

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

**MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO PARA
AS PLANTAS EM SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL**

MAGNO BATISTA AMORIM

(Dissertação)

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

**MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO PARA
AS PLANTAS EM SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL**

MAGNO BATISTA AMORIM
Engenheiro Agrônomo (UNIR)

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

Porto Alegre (RS) Brasil

Fevereiro de 2014

MAGNO BATISTA AMORIM
Engenheiro Agrônomo (UNIR)

DISSERTAÇÃO

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

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Faculdade de Agronomia
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil. Aprovada em: 20/02/2014
Homologado em:
Pela Banca Examinadora:

CLESIO GIANELLO
Professor Orientador
PPG-Ciência do Solo

ALBERTO VASCONCELOS INDA
JUNIOR
Coordenador do PPG-Ciência do Solo

CARLOS ALBERTO BISSANI
PPG-Ciência do Solo

MARGARETE NICOLODI
Dra. Ciência do Solo

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de Agronomia

CLÁUDIO HENRIQUE KRAY
IFRS

OFEREÇO

Aos meus pais, Laudicia e José, pelo Amor e apoio incondicional desde sempre, contribuindo para minha formação de caráter e profissional.

Aos meus irmãos, Debora e Macson, pelo companheirismo e apoio durante nossa história.

A minha noiva Oliliane, por me mostrar o Amor da forma mais pura, e mesmo a distância estar sempre ao meu lado.

DEDICO a minha tia Marcia Boy e seu anjinho "*in memoriam*" pelos momentos alegres que proporcionastes a nossa família.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por me conceder a oportunidade de especialização e aperfeiçoamento moral e profissional.

Ao Prof. Clesio Gianello, pela orientação, e por compartilhar uma pequena parte do seu conhecimento, experiência de vida e profissional. Pela paciência com o “estudantez” e o “vernáculo”. Por compreender minhas limitações e me ajudar a supera-las.

Aos professores, pela transferência de conhecimento, exemplos profissionais, convívio e disponibilidade sempre que solicitados.

Ao CNPq pela bolsa de estudos.

Ao LAS-UFRGS e FAURGS pelo apoio financeiro.

Aos amigos e colegas Ana Ludtke, Clarissa Borges, Cassio Boechat, Filipe Selau, José Bernardo Borin, Fernando Arnutt, Daiana Althaus, Jovana Bavaresco e Leonardo Capeleto, pela recepção e amizade cultivada ao longo do curso. E por último, mas não menos importante, ao amigo Douglas Antônio Rogeri, pelo apoio, auxílio, convívio e orientações.

Aos amigos do LAS-UFRGS Lisandra, Elisangela, Elio, Daniela, Tais, Bernadete, Daniel, Valéria, Letícia, Tauana, David, Sidinei, Sinval, Stefano pela assistência e convívio.

Aos bolsistas de iniciação científica Sergio Souza, Talisson Gozatto e Fernando Berlitz.

À todos, não citados aqui, que contribuíram para minha formação científica, moral e profissional.

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO PARA AS PLANTAS EM SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL ^{1/}

