ mg dm}^{-3}$ para a camada de 0-20 cm, considerando as culturas de soja, milho e trigo.

Em comparação à atual recomendação de adubação fosfatada utilizada no estado do Paraná, o teor crítico de P para as culturas de trigo e cevada é um pouco superior ao teor de 9 mg dm^{-3} indicado por (Embrapa, 2011b; 2013), a qual considera a camada de 0-10 cm para a recomendação de

adubação. Para a cultura da soja, a Embrapa (2011a) considera como teor crítico o valor de 6 mg dm^{-3} , o qual é baseado em estudos da década de 80 e 90 (OCEPAR, 1987; Lantmann et al., 1996; Embrapa, 1999).

6.1.3. Faixas e classes de disponibilidade de fósforo do solo

Após a definição dos teores críticos de P para as diferentes camadas de solo e culturas, realizou-se o estabelecimento das faixas de disponibilidade, visando detalhar a curva de calibração, fracionando-a pelos teores do nutriente no solo, facilitando a interpretação das análises de solo e a recomendação de doses.

Deve ser destacado que a recomendação de adubação desenvolvida neste estudo visa à rotação de culturas em sistema plantio direto. Portanto, a definição do teor crítico a ser adotado para o estabelecimento das faixas de disponibilidade objetiva contemplar as culturas de maior exigência do nutriente, que foram os cereais de inverno (aveia branca, trigo e cevada) (Figura 5). Dessa forma, os teores críticos ajustados utilizados na definição das faixas de fertilidade foram de 8 mg dm^{-3} para a profundidade de amostragem de 0-20 cm e de 11 mg dm^{-3} para a profundidade de 0-10 cm. O ajuste dos teores críticos foi realizado para obtenção de valores inteiros, facilitando a interpretação da disponibilidade de P em faixas de teores e o estabelecimento das doses de fertilizante em cada faixa.

No estabelecimento das faixas de disponibilidade, o teor crítico do nutriente representa o limite superior da classe média, sendo este dividido por dois para delimitar as classes equidistantes, chamadas “Baixa” e “Média”, e multiplicado por dois para obter o limite entre as classes “Alta” e “Muito alta” (Figura 6). As faixas de disponibilidade podem ser analisadas pelo rendimento relativo das culturas, em que as classes “Baixa”, “Média”, “Alta” e “Muito alta” correspondem aos rendimentos relativos percentuais de “0 a 68”, “68 a 90”, “90 a 99” e “> 99”, respectivamente.

As delimitações das classes de disponibilidade estão diretamente relacionadas com a probabilidade de resposta das culturas à adição do nutriente. Acima do teor crítico, a probabilidade de resposta é muito baixa ou

nula, enquanto que abaixo, ela aumenta à medida que o teor no solo se afasta do teor crítico.

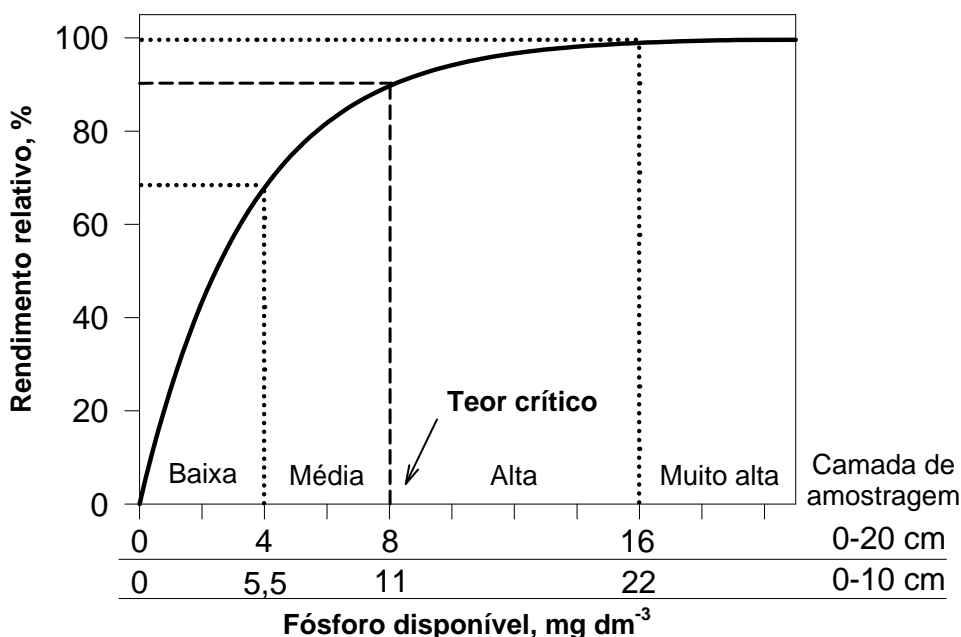


FIGURA 6. Faixas e classes de disponibilidade de fósforo do solo (Mehlich-1) para a rotação de culturas com soja, milho, trigo e cevada, nas camadas de 0-20 e 0-10 cm em Latossolos (> 600 g kg⁻¹ de argila) em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

Conceitualmente, a classe de disponibilidade Alta compreende a faixa de teores do nutriente no solo mais adequados para o desenvolvimento e rendimento das culturas (Sociedade..., 2004). Por isso, quando o teor de P no solo situa-se nessa classe, o objetivo da adubação é a manutenção do teor de P no solo, devendo ser o suficiente para repor as quantidades exportadas pelos grãos, suprir eventuais perdas do sistema que possam ocorrer (erosão) e a necessidade de P para a “construção” da fertilidade do solo, suprimindo a adsorção de P no solo.

Na classe Muito alta, o solo apresenta alta reserva disponível do nutriente para o desenvolvimento das plantas e, conseqüente, muito baixa probabilidade de resposta ao nutriente. Nessa classe, a adubação poderá ser apenas a exportação via grãos, visando manter a fertilidade do solo ou poderá ser reduzida em algumas situações de expectativas de preços baixos de grãos ou pelo custo do fertilizante muito alto. Cabe destacar que, mesmo na classe Muito alta, algumas culturas se beneficiam com uma dose de P na semeadura, favorecendo o “arranque inicial” das culturas (Bundy & Andraski, 2001).

Quando o teor de P no solo se encontra na classe Média ou Baixa, a probabilidade de resposta ao nutriente é média a alta. Desta forma, a adubação nessas classes objetiva buscar a cada safra o máximo retorno econômico das culturas e, gradualmente, elevar os teores do nutriente no solo para a classe ótima de disponibilidade do nutriente no solo (Alta).

A resposta das culturas ao P adicionado nas distintas classes de disponibilidade de P no solo foi avaliada pelo do retorno econômico (R\$ ha⁻¹) a partir da aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ nos experimentos de resposta à adubação de P (Tabelas 4 e 5), considerando a situação de preço de grãos médio de 5 anos (Figura 7a) e uma condição de preços baixos, estimando em 30 % inferior ao preço médio (Figura 7b).

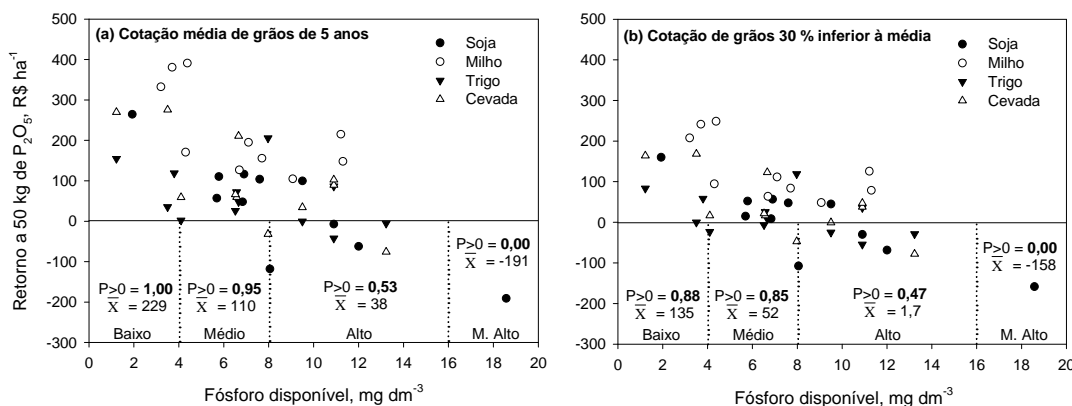


FIGURA 7. Retorno líquido da adubação fosfatada em diferentes teores de P disponível e preços de grãos. Cotação de soja, milho, trigo e cevada de R\$ 789, R\$ 355, R\$ 522 e R\$ 496 t⁻¹ (a), e de R\$ 552, R\$ 249, R\$ 366 e R\$ 347 t⁻¹ (b), respectivamente. Cotação do fertilizante fosfatado de R\$ 1654 t⁻¹ de P₂O₅.

Os maiores retornos econômicos foram observados nos solos na classe Baixa de P no solo, diminuindo com o aumento dos níveis de disponibilidade e tornando negativo na classe Muito alta. Na condição atual de cotação de grãos, 100 % dos experimentos apresentaram retorno econômico positivo à aplicação do fertilizante fosfatado em solo na classe baixa e 95 % na classe Média. Nos solos da classe Alta, a resposta positiva foi observada em 53 % dos casos, porém com menor retorno econômico, de 38 R\$ ha⁻¹. Relação percentual semelhante foi observada com a cotação de preços inferior à média. Entretanto, o retorno econômico médio da adubação foi menor nesta condição, principalmente na classe Alta, que apesar de 47 % dos experimentos

apresentarem resposta positiva à aplicação de P, o retorno econômico médio com a aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi de apenas 1,7 R\$ ha⁻¹.

6.1.4. Doses de fósforo para as culturas

Após a obtenção dos teores críticos e estabelecidas as faixas de disponibilidade a partir das curvas de calibração, os experimentos de resposta à adubação fosfatada foram designados em suas respectivas classes de acordo como o teor de P disponível tomando como referência a análise de solo da camada de 0-20 cm (Tabelas 6 e 7). A camada de 0-20 cm foi utilizada como referência no enquadramento dos experimentos nas faixas de fertilidade porque é a camada diagnóstica recomendada para amostragem na região Centro-Sul do Paraná (Vieira, 2010), e amplamente utilizada no estado do Paraná. Além disso, a camada 0-20 cm apresentou maiores coeficientes de determinação no ajuste entre os valores de análise de solo e os respectivos rendimentos relativos das culturas (Figura 5).

A partir das equações de ajuste dos rendimentos de grãos em função das doses de P₂O₅ (Tabelas 4 e 5), obteve-se o rendimento máximo de grãos (MET) e sua respectiva dose de P₂O₅ em cada experimento (Tabelas 6 e 7). O rendimento de máxima eficiência econômica (MEE) foi calculado a partir do retorno econômico pelo incremento de grãos e das despesas em função das doses de P₂O₅ aplicadas, considerando preços médios de 5 anos (Tabela 1), diferentemente dos estudos de calibração que adotam como MEE o valor de 90 % do RR de MET (Cubilla et al., 2007; Schlindwein & Gianello, 2008; Wendling et al., 2008; Schlindwein et al., 2011).

A definição da dose de máxima eficiência econômica como 90 % da máxima eficiência técnica refletia as condições de rendimento médio de grãos e a relação entre preços de produtos e de fertilizantes da década de 90, além de contemplar as condições adversas de cotações na época. Entretanto, mediante a análise dos rendimentos atuais das culturas na região Centro-Sul do Paraná e das cotações de preços de grãos e fertilizante entre 2008 e 2013, observou-se que o valor de rendimento relativo de 90 % é inferior ao rendimento de MEE estimado, que na média das culturas e safras foi de 96 % da MET.

TABELA 6. Classe de disponibilidade de P, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de soja e milho, em função das doses de P₂O₅ nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.

Local do experimento	Saфра	P-Mehlich-1		Classe ¹	--- MET ---		----- MEE -----		RR
		0-20	0-10		Dose	Rend.	Dose	Rend.	
		mg dm ⁻³				----- kg ha ⁻¹ -----		%	
Soja									
Candói	2011/12	1,9	2,6	Baixa	254	3608	199	3550	98
Pinhão	2011/12	5,7	8,6	Média	258	3145	121	3001	95
Murakami 1	2011/12	5,8	14,6	Média	208	4215	129	4133	98
Roncador	2011/12	6,8	4,5	Média	184	3668	84	3562	97
Jaster	2012/13	6,9	10,4	Média	240	5753	240	5753	100
Murakami 2	2012/13	7,6	11,5	Média	162	5945	101	5881	99
Média		6,5	9,9	Média	210	4545	135	4466	98
Murakami 2	2011/12	8,1	13	Alta	0	4727	0	4727	100
Roncador	2012/13	9,5	8,4	Alta	266	3375	157	3260	97
Murakami 1	2012/13	10,9	15,7	Alta	240	3219	0	2802	87
Guarapuava	2012/13	12	14,5	Alta	240	5665	0	5541	98
Média		10,1	12,9	Alta	187	4247	39	4083	96
Guarapuava	2011/12	18,6	16,5	Muito alta	0	4671	0	4671	100
Milho									
Goioxim	2012/13	3,2	5,2	Baixa	168	14102	140	14036	99
Candói	2012/13	3,7	8,4	Baixa	198	11770	167	11698	99
Média		3,4	6,8	Baixa	183	12936	154	12867	99
Roncador	2012/13	4,3	7,7	Média	227	17021	162	16869	99
Roncador	2011/12	4,4	4,4	Média	185	13428	157	13364	99
Pinhão	2011/12	6,7	5,5	Média	222	14406	143	14222	99
Murakami	2012/13	7,1	22,9	Média	221	14314	162	14178	99
Pinhão	2012/13	7,7	9,6	Média	240	15386	165	15213	99
Média		6,0	10,0	Média	219	14911	158	14769	99
Murakami	2011/12	9,1	11,4	Alta	220	15834	134	15632	99
Guarapuava	2011/12	11,2	12,4	Alta	128	16034	99	15968	99
Guarapuava	2012/13	11,3	21,5	Alta	178	15650	123	15522	99
Média		10,5	15,1	Alta	175	15839	119	15707	99

¹ A classe de disponibilidade de P foi definida com base no teor de P da análise de solo da camada de 0-20 cm.

TABELA 7. Classe de disponibilidade de P, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de trigo e cevada, em função das doses de P₂O₅ nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.

