

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO POTÁSSICA PARA TRIGO, MILHO E SOJA SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO NO PARAGUAI⁽¹⁾

Ademir Wendling⁽²⁾, Flávio Luiz Foletto Eltz⁽³⁾, Martin Maria
Cubilla⁽⁴⁾, Telmo Jorge Carneiro Amado⁽⁵⁾ & João Mielniczuk⁽⁶⁾

RESUMO

A ferramenta mais utilizada para se recomendar adubação é a análise de solo. Com ela é possível avaliar o estado de fertilidade do solo e determinar a quantidade de nutrientes necessária para o adequado crescimento e desenvolvimento das plantas. Para que isso seja possível, é necessário ter tabelas de interpretação e recomendação elaboradas a partir de experimentos realizados em campo. Um sistema de recomendação de adubação normalmente visa suprir a demanda das culturas e elevar os teores no solo ao nível de suficiência. Com o objetivo de obter informações para elaboração de uma tabela de interpretação de teores no solo e recomendação de adubação potássica para solos cultivados em plantio direto, foram realizados sete experimentos em rede em quatro Departamentos do Paraguai: dois no departamento de Misiones, dois no Departamento de Itapúa, dois no Departamento de Alto Paraná e um no Departamento de Amanbay. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com três repetições. Os tratamentos consistiram de cinco doses de K_2O (0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹) aplicadas em superfície antes da semeadura das culturas. As adubações de N e P foram constantes e satisfatórias para atender as necessidades das culturas, utilizando-se a dose de 100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 para trigo, milho e soja, 60 kg ha⁻¹ de N para o trigo e 180 kg ha⁻¹ de N para o milho. Foram determinados o teor de K no solo pelo método Mehlich-1 após cada cultura, e o rendimento de grãos de trigo, milho e soja. Foi calculado o

⁽¹⁾ Parte da tese de Mestrado do primeiro autor. Financiada pela Câmara Paraguaia de Exportadores de Cereais e Oleaginosas – CAPECO. Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em julho de 2008.

⁽²⁾ Mestre em Ciência do Solo, BASE Precisão na Agricultura. Av. Roraima 03, Caixa Postal 5053, CEP 97110-970 Santa Maria (RS). E-mail: ademir@baseap.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Av. Roraima 1000, CEP 97105-9000 Santa Maria (RS). E-mail: feltz@ccr.ufsm.br

⁽⁴⁾ Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. E-mail: martincubilla@hotmail.com

⁽⁵⁾ Professor Associado do Departamento de Solos, UFSM. Bolsista do CNPq. E-mail: tamado@smail.ufsm.br

⁽⁶⁾ Professor Colaborador da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, Caixa Postal 15100, CEP 91501-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: joaomiel@terra.com.br

rendimento relativo para cada experimento e cultura, e utilizou-se a equação de Mitscherlich para descrever a relação entre os teores de K no solo e os valores de rendimento relativo (curva de calibração). O teor crítico médio para as três culturas, definido como o valor do nutriente no solo para a probabilidade de resposta de aproximadamente 90 % do rendimento máximo, foi de 75 mg dm^{-3} . Foi necessário aplicar 5 kg ha^{-1} de K_2O para elevar em 1 mg dm^{-3} o teor de K no solo. Em teores no solo acima de 150 mg dm^{-3} , as plantas apresentaram baixa resposta à aplicação de fertilizantes potássicos.

Termos de indexação: calibração Mehlich-1, teor crítico de K, classes de fertilidade, recomendação de K, plantio direto.

SUMMARY: *RECOMMENDATION OF POTASSIUM FERTILIZATION FOR NO-TILL WHEAT, CORN AND SOYBEAN IN PARAGUAY*

Soil test is the most widely used tool to determine the soil fertility status and fertilizer demand for crop production. Tables of soil analysis interpretations and fertilizer recommendation based on field experiments are required for this purpose. A recommendation system normally aims at supplying crop requirements and improving soil fertility levels to a sufficient degree. To obtain information for building K interpretation and recommendation tables, seven experiments were carried out with wheat, corn and soybean in four Paraguayan Departments: two in Misiones, two in Itapua, two in Alto Paraná and one in the Department of Amanbay. The experimental design was random blocks with three replications. Treatments consisted of five K_2O levels (0, 25, 50, 75, and 100 kg ha^{-1}) broadcast on the soil surface before sowing. N and P were fertilized at constant and satisfactory rates to supply crop requirements. For wheat, corn and soybean 100 kg ha^{-1} P_2O_5 was applied; for wheat 60 kg ha^{-1} N and for corn 180 kg ha^{-1} N. Exchangeable potassium was determined in the soil by the Mehlich-1 method as well as the wheat, corn and soybean grain yield. The relative yield for each crop and site was calculated. The Mitscherlich equation was used to establish a calibration curve that describes soil K values determined by the Mehlich-1 method and the relative yield. The critical level was defined as the soil nutrient level sufficient to reach 90 % of maximum yield. The average critical K level in the soil determined by Mehlich-1 for wheat, corn and soybean under no-tillage system in Paraguay was 75 mg dm^{-3} . To increase the K level by one mg dm^{-3} in the soil, 5 kg ha^{-1} K_2O is needed. In soils with K content above 150 mg dm^{-3} the plant response to potassium fertilization was low.

Index terms: Mehlich-1 calibration, K critical level, fertility classes, K recommendation, no-till sowing.

INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios modernos da fertilidade do solo é fornecer quantidades suficientes de nutrientes para que as culturas possam expressar seu potencial de produtividade, sendo ao mesmo tempo economicamente viável e ambientalmente seguro. A ferramenta mais utilizada para determinar a quantidade necessária de fertilizantes para as culturas é a análise do solo. Contudo, a análise de solo é eficiente somente se apoiada em um programa de calibração dos valores obtidos pelo método analítico com o rendimento das culturas (Schlindwein, 2003). Para isso, as análises deverão ser feitas segundo métodos utilizados na calibração.

A calibração de um método de análise de solo consiste em relacionar o teor determinado no solo com medidas de resposta das plantas, geralmente rendimento e quantidades absorvidas. A partir disso, são elaboradas tabelas de interpretação e recomendação de fertilizantes. A recomendação de adubação considera a máxima eficiência econômica, assim como a quantidade do nutriente necessária para atingir níveis de suficiência no solo, determinados pelos experimentos de calibração. Pode-se utilizar um método de análise para a determinação do teor do nutriente no solo se o método utilizado apresentar correlação entre o resultado analítico e a resposta das culturas (Raij, 1981).

Uma 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.

Os principais cultivos comerciais de grãos no Paraguai são a soja e o milho no verão e o trigo no inverno. Atualmente, o sistema de cultivo mais comum é o sistema plantio direto (SPD). O país tem o maior índice de adoção desse sistema na América do Sul.

O Paraguai, um país com uma história de agricultura recente, tem uma recomendação feita na década de 90 (Fatecha, 1999), que visa somente à adubação da cultura e foi feita no sistema convencional de preparo do solo. Outras recomendações utilizadas naquele país são de diferentes locais do Brasil, como do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais, bem como da Argentina. Essas não foram testadas e calibradas para as condições do Paraguai, restando questionamentos sobre sua adequação. O K se encontra na fase sólida do solo (95 %), em equilíbrio com a fase líquida. Entretanto, a grande parte do K absorvido pelas culturas retorna à superfície do solo juntamente com os resíduos culturais, tornando-se novamente disponível para as próximas culturas, concentrando-se na superfície do solo (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000). O revolvimento do solo somente na linha de plantio e a adição de resíduos das culturas promovem um fluxo contínuo de C no solo no SPD, proporcionando um aumento da atividade biológica, com aumento do teor de matéria orgânica, ciclagem e armazenamento de nutrientes (Schlindwein & Anghinoni, 2000) e aumento da capacidade produtiva do solo. As características do manejo dos solos e das culturas no SPD proporcionam alterações no perfil do solo em comparação ao sistema convencional, influenciando na dinâmica e na disponibilidade dos nutrientes (Eltz et al., 1989) e, por consequência, no manejo da fertilidade do solo. No plantio direto, a aplicação de fertilizantes potássicos ocorre na linha de semeadura e, em solos com teores acima do teor crítico, pode ser realizada a lanço, com resultados semelhantes àqueles com a aplicação na linha (Wiethölter et al., 1998; Ceretta & Pavinato, 2003).

O objetivo deste trabalho foi obter informações para elaborar uma recomendação de adubação potássica para o trigo, soja e milho sob SPD no Paraguai.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada uma rede de sete experimentos em quatro departamentos do Paraguai, sendo dois no Departamento de Misiones (M1 e M2), dois no Departamento de Itapúa (I1 e I2), dois no Departamento de Alto Paraná (AP1 e AP2) e um no Departamento de Amanbay (PJC1). Os experimentos contemplam duas seqüências de culturas (trigo-soja-trigo e trigo-milho-trigo) iniciadas em 2003. A safra do trigo de 2003 foi conduzida somente no M1 e I1, a

safrinha do milho (2003/2004) foi conduzida em todos os locais à exceção do AP1, a da soja (2003/2004) em todos os locais e a do trigo em 2004, em todos os locais com exceção de M2 e PJC1 após a soja e M2, AP1 e PJC1 após o milho.

Utilizou-se a Classificação Americana de Solos, que é a adotada no Paraguai e também a correspondente brasileira (Quadro 1). A região tem precipitação pluviométrica média de 1802,3 mm, com a maior parte ocorrendo na primavera/verão e a menor parte no outono/inverno. A temperatura média anual é de 23,8 °C, podendo ocorrer veranicos.

O experimento M1 foi realizado sobre uma área cultivada há aproximadamente seis anos sob plantio direto, com algumas retiradas de resíduos das culturas para silagem para alimentação animal. O experimento M2 foi implantado sobre uma área de pastagem de braquiária, que foi dessecada para iniciar a produção de grãos. Havia alta quantidade de palha sobre a superfície, impossibilitando a semeadura do trigo no inverno de 2003, por isso a primeira safra foi a do verão de 2003/04 com o milho e a soja. O experimento de I1 foi implantado numa área sob plantio direto há mais de 15 anos com alto aporte anual de matéria seca (produções de soja em torno de 3.200 kg ha⁻¹ e milho com mais de 6.000 kg ha⁻¹). O experimento I2 foi realizado sob uma área em pousio invernal com baixa quantidade de palha sobre a superfície. Essa área foi muito degradada (apresenta vestígios de erosão) quando estava sob sistema convencional de cultivo e passou ao SPD há seis anos. O experimento AP1 foi realizado em área sob condução no SPD com alta adição de resíduos de cultura (experimentos de adubos verdes foram realizados na área). O experimento AP2 foi realizado em área cultivada sob SPD, que vinha sendo cultivada por arrendatário que usava baixas doses de fertilizantes (20 kg ha⁻¹ de K₂O). O experimento PJC1 foi realizado em área desmatada recentemente e estava sob grama missioneira e pastejo para bovinos. No ano de 2002, a área foi dessecada, iniciando-se a produção de grãos.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, com três repetições. As dimensões das parcelas experimentais foram de 5 x 8 m. Os tratamentos consistiram de cinco doses de K₂O (0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹), com as aplicações sendo efetuadas em superfície antes da semeadura das culturas. As doses foram aplicadas safra após safra na mesma quantidade, nas mesmas parcelas. Os experimentos M1 e I1 foram iniciados com trigo em 2003, e as doses foram aplicadas três vezes: a primeira antes do trigo de 2003, a segunda antes do milho ou soja de 2003/04 e a terceira antes do trigo de 2004. O experimento M2 recebeu adubação em 2003, porém o trigo não foi semeado. Os tratamentos com 100 kg ha⁻¹ só foram implantados após a primeira safra de trigo nesses experimentos (M1, M2 e I1) e nos iniciados com milho e soja em