Autor: Magno Batista Amorim

Orientador: Prof. Clesio Gianello

RESUMO

Os principais laboratórios de análise de solo de rotina brasileiros utilizam a solução Mehlich-1 para determinação de potássio disponível no solo. Os outros cátions de maior importância no complexo de troca (Ca, Mg, Mn, Na e Al) são determinados pela solução de cloreto de potássio (KCl 1,0 mol L⁻¹). Porém estes procedimentos possuem limitações químicas e operacionais. Logo, a necessidade de novos extratores é discutida no meio científico, principalmente com a recente adoção da técnica de espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Assim, o objetivo do presente estudo foi comparar diferentes soluções extratoras (Mehlich-1, Melich-3, KCl 1,0 mol L⁻¹ e NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹) com a solução padrão de AcNH₄ 1,0 mol L⁻¹, como extratores de K e demais cátions do solo, e verificar a capacidade dos extratores em prever a disponibilidade de K para as plantas em solos do Rio Grande do Sul. Para isso, foram desenvolvidos três estudos, dois em laboratório e um em casa de vegetação. Nos estudos em laboratório foram utilizados diferentes tempos de agitação (5, 30 e 60 minutos), relação solo:solução (1:5, 1:10 e 1:20 v/v) e tempos de decantação (2 e 16 horas). Em casa de vegetação foram conduzidos dois cultivos com milho. Os coeficientes de correlação entre todos os métodos foram altos. No entanto, os valores obtidos pela solução de Mehlich-1 foram, em geral, menores que os obtidos por AcNH₄ e NH₄Cl, mesmo quando o tempo de agitação foi aumentado. Quando a relação solo:solução foi diminuída o Mehlich-1 extrai ainda menos K do solo. Os teores obtidos de K, Ca, Mg, Mn, Al e Na pela solução NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹, com no mínimo 30 minutos de agitação, foram semelhantes aos obtidos pelos procedimentos padrão de AcNH₄ (K) e KCl (Ca, Mg, Mn, Al e Na), independente da relação solo:solução e do tempo de decantação. Todas as soluções foram eficientes em prever a disponibilidade de K para as culturas. De modo geral os resultados obtidos indicam que é viável substituir as soluções tradicionais Mehlich-1 e KCl 1,0 mol L⁻¹ na extração de cátions trocáveis do solo, pela solução de NH₄Cl mol L⁻¹ em laboratórios que dispõem de ICP-EOS.

^{1/} Dissertação de mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (99 p.) Fevereiro de 2014. Trabalho realizado com apoio financeiro da FAURGS e do CNPq.

METHODS FOR ASSESSING THE AVAILABILITY OF POTASSIUM FOR PLANTS IN SOIL OF RIO GRANDE DO SUL

Autor: Magno Batista Amorim

Orientador: Prof. Clesio Gianello

ABSTRACT

The main Brazilian soil testing laboratories use Mehlich-1 solution for determination of available potassium in the soil. The other most important cations in the exchange complex (Ca, Mg, Mn, Na and Al) are determined using a solution of potassium chloride ($\text{KCl } 1.0 \text{ mol L}^{-1}$). However, these procedures have chemical and operational limitations. Therefore, the need for new extractors is discussed in the scientific environment, especially with recently adoption of ICP-OES in routine soil testing laboratories. The aim of this study was to compare different extraction solutions (Mehlich-1, Melich-3, $\text{KCl } 1.0 \text{ mol L}^{-1}$ and $\text{NH}_4\text{Cl } 1.0 \text{ mol L}^{-1}$) with the standard solution of 1.0 mol L^{-1} AcNH_4 , as K, Ca, Mg, Mn, Na and Al extractors from the soil, and verify the ability of extractants to predict K availability to plants in soils of Rio Grande do Sul. Treatments tested in laboratory consisted of three soil:solution ratio (1:5, 1:10 and 1:20 v / v), two settling times (2 and 16 hours) and three agitation times (5, 30 and 60 minutes). In the greenhouse were made two maize crops cycles. The correlation coefficients between all methods were high. However, the values obtained by Mehlich-1 solution were generally lower than values obtained using AcNH_4 NH_4Cl and even when the stirring time was increased. When the soil:solution ratio decreased, Mehlich-1 extract less exchangeable K. The values obtained to K, Ca, Mg, Mn, Al and Na using $\text{NH}_4\text{Cl } 1.0 \text{ mol L}^{-1}$ solution, at least 30 minutes of stirring, were similar to values obtained by standard procedures AcNH_4 (K) and KCl (Ca, Mg, Mn, Al and Na), regardless of soil:solution ratio and settling time. All solutions were effective in predicting K availability to agricultural cultures. Overall the results indicate that it is feasible to replace the traditional solutions Mehlich-1 and $\text{KCl } 1.0 \text{ mol L}^{-1}$ in the extraction of soil exchangeable cations by solution of $\text{NH}_4\text{Cl } 1.0 \text{ mol L}^{-1}$ in laboratories that have an ICP - EOS.