Local do experimento	Saфра	P-Mehlich-1		Classe ¹	--- MET ---		----- MEE -----		RR
		0-20	0-10		Dose	Rend.	Dose	Rend.	
		mg dm ⁻³			----- kg ha ⁻¹ -----				%
Trigo									
Rodeio	2011	1,2	2,0	Baixa	195	2450	135	2356	96
Pinhão 2	2012	3,5	5,6	Baixa	384	3261	132	2861	88
Roncador	2012	3,8	4,8	Baixa	183	3099	118	2996	97
Média		2,8	4,1	Baixa	254	2937	128	2738	94
Pinhão 1	2012	4,1	8,6	Média	204	3168	0	2791	88
Santana	2011	6,5	6,0	Média	273	4440	84	4140	93
Santa Clara	2011	6,6	19,4	Média	276	4272	141	4056	95
Campo Bonito	2011	6,7	8,4	Média	210	5126	94	4942	96
Santa Rita	2011	8,0	17,2	Média	198	5689	148	5609	99
Média		6,4	11,9	Média	232	4539	93	4308	94
Murakami 2	2012	9,5	10,4	Alta	240	3423	0	2666	78
Murakami 1	2012	10,9	13,3	Alta	229	2916	129	2758	95
Guarapuava	2012	10,9	41,6	Alta	240	4223	0	3851	91
Guarapuava	2011	13,2	19,3	Alta	222	4411	0	4041	92
Média		11,1	21,2	Alta	233	3743	32	3329	89
Cevada									
Rodeio	2011	1,2	2,0	Baixa	226	2380	179	2302	97
Pinhão 2	2012	3,5	5,6	Baixa	192	4283	154	4219	98
Média		2,4	3,8	Baixa	209	3332	167	3261	98
Pinhão 1	2012	4,1	8,6	Média	169	3041	85	2901	95
Santana	2011	6,5	6,0	Média	200	5719	103	5559	97
Santa Clara	2011	6,6	19,4	Média	126	5678	67	5580	98
Campo Bonito	2011	6,7	8,4	Média	205	6512	154	6426	99
Santa Rita	2011	8,0	17,2	Média	133	3403	0	3235	95
Média		6,4	11,9	Média	167	4871	82	4740	97
Murakami 2	2012	9,5	10,4	Alta	192	3868	74	3670	95
Murakami 1	2012	10,9	13,3	Alta	124	2739	77	2660	97
Guarapuava	2012	10,9	41,6	Alta	138	5198	87	5114	98
Guarapuava	2011	13,2	19,3	Alta	240	5092	0	5029	99
Média		11,1	21,2	Alta	174	4224	60	4118	97

¹ A classe de disponibilidade de P foi definida com base no teor de P da análise de solo da camada de 0-20 cm.

A estimativa das doses de P recomendadas para as culturas depende da filosofia de adubação adotada. Grande parte dos atuais estudos de calibração de P no Brasil (Sociedade..., 2004; Cubilla et al., 2007; Schlindwein & Gianello, 2008; Wendling et al., 2008; Schlindwein et al., 2011) têm estimado e recomendado doses a partir da necessidade de P no solo para atingir o teor crítico, segundo metodologia proposta por Kussow et al. (1976). Nesses estudos, a filosofia de adubação é baseada em doses de correção e manutenção de P no solo, para as faixas abaixo e acima do teor crítico, respectivamente. Entretanto, em estudo prévio na região Centro-Sul realizado em experimentos de calibração de P conduzidos nas localidades de Pinhão e Candói, Vieira (2010) observou a necessidade de altas doses de P_2O_5 para o incremento de 1 mg dm^{-3} de P disponível na camada de 0-20 cm (100 a 130 kg ha^{-1} de P_2O_5), em razão da alta capacidade de adsorção de P do solo. Esta quantidade de P_2O_5 necessária para elevar 1 mg dm^{-3} de P é muito superior à quantidade de $31,1 \text{ kg ha}^{-1}$ reportada por Schlindwein e Gianello (2008) e de $25,7 \text{ kg ha}^{-1}$ por Cubilla et al. (2007). Dessa forma, a filosofia da adubação corretiva de P para estimar doses de P para as classes de disponibilidade abaixo do teor crítico não é adequada para os solos da região específica em estudo.

Mediante o exposto, a definição de doses de P para a região Centro-Sul do Paraná foi baseada nas duas filosofias de adubação, utilizando a construção gradual da fertilidade para solos com teores de P inferiores ao teor crítico e de manutenção e reposição para solos com teores de P acima do teor crítico, maximizando o retorno econômico às doses aplicadas.

Para as classes de disponibilidade de P Baixa e Média, as doses de P_2O_5 foram estimadas através das curvas de resposta ao P dentro das faixas de P, semelhantemente ao realizado nas recomendações do estado de SP (Raij et al., 1997; Raij, 2011), obtendo a dose de maior retorno econômico. Dessa forma, os experimentos de mesma cultura e dentro de cada classe foram agrupados, obtendo uma curva de resposta média para os incrementos no rendimento de grãos com as doses de P_2O_5 em relação à testemunha (Figura 8 e Tabela 8).

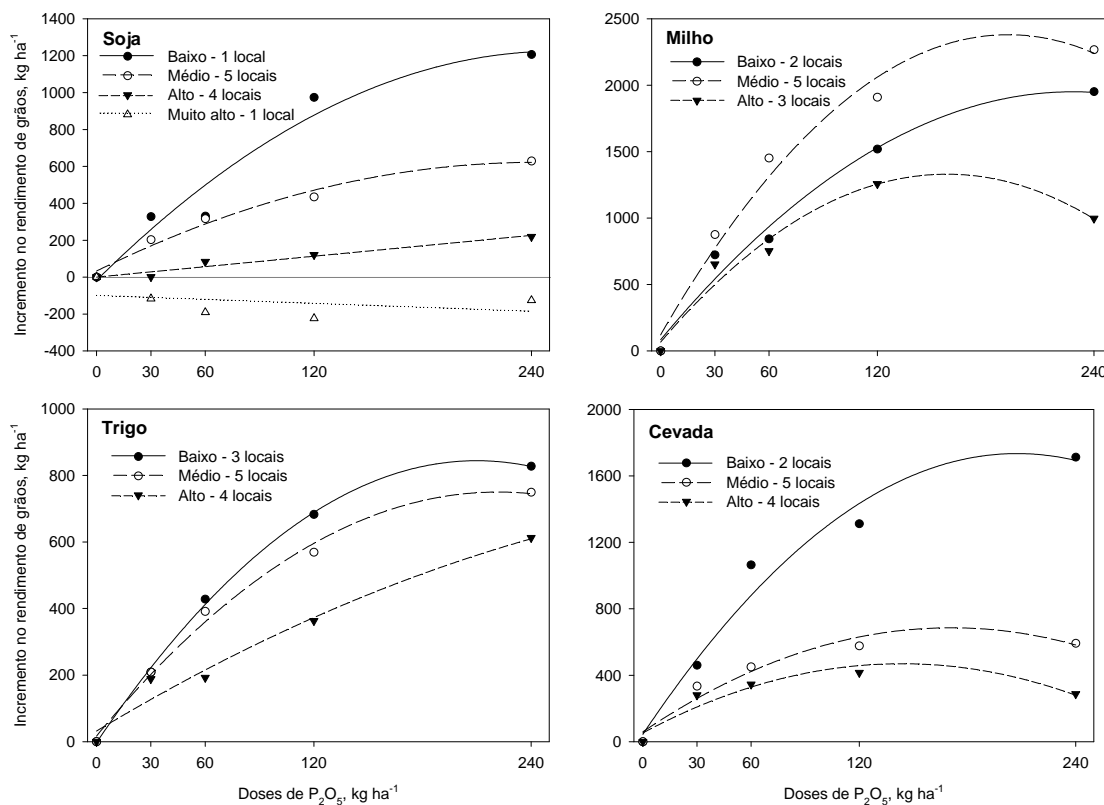


FIGURA 8. Incremento médio no rendimento de grãos de soja, milho, trigo e cevada com as doses de fósforo em diferentes classes de disponibilidade.

Os maiores incrementos no rendimento de grãos foram com as maiores doses de P₂O₅ nas áreas com baixos teores de P, acrescentando em 1200 kg ha⁻¹ de soja, 2000 kg ha⁻¹ de milho, 800 kg ha⁻¹ de trigo e 1700 kg ha⁻¹ de cevada nos solos com P na classe Baixa.

A aplicação de doses de P em solos com o teor de P na classe Alta também incrementou o rendimento de grãos de soja, milho, trigo e cevada, embora em menor proporção (Figura 8), não sendo economicamente viável em alguns casos (Tabela 8). Contudo, a resposta ao fertilizante fosfatado nos solos com o teor de P na classe Alta sugere haver benefício às plantas com a aplicação de P na semeadura. Cabe destacar que a produtividade das culturas nos experimentos e na região de estudo é alta e, conseqüentemente, a exigência de nutrientes para as plantas, o que pode favorecer a resposta das culturas à adubação mesmo com teores altos.

O trigo foi a cultura que apresentou menor incremento no rendimento de grãos com a adição de P, aumentando, na média das classes Baixa e Média, 6,6 kg de grãos para cada kg de P₂O₅ aplicado no solo, enquanto que a

soja, o milho e a cevada produziram 7,3, 19,9 e 10,9 kg de grãos, respectivamente. A maior necessidade de P da cultura do trigo e soja frente ao milho também foi verificada por Schlindwein e Gianello (2008), obtendo 7,2, 12,4 e 47,1 kg de grãos (soja, trigo e milho, respectivamente) para cada kg de P_2O_5 aplicado. A menor eficiência na aplicação de P na soja refletiu em altas doses de MET e maior dose de MEE para a classe Baixa, em função do alto valor agregado ao grão (Tabela 1).

TABELA 8. Teor de P disponível (Mehlich-1) no solo, equações de ajuste do incremento no rendimento de grãos referentes à figura 8, doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) nas diferentes classes de disponibilidade.

Classe	Teor de P 0-20 cm	Locais	Equação de regressão polinomial	r^2	Dose	Dose
					MET	MEE
kg ha ⁻¹						
Soja						
Baixa	1,9	1	$y = -0,0192x^2 + 9,759x - 17,659$	0,96	254	203
Média	6,5	5	$y = -0,01x^2 + 4,844x + 32,932$	0,98	242	85
Alta	10,1	4	$y = 0,9419x + 0,1405$	0,95	240	0
Muito alta	18,6	1	$y = -0,3572x - 99,208$	0,16	0	0
Milho						
Baixa	3,4	2	$y = -0,0357x^2 + 16,319x + 84,307$	0,98	229	163
Média	6,0	5	$y = -0,0611x^2 + 23,493x + 121,14$	0,98	192	154
Alta	10,5	3	$y = -0,0504x^2 + 15,959x + 66,176$	0,96	158	115
Muito alta	-	0	-	-	-	-
Trigo						
Baixa	2,8	3	$y = -0,0192x^2 + 8,0692x - 2,8085$	0,99	210	128
Média	6,4	4	$y = -0,0107x^2 + 5,1188x + 1,6829$	0,99	222	88
Alta	11,1	5	$y = -0,0093x^2 + 5,1444x + 40,65$	0,98	455	61
Muito alta	-	0	-	-	-	-
Cevada						
Baixa	2,4	2	$y = -0,0392x^2 + 13,288x + 44,352$	0,97	208	164
Média	6,4	4	$y = -0,0245x^2 + 8,5484x + 64,728$	0,95	171	102
Alta	11,1	5	$y = -0,0181x^2 + 5,1569x + 49,741$	0,88	143	73
Muito alta	-	0	-	-	-	-

As doses de MEE para as culturas estimadas pelas equações de regressão polinomial na tabela 8 representam a dose a ser aplicada para o teor de P no solo na média dos experimentos de resposta à adubação em cada classe de disponibilidade. Destaca-se que esses teores de P não foram exatamente o valor intermediário das classes de disponibilidade de P (Baixa = 2 mg dm⁻³ e Média = 6 mg dm⁻³). Por isso, estimou-se a dose de P para cada classe a partir da equação de ajuste entre os teores de P no solo e as doses recomendadas (Figura 9), obtendo a dose correspondente ao teor de P médio de cada classe (Tabela 9)

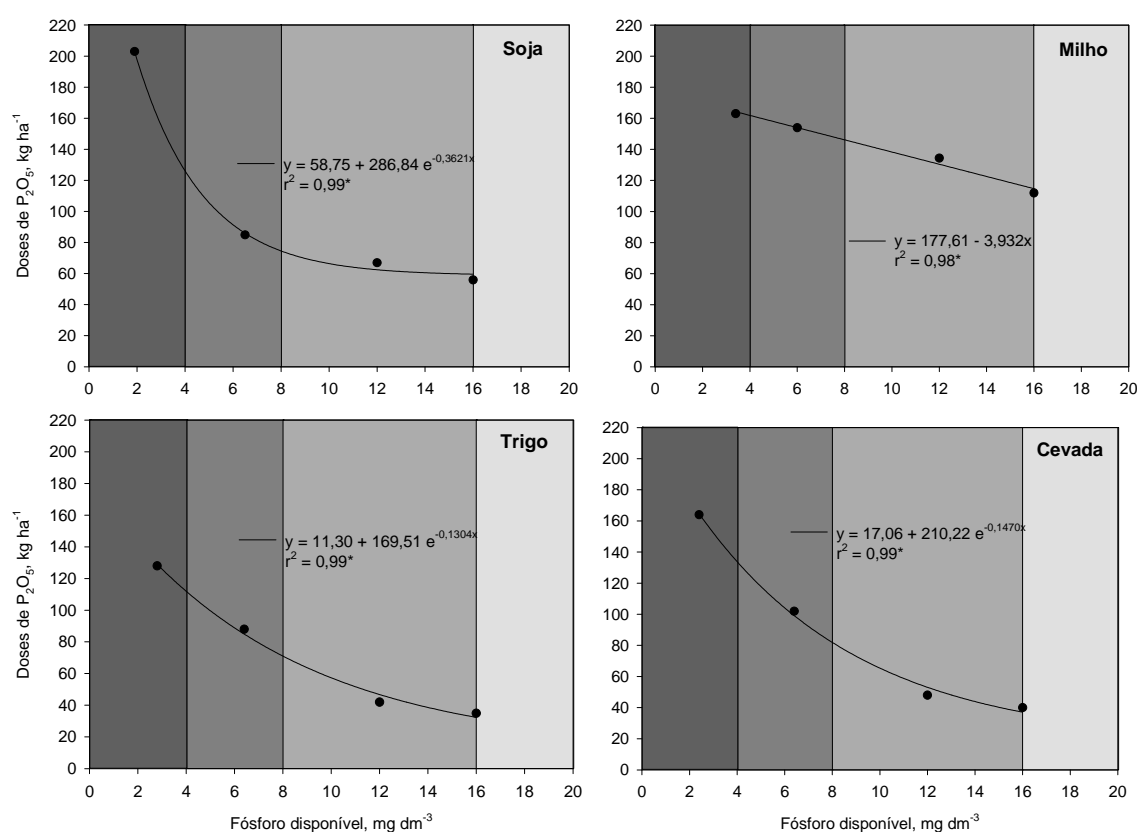


FIGURA 9. Estimativa de doses de fósforo para as culturas de soja, milho, trigo e cevada para cada classe de disponibilidade de P no solo.

As doses de P₂O₅ recomendadas para as culturas na classe Muito alta foram estimadas a partir da exportação de P pelos grãos, que foi obtida pela relação entre o rendimento médio da cultura e o teor de P nos grãos, considerando como 14, 8, 10 e 10 kg de P₂O₅ por t de grãos produzidos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente, segundo Sociedade (2004). Para a classe Alta, a dose relativa à exportação pelos grãos foi acrescida de 20%, visando suprir perdas do sistema por adsorção e erosão (Tabela 9).

TABELA 9. Dose média de P_2O_5 recomendada para soja, milho, trigo e cevada sob sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade para os Latossolos da região Centro-Sul do Paraná.

Classe de disponibilidade	Culturas			
	Soja	Milho	Trigo	Cevada
	$kg\ ha^{-1}$			
Baixa ¹	200	170	140	165
Média ¹	90	155	90	100
Alta ²	65	130	45	50
Muito alta ³	55	115	35	40
Expectativa de rendimento	4.000	14.000	3.500	4.000

¹ Doses de P_2O_5 para rendimento de máxima eficiência econômica. ² Doses de manutenção de P_2O_5 baseadas na exportação de fósforo acrescidas de 20 %. ³ Doses de reposição de P_2O_5 baseadas na exportação de fósforo pelos grãos e na expectativa de rendimento; Para expectativa de rendimento diferente, considerar a exportação de 14, 8, 10 e 10 $kg\ P_2O_5\ t^{-1}$ de grãos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente.