Quadro 1. Classificação de solo, localização geográfica dos experimentos, seqüência de cultivos, teor de argila e areia, características químicas na camada 0–10 cm e histórico de manejo nos locais antes da instalação dos experimentos

Local	Classificação dos solos		Lat. Sul	Long. Oeste	Seqüência de cultivos				Argila e areia	pH	CTC	MO	P	K	Histórico de manejo
	Brasileira	Americana			2002/03	2003	2003/04	2004							
									g kg ⁻¹	cmol, dm ³	%	·	mg dm ⁻³ .		
M1	Argissolo	Ultisol	26°59' 55"	56°45' 01"	Soja	Trigo	Milho Soja	Trigo	250 e 210	5,2	14,7	2,5	11,9	47	PD estabelecido Retiradas de silagem
M2	Argissolo	Ultisol	26°59' 55"	56°45' 01"	Pastagem		Milho Soja	Trigo	250 e 270	5,1	10,5	2,7	4,3	126	PD estabelecido Retiradas de silagem
I1	Latossolo	Oxisol	26°56' 07"	55°38' 03"	Soja	Trigo	Milho Soja	Trigo	475 e 100	5,6	14,9	3,0	12,7	206	PD estabelecido Alta adição de palha
I2	Argissolo	Ultisol	27°08' 54"	56°03' 46"	Soja	Trigo	Milho Soja	Trigo	355 e 170	6,2	13,2	2,5	3,5	195	PD semcobertura Pousio invernal.
AP1	Latossolo	Oxisol	25°27' 23"	55°02' 49"	Soja	Trigo	Milho Soja	Trigo	395 e 130	5,3	13,7	2,9	7,6	203	PD estabelecido Alta adição de palha
AP2	Latossolo	Alfisol	25°58' 07"	55°12' 48"	Soja	Aveia	Milho Soja	Trigo	470 e 90	6,5	18,7	4,2	7,9	359	PD estabelecido Alta adição de palha
PJC	Latossolo	Alfisol	22°39' 17"	55°53' 36"	Milho	Pousio	Milho Soja	Trigo	569 e 70	6,7	19,8	4,4	5,2	256	PD em fase inicial Floresta com alguns anos de pastagem

M1: Misiones 1; I1: Itapúa 1; I2: Itapúa 2, AP1: Alto Paraná1; AP2: Alto Paraná2; PJC1: Pedro Juan Caballero.

2003/04 (I2, AP1, AP2 e PJC1), sendo, portanto, as cinco doses aplicadas duas vezes, a primeira antes do milho e da soja da safra de 2003/4 e a segunda antes do trigo de 2004.

Todos os experimentos foram conduzidos em sistema plantio direto. As sementes foram efetuadas nas épocas recomendadas, objetivando atingir os máximos rendimentos das culturas. O trigo foi semeado em meados de maio de 2003 e 2004, e as culturas do milho e da soja foram semeadas na primeira semana de novembro de 2003. As adubações de N e P foram mantidas constantes e suficientes para atender as necessidades das culturas, utilizando-se a dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para as culturas de trigo, milho e soja, 60 kg ha⁻¹ de N para o trigo e 180 kg ha⁻¹ de N para o milho, sendo 15 e 30 kg ha⁻¹ na semeadura, respectivamente, e o restante em cobertura. As fontes utilizadas foram o superfosfato triplo (41 % de P₂O₅) e a uréia (44 % de N). A fonte de K utilizada foi o cloreto de K (58 % de K₂O). As aplicações de P, K e N no trigo foram feitas a lanço em cada tratamento. A aplicação de N em cobertura do milho foi efetuada na linha com o auxílio de uma adubadora manual, regulada para aplicação de 150 kg ha⁻¹.

Foram determinadas as produtividades de cada parcela nas áreas úteis de 2 m² para trigo, milho e soja, corrigida para 13 % de umidade no grão e expressa em kg ha⁻¹.

As coletas de amostras de solos foram efetuadas com trado calador após a colheita das culturas, retirando-se, em todos os tratamentos, dez

subamostras de 0 a 10 cm de profundidade, aleatoriamente distribuídas nas parcelas, para compor uma amostra representativa. As análises foram feitas segundo o método descrito por Tedesco et al. (1995).

Foram ajustadas equações polinomiais para representar a resposta das culturas às doses aplicadas. Escolheu-se a equação que melhor se ajustou aos dados e à resposta biológica das plantas à aplicação de nutrientes.

O rendimento relativo das culturas foi obtido pela relação:

$$RR = ("a" * 100) / MET \quad (1)$$

em que RR é o rendimento relativo; "a" é a produtividade estimada de grãos da cultura sem o fertilizante testado; e MET (máxima eficiência técnica) é o valor da produtividade máxima da cultura nas condições do experimento, obtido na dose de máxima eficiência técnica (DMET). No caso das equações lineares positivas ou das quadráticas, foi utilizado o valor estimado pela equação de regressão na dose máxima utilizada. No caso de resposta negativa, o rendimento máximo foi o correspondente a dose zero do fertilizante testado (coeficiente "a" da equação de regressão linear negativa). Quando se ajustou a equação quadrática, estimou-se a dose da MET dentro do intervalo das doses de adubo utilizadas e derivou-se a função para a obtenção do valor de rendimento máximo a ser empregado na equação 1.

A curva de calibração foi obtida pela relação entre os teores de K no solo, determinados pelo método Mehlich-1, e o rendimento relativo, calculado pela equação (1). A equação selecionada (2) é a forma exponencial da equação de Mitscherlich que melhor se ajustou aos dados experimentais. A equação foi utilizada de modo a alcançar o rendimento relativo de 100 %:

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

em que y representa o rendimento relativo, A representa a produtividade máxima, b é o coeficiente de eficácia do nutriente, e x é o teor de K no solo em mg dm⁻³.

O teor crítico foi definido como o teor do nutriente no solo correspondente a 90 % do rendimento máximo, de acordo com a definição adotada nos Programas de Adubação no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina (Mielniczuk et al., 1969; UFRGS, 1973; Tabelas..., 1976; FECOTRIGO, 1981; Siqueira et al., 1987; CFSRS/SC, 1989, 1995; CQFSRS/SC, 2004; Schindwein, 2003).

O intervalo abaixo do teor crítico foi dividido em relação à fertilidade, denominado “muito baixo”, ou “baixo” ou “médio”; e acima do teor crítico, o intervalo foi multiplicado por dois, obtendo-se o limite entre as duas classes, denominado “alto” ou “muito alto”.

Foram calculadas doses de fertilizantes de K₂O para a correção do teor de K no solo, doses necessárias para a manutenção do K no solo acima do teor crítico e doses de reposição. As doses de correção foram calculadas para atingir valores acima do teor crítico em três cultivos.

Para a estimativa do efeito da aplicação do fertilizante potássico sobre o K do solo, elaboraram-se as equações de resposta do solo às aplicações de K, em que foi utilizada a quantidade acumulada de K aplicado e os respectivos teores encontrados no solo. Dessa forma, foi obtido o coeficiente “b” das equações lineares, que corresponde ao aumento de K no solo em mg dm⁻³ para cada kg ha⁻¹ de K₂O aplicado.

A quantificação da dose de K₂O a ser recomendada para as faixas de fertilidade (muito baixa, baixa e média) foi obtida multiplicando-se a quantidade necessária para elevar o teor em 1 mg dm⁻³ (coeficiente ‘b’) no solo pela diferença entre o valor do teor crítico e o valor central da faixa de fertilidade em estudo. A quantidade de K obtida foi dividida para três cultivos, com aplicação aproximada de 50 % no primeiro, 30 % no segundo e 20 % no terceiro cultivo.

As doses de manutenção foram obtidas a partir da exportação de nutrientes (baseado em CQFSRS/SC, 2004) para cada cultura, acrescidas de 25 % para garantir a manutenção do teor no solo, suprimindo eventuais perdas no sistema (CQFSRS/SC, 2004).

As doses de reposição são iguais às quantidades exportadas pelos grãos de cada cultura sem o fator de correção de 25 %. No caso de teores muito altos no solo, a aplicação de K₂O é opcional por duas a três safras, até uma próxima análise de solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produtividade das culturas em função das doses de potássio

Devido aos altos teores de K encontrados em cinco dos sete experimentos conduzidos no período, as respostas do trigo, milho e soja foram muito baixas ou não existiram na maioria dos locais e safras (Quadro 2). Apenas o experimento M1, do Departamento de Missões, apresentou resposta consistente à aplicação de K, com rendimento relativo no testemunha, de 74 e 56 % no trigo após soja e após milho, respectivamente, em 2004, e 81 e 89 % no milho e na soja respectivamente na safra 2003/2004. O solo do local é arenoso e foi submetido a cultivos para silagem, que normalmente exportam grande quantidade de K, refletindo-se no teor baixo de K no solo, 47 mg dm⁻³ (Quadro 1).

Na safra de trigo de 2003 (Quadro 2), pode-se observar uma grande diferença nas produtividades dos dois experimentos (M1 e I1), com baixa resposta à aplicação de K em ambos. A menor produtividade em M1 provavelmente deve-se à deficiência hídrica ocorrida durante o desenvolvimento da cultura.

Na safra de trigo de 2004, no experimento M1 (Quadro 2), a cultura do trigo respondeu mais à aplicação de K em relação a 2003. Nessa safra, ocorreu melhor disponibilidade hídrica e já havia uma quantidade residual de K aplicado na cultura do trigo em 2003 e no milho e na soja de 2003/04, o que provavelmente tenha contribuído para a resposta do trigo. O rendimento relativo do trigo após a soja na dose testemunha foi de 73,9 %, e a produtividade máxima estimada pelo ajuste de uma equação quadrática foi estimada em 2.322 kg ha⁻¹, com a aplicação de 97 kg ha⁻¹ de K₂O (Quadro 2). Este valor está de acordo com CQFSRS/SC (2004), que prevê rendimento relativo de 75 % para teores de K entre 40 e 60 mg dm⁻³ com capacidade de troca de cátions (CTC) de 5 a 15 cmol_c dm⁻³. A produção após o milho atingiu 2.400 kg ha⁻¹, com dose de 100 kg ha⁻¹ de K₂O, e um rendimento relativo de 56 %. Este resultado também está coerente com CQFSRS/SC (2004), que prevê rendimentos relativos de 40 a 50 % para teores de K entre 20 e 40 mg dm⁻³ com CTC entre 5 e 15 cmol_c dm⁻³. Neste local, verificou-se a menor disponibilidade no solo após o milho, o que provocou menor RR na parcela testemunha (Quadro 2).