A dose estimada para a soja em solos na classe de disponibilidade Baixa encontra-se acima da maioria das recomendações fosfatadas para essa cultura. Deve ser observado que somente um experimento de soja contemplou a classe Baixa e apresentou alto incremento no rendimento de grãos com as doses de fertilizante, o que condicionou a maior dose de P_2O_5 recomendada. A recomendação para soja no estado do Paraná em solos com teor de P menor que $3\ mg\ dm^{-3}$ é de $100\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , considerando solos com teor de argila maior que 40 % (Embrapa, 2011a). Porém, essa recomendação, tanto em teor crítico e classes de disponibilidade, quanto às doses, são baseadas em resultados obtidos nas décadas de 80 e 90 (OCEPAR, 1987; Embrapa, 1999), considerando solos cultivados em preparo convencional e potencial produtivo das culturas inferiores aos atuais.

Com relação às doses para a soja nas classes de disponibilidade Média, Alta e Muito alta, elas estão um pouco superiores também a recomendação para os estados do RS e SC (Sociedade..., 2004), considerando a mesma expectativa de rendimento deste estudo, de $4,0\ t\ ha^{-1}$. Essa situação também foi reportada por Schlindwein e Gianello (2008), sugerindo que há maior exigência das cultivares atualmente utilizadas.

As doses de adubação fosfatada para a cultura do milho foram baseadas na expectativa de rendimento de 14 t ha^{-1} , valor correspondente à média de rendimento de grãos dos 10 locais de estudo. Cabe destacar que, mesmo na classe de disponibilidade Baixa e sem adição de P, o menor rendimento de grãos obtido nos experimentos foi de $8,8 \text{ t ha}^{-1}$, o qual é superior à produtividade média paranaense ($5,5 \text{ t ha}^{-1}$) e brasileira ($5,1 \text{ t ha}^{-1}$) (CONAB, 2013; IBGE, 2013).

As características regionais de alto potencial produtivo de milho destaca a recomendação de adubação deste trabalho das demais existentes nas diferentes regiões brasileiras, pois todas as demais recomendações utilizam expectativas de rendimento inferiores à deste estudo. Nos estados do RS e SC a recomendação de adubação fosfatada para o milho é baseada na expectativa de rendimento de 4 t ha^{-1} , sendo acrescido $15 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ por tonelada adicional de grãos a ser produzido (Sociedade..., 2004). Extrapolando para a expectativa de rendimento da região Centro-Sul do Paraná (14 t ha^{-1}), a recomendação para a classe baixa seria de $255 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, muito superior à dose de 170 kg ha^{-1} recomendada. A recomendação para o estado de Minas Gerais é que apresenta maior expectativa de rendimento para o milho, até 8 t ha^{-1} (RIBEIRO et al., 1999). Extrapolando para a faixa de rendimento de $12-14 \text{ t ha}^{-1}$, a dose recomendada seria semelhante ao deste estudo para a classe Baixa, de $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. O milho é a cultura dentro o sistema de rotação adotado que apresenta a menor concentração de P nos grãos. Entretanto, em razão dos rendimentos de grãos superiores a 14 t ha^{-1} apresentou as maiores doses de P para as classes Alta e Muito alta, em comparação com as demais culturas.

A recomendação de adubação fosfatada para o trigo e para a cevada também foram superiores às atuais recomendações utilizadas no estado do Paraná, as quais recomendam para ambas as culturas 75 , 50 e $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ para as faixas de disponibilidade de 0 a 5 , 5 a 9 e maior que 9 mg P dm^{-3} (Embrapa, 2011b, 2013). Porém, estas recomendações não informam a expectativa de rendimento para qual são sugeridas as doses, o que pode ser a razão dos menores valores. Considerando a mesma expectativa de rendimento de $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ de trigo e $4,0 \text{ t ha}^{-1}$ de cevada, as doses apresentadas neste

trabalho são semelhantes às sugeridas para os estados do RS e SC (Sociedade..., 2004).

As doses recomendadas para todas as culturas em solos com disponibilidade de fósforo acima do teor crítico – classes Alta e Muito alta - são muito semelhantes às recomendações das demais regiões brasileiras, pois todas baseiam sua recomendação de dose na exportação de P pelos grãos.

Cabe destacar que a adição de doses de P_2O_5 nas classes de disponibilidade Alta e Muito alta, mesmo apenas como forma de reposição suprindo a exportação pelos grãos, podem não ser economicamente viáveis se considerado um curto período de tempo. Entretanto, quando o teor de P atinge a classe desejada Alta ou acima dela, condição de solo comumente encontrada nas áreas de abrangência da Cooperativa Agrária, o manejo da adubação fosfatada deixa de ser direcionado criteriosamente às culturas individuais e sua máxima eficiência econômica, e sim, visualiza alimentar o sistema de rotação de culturas adotado. Dessa forma, mantêm-se a ciclagem de P no solo através das adubações fosfatadas equivalentes à quantidade removida via exportação pelos grãos.

A ideia de adubação fosfatada visando adubar o sistema está em concordância com a nova abordagem da avaliação da eficiência da adubação fosfatada na agricultura (Johnston & Syers, 2009). Essa nova visão do manejo do P no solo baseia-se no estudo de recuperação de P através do método de balanço de P (Syers et al., 2008), que consiste na razão entre o P removido pelas culturas e o P aplicado ao solo. A recuperação de P descrita pelo método de balanço surgiu a partir de estudos de recuperação da adubação fosfatada utilizando o método direto, com isótopo ^{32}P , em que a percentagem de recuperação do P (eficiência) raramente excede 25 % na cultura em que o fertilizante foi aplicado. Ou seja, desconsiderando perdas, 75 % do P aplicado vão para as reservas do solo, seja na fração lábil, moderadamente lábil ou não lábil. Assim, é razoável considerar que do total de P absorvido por uma cultura, parte veio do P do fertilizante e parte da reserva do solo, a qual é mantida pela adubação fosfatada.

Em solos com teores de P disponível acima do teor crítico, McCollum (1991) observou que doses correspondentes à exportação de P pelos grãos são suficientes para manter os teores desse nutriente no solo.

Além disso, nesta condição de fertilidade, a eficiência da adubação fosfatada estimada pelo método de balanço de P excede 95 % (Johnston & Syers, 2009).

Para o manejo da adubação fosfatada nas classes de disponibilidade Baixa e Média, as doses de P_2O_5 foram estimadas pela MEE das culturas, e não contemplam a filosofia de correção do solo com aplicação e incorporação na camada arável. Porém, as doses recomendadas para a classe Baixa são em média 145, 55, 105 e 125 kg P_2O_5 ha⁻¹ superiores à exportação pelos grãos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente e, para a classe Média, 35, 40, 55 e 60 kg P_2O_5 ha⁻¹. Considerando a necessidade de 100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 para elevar 1 mg dm⁻³ de P disponível no solo na camada de 0-20 cm (Vieira, 2010) e a rotação de culturas amplamente utilizada na região Centro-Sul do Paraná, observa-se que após um ciclo de rotação com estas doses (3 anos), a quantidade de P_2O_5 aplicada além da exportação dos grãos seria próxima à necessária para elevar os teores de P disponível no solo ao teor crítico (Tabela 10), atingindo a classe de disponibilidade de P desejada (Alta), mesmo que a recomendação de doses para as culturas em solos com P abaixo do teor crítico não foram desenvolvidas na filosofia de correção do solo.

Esta condição aproxima-se das recomendações que propunham a correção gradual dos teores de P disponível no solo, através da aplicação no sulco de semeadura de uma quantidade de P superior à extração da cultura, de modo a acumular P no solo com o passar do tempo, atingindo após alguns anos a disponibilidade de P desejada. As doses de adubação corretiva gradual de P no solo e o período estipulado para atingir o teor crítico no solo variam entre as recomendações, por vezes considerando períodos curtos de 2 ou 3 cultivos (Sociedade..., 2004; Cubilla et al., 2007), ou períodos mais longos como 3, 4 ou até 8 anos (Leikam et al., 2003; Schlindwein, 2003).

TABELA 10. Dose média de P_2O_5 aplicada além da exportação pelos grãos de soja, milho, cevada e trigo nas classes de disponibilidade e o total aplicado no ciclo de rotação de culturas trianual.

Classe de disponibilidade	Rotação de culturas						Total
	Cevada/	Soja/	Nabo/	Milho/	Trigo/	Soja	
	kg P_2O_5 ha ⁻¹						
Baixa	125	145	-	55	105	145	575
Média	60	35	-	40	55	35	225

6.2. ESTUDO 2: Calibração de potássio no solo com o extrator Mehlich-1 e recomendação de adubação potássica para soja, milho, trigo e cevada

Nesta seção são apresentados os rendimentos de grãos das culturas e os correspondentes teores de K no solo, nos experimentos de calibração com doses de K_2O para a criação de níveis de fertilidade e nos experimentos de resposta à adubação com doses de K_2O na semeadura das culturas. A partir da análise conjunta desses dados, realizou-se a consolidação da curva de calibração de K e do teor crítico para a rotação de culturas, bem como a definição das faixas de disponibilidade e a elaboração da recomendação de doses de K para as culturas de soja, milho, trigo e cevada.

6.2.1. Rendimento de grãos das culturas e teores de potássio no solo

Os rendimentos de grãos das culturas nos experimentos de calibração de K instalados em 2008 são apresentados na tabela 11 e os respectivos teores de K no solo na tabela 12. O rendimento das culturas foi alto nos três experimentos, atingindo rendimentos máximos de $5,9 \text{ t ha}^{-1}$ de soja, $16,2 \text{ t ha}^{-1}$ de milho, $4,1 \text{ t ha}^{-1}$ de trigo e $6,6 \text{ t ha}^{-1}$ de cevada. Os rendimentos dos tratamentos sem aplicação de K também foram altos, proporcionando rendimentos relativos acima de 90 % na maioria dos tratamentos, culturas e safras. Estes rendimentos relativos elevados foram reflexos dos altos teores de K no solo nos experimentos, principalmente nos anos iniciais.

Os teores de K no solo nos três experimentos diminuíram ao longo dos anos, porém, mesmo após 5 anos sem aplicação de fertilizante potássico, os teores de K na amostragem de solo em abril de 2013 (0-20 cm) ainda eram de $0,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em Guarapuava, $0,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em Pinhão e $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em Candói (Tabela 12). Os baixos teores de K no solo no experimento em Candói proporcionaram os menores rendimentos relativos de grãos (78 %), com produtividades de soja de até 750 kg ha^{-1} inferior à MET.

TABELA 11. Rendimentos relativos de soja, milho, trigo, cevada e aveia branca nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de K₂O aplicadas na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de potássio a cada safra.

Local do experimento	Safra	Rend. máximo ¹ kg ha ⁻¹	Rendimento relativo ²				
			Doses de correção, kg K ₂ O ha ⁻¹				
			0	80	160	320	640
			----- % -----				
Soja							
Guarapuava	2010/11	3990	99	100	98	99	98
Guarapuava	2011/12	4106	96	100	95	95	94
Guarapuava	2012/13	5981	96	92	91	99	99
Pinhão	2010/11	4453	95	92	98	100	100
Pinhão	2011/12	4042	90	89	92	94	98
Pinhão	2012/13	4251	90	89	94	100	96
Candói	2009/10	4602	96	96	94	95	95
Candói	2011/12	4315	93	95	96	97	97
Candói	2012/13	4622	84	86	94	98	97
Milho							
Guarapuava	2009/10	16223	99	100	99	100	99
Pinhão	2009/10	14909	91	88	92	89	92
Candói	2010/11	15513	94	96	98	98	100
Trigo							
Pinhão	2010	4130	94	93	94	92	93
Cevada							
Guarapuava	2011	6675	95	93	93	95	96
Pinhão	2011	5768	94	96	94	91	95
Candói	2011	5125	92	98	99	95	90
Aveia branca							
Candói	2012	2536	78	81	84	86	87

¹ Rendimento de grãos referente ao tratamento que apresentou o maior rendimento de grãos em cada experimento e safra (considerando os tratamentos sem e com reaplicação de K); valor definido como RR = 100 %.

² Percentual do rendimento do tratamento em relação ao máximo obtido no experimento em cada safra.

TABELA 12. Teores de potássio disponível (Mehlich-1) no solo nos experimentos de calibração em função das diferentes doses de K₂O aplicadas em superfície na instalação dos experimentos em 2008, nos tratamentos sem reaplicação de potássio a cada safra.

Local do experimento	Época de coleta	Camada	Potássio disponível					
			Doses de correção, kg K ₂ O ha ⁻¹					
			0	80	160	320	640	
		cm	----- cmol _c dm ⁻³ -----					
Guarapuava	Novembro 2008 ¹	0-10	0,73	0,74	0,85	1,10	1,56	
		0-20	0,50	0,54	0,71	0,79	1,08	
	Abril/2009 ¹	0-10	0,66	0,64	0,79	1,48	1,32	
		0-20	0,50	0,43	0,48	0,76	1,01	
	Abril/2010	0-10	0,54	0,49	0,48	0,75	0,74	
		0-20	0,35	0,35	0,42	0,66	0,64	
	Abril/2011	0-10	0,38	0,42	0,48	0,57	0,65	
		0-20	0,29	0,30	0,34	0,43	0,56	
	Abril/2012	0-10	0,50	0,42	0,56	0,68	0,81	
		0-20	0,39	0,30	0,41	0,47	0,65	
	Abril/2013	0-10	0,36	0,40	0,44	0,49	0,63	
		0-20	0,25	0,27	0,30	0,36	0,44	
	Pinhão	Novembro 2008	0-10	0,58	0,70	0,75	0,97	1,34
			0-20	0,54	0,58	0,70	0,88	1,10
Abril/2009		0-10	0,79	0,95	0,96	1,21	1,36	
		0-20	0,56	0,62	0,75	0,95	1,25	
Abril/2010		0-10	0,60	0,75	0,76	0,84	1,04	
		0-20	0,57	0,64	0,61	0,59	0,83	
Abril/2011		0-10	0,65	0,78	0,70	0,73	0,73	
		0-20	0,50	0,61	0,56	0,57	0,65	
Abril/2012		0-10	0,62	0,72	0,72	0,82	0,93	
		0-20	0,47	0,56	0,53	0,62	0,73	
Abril/2013		0-10	0,73	0,73	0,64	0,82	0,84	
		0-20	0,60	0,58	0,56	0,64	0,71	
Candói		Novembro 2008	0-10	0,32	0,39	0,49	0,75	1,00
			0-20	0,22	0,34	0,40	0,51	0,93
	Abril/2009	0-10	0,30	0,30	0,58	0,65	0,87	
		0-20	0,22	0,24	0,43	0,45	0,57	
	Abril/2010	0-10	0,25	0,27	0,25	0,37	0,45	
		0-20	0,16	0,18	0,24	0,35	0,41	
	Abril/2011	0-10	0,22	0,27	0,30	0,38	0,55	
		0-20	0,15	0,18	0,21	0,35	0,39	
	Abril/2012	0-10	0,21	0,33	0,38	0,60	0,64	
		0-20	0,14	0,22	0,27	0,42	0,49	
	Abril/2013	0-10	0,22	0,31	0,45	0,64	0,64	
		0-20	0,15	0,23	0,31	0,44	0,47	

¹ Análises de solo referentes às coletas de novembro de 2008 e abril de 2009 publicadas em Vieira (2010).

Os rendimentos relativos nos experimentos de resposta à adubação de K instalados em cada local e em cada safra (2011, 2011/12, 2012 e 2012/2013), bem como a equação de ajuste em função das doses e os coeficientes de determinação são apresentados nas tabelas 13 e 14. As equações foram selecionadas de acordo com o maior coeficiente de determinação.