A cultura do trigo no experimento M1 não apresentou resposta à aplicação de K (Figura 2), mostrando o alto potencial que o solo apresenta em fornecer quantidades suficientes de K para as culturas mesmo após duas ou mais safras consecutivas sem aplicação do elemento. No experimento I2, o comportamento foi igual ao I1, ou seja, o trigo não respondeu às doses de K, caracterizando a alta capacidade de suprimento do nutriente nos solos da região de Itapúa. No experimento AP1, AP2 e PJC1,

Quadro 2. Local do experimento, safra de condução, dose de máxima eficiência técnica (MET), produtividade máxima, K extraível por Mehlich-1 e rendimento relativo do trigo, milho e soja em função das doses de K₂O aplicadas sob sistema plantio direto

Local	Cultura anterior	Equação de produtividade	CV	Sig.	MET		K no solo	RR ⁽¹⁾
					K ₂ O	Prod.		
					— kg ha ⁻¹ —		mg dm ⁻³	%
Trigo safra 2003								
M1	Soja	$\hat{y} = 1695 + 5,16K - 0,0523K^2$	19,9	NS	49	1.822	47	93,0
I1	Soja	$\hat{y} = 3862 + 16,62K - 0,204K^2$	6,5	o	41	4.200	200	92,0
Trigo safra 2004								
M1	Soja	$\hat{y} = 1717 + 12,42K - 0,0637K^2$	21,9	NS	97	2.322	49	73,9
I1	Soja	$\hat{y} = 2503 + 3,34K - 0,0762K^2$	20,6	NS	22	2.540	283	98,5
I2	Soja	$\hat{y} = 2648 + 1,69K - 0,0011K^2$	6,9	NS	72	2.708	183	97,8
AP1	Soja	$\hat{y} = 2683 + 7,50K - 0,1031K^2$	9,5	NS	36	2.819	200	95,2
AP2	Soja	$\hat{y} = 2729 + 9,23K - 0,0826K^2$	9,3	NS	56	1.987	364	91,4
Média						2.475		91,4
M1	Milho	$\hat{y} = 1344 + 10,56K$	13,0	**	100	2.400	37	56,0
I1	Milho	$\hat{y} = 2391 - 1,65K$	5,2	o	0	2.391	245	100
I2	Milho	$\hat{y} = 2815 - 3,41K$	9,4	o	0	2.815	182	100
AP2	Milho	$\hat{y} = 2642 - 2,36K$	14,2	NS	0	2.642	336	100
Média						2.562		89,0
Média geral trigo 2004						2.518		90,2
Milho safra 2003/04								
M1	Trigo	$\hat{y} = 3676 + 11,73K - 0,029K^2$	9,6	NS	100	4.559	50	80,6
M2	Pastagem	$\hat{y} = 3878 + 25,96K - 0,1828K^2$	20,6	NS	71	4.804	130	80,7
I1	Trigo	$\hat{y} = 5518 - 3,76K$	11,4	NS	100	5.894	179	93,6
I2	Pousio	$\hat{y} = 3226 + 0,88K - 0,0301K^2$	19,0	NS	14	3.232	185	99,8
AP2	Trigo	$\hat{y} = 8213 + 9,65K - 0,0405K^2$	7,9	NS	100	8.773	200	93,6
PJC	Pousio	$\hat{y} = 5443 + 8,97K - 0,0847K^2$	16,7	NS	53	5.680	263	95,8
Média do milho						5.490		90,7
Soja safra 2003/04								
M1	Trigo	$\hat{y} = 2078 + 9,65K - 0,0934K^2$	13,4	NS	52	2.327	50	89,3
M2	Pastagem	$\hat{y} = 2513 + 3,65K - 0,0352K^2$	14,7	NS	52	2.608	130	96,3
I1	Trigo	$\hat{y} = 2554 + 4,67K - 0,0207K^2$	7,2	NS	100	2.814	245	90,8
I2	Pousio	$\hat{y} = 980 - 0,48K$	13,5	NS	0	980	183	100
AP1	Aveia	$\hat{y} = 3925 - 0,48K$	6,8	NS	0	3.925	200	100
AP2	Trigo	$\hat{y} = 3715 + 7,62K - 0,0722K^2$	3,7	NS	53	2.916	364	93,1
PJC	Pousio	$\hat{y} = 3067 - 4,42K$	19,5	NS	0	3.067	231	100
Média da soja						2.662		95,6
Média geral das três culturas								92,2

⁽¹⁾ rendimento relativo. **: significativo a 1%. °: significativo a 10%. NS: não significativo. CV: coeficiente de variação.

locais com teores muito altos de K no solo, não ocorreu resposta do trigo às doses de K após o milho e após a soja (Quadro 2).

A produtividade máxima na média dos experimentos com trigo após a soja chegou a 2.475 kg ha⁻¹, sendo o rendimento relativo de 91,4 %. Após o milho, a produtividade atingida foi um pouco maior, alcançando 2.562 kg ha⁻¹ e o RR médio em torno de 89 %.