O teor de K no solo dos 44 experimentos de resposta à adubação variou de 0,20 a 0,67 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (0-20 cm), sendo 19 deles inferior ao teor crítico sugerido por Vieira (2010) de 0,30 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, valor que também representa o teor médio dos solos agrícolas da região de Guarapuava (Fontoura et al., 2004). Originalmente, os solos do Paraná são bem supridos de potássio, com exceção aos solos arenosos com baixa CTC da região Noroeste (Caires, 2013). Acrescido à boa disponibilidade natural de K nos solos de origem basáltica da formação Serra Geral, o alto teor médio de K nos solos agrícolas da região Centro-Sul também é favorecido pelo longo histórico de adubação, aliado a adoção da rotação de culturas com alto aporte de resíduos e ao sistema plantio direto, refletindo em altos teores de matéria orgânica (47 g kg^{-1}) e $\text{CTC}_{\text{pH}7,0}$ (15 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), minimizando perdas de K e mantendo uma constante ciclagem de K pelas plantas.

A aplicação das doses de potássio na semeadura da soja implicou na resposta negativa do rendimento desta cultura na maioria das safras e locais, sendo que, dentre os 11 experimentos com soja nas safras 2011/12 e 2012/13, apenas três apresentaram incremento no rendimento de grãos com a adição do fertilizante potássico. Os efeitos negativos podem ser decorrentes da forma em que o potássio foi aplicado ao solo, como cloreto de potássio (KCl). Neste caso, pode ocorrer excesso de cloro no solo e conseqüente acúmulo de cloreto na planta, ou efeito de salinidade no solo, pelo alto índice salino do fertilizante (Ernani et al., 2007) aliado à maior suscetibilidade da semente oleaginosa. Em razão disto, diversas referências estipulam dose máxima de K_2O a ser aplicada na linha de semeadura da soja, como 80 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ segundo Embrapa (2011a) e 50 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ segundo Raij (2011)..

TABELA 13. Teores de potássio disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de soja e milho nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de K_2O em diferentes safras e locais.

Local do experimento	Camada		Safr	Equação de regressão polinomial	r^2	RR ¹	MET ²
	0-20	0-10					
	cmol _c dm ⁻³					%	kg ha ⁻¹
Soja							
Murakami 1	0,24	0,32	2011/12	$y = 0,0106(K_2O)^2 - 6,249(K_2O) + 4369$	0,96	100	4369
Candói	0,31	0,35	2011/12	$y = 0,0268(K_2O)^2 - 6,078(K_2O) + 3434$	0,80	100	3434
Guarapuava	0,38	0,39	2011/12	$y = -0,0178(K_2O)^2 + 4,943(K_2O) + 4416$	0,72	93	4759
Roncador	0,49	0,60	2011/12	$y = -0,0052(K_2O)^2 - 0,824(K_2O) + 3732$	0,81	100	3732
Pinhão	0,56	0,70	2011/12	$y = -0,7172(K_2O) + 3064$	0,27	100	3064
Murakami 2	0,67	0,78	2011/12	$y = 0,013(K_2O)^2 - 4,335(K_2O) + 4671$	0,96	100	4671
Jaster	0,27	0,35	2012/13	$y = -0,0131(K_2O)^2 + 2,910(K_2O) + 5002$	0,84	97	5164
Murakami 2	0,42	0,42	2012/13	$y = 0,0133(K_2O)^2 - 6,115(K_2O) + 6057$	0,92	100	6057
Guarapuava	0,43	0,58	2012/13	$y = 0,0261(K_2O)^2 - 7,737(K_2O) + 5891$	0,98	100	5891
Murakami 1	0,62	0,85	2012/13	$y = -2,1573(K_2O) + 3497$	0,56	100	3497
Roncador	0,66	0,68	2012/13	$y = -0,0091(K_2O)^2 + 1,225(K_2O) + 3427$	0,80	99	3468
Milho							
Murakami	0,22	0,24	2011/12	$y = 1,1552(K_2O) + 14898$	0,82	98	15175
Pinhão	0,26	0,46	2011/12	$y = -1,2334(K_2O) + 12742$	0,07	100	12742
Roncador	0,37	0,54	2011/12	$y = -0,3113(K_2O) + 10690$	0,01	100	10690
Guarapuava	0,50	0,50	2011/12	$y = -0,1577(K_2O)^2 + 25,455(K_2O) + 14862$	0,98	94	15889
Roncador	0,26	0,46	2012/13	$y = -0,0646(K_2O)^2 + 12,923(K_2O) + 15773$	0,73	96	16419
Goioxim	0,35	0,44	2012/13	$y = -0,0964(K_2O)^2 + 20,741(K_2O) + 12452$	0,69	92	13568
Candói	0,39	0,55	2012/13	$y = -0,0578(K_2O)^2 + 11,336(K_2O) + 11843$	0,89	96	12399
Pinhão	0,47	0,76	2012/13	$y = 1,2438(K_2O) + 13855$	0,05	98	14154
Guarapuava	0,52	0,81	2012/13	$y = -0,0525(K_2O)^2 + 10,909(K_2O) + 14962$	0,99	96	15629
Murakami	0,54	0,64	2012/13	$y = -5,0521(K_2O) + 14229$	0,50	100	14229

¹ Rendimento relativo de grãos do tratamento sem adição de K em relação ao rendimento de MET. ² Rendimento de grãos correspondente à máxima eficiência técnica (MET) estimada pela curva de ajuste do rendimento.

As culturas de trigo e cevada apresentaram maior resposta à adubação potássica que a soja e o milho, evidenciada por rendimentos relativos médios de 91,4 % para trigo, 88,8 % para cevada, 99 % para soja e 97 % para o milho. A maior exigência de K no solo pelos cereais de inverno é destacada na literatura e utilizada na recomendação de adubação potássica para a sucessão trigo/soja no estado do Paraná desde o trabalho de Lantmann et al. (1996), a partir da interpretação dos resultados de menor teor crítico de K para soja (Sfredo & Borkert, 1991) que para o trigo (Muzilli & Lantmann, 1978). Semelhante ao destacado no estudo de fósforo, a maior exigência dos cereais

de inverno pode estar relacionado à menor disponibilidade hídrica nos meses de inverno, influenciando as taxas de difusão de K no solo e, conseqüentemente, refletindo em valores analíticos desse nutriente maiores no inverno para proporcionar o mesmo rendimento relativo de 90 %.

TABELA 14. Teores de potássio disponível no solo, equações de ajuste e rendimentos relativos de trigo e cevada nos experimentos de resposta à adubação em função das doses de K₂O em diferentes safras e locais.

Local do experimento	Camada		Safr	Equação de regressão polinomial	r ²	RR ¹	MET ²
	0-20	0-10					
	cmol _c dm ⁻³					%	
Trigo							
Rodeio	0,20	0,30	2011	$y = -0,0088(K_2O)^2 + 3,619(K_2O) + 2235$	0,67	85	2507
Santa Clara	0,23	0,27	2011	$y = -0,0173(K_2O)^2 + 5,502(K_2O) + 3940$	0,90	90	4377
Guarapuava	0,24	0,34	2011	$y = 2,2753(K_2O) + 4321$	0,65	89	4867
Santa Rita	0,28	0,33	2011	$y = -0,0153(K_2O)^2 + 5,286(K_2O) + 5061$	0,94	92	5518
Santana	0,56	0,61	2011	$y = 0,3897(K_2O) + 4273$	0,16	98	4367
Campo Bonito	0,62	0,70	2011	$y = -0,0094(K_2O)^2 + 4,462(K_2O) + 4490$	0,82	89	5019
Pinhão 2	0,25	0,33	2012	$y = -0,0016(K_2O)^2 + 0,574(K_2O) + 2629$	0,64	87	3284
Guarapuava	0,29	0,47	2012	$y = -0,0937(K_2O)^2 + 12,69(K_2O) + 4129$	0,99	91	4129
Murakami 1	0,29	0,58	2012	$y = 1,1685(K_2O) + 2291$	0,73	89	2571
Roncador	0,37	0,40	2012	$y = 0,037(K_2O) + 2787$	0,01	100	2796
Murakami 2	0,47	0,50	2012	$y = -0,0116(K_2O)^2 + 4,471(K_2O) + 2853$	0,64	87	3284
Pinhão 1	0,64	0,71	2012	$y = -1,8833(K_2O) + 3226$	0,53	100	3226
Cevada							
Rodeio	0,20	0,30	2011	$y = -0,0927(K_2O)^2 + 14,65(K_2O) + 1816$	0,96	76	2395
Santa Clara	0,23	0,27	2011	$y = -0,0203(K_2O)^2 + 5,747(K_2O) + 5410$	0,84	93	5816
Guarapuava	0,24	0,34	2011	$y = -0,0107(K_2O)^2 + 2,507(K_2O) + 5127$	0,51	97	5274
Santa Rita	0,28	0,33	2011	$y = -0,0361(K_2O)^2 + 11,099(K_2O) + 3219$	0,67	79	4072
Santana	0,56	0,61	2011	$y = -0,0052(K_2O)^2 + 3,008(K_2O) + 5372$	0,27	93	5807
Campo Bonito	0,62	0,70	2011	$y = -0,013(K_2O)^2 + 5,019(K_2O) + 5613$	0,69	92	6098
Pinhão 2	0,25	0,33	2012	$y = -0,0307(K_2O)^2 + 8,587(K_2O) + 3056$	0,32	84	3657
Guarapuava	0,29	0,47	2012	$y = -0,0148(K_2O)^2 + 4,730(K_2O) + 4843$	0,89	93	5221
Murakami 1	0,29	0,58	2012	$y = -0,0167(K_2O)^2 + 3,925(K_2O) + 2302$	0,88	91	2533
Murakami 2	0,47	0,50	2012	$y = -0,0254(K_2O)^2 + 7,571(K_2O) + 3347$	0,82	86	3911
Pinhão 1	0,64	0,71	2012	$y = -0,0125(K_2O)^2 + 4,706(K_2O) + 2730$	0,86	86	3173

¹ Rendimento relativo de grãos do tratamento sem adição de K em relação ao rendimento de MET. ²Rendimento de grãos correspondente à máxima eficiência técnica (MET) estimada pela curva de ajuste do rendimento.

Os menores rendimentos relativos de trigo e cevada também podem estar relacionados à dinâmica da disponibilidade de K no solo na rotação de culturas. Em geral, menores teores de K no solo são observados após a

colheita da cultura da soja em relação ao trigo e à cevada quando considerado a sucessão soja/trigo ou soja/cevada, em razão das quantidades de K absorvida e exportada pelas plantas. A cultura da soja absorve 38 kg de K_2O para cada tonelada de grãos a ser produzido e exporta em torno de 20 kg K_2O t^{-1} de grão, ou seja, aproximadamente 50 % do K absorvido (Embrapa, 2011a), enquanto que culturas como o trigo, a cevada e o milho absorvem cerca de 25 kg K_2O t^{-1} de grão e exportam apenas 20 a 25 % do K absorvido (6 kg K_2O t^{-1} de grãos) (Rossato, 2004). Essa diferença reflete na quantidade de K que retorna ao solo via palhada, após a colheita dos grãos das culturas. Considerando o rendimento médio dos experimentos de 4,2 t ha^{-1} de soja, 13,7 t ha^{-1} de milho, 3,6 t ha^{-1} de trigo e 4,1 t ha^{-1} de cevada, a quantidade de potássio que retornaria ao solo através da palhada após a colheita dos grãos seria de 70 kg ha^{-1} oriunda da soja, 175 kg ha^{-1} do milho, 90 kg ha^{-1} do trigo e 100 kg ha^{-1} da cevada. Dessa forma, a maior absorção de K pela soja, bem como exportação e menor quantidade de retorno ao sistema condiciona à cultura em sucessão (trigo ou cevada) menor disponibilidade de K via ciclagem.

6.2.2. Consolidação da curva de calibração de potássio

Os resultados de rendimento de grãos dos 44 experimentos de resposta à adubação e dos três experimentos de calibração (período compreendido entre os anos agrícolas de 2009/10 a 2012/13) foram agrupados aos resultados obtidos por Vieira (2010), no período de 2008 a 2009. Um total de 152 valores de rendimentos foram utilizados para compor as curvas de calibração, correspondendo a 71 valores referentes à cultura soja, 25 de milho, 18 de trigo, 32 de cevada e 6 de aveia branca.

As curvas de calibração, as equações de ajuste e os teores críticos de K, determinados para as camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade com o extrator Mehlich-1 são apresentados na figura 10. As culturas foram agrupadas em duas curvas de calibração distintas, conforme sua semelhança na resposta à adubação potássica, obtendo assim, um teor crítico para as culturas de aveia branca, trigo e cevada, e outro para soja e milho.

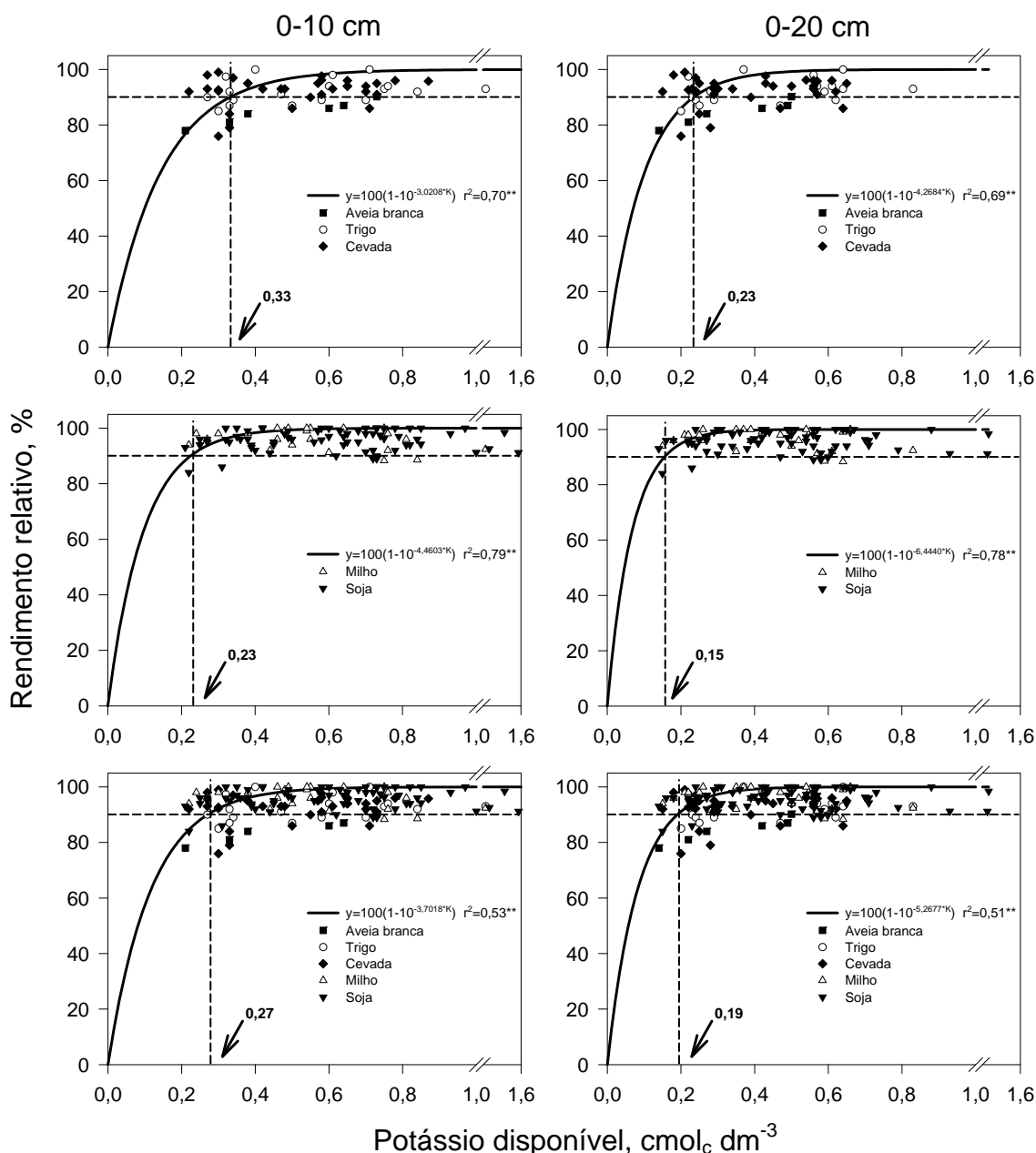


FIGURA 10. Teor crítico de potássio disponível (Mehlich-1) no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, para as culturas de aveia branca, trigo, cevada, soja e milho (0,01 cmol_c K dm⁻³ corresponde a 3,91 mg K dm⁻³). ** Significativo (p < 0,01).

Os coeficientes de determinação obtidos entre o teor de K no solo e o rendimento relativo das culturas foram significativos em todos os grupos de culturas e profundidades (Figura 10). Dentre os grupos de culturas, melhor ajuste do rendimento relativo com o teor de K no solo foi obtido com as culturas de verão (r² = 0,79), seguido dos cereais de inverno (r² = 0,70) e do conjunto com todas as culturas (r² = 0,53). O ajuste do rendimento das culturas com os teores de K no solo foi semelhante entre as camadas de 0-10 e 0-20 cm.

As culturas de aveia branca, trigo e cevada foram mais exigentes em K que as culturas do verão, apresentando teor crítico de $0,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada de 0-10 cm e de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada de 0-20 cm. Estes teores críticos são inferiores aos valores de 0,40 e $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ obtidos por Vieira (2010) para as respectivas camadas e culturas, porém, muito semelhantes aos teores críticos obtidos por Schlindwein et al. (2011) para milho, soja e trigo em solos do RS, que foram de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada de 0-10 cm e de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada de 0-20 cm.

Os teores críticos de K para as culturas de soja e milho foram menores, de 0,23 e $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para as camadas de 0-10 e 0-20 cm, respectivamente. A baixa resposta dessas culturas à adubação potássica e os baixos teores críticos de K no solo têm sido observado por vários autores. Dentre eles, destacam-se os estudos com a cultura da soja de Borkert et al. (1993) no estado do Paraná e de Scherer (1998) no estado de SC, e com as culturas de soja, milho e sorgo de Brunetto et al. (2005), no estado do RS. Os teores críticos propostos nesses estudos foram de 0,10, 0,16 e $0,11 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente.

A recomendação de adubação para os estados do RS e SC (Sociedade..., 2004) sugere para solos com CTC acima de $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, faixa em que os solos da região de Centro-Sul do Paraná estão situados, o teor crítico de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada amostrada de 0-10 cm em plantio direto consolidado, não discriminando a cultura em questão. Esse valor é o mesmo teor crítico encontrado neste trabalho para as culturas de soja e milho na camada de 0-10 cm, bem como para os cereais de inverno na camada amostrada de 0-20 cm. Com isso, a utilização do teor crítico sugerido pela Sociedade... (2004) para os solos da região Centro-Sul do Paraná decorreria em uma subestimação do teor crítico, pois, considerando a camada de amostragem de 0-10 cm, o teor crítico para os cereais de inverno foi de $0,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Em comparação à atual recomendação de adubação potássica utilizada no estado do Paraná, o teor crítico de K para as culturas de trigo e cevada é um pouco superior ao teor de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ indicado por Embrapa (2011b) e Embrapa (2013), as quais consideram a camada de 0-10 cm para a recomendação de adubação. Para a cultura da soja, a Embrapa (2011a)

considera como teor crítico $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o qual é muito superior ao valor de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ verificado neste trabalho. Cabe destacar que, desde os estudos de Lantmann et al. (1996), as recomendações de adubação para o estado do Paraná tem apresentado uma visão diferenciada na filosofia de recomendação, na qual, mesmo com a cultura da soja apresentando menor exigência de teor crítico, o foco de adubação é direcionado à rotação de culturas, prevalecendo o teor crítico da cultura de maior exigência, conceito este de adubação de sistemas que é compartilhado neste trabalho de calibração de K, em que os cereais de inverno aveia branca, trigo e cevada foram mais exigentes.

6.2.3. Faixas e classes de disponibilidade de K no solo

Após a definição dos teores críticos de K para as diferentes camadas amostradas e culturas, estabeleceu-se as faixas e classes de disponibilidade, visando detalhar a curva de calibração, fracionando-a pelos teores do nutriente no solo, facilitando a interpretação das análises de solo e a recomendação de doses.

Deve ser destacado que a recomendação de adubação desenvolvida neste estudo visa o sistema de rotação de culturas. Portanto, a definição do teor crítico a ser adotado para o estabelecimento das faixas de disponibilidade objetiva contemplar as culturas de maior exigência do nutriente, que foram os cereais de inverno (aveia branca, trigo e cevada) (Figura 10). Dessa forma, os teores críticos ajustados utilizados na definição das faixas foram de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada 0-20 cm e de $0,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a camada 0-10 cm.

No estabelecimento das faixas de disponibilidade, o teor crítico do nutriente representa o limite superior da classe Média, sendo este dividido por dois para delimitar as classes equidistantes, chamadas Baixa e Média, e multiplicado por dois para obter o limite entre as classes Alta e Muito alta (Figura 11). Dessa forma, para a camada 0-20 cm, a classe Baixa contempla solos com teores de K de zero a $0,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, a classe Média de $0,121$ a $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, a classe Alta de $0,231$ a $0,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e a classe Muito alta contempla os solos com teor de K maior que $0,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

As delimitações das faixas e classes de disponibilidade estão diretamente relacionadas com a probabilidade de resposta das culturas à adição do nutriente. Acima do teor crítico, a probabilidade de resposta é muito baixa ou nula, enquanto que abaixo, ela aumenta à medida que o teor no solo diminui em relação ao teor crítico.

Embora grande parte das áreas agrícolas da região Centro-Sul do Paraná estejam situadas nas classes Alta e Muito alta, muitos produtores seguem com altas aplicações de fertilizante potássico para as culturas. Na classe de disponibilidade Alta, encontram-se os solos com a disponibilidade de K adequada para o desenvolvimento das culturas. Nesta situação, o objetivo da adubação é a manutenção dos teores de K nesta classe, através da reposição da quantidade de K exportada pelos grãos e de eventuais perdas do nutriente, principalmente por lixiviação. Porém, na situação de disponibilidade de K Muito alta, o solo já apresenta alta reserva do nutriente para o desenvolvimento adequado das plantas, não sendo necessária a adição de doses maiores que a exportação pelas culturas. Além disso, a probabilidade de resposta ao fertilizante adicionado nesta classe é muito baixa, podendo não ser economicamente viável.

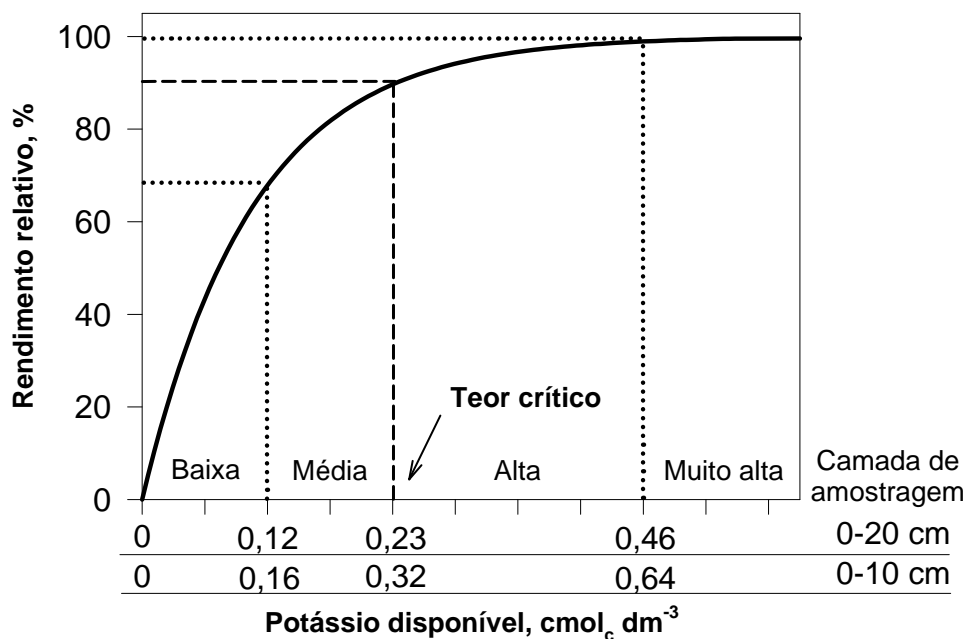


FIGURA 11. Faixas e classes de disponibilidade de potássio no solo (Mehlich-1) para a rotação de culturas com soja, milho, trigo e cevada, nas camadas de 0-20 e 0-10 cm em Latossolos ($CTC_{pH7,0} > 15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

Nas condições de disponibilidade de K Média ou Baixa, a probabilidade de resposta ao fertilizante potássico é média a alta. Assim, a adubação nessas classes objetiva o máximo retorno econômico das culturas e, gradualmente, elevar os teores do nutriente no solo para a classe ótima de disponibilidade do nutriente no solo (Alta).

A resposta das culturas ao K adicionado nas distintas classes de fertilidade do solo foi avaliada através do retorno econômico (R\$ ha⁻¹) a partir da aplicação de 50 kg ha⁻¹ de K₂O nos experimentos de resposta à adubação de K (Tabelas 13 e 14), considerando a situação de preço de grãos médio de 5 anos (Figuras 12a, 12c e 12e) e uma condição de preços baixos, estimados em 30 % inferior ao preço médio (Figuras 12b, 12d e 12f).

Os maiores retornos econômicos foram observados nos solos na classe Média de K no solo, diminuindo com o aumento dos níveis de disponibilidade, confirmando as probabilidades de resposta média, baixa e muito baixa para as respectivas classes de disponibilidade Média, Alta e Muito alta. Na condição atual de cotação de grãos e considerando as quatro culturas em conjunto, apenas na classe de disponibilidade Média observou-se retorno econômico positivo à aplicação do fertilizante potássico. Apesar de 47 % dos experimentos nas classes Alta e Muito alta ter apresentado retorno econômico positivo, o valor médio deste retorno foi negativo, de -R\$ 19,00 e -R\$ 21,00, respectivamente. Quando considerada a cotação de grãos 30 % inferior à média na condição de disponibilidade de K Média, o retorno nesta classe ainda foi baixo, de R\$ 20,00 por hectare.

As culturas de verão apresentaram grande amplitude no retorno econômico dentro de cada classe (Figuras 12c e 12d). Em geral, a cultura do milho apresentou retorno econômico positivo de R\$ 53,00 ha⁻¹ para a classe Alta e de R\$ 35,00 ha⁻¹ para a classe Muito alta. Em contraposto, a cultura da soja foi a que menos respondeu à aplicação de K, apresentando resposta negativa em 67 % dos experimentos na classe Alta e em 100 % dos experimentos na classe Muito alta, o que correspondeu a um déficit médio de R\$ 117,00 ha⁻¹ com a aplicação de 50 kg K₂O ha⁻¹ em solos nessa classe de disponibilidade. Este prejuízo econômico na cultura da soja com a adição de K reflete os rendimentos negativos destacados na tabela 13, em que apenas três

dentre os 11 experimentos avaliados apresentaram incremento no rendimento de grãos com a adição de K ao solo.

Dessa forma, os resultados indicam que o manejo da adubação potássica para a cultura da soja em solos com disponibilidade Muito alta de K deve ser realizado com cautela, sendo práticas plausíveis a aplicação de doses inferiores à exportação ou mesmo a suspensão temporária da adubação potássica, visto que mesmo a dose de reposição do nutriente pode não proporcionar retorno econômico ao produtor.

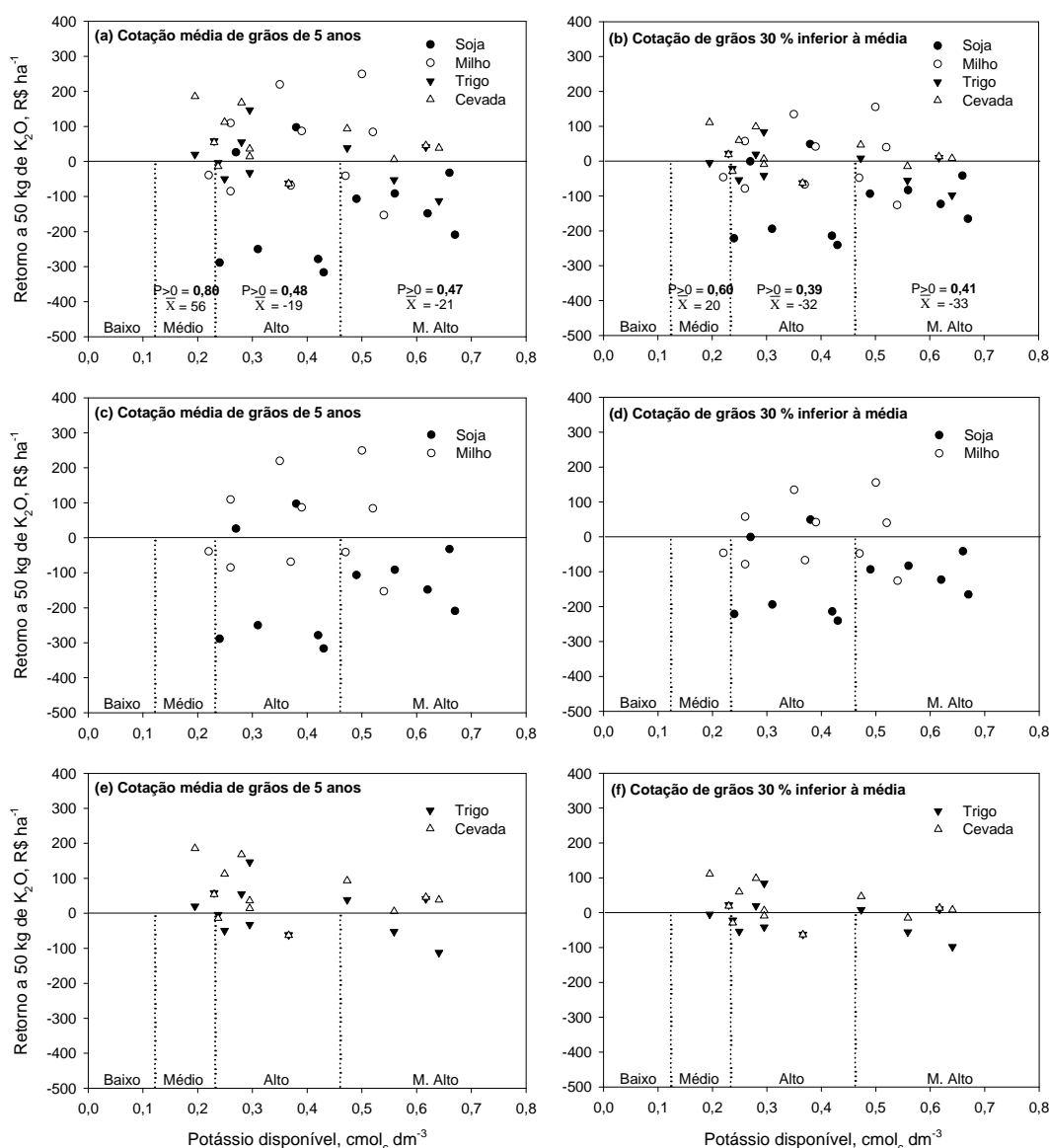


FIGURA 12. Retorno líquido da adubação potássica em diferentes teores de K disponível e preços de grãos. Cotação de soja, milho, trigo e cevada de R\$ 789, R\$ 355, R\$ 522 e R\$ 496 t⁻¹ (a), e de R\$ 552, R\$ 249, R\$ 366 e R\$ 347 t⁻¹ (b), respectivamente. Cotação do fertilizante potássico de R\$ 1258 t⁻¹ de K₂O.