O milho no experimento M1 apresentou resposta positiva à aplicação de K, tendo aumentado a produtividade em até 880 kg ha⁻¹. Com base em uma equação quadrática ajustada, obteve-se o rendimento de 4.559 kg ha⁻¹ com a dose de 100 kg ha⁻¹, sem, no entanto, atingir o rendimento máximo. Conforme definido na metodologia, utilizou-se este valor para o cálculo do rendimento relativo (RR). No experimento M2, a resposta foi positiva e o rendimento máximo

Schlindwein (2003), na calibração dos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e Resina, encontrou um teor crítico de K no solo de 125 mg dm⁻³, semelhante para todos os métodos testados.

Determinação das classes de fertilidade no solo

Neste estudo, considerou-se o teor crítico no solo de 75 mg dm⁻³, correspondente a 90 % do RR obtido pela equação de Mitscherlich (Figura 1), que representa o limite superior da classe “médio”. O intervalo entre 0 e 75 mg dm⁻³ foi dividido em três classes equidistantes, chamadas “muito baixo” (MB), “baixo” (B) e “médio” (M), e o limite superior (75 mg dm⁻³) foi multiplicado por dois para obter o limite entre as classes “alto” (A) e “muito alto” (MA) (Quadro 3).

Acima do teor crítico, a probabilidade de resposta das plantas é muito baixa ou nula, enquanto abaixo, ela aumenta à medida que o teor no solo se afasta do teor crítico. Neste contexto, o limite inferior da classe “alto” coincide com o teor crítico, onde se obtêm rendimentos próximos da máxima eficiência econômica das culturas. O teor “muito alto” corresponde a teores acima do dobro do teor crítico, apresentando alta reserva do nutriente para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O teor mais adequado para as culturas e suas produtividades encontra-se na classe “alto”. Quando esta classe é atingida, a adubação corresponde à de manutenção, devendo ser o suficiente para repor as quantidades exportadas (grãos, matéria seca, etc.), mais determinado valor para eventuais perdas do sistema (erosão, lixiviação, etc.). Quando o teor no solo está muito alto, as adubações podem ser somente de arranque, ou dispensadas em algumas situações de expectativas de preços baixos, ou então investidas em outros nutrientes que possam estar prejudicando o rendimento das culturas. Quando os teores no solo se encontram “médios”, “baixos” ou “muito baixos”, a dose deve suprir as necessidades das culturas mais uma porcentagem para atingir o teor crítico no solo, alcançando o teor ideal para o crescimento e desenvolvimento das culturas, que ocorre com K “alto” no solo.

Adubação de correção

Adubação de correção deve ser realizada quando o teor determinado pelo Mehlich-1 for inferior a 75 mg dm⁻³, sendo seu objetivo atingir este valor no solo e suprir as necessidades das culturas.

Para o cálculo da adubação corretiva, será utilizado o experimento M1, que apresentou resposta à adubação potássica, especialmente na cultura do trigo. As relações entre as doses de K₂O aplicadas e o teor de K no solo encontram-se representadas nas figuras 2 e 3, para os sistemas de culturas trigo/milho/trigo e trigo/soja/trigo, respectivamente.

Observando o fator “b” das equações, que relacionam o K₂O adicionado e o K extraído pelo método Mehlich-1 nas diferentes épocas de avaliação, percebe-se que o trigo em sucessão ao milho (Figura 2) apresenta valor semelhante nas três épocas de avaliação, ou seja, em torno de 0,24. A partir deste valor, pode-se determinar a quantidade necessária

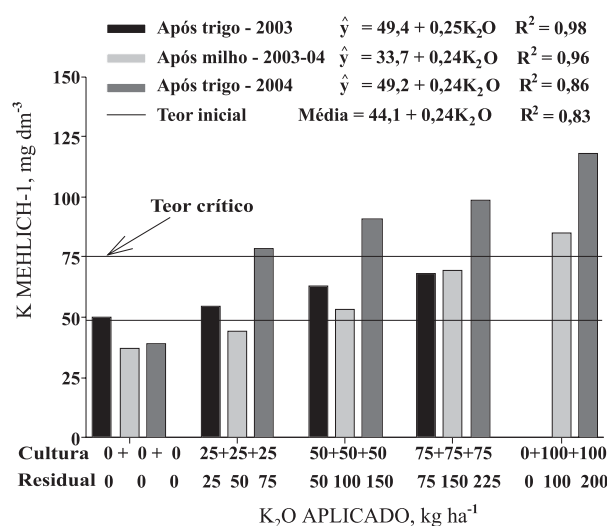


Figura 2. Teor de K extraído por Mehlich-1 em três épocas, e equações de resposta do solo à aplicação de K na sucessão trigo/milho/trigo no experimento M1

Quadro 3. Classes de disponibilidade de K para as culturas, teor de K extraível por Mehlich-1 em cada classe, rendimento relativo esperado e probabilidade de resposta (RR) das culturas à aplicação de fertilizantes potássicos

Classe	K Mehlich-1 mg dm ⁻³	RR	Probabilidade de resposta
Muito baixo	Até 25	Menor 55 %	Alta
Baixo	26– 50	56– 80 %	Média
Médio	51– 75	81– 90 %	Baixa
Alto	76–150	90–100 %	Muito baixa
Muito alto	Maior que 150	100 %	Inexistente ou casual

para elevar um mg dm⁻³ de K no solo, sendo, nesse caso, necessários aproximadamente 4 kg ha⁻¹ de K₂O para elevar em um mg dm⁻³ o teor no solo. Em sucessão com a soja (Figura 3), este valor é um pouco menor, apresentando uma média de 0,16, sendo necessários aproximadamente 6 kg ha⁻¹ de K₂O para elevar um mg dm⁻³ no solo. Para a confirmação desses valores, é necessário conduzir experimentos por um período maior, acompanhando o comportamento do K no solo, e considerar os valores de exportação.