O retorno econômico das culturas de trigo e cevada com a adubação potássica foi distinto do observado para as culturas de verão, apresentando valores de retorno positivos mesmo a partir da adição de 50 kg ha^{-1} em solos da classe de disponibilidade Muito alta. Dessa forma, o retorno econômico por hectare para as culturas de trigo e cevada foi de R\$ 80,00 para a classe Média, R\$ 26,00 para a classe Alta e de R\$ 12,00 para a classe Muito alta, considerando a cotação de grãos média dos últimos 5 anos (Figura 12e). Mesmo na condição de preços 30 % inferiores (Figura 12f), o retorno foi positivo em R\$ 36,00 ha^{-1} na classe Média de disponibilidade. Para as classes Alta e Muito alta, o retorno econômico foi negativo em R\$ 1,00 e R\$ 10,00, respectivamente.

6.2.4. Doses de potássio para as culturas

Após a obtenção dos teores críticos e estabelecidas as faixas e classes de disponibilidade de K a partir das curvas de calibração, realizou-se a estimativa de dose para as culturas em cada classe.

A estimativa de doses e recomendação da adubação potássica foi baseada nos conceitos de adubação de correção, manutenção e reposição, complementada pela análise conjunta das curvas de resposta de produtividade das culturas em função da aplicação de potássio ao solo. Essa diferenciação na filosofia em relação à utilizada para o fósforo decorre do potássio no solo não sofrer adsorção específica, como ocorre fortemente com o P nesses solos ricos em óxidos de alumínio e ferro e que inviabiliza economicamente as doses de correção para o P nessa região.

Para a estimativa das doses de potássio nas classes de disponibilidade Baixa e Média, utilizaram-se os experimentos instalados em 2008 em Guarapuava, Pinhão e Cândói. A partir da relação entre os teores de K no solo após sete meses da adubação e as respectivas doses de K_2O aplicadas obteve-se a quantidade de potássio necessária para incrementar $0,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de potássio disponível no solo em cada local (Figura 13). Nos experimentos em Guarapuava e Pinhão foram necessários $11,1 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para aumentar $0,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo, enquanto que em Cândói foram necessários $9,1 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$. Estes valores são inferiores à necessidade de

20,3 kg K₂O ha⁻¹ obtido por Schindwein et al. (2013) para elevar 0,01 cmol_c dm⁻³ de K na camada de 0-20 cm em solos do planalto do Rio Grande do Sul, bem como ao valor de 19,6 kg K₂O ha⁻¹ obtido por Wendling et al. (2008) para a camada de 0-10 cm em solos do Paraguai.

Para a estimativa das doses de K utilizou-se o valor médio das três localidades, de 10,4 kg K₂O ha⁻¹ para cada 0,01 cmol_c dm⁻³, multiplicando-se pelo valor obtido entre a diferença do teor crítico e o valor intermediário da classe Média, e o valor superior da classe Baixa, visto que escassos são os solos na região com K menor que 0,12 cmol_c dm⁻³. Dessa forma, para a classe de disponibilidade Baixa são necessários 115 kg K₂O ha⁻¹ para elevar o teor de K no solo de 0,12 a 0,23 cmol_c dm⁻³, enquanto que na classe de disponibilidade Média são necessários 55 kg K₂O ha⁻¹ para elevar o teor de K no solo de 0,175 a 0,23 cmol_c dm⁻³ (Tabela 15).

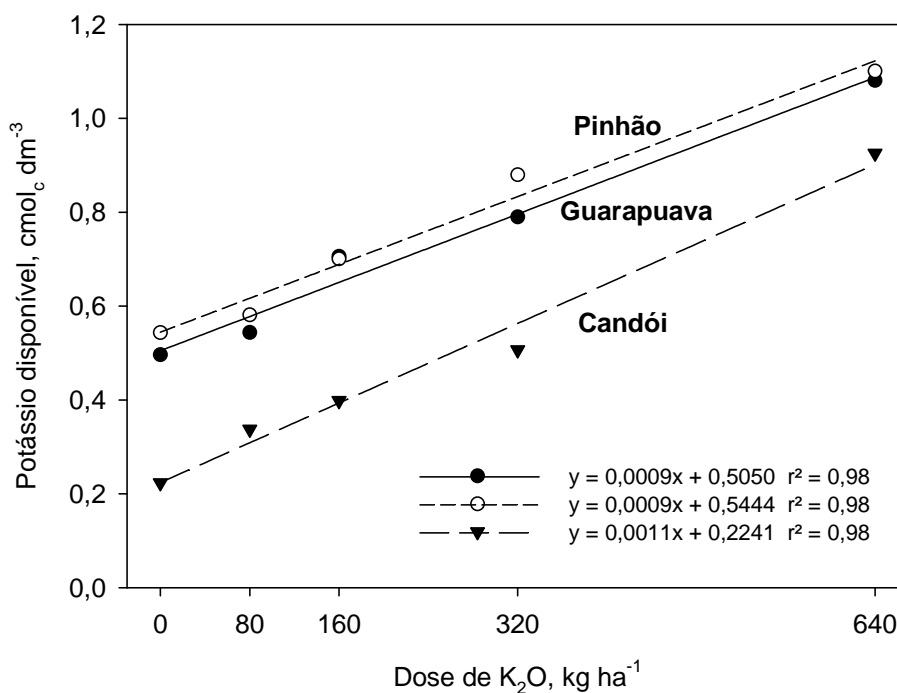


FIGURA 13. Teor de potássio disponível no solo após sete meses da aplicação das doses de K₂O na implantação dos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói.

A aplicação das doses de correção, principalmente na classe Baixa, pode ser realizada a lanço, visto que a aplicação na linha de semeadura pode causar danos às sementes além da má distribuição do fertilizante na área se aplicado na semeadura das culturas de verão, com maior espaçamento entre

linhas de semeadura. Além disso, os resultados de Vieira (2010), nestes mesmos experimentos, demonstraram que a aplicação do K a lanço incrementa tanto os teores de K disponível na camada de 0-10 cm como na camada de 10-20 cm, não se restringindo, portanto, à camada superficial.

A recomendação de adubação potássica a partir de doses de correção para solos com baixos teores de K é utilizada na maioria das atuais recomendações no Brasil, porém, variam a dose conforme calibração para o solo e clima local. Em geral, essas recomendações sofrem alterações entre os locais pela discrepância da capacidade de troca de cátions e da textura dos solos.

TABELA 15. Quantidade de potássio a ser adicionada ao solo para a adubação de correção do solo

Disponibilidade de K		Classe	Dose de K ₂ O
----- Faixa -----			
cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³		kg ha ⁻¹
< 0,12	< 45	Baixa	115
0,12 a 0,23	45 a 90	Média	55

No estado do Paraná, há recomendação de adubação corretiva potássica para a cultura da soja em solos com teor de K abaixo de 0,08 cmol_c dm⁻³ e com teor de argila acima de 40 % (Embrapa, 2011a). Nesta situação, a recomendação sugerida é a aplicação antecipada a lanço de 140 kg K₂O ha⁻¹, acrescentando a dose de reposição correspondente à expectativa de rendimento na semeadura. Para as culturas de milho e trigo nesse Estado, Oliveira (2003) sugere doses de recomendação de adubação para cada cultura em cada classe de disponibilidade de K no solo, não estipulando doses de correção do solo.

Nos estados do RS e SC, a recomendação de adubação de correção total para os solos com CTC maior que 15 cmol_c dm⁻³ sugere a aplicação de 120, 60 e 30 kg K₂O ha⁻¹ para solos com disponibilidade de K Muito baixa (<0,08 cmol_c dm⁻³), Baixa (0,08 a 0,15 cmol_c dm⁻³) e Média (0,15 a 0,23 cmol_c dm⁻³), respectivamente. Apesar da diferença entre as classes de disponibilidade da recomendação da Sociedade (2004) para este trabalho, as doses recomendadas são semelhantes, visto que neste trabalho a classe Baixa

corresponde a valores intermediários entre as classes Muito baixa e Baixa da Sociedade (2004), bem como a classe Média corresponde a valores intermediários da classe Baixa e Média da Sociedade (2004).

As doses de reposição de K para as culturas foram baseadas na exportação do nutriente pelos grãos, utilizando para o cálculo o rendimento médio obtido nos experimentos de 4 t ha⁻¹ de soja, 14 t ha⁻¹ de milho, 3,5 t ha⁻¹ de trigo e 4 t ha⁻¹ de cevada; e a concentração média de K nos grãos das respectivas culturas, de 20, 6, 6 e 6 kg K₂O t⁻¹ de grãos (Sociedade..., 2004).

Para a análise conjunta entre a recomendação de doses de correção e de máxima eficiência econômica, os experimentos de resposta à adubação potássica foram designados em suas respectivas classes de acordo como o teor de K disponível tomando como referência a análise de solo da camada de 0-20 cm (Tabelas 16 e 17).

A partir das equações de ajuste dos rendimentos de grãos em função das doses de K₂O (Tabelas 13 e 14), obteve-se o rendimento máximo de grãos (MET) e sua respectiva dose de K₂O em cada experimento (Tabelas 16 e 17). O rendimento de máxima eficiência econômica (MEE) foi calculado a partir do retorno econômico pelo incremento de grãos e das despesas em função das doses de K₂O aplicadas, considerando preços médios de 5 anos (Tabela 1), diferentemente dos estudos de calibração que adotam como MEE o valor de 90 % do RR de MET (Wendling et al., 2008; Schlindwein et al., 2011)

Cabe destacar que não foram contemplados solos com teor de K na classe Baixa (inferior a 0,12 cmol_c dm⁻³). A obtenção de áreas conduzidas em sistema plantio direto de longa duração com baixa disponibilidade de K no solo tem sido uma dificuldade nos estudos de calibração de K na região Centro-Sul do Paraná. Isto se deve pela alta eficiência do sistema plantio direto e da rotação de culturas na ciclagem de K no solo, tanto em razão do incremento de matéria orgânica e da CTC, quanto pela redução das perdas por lixiviação, mantendo no solo o K adicionado às culturas.

TABELA 16. Classe de disponibilidade de K, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de soja e milho, em função das doses de K₂O nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.

Local do experimento	Saфра	K-Mehlich-1		Classe ¹	--- MET ---		----- MEE -----		RR	
		0-20	0-10		Dose	Rend.	Dose	Rend.		
		cmol _c dm ⁻³			----- kg ha ⁻¹ -----				%	
Soja										
Murakami 1	2011/12	0,24	0,32	Alta	0	4369	0	4369	100	
Jaster	2012/13	0,27	0,35	Alta	111	5164	51	5116	99	
Candói	2011/12	0,31	0,35	Alta	0	3434	0	3434	100	
Guarapuava	2011/12	0,38	0,39	Alta	139	4759	94	4723	99	
Murakami 2	2012/13	0,42	0,42	Alta	0	6057	0	6057	100	
Guarapuava	2012/13	0,43	0,58	Alta	0	5891	0	5891	100	
Média		0,34	0,40	Alta	42	4946	24	4932	100	
Roncador	2011/12	0,49	0,60	Muito alta	0	3732	0	3732	100	
Pinhão	2011/12	0,56	0,70	Muito alta	0	3064	0	3064	100	
Murakami 1	2012/13	0,62	0,85	Muito alta	0	3497	0	3497	100	
Roncador	2012/13	0,66	0,68	Muito alta	67	3468	0	3468	100	
Murakami 2	2011/12	0,67	0,78	Muito alta	0	4671	0	4671	100	
Média		0,60	0,72	Muito alta	13	3686	0	3686	100	
Milho										
Murakami	2011/12	0,22	0,24	Média	240	15175	0	14898	98	
Pinhão	2011/12	0,26	0,46	Alta	0	12742	0	12742	100	
Roncador	2012/13	0,26	0,46	Alta	100	16419	73	16371	99	
Goioxim	2012/13	0,35	0,44	Alta	108	13568	89	13535	100	
Roncador	2011/12	0,37	0,54	Alta	0	10690	0	10690	100	
Candói	2012/13	0,39	0,55	Alta	98	12399	67	12345	99	
Média		0,33	0,49	Alta	61	13164	46	13137	100	
Pinhão	2012/13	0,47	0,76	Muito alta	240	14154	0	13855	98	
Guarapuava	2011/12	0,50	0,50	Muito alta	81	15889	69	15869	99	
Guarapuava	2012/13	0,52	0,81	Muito alta	104	15529	70	15469	100	
Murakami	2012/13	0,54	0,64	Muito alta	0	14229	0	14229	100	
Média		0,51	0,68	Muito alta	106	14950	35	14856	99	

¹ A classe de disponibilidade de K foi definida com base no teor de K da análise de solo da camada de 0-20 cm.

TABELA 17. Classe de disponibilidade de K, dose e produtividade de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) e rendimento relativo da MEE de trigo e cevada, em função das doses de K₂O nas diferentes safras e locais nos experimentos de resposta à adubação.

Local do experimento	Saфра	K-Mehlich-1		Classe ¹	--- MET ---		----- MEE -----		RR	
		0-20	0-10		Dose	Rend.	Dose	Rend.		
		cmol _c dm ⁻³				----- kg ha ⁻¹ -----		%		
Trigo										
Rodeio	2011	0,20	0,30	Média	206	2507	69	2342	93	
Santa Clara	2011	0,23	0,27	Média	159	4377	90	4294	98	
Média		0,22	0,29	Média	183	3442	80	3318	96	
Guarapuava	2011	0,24	0,34	Alta	240	4867	0	4321	89	
Pinhão 2	2012	0,25	0,33	Alta	180	2680	0	2629	98	
Santa Rita	2011	0,28	0,33	Alta	173	5518	94	5423	98	
Guarapuava	2012	0,29	0,47	Alta	68	4559	55	4543	99	
Murakami 1	2012	0,29	0,58	Alta	240	2571	0	2291	89	
Roncador	2012	0,37	0,40	Alta	240	2796	0	2787	100	
Média		0,29	0,41	Alta	190	3832	25	3666	96	
Murakami 2	2012	0,47	0,50	Muito alta	193	3284	88	3157	96	
Santana	2011	0,56	0,61	Muito alta	240	4367	0	4273	98	
Campo Bonito	2011	0,62	0,70	Muito alta	237	5019	109	4865	97	
Pinhão 1	2012	0,64	0,71	Muito alta	0	3226	0	3226	100	
Média		0,57	0,63	Muito alta	168	3974	49	3880	98	
Cevada										
Rodeio	2011	0,20	0,30	Média	79	2395	65	2377	99	
Santa Clara	2011	0,23	0,27	Média	142	5816	79	5737	99	
Média		0,22	0,29	Média	111	4106	72	4057	99	
Guarapuava	2011	0,24	0,34	Alta	117	5274	0	5127	97	
Pinhão 2	2012	0,25	0,33	Alta	140	3657	99	3605	99	
Santa Rita	2011	0,28	0,33	Alta	154	4072	119	4028	99	
Guarapuava	2012	0,29	0,47	Alta	160	5221	75	5113	98	
Murakami 1	2012	0,29	0,58	Alta	118	2533	41	2436	96	
Média		0,27	0,41	Alta	138	4151	67	4062	98	
Murakami 2	2012	0,47	0,50	Muito alta	149	3911	99	3847	98	
Santana	2011	0,56	0,61	Muito alta	289	5807	45	5497	95	
Campo Bonito	2011	0,62	0,70	Muito alta	193	6098	96	5976	98	
Pinhão 1	2012	0,64	0,71	Muito alta	188	3173	87	3045	96	
Média		0,57	0,63	Muito alta	205	4747	82	4591	97	

¹ A classe de disponibilidade de K foi definida com base no teor de K da análise de solo da camada de 0-20 cm.