A partir da média desses valores (5 kg ha⁻¹ de K₂O), para elevar 1 mg dm⁻³ o teor de K no solo, são determinadas as quantidades necessárias para fazer a correção das deficiências de K no local.

Para a aplicação de doses altas de K, deve-se levar em consideração o tipo de solo, pois em algumas situações poder-se-á estar aplicando sem necessidade e a quantidade poderá ser perdida por lixiviação, no caso de solos com baixos teores de argila e baixa CTC (Sanzonowicz & Mielniczuk, 1985). Para reduzir as possibilidades de perdas por lixiviação, as altas quantidades de K devem ser parceladas e, ou, atingir maior volume de solo para que a concentração não fique muito alta, utilizar fontes menos solúveis e, ou, portadoras de ânions menos móveis (KAlSiO₄, K₂SO₄) e elevada cobertura vegetal do solo. Por outro lado, em solos muito argilosos ou com alta CTC, o K é um elemento pouco móvel no solo. Nessas situações, a perda por lixiviação praticamente não ocorre, sendo possível a criação de teores mais altos de fertilidade do solo. Assim é possível fazer a adubação do sistema e não mais de cada cultura individualmente. Esta situação é desejável para otimização das operações de semeadura e aplicação de fertilizantes, fazendo uma distribuição das tarefas ao longo do ano.

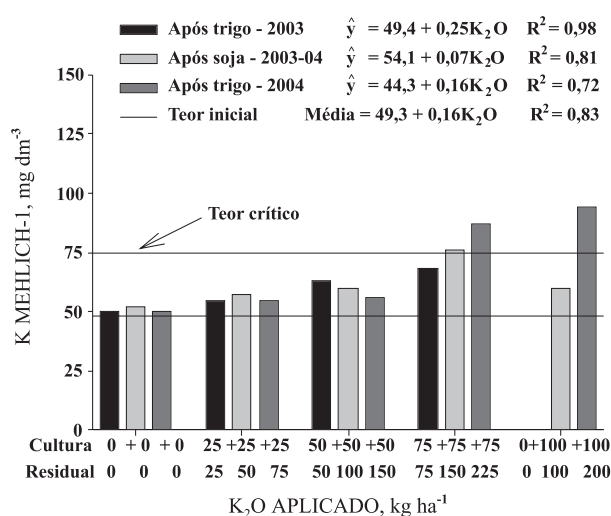


Figura 3. Teor de K extraído por Mehlich-1 em três épocas, teor inicial, equações de resposta do solo à aplicação de K na sucessão trigo/soja/trigo no experimento M1.

Adubação de manutenção

A adubação de manutenção tem por objetivo manter o teor de K no solo acima do teor crítico, onde a probabilidade de resposta das plantas é baixa. Para isso, repõem-se os nutrientes exportados pelos grãos e o resíduo da parte aérea mais uma quantidade a fim de suprir eventuais perdas no sistema. As perdas de maneira geral são consideradas de 20 a 30 % (CQFSRS/SC, 2004). Neste estudo, optou-se por adotar 25 %.

Adubação de reposição

Quando os teores de K no solo estão “muito alto” (Quadro 4), as adubações podem ser mais flexíveis. Pode-se adotar a estratégia de adubação em qualquer época ou cultura, podendo ser em linha (para doses menores) ou em superfície. Mesmo o K estando na classe “muito alto”, algumas culturas poderão beneficiar-se da adubação potássica, principalmente no arranque inicial das plantas quando feita em linha.

Foram encontrados valores mais baixos de K extraível no solo após a cultura do milho em relação à cultura de soja (Quadro 2). Sanzonowicz & Mielniczuk (1985) relataram que o milheto apresentou diminuição do teor de K no solo. Este efeito do sistema de culturas sobre o teor no solo foi constatado neste trabalho com o milho e a soja, atribuído à grande quantidade absorvida pelas gramíneas e à reposição mais lenta desta quantidade retida no tecido ao solo. Por outro lado, a soja, além de exportar grande quantidade, retorna mais rapidamente o K ao solo após a cultura, podendo, em caso de elevada precipitação pluvial entre o final do ciclo da soja e a implantação da próxima, apresentar risco de perda. Para melhor entendimento dessa dinâmica do K no solo, será necessário o acompanhamento da quantidade de K acumulada no tecido e do tempo necessário para retornar ao solo.

Quadro 4. Recomendação de potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto

Classe	Recomendação para três cultivos			
	1º cultivo	2º cultivo	3º cultivo	Total
	kg ha ⁻¹ de K ₂ O			
Muito baixo	150	100	60	310
Baixo	90	60	40	190
Médio	60	M	M	60+2M
Alto	M	M	M	3M
Muito alto	R	R	R	3R

M: manutenção (taxa de exportação das culturas + perdas). R: reposição (Exportação das culturas) trigo e milho: 6 kg de K₂O por tonelada de grãos e soja: 20 kg de K₂O por tonelada de grãos exportados.