Os experimentos de mesma cultura e dentro de cada classe de fertilidade foram agrupados, obtendo uma curva de resposta média para os incrementos no rendimento de grãos com as doses de K_2O em relação à testemunha (Tabela 18).

TABELA 18. Teor de K disponível (Mehlich-1) no solo, equações de ajuste do incremento no rendimento de grãos, doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) nas diferentes classes de disponibilidade.

Classe	Teor de K	Locais	Equação de regressão polinomial	r^2	Dose	Dose
	0-20 cm				MET	MEE
	cmol _c dm ⁻³				kg ha ⁻¹	
Soja						
Baixa	-	0	-	-	-	-
Média	-	0	-	-	-	-
Alta	0,34	6	$y = 0,0077x^2 - 3,0545x - 4,0706$	0,99	0	0
Muito alta	0,60	5	$y = 0,0035x^2 - 2,2853x + 0,5578$	0,99	0	0
Milho						
Baixa	-	0	-	-	-	-
Média	0,22	1	$y = 1,1552x - 0,2531$	0,82	240	0
Alta	0,33	5	$y = -0,0284x^2 + 4,8934x + 221,73$	0,60	86	65
Muito alta	0,51	4	$y = -0,035x^2 + 7,5684x + 15,788$	0,83	108	60
Trigo						
Baixa	-	0	-	-	-	-
Média	0,22	2	$y = -0,0131x^2 + 4,5604x + 9,5601$	0,87	174	59
Alta	0,29	6	$y = -0,0043x^2 + 1,9079x + 41,284$	0,77	222	31
Muito alta	0,57	4	$y = 0,5623x - 39,355$	0,34	240	0
Cevada						
Baixa	-	0	-	-	-	-
Média	0,22	2	$y = -0,0247x^2 + 6,5072x + 90,401$	0,78	133	81
Alta	0,27	5	$y = -0,0272x^2 + 7,3396x - 49,130$	0,94	135	64
Muito alta	0,57	4	$y = -0,0140x^2 + 5,0759x - 51,275$	0,91	181	37

A adubação potássica na cultura da soja pouco respondeu à aplicação de potássio, apresentando retorno econômico positivo em apenas 33 % dos experimentos na classe Alta, sendo a média das doses dos 6 locais (24 kg ha⁻¹) inferior à dose de reposição de 80 kg ha⁻¹. Em nenhum local houve resposta da soja à adubação na classe Muito alta, sendo que 80 % dos experimentos apresentaram incrementos negativos no rendimento de grãos

com a adição de potássio ao solo (Tabela 16). Deve ser destacado que o teor crítico para a cultura da soja na região foi de $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo adotado o valor de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a rotação de culturas em razão da maior exigência de potássio dos cereais de inverno. Assim, era esperada uma baixa resposta da soja na classe Alta de disponibilidade de K para a rotação de culturas e menor ainda para a classe Muito alta.

Quando considerado o incremento no rendimento de grãos de soja na média dos seis experimentos na classe Alta e dos cinco na classe Muito alta (Tabela 18), não foi observado dose de MET ou MEE favorável à adição de fertilizante potássico, sugerindo que, para estas classes de disponibilidade, se possa aplicar doses inferiores ao valor de reposição pela exportação dos grãos. Contudo, dentro da classe de disponibilidade Alta, apesar de não ser verificado incremento no rendimento de grãos e retorno econômico, dentro da visão de fertilização para a rotação de culturas, pode-se manter a dose de reposição e, conseqüentemente, os teores de K no solo em níveis adequados para as culturas mais exigentes, o trigo e a cevada.

Da mesma forma como o estabelecido na cultura da soja, a cultura do milho também tem um teor crítico inferior ao valor estabelecido para a rotação de culturas, de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Esta característica justifica a ausência de resposta ao K no experimento conduzido na classe Média, pois o teor de K neste solo era de $0,22 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Nos solos com teores de K na classe Alta, a resposta da cultura do milho à aplicação de K foi economicamente positiva em três dos cinco experimentos, sendo a dose de MEE muito semelhante à quantidade de K exportada pelos grãos. Na classe Muito alta, apesar da baixa expectativa de resposta à adubação potássica, 50 % dos experimentos responderam com a dose de MEE de $70 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$. Portanto, a aplicação apenas da dose de reposição para o milho na classe Alta é recomendada (sem os 20 % adicionais acrescidos em doses de manutenção), repondo o K extraído pela cultura e mantendo o teor na classe adequada para as culturas mais exigentes.

As culturas do trigo e cevada responderam à adubação potássica em todos os experimentos nas classes Média e Alta (Tabela 17). A dose de MEE na classe média estimada pelo incremento no rendimento de grãos foi semelhante ao proposto pela dose de correção desta classe acrescido do valor

referente à exportação de K pelos grãos para a cultura da cevada, e um pouco inferior para a cultura do trigo (Tabela 18).

Na classe de disponibilidade Alta, a cultura do trigo incrementou o rendimento de grãos em todos os seis experimentos, sendo economicamente viável a adubação em apenas dois locais. Na avaliação média dos experimentos com trigo na classe Alta, a dose de MEE para a classe foi idêntica à adubação de manutenção, equivalente à reposição (25 kg ha^{-1}) para a expectativa de $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ acrescida de 20 %. Condição diferenciada foi observada com a cultura da cevada que, dentre os seis experimentos conduzidos na classe Alta, cinco responderam favoráveis à adubação. Nesta cultura, a dose de MEE obtida pelos incrementos médios para a classe Alta ($64 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) foi superior à dose de manutenção.

A adubação potássica na classe Muito alta incrementou o rendimento de grãos de trigo em três dos quatro experimentos, sendo economicamente rentável em dois deles (Tabela 17). Entretanto, quando agrupado e analisado o retorno econômico das doses nos quatro experimentos, a aplicação de K para o trigo nessa classe não foi economicamente viável (Tabela 18). Para a cultura da cevada, todos os experimentos responderam positivamente à adição de K, o que não era esperado, visto a baixa expectativa de resposta à adubação na classe Muito alta. Contudo, a dose de MEE para a cevada nessa classe foi semelhante à dose de reposição recomendada pela expectativa de rendimento de grãos.

Para avaliar o comportamento do K no solo sem e com a adição de K para as culturas, são apresentadas na figura 14 as variações nos teores de K no solo ao longo dos anos sem a aplicação de K e com a reaplicação de $60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ a cada safra, em Guarapuava, Pinhão e Candói, bem como os valores correspondentes à exportação via grãos.

A ausência de aplicação de K durante os cinco anos resultou na redução em 50 % do teor inicial do solo em Guarapuava e em 32 % em Candói, o que esteve relacionado com a exportação de K via grãos das culturas. Esta redução não foi verificada no experimento em Pinhão, local com o maior teor inicial de K no solo.

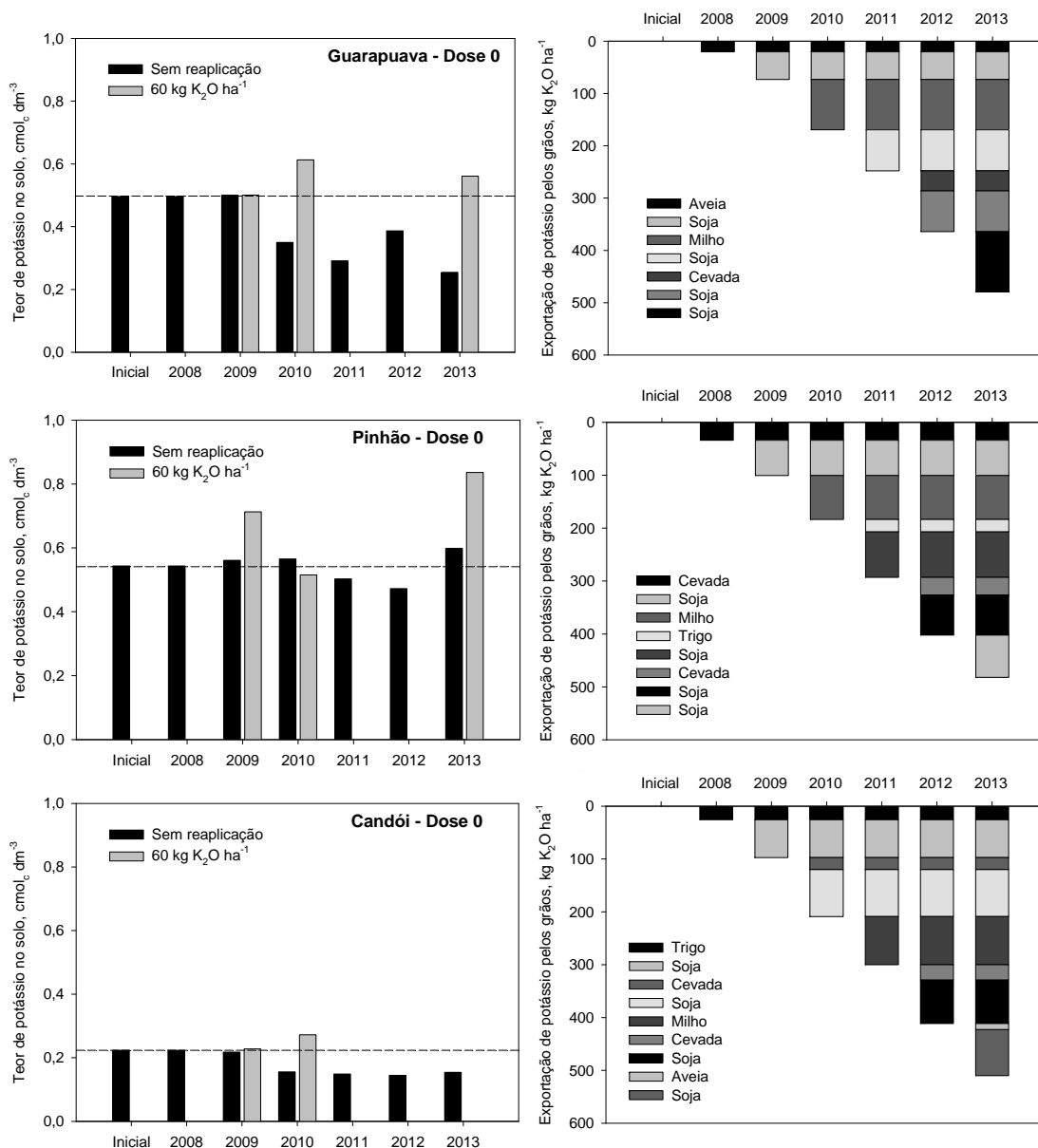


FIGURA 14. Variação nos teores de potássio no solo ao longo dos anos sem a adição de K e com a reaplicação a cada safra de 60 kg K₂O ha⁻¹; e exportação de K₂O pelos grãos nos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói.

A aplicação de 60 kg K₂O ha⁻¹ a cada safra de grãos foi suficiente para manter os teores de K no solo semelhantes ao teor inicial em Guarapuava e em Candói, uma vez que, na média dos locais, foram adicionados 480 kg K₂O ha⁻¹ via reaplicação ao longo dos cinco anos, enquanto que foram exportados 490 kg K₂O ha⁻¹. No experimento em Pinhão, a aplicação de 60 kg K₂O ha⁻¹ a cada cultivo aumentou os teores de K no solo após os cinco anos de adubação. A variação dos teores de K no solo resultante entre a ausência e a reaplicação de K reforça a eficiência da dose de reposição na manutenção dos teores de K no solo, tanto em solo com teor de K na classe de disponibilidade

Média quanto na Muito alta, em virtude da alta eficiência do sistema na ciclagem e redução de perdas deste nutriente.

A partir da análise conjunta dos resultados de solo e da resposta das plantas ao K, a recomendação de adubação potássica para as culturas em solos abaixo do teor crítico baseia-se na dose de correção de 115 kg ha⁻¹ para a classe Baixa e de 55 kg ha⁻¹ para a classe Média, acrescidas da dose de reposição de potássio pela exportação pelas culturas (Tabela 19). Para a classe Alta, sugere-se a adubação de manutenção para o trigo e a cevada e a adubação de reposição para o milho e a soja. Para a classe de disponibilidade Muito alta, recomenda-se a adubação de reposição para todas as culturas, podendo ser reduzida ou temporariamente suspensa para as culturas de verão, principalmente a soja, visto que para esta cultura, o resultado de cinco experimentos na classe Muito alta não apresentaram incremento no rendimento em nenhum caso.

TABELA 19. Dose média de K₂O recomendada para soja, milho, trigo e cevada sob sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade para os Latossolos da região Centro-Sul do Paraná.

Classe de disponibilidade	Culturas			
	Soja	Milho	Trigo	Cevada
	kg ha ⁻¹			
Baixa ¹	195	200	135	140
Média ¹	135	140	75	80
Alta ²	80	85	25	30
Muito alta ²	<80	<85	20	25
Expectativa de rendimento	4.000	14.000	3.500	4.000

¹ Doses de K₂O baseadas na adubação de correção acrescida da exportação pelos grãos. ²Doses de K₂O baseadas na análise conjunta do retorno econômico, da exportação pelos grãos e expectativa de rendimento; Para expectativa de rendimento diferente, considerar a exportação de 20, 6, 6 e 6 kg K₂O t⁻¹ de grãos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente.

As doses de K₂O estimadas para a cultura da soja são maiores que a recomendação para o estado do Paraná (Embrapa, 2011a), em todas as classes de disponibilidade. Esta variação provavelmente se deve às diferentes expectativas de rendimento entre os trabalhos, visto que a tabela 19 indica a

dose de reposição de $80 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ com base na expectativa de 4 t ha^{-1} em solos com disponibilidade de K acima de $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, enquanto que a Embrapa (2011a) recomenda a aplicação de $40 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para solos com teores de K acima de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o que corresponde ao valor de exportação equivalente ao rendimento de 2 t ha^{-1} . A diferença nas expectativas de rendimento de soja se refletem também nas doses para as classes de menor disponibilidade de K, sendo recomendado por Embrapa (2011a) a dose de $90 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para solos com teor de K abaixo de $0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de $70 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para solos com teor entre $0,10$ a $0,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Conforme destacado na discussão dos teores críticos, deve-se levar em conta que a recomendação de adubação para a cultura da soja no Paraná (Embrapa, 2011a) é baseada em resultados obtidos nas décadas de 80 e 90 (OCEPAR, 1987; Sfredo & Borkert, 1991; Embrapa, 1999), considerando solos cultivados em preparo convencional e potencial produtivo das culturas inferiores aos atuais, o que justifica as divergências entre as recomendações.

Para a cultura do milho, a “Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no estado do Paraná” (Oliveira, 2003), indica a aplicação de doses menores de K_2O que as estabelecidas na tabela 19, sendo de $60\text{-}70 \text{ kg ha}^{-1}$ para solos com teores abaixo de $0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $40\text{-}60 \text{ kg ha}^{-1}$ para solos com teores entre de $0,11$ e $0,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de $30\text{-}40 \text{ kg ha}^{-1}$ para solos com teores acima de $0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Entretanto, não é informada a expectativa de rendimento da cultura a partir dessas doses de K recomendadas.

As doses de correção total para a cultura do milho sugeridas na tabela 19 são menores que as estimadas para a mesma expectativa de 14 t ha^{-1} pela recomendação de adubação potássica dos estados do RS e SC (Sociedade..., 2004), considerando a cultura do milho em primeiro cultivo, a qual inclui o valor equivalente a $2/3$ da dose de correção. Nesses estados, sugere-se a aplicação de $210 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para solos abaixo de $0,08 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de $160\text{-}170 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para solos entre $0,08$ e $0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Entretanto, esta é uma extrapolação matemática da recomendação da Sociedade (2004), a qual é calibrada para rendimentos de 4 t ha^{-1} de milho, o que representa uma grande distinção para a calibração a campo da recomendação de adubação para rendimento de 14 t ha^{-1} de milho deste estudo.

As recomendações de adubação potássica para as culturas de trigo (Embrapa, 2011b) e cevada (Embrapa, 2013) atualmente utilizadas no estado do Paraná são idênticas e derivam da sugestão de adubação para a cultura do trigo de Oliveira (2003). Estas recomendações propõem a aplicação de 60-80 kg K₂O ha⁻¹ em solos com teor de K abaixo de 0,10 cmol_c dm⁻³ e de 40-60 kg K₂O ha⁻¹ para solos com teores de K entre 0,11 e 0,30 cmol_c dm⁻³, as quais são inferiores às obtidas neste trabalho (Tabela 19). Contudo, a recomendação de K para as culturas de trigo e cevada nos estados do RS e SC é semelhante ao proposto neste trabalho, com exceção da dose indicada para solos com teor de K abaixo de 0,12 cmol_c dm⁻³ (classe Baixa), a qual supera em 20 kg ha⁻¹ o recomendado pela Sociedade (2004).

As doses de correção total aplicadas em uma única cultura/safra propõem a elevação do teor de K no solo ao teor crítico do sistema de rotação de culturas logo no primeiro cultivo. Entretanto, as culturas de soja e milho apresentam menor exigência de K no solo em relação ao trigo e à cevada, possibilitando que a adubação potássica corretiva na classe de disponibilidade baixa seja fracionada (Tabela 20). Neste caso, divide-se a dose de correção em dois cultivos, iniciando pela cultura de verão. Considerando o teor crítico obtido para soja e milho de 0,15 cmol_c dm⁻³ e a necessidade de 10,4 kg K₂O ha⁻¹ para elevar 0,01 cmol_c dm⁻³, a aplicação de 35 kg ha⁻¹ de K₂O é suficiente para elevar o teor de K de 0,12 para 0,15 cmol_c dm⁻³. Dessa forma, para o primeiro cultivo de soja e milho em solos na classe Baixa, sugere-se a aplicação de 35 kg K₂O ha⁻¹ acrescido da dose de reposição pela expectativa de rendimento, sendo o restante aplicado no segundo cultivo para a cultura sucessora no inverno. Para a classe de disponibilidade Média, sugere-se aplicar a dose de correção (55 kg ha⁻¹) para aumentar o teor de K no solo ao teor crítico nas culturas de trigo e cevada, mantendo nos cultivos de verão apenas a dose de reposição (Tabela 20).

TABELA 20. Fracionamento da dose de correção de potássio no solo na sequência de dois cultivos, para as culturas de soja, milho, trigo e cevada sob sistema plantio direto, nos Latossolos da região Centro-Sul do Paraná.

Classe de disponibilidade	Culturas			
	Soja / Milho		Trigo / Cevada	
	kg ha ⁻¹			
	1º cultivo	2º cultivo	1º cultivo	2º cultivo
Baixa	35+R	R	115+R	80+R
Média ¹	R	R	55+R	55+R

¹ R = dose de reposição baseadas na expectativa de rendimento e no teor médio de K nos grãos exportados (considerar 20, 6, 6 e 6 kg K₂O t⁻¹ de grãos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente).

Para as classes de disponibilidade Alta e Muito alta, a expectativa de resposta da cultura ao fertilizante bem como de retorno econômico é baixa/muito baixa. Nesta condição, o manejo da adubação potássica objetiva alimentar o sistema de rotação de culturas adotado, podendo ser utilizada a filosofia da adubação do sistema, aliando as doses de reposição pela exportação via grãos à probabilidade de resposta das culturas observadas nas tabelas 16 e 17.

Conforme discutido anteriormente nas tabelas 16 e 17, a cultura da soja apresenta resposta muito baixa ao fertilizante potássico nas classes Alta e Muito alta, enquanto que o milho apresenta resposta média e os cereais de inverno mantêm um incremento no rendimento de grãos a partir do K adicionado em semeadura mesmo nas condições de disponibilidade de K no solo acima do teor crítico. Esta dinâmica diferenciada entre as culturas torna plausível a transferência de parte da dose de K recomendada na cultura da soja para o trigo e a cevada. Neste contexto, ratificado pelas doses de MEE averiguadas nos resultados dos experimentos nas tabelas 16 e 17, sugere-se na sucessão soja/trigo ou soja/cevada a aplicação de 40 kg K₂O ha⁻¹ na cultura da soja e a transferência dos outros 40 kg K₂O ha⁻¹ (referentes à exportação pelos grãos 4 t ha⁻¹) para a cultura de inverno, adicionando assim 60 kg K₂O ha⁻¹ para a cultura do trigo e 65 kg K₂O ha⁻¹ para a cultura da cevada, mantendo as expectativas de rendimento de 4 t ha⁻¹ de soja, 3,5 t ha⁻¹ de trigo e 4 t ha⁻¹ de cevada.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os teores críticos de fósforo e de potássio em solos em sistema plantio direto são maiores para as culturas de aveia branca, trigo e cevada em relação à soja e milho, bem como para a camada de amostragem 0-10 cm em relação a 0-20 cm de profundidade.

As doses de fósforo e potássio recomendadas para soja, milho, trigo e cevada em solos em sistema plantio direto de longa duração na região Centro-Sul do Paraná são superiores às atuais recomendações de adubação para o Estado.

Embora adotada a filosofia de suficiência/adubação de cultura para recomendação de adubação de fósforo em solos abaixo do teor crítico, foi possível estimar que as doses recomendadas para as culturas elevam o teor de fósforo no solo ao teor crítico após um ciclo da rotação de culturas (três anos).

A análise conjunta da filosofia de correção e manutenção de potássio no solo com o retorno econômico da adubação permite caracterizar a probabilidade de resposta de cada cultura nas classes de disponibilidade e, conseqüentemente, diferenciar as doses de recomendação de reposição para cada cultura, considerando o manejo da adubação integrado dentro do sistema de rotação de culturas.

A adubação potássica para a cultura da soja em solos com disponibilidade Alta e Muito Alta não aumenta o rendimento de grãos desta cultura, podendo apresentar retornos negativos. Nesta situação, a adubação potássica referente à reposição da exportação pelos grãos pode ser reduzida ou transferida parcialmente para a cultura de inverno.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRÁRIA. Agrária em Números. **Agrária**, Guarapuava. Disponível em: <http://www.agraria.com.br/portal/institucional_quem_agraria_numeros.php>. Acesso em: 11 abr. 2012.

AGROLINK. Cotações. **Agrolink**. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/culturas/soja/Default.aspx>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

AGROSOFT. Paraná vai estimular a retomada do sistema de plantio direto na palha. **Agrosoft**. Disponível em: <<http://agrosoft.com/pdf.php/?node=103907>>. Acesso em: 11 dez. 2009. 2009.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 963-975, 2005.

ANDRADE, F. V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1003-1011, 2003.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873-928.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 105-112, 1997.

BORKERT, C. M.; SFREDO, G. J.; SILVA, D. N. Calibração de potássio trocável para soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 223-226, 1993.

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.

BUNDY, L. G.; ANDRASKI, T. W. Starter fertilizer response on high and very high testing soils. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 85, n. 2, p. 3-5, 2001.

CAIRES, E. F. Indicadores químicos de qualidade do solo. In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO LONDRINA, 3., 2013, Londrina. **Anais...** Londrina: IAPAR-SBCS-NEPAR, 2013. p. 425-432.

CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 769-850.

CIOTTA, M. N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO. **Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 2. ed. Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 1989. 128 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Pesquisa de safras e informações geográficas da agricultura brasileira. **Revista Indicadores da Agropecuária**, Brasília, n. 12, p. 13-21, 2013.

_____. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2013/14**. Brasília: Conab, 2013. v. 1. Sétimo levantamento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_10_17_37_10_boletim_graos_abril_2014.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2014.

COSTA, S. E. V. G. A. et al. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1237-1247, 2009.

COSTA, S. E. V. G. A. et al. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, n. 1, p. 41-49, 2010.

CUBILLA, M. M. et al. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1463-1474, 2007.

DICK, D. P.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: Dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, n. 1-2, p. 49-63, 1996.

ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 259-267, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná 1999/2000**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 236 p. (Documentos, 131).

_____. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 306 p.

_____. **Indicações técnicas para produção de cevada cervejeira nas safras 2007 e 2008**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 104 p. (Sistemas de Produção, 3).

_____. **Indicações técnicas para produção de cevada cervejeira nas safras 2009 e 2010**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. 100 p. (Sistemas de Produção, 5).

_____. **Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil – 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011a. 261 p. (Sistemas de Produção, 15).

_____. **Informações Técnicas para Trigo e Triticale: Safra 2012**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2011b. 204 p. (Sistemas de Produção, 9).

_____. **Indicações Técnicas para a Produção de Cevada Cervejeira nas Safras 2013 e 2014**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2013. 105 p. (Sistemas de Produção, 7).

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 551-594.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na Região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1721-1732, 2009.

FONTOURA, S. M. V. et al. Evolução e fertilidade atual do solo da região Centro-Sul do Estado do Paraná, sob plantio direto. In: FERTBIO 2004. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26., 2004, Lages. **Anais...** Lages: UDESC, 2004.

FONTOURA, S. M. V. et al. **Camada diagnóstica e critérios de manejo da fertilidade de solos em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária - FAPA, 2011. 64 p.

GUPPY, C.N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Soil Research**, Coolingwood, v. 43, n. 2, p. 189-202, 2005.

INDA JUNIOR, A. V. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1301-1307, 2007.

INDEX MUNDI. Cloreto de potássio: Preço Mensal. **Index Mundi**. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=cloreto-de-pot%C3%A1ssio&meses=60&moeda=brl>>. Acesso em: 11 nov. 2013a.

_____. Superfosfato triplo: Preço Mensal. **Index Mundi**. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=superfosfato-triplo&meses=60&moeda=brl>>. Acesso em: 11 nov. 2013b.

INSTITUO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Núcleo Regional Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo quer estimular pesquisa no Estado. **IAPAR**, Londrina, 23 set. 2008. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/noticias/article.php?storyid=449>>. Acesso em: 12 fev. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estados - Lavoura Temporária 2010. **IBGE**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pr&tema=lavouratemporaria2010>>. Acesso em: 9 ago. 2011.

_____. Estados - Lavoura Temporária 2012. **IBGE**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pr&tema=lavouratemporaria2012>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

JOHNSTON, A. E.; SYERS, J. K. A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 93, n. 3, p. 14-16, 2009.

KUSSOW, W. R.; CORUM, K. R.; DALL'ACQUA, F. M. **Interpretação agro-econômica de ensaios de adubação**. Goiania: EMBRAPA, 1976. 49 p. (Boletim Técnico, 4).

LANTMANN, A. F. et al. **Adubação fosfatada e potássica para sucessão soja-trigo em latossolo roxo distrófico sob semeadura direta**. Londrina: Embrapa Soja, 1996. 44 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 15).

LEIKAM, D. F.; LAMOND, R. E.; MENGEL, D. B. Providing flexibility in phosphorus and potassium fertilizer recommendations. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 87, n. 3, p. 6-10, 2003.

MALLARINO, A. P. Long term phosphorus studies and how they effect recommendation philosophies. In: NORTH CENTRAL EXTENSION-INDUSTRY SOIL FERTILITY CONF., 39., 2009, Des Moines. **Proceedings...** Des Moines: International Plant Nutrition Inst., 2009. p. 5-12.

MCCOLLUM, R. E. Buildup and decline in soil phosphorus: 30-year trends on a Typic Umbraquult. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 77-85, 1991.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Ed.). **Potássio na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 165-178.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Plantio direto ocupa 70% das áreas de lavoura de grãos. **MAPA**, Brasília. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2009.

MUZILLI, O.; LANTMANN, A. F. **Calagem e adubação para a cultura de trigo no Estado do Paraná com base na análise de solos**. Londrina: IAPAR, 1978. 25 p. (Circular, 2).

OLIVEIRA, E. L. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná** Londrina: IAPAR, 2003. 30 p. (Circular, 128).

ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS DO PARANÁ. **Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná - 1987/88**. Cascavel: Embrapa Soja, 1987. 76 p. (Boletim Técnico, 21).

PAULETTI, V. et al. Atributos químicos de um latossolo bruno sob sistema plantio direto em função da estratégia de adubação e do método de amostragem de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 581-590, 2009.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute 2011. 420 p.

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

RIBEIRO, A. C. et al. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p. (5ª Aproximação).

ROSSATO, R. R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo em plantio direto**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 201-222.

SAWYER, J. E. et al. **A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa**. Ames: Iowa State University. University Extension, 2011. 20 p. (PM 1688).

SCHERER, E. E. Níveis críticos de potássio para a soja em Latossolo húmico de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 57-62, 1998.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos 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. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendação de fertilizantes para as culturas cultivadas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 79, p. 12-15, 2004.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2037-2049, 2008.

SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1669-1678, 2011.

SCHLINDWEIN, J. A. et al. Phosphorus and potassium fertilization in no till southern Brazilian soils. **Agricultural Sciences**, v. 4, n. 12, p. 39-19, 2013.

SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M. **Soja**: adubação e calagem no Brasil. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1991. 30 p. (Documentos, 48).

SILVA, J. R. T.; MEURER, E. J. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 137-142, 1988.

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 Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

SOUSA, D. M. G.; VOLKWEISS, S. J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 2, p. 141-146, 1987.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Correção do solo e adubação da cultura da soja**. Planaltina: Embrapa CPAC, 1996. 30 p. (Embrapa CPAC. Circular Técnica, 33).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: Correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information.** Roma: FAO, 2008. 108 p. (FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 18).

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 111-118, 2003.

VIEIRA, R. C. B. **Camada diagnóstica, critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em solos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná.** 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VILLALBA, E. O. H. **Recomendação de nitrogênio, fósforo e potássio para girassol sob sistema plantio direto no Paraguai.** 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

VITOSH, M. L.; JOHNSON, J. W.; MENGEL, D. B. **Tri-State fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat, and alfalfa:** Michigan State University, The Ohio State University, Purdue University, 1995. 24 p. (Extension Bulletin E-2567).

WENDLING, A. et al. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1929-1939, 2008.