As culturas de trigo e milho exportam em média 6 kg de K_2O por tonelada de grãos retirados da cultura. A soja apresenta uma taxa de exportação muito superior por tonelada produzida, chegando a 20 kg de K_2O por tonelada (CQFSRS/SC, 2004). Esses valores correspondem às doses de reposição. A partir desses valores, calculam-se as doses de manutenção multiplicando-os por 1,25. Desta forma, a dose para manutenção ficará de 7,5 kg ha^{-1} de K_2O para trigo e milho e de 25 kg ha^{-1} de K_2O para a soja por tonelada de grãos exportados. Pode-se perceber a alta taxa de exportação de K pela soja, embora a cultura tenha sido pouco responsiva às aplicações do nutriente, quando comparada ao trigo e ao milho (Quadro 2).

O objetivo da recomendação quando os teores no solo estão abaixo do teor crítico é a construção da fertilidade até a classe “alto”, em que a probabilidade de resposta é baixa. Quando o teor no solo se encontra na classe “alto”, o objetivo da recomendação é manter o teor nesta classe, ou seja, estar acima do teor crítico em que a probabilidade de resposta é muito baixa. Quando o teor no solo está na classe “muito alto”, pode-se permanecer por determinado período sem aplicação, ou aplicar pequenas doses, economizando e construindo a fertilidade de outros nutrientes e corrigindo problemas que podem estar limitando a produtividade da lavoura.

Quando os teores de K no solo pelo Mehlich-1 estão acima do teor crítico, as adubações podem ser feitas tanto a lanço quanto na linha, pois apresentam a mesma eficiência (Klepkner & Anghinoni, 1996; Wiethölter et al., 1998, Ceretta & Pavinato, 2003).

Depois de três cultivos, é necessário fazer outra análise de solo para identificar se o objetivo foi atingido. Em caso contrário, passa-se a adotar a estratégia da manutenção do teor, adicionando-se o total exportado pela cultura e a quantidade provável perdida, que em geral são de aproximadamente 25 %. Quando o objetivo não for atingido, deve-se elaborar uma nova recomendação.

CONCLUSÕES

1. O teor crítico de K no solo, determinado pelo Mehlich-1, para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai é de 75 mg dm^{-3} .

2. As classes de fertilidade de K no solo são “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”, correspondendo respectivamente a menos de 25, de 26 a 50, de 51 a 75, de 76 a 150 e maior que 150 mg dm^{-3} de K, determinado pelo Mehlich-1.

3. Foi necessário, na média das três culturas, aplicar 5 kg ha^{-1} de K_2O para elevar 1 mg dm^{-3} no teor de K no solo. Os teores se elevaram mais rapidamente após o milho do que após o cultivo de soja.

4. É necessário aplicar 310 kg ha^{-1} de K_2O , em três cultivos, para atingir o teor crítico no solo quando este se encontra na classe “muito baixo”, 190 kg ha^{-1} quando está “baixo”, e 60 kg ha^{-1} quando está “médio”.

5. A soja respondeu menos à aplicação de fertilizante potássico do que o trigo e o milho, sob sistema plantio direto no Paraguai. As respostas à aplicação de K foram, de modo geral, limitadas devido aos altos teores do nutriente no solo, na maioria dos locais investigados.

LITERATURA CITADA

- CERETTA, C.A. & PAVINATO, P.S. Adubação em linha ou a lanço no plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 6., Ibirubá, 2003. Trabalhos publicados... Ibirubá, 2003. p.23-35.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. Recomendações de adubação e 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, Embrapa/CNPT, 1989. 128p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, Embrapa /CNPT, 1995. 224p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. Manual de recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.
- 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. R. Bras. Ci. Solo, 13:259-267, 1989.
- FATECHA, A. Guía para la fertilización de cultivos anuales e perennes de la región oriental del Paraguay. Caacupé, Ministério de Agricultura Y Ganaderia, Subsecretaria de Estado de Agricultura, Dirección de Investigación Agrícola, 1999. 23p.
- KLEPKER, D. & ANGHINONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos de solo. Pesq. Agropec. Gaúcha, 2:79-86, 1996.
- FECOTRIGO. Manual de adubação e calagem para cultivos agrícolas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Trigo e Soja, 56:1-34, 1981.
- MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A. & BOHNEN, H. Métodos de análise do laboratório de análise de solo In: Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1969. 39p. (Boletim Técnico, 2)
- RAIJ, B.van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato e Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142p.

- SANZONOWICZ, C. & MIELNICZUK, J. Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciada pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. R. Bras. Ci. Solo, 9:45-50, 1985.
- SCHLINDWEIN, J.A. Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 169p. (Tese de Doutorado)
- SCHLINDWEIN, J.A. & ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. Ci. Rural, 30:611-617, 2000.
- SIQUEIRA, O.J.F.; SCHERER, E.E.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, J.F.; TEDESCO, M.; MILAN, P.A. & ERNANI, P.R. Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo, Embrapa/CNPT, 1987. 100p.
- TABELAS de adubação corretiva e adubação de manutenção para solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Trigo e Soja, 10:15-23, 1976.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS. Faculdade de Agronomia. Departamento de Solos. Tabelas de adubação corretiva e adubação de manutenção para os solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, 1973. 11p. (Boletim Técnico)
- VIDOR, C.; FREIRE, J.R.J.; GONÇALVES, H.M.; GOMES, J.E.; GUTERRES, J.P. & GONÇALVES, J. Análise de um grupo de experimentos de adubação com fósforo, potássio e calcário em *Glycine max* (L) Merrill. Agron. Sulriograndense., 9:33-39, 1973.
- WIETHÖLTER, S.; BEN, J. R.; KOCHHANN, R. A. & PÖTTKER, D. Fósforo e potássio no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N.J. Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto. Lages, SBCS/NRS, 1998. 160p.