^{1/} Msc. Dissertation in Soil Science - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (99 p.) February, 2014. Research work supported by FAURGS and CNPq.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Disponibilidade de potássio para as plantas.....	4
2.2. Avaliação da disponibilidade de K no solo.....	9
2.2.1. Solução de acetato de amônio.....	10
2.2.2. Solução de Mehlich.....	12
2.2.3. Solução de cloreto de amônio.....	14
3. ESTUDO I	17
3.1. INTRODUÇÃO.....	18
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
3.3.1. Potássio.....	23
3.3.2. Cálcio e Magnésio.....	26
3.3.3. Alumínio e manganês.....	28
3.4. CONCLUSÕES.....	31
3.5. AGRADECIMENTOS.....	31
4. ESTUDO II	32
4.1. INTRODUÇÃO.....	33
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.2.1. Procedimento acetato de amônio.....	36
4.2.2. Procedimento Mehlich-1.....	36
4.2.3. Procedimento cloreto de amônio.....	37
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.4. CONCLUSÕES.....	48
5. ESTUDO III	50
5.1. INTRODUÇÃO.....	51
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
5.4. CONCLUSÕES.....	70
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

8. APÊNDICES	80
--------------------	----

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Relação entre as quantidades extraídas de potássio pela solução de Mehlich-1 e de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ em três tempos de agitação e a quantidade extraída pela solução padrão de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ 24
- Figure 2.** Relação entre as quantidades extraídas de Ca e Mg trocáveis pela solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ em três tempos de agitação e a quantidade extraída por AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ 27
- Figura 3.** Relação entre quantidades extraídas de Al trocável e de Mn por diferentes procedimentos: Al e Mn por NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, em dois períodos de agitação e por KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, determinado por titulação de retorno (Al) e ICP (Al e Mn).....30
- Figura 4.** Relação entre as quantidades extraídas de K trocável pelas soluções de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e Mehlich-1 em diferentes tempos de agitação (5, 30 e 60 minutos) e a quantidade extraída por AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS.....39
- Figura 5.** Relação entre as quantidades extraídas de K trocável pelas soluções de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e Mehlich-1 em diferentes relações solo:solução (1:05, 1:10 e 1:20 v/v) e a quantidade extraída por AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS.....41
- Figura 6.** Relação entre as quantidades extraídas de K trocável pelas soluções de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e Mehlich-1 em diferentes tempos de decantação (duas e 16 horas) e a solução de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS.43
- Figura 7.** Relação entre as quantidades de K extraído pelas solução de Mehlich-1 na relação solo:solução 1:10 (v/v) e tempo de decantação de 2 horas (A) e 16 horas (B), para solos com valores de K inferiores a $1,5 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ e a quantidade extraída pelo procedimento padrão de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS.44
- Figura 8.** Relação entre as quantidades de K extraído pelas soluções Mehlich-1 e NH_4Cl 1 M L^{-1} , para todos os solos (A) e para solos com valores de K inferiores a $1,5 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ (B) e a quantidade extraída pelo procedimento padrão de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS.....47
- Figura 9.** Relação entre a quantidade de K absorvido pelas plantas e a extraída pelas diferentes soluções (1º cultivo).....61
- Figura 10.** Relação entre a quantidade de K absorvido pelas plantas e a extraída pelas diferentes soluções (2º cultivo).....63

Figure 11. Relação entre a quantidade absorvida de K por plantas de milho e o índice saturação por potássio (1º cultivo).....	66
Figure 12. Relação entre a quantidade absorvida de K por plantas de milho e o índice saturação por potássio (2º cultivo).....	67

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Algumas propriedades físicas e químicas dos solos utilizados no estudo I selecionados do banco de solos do LAS-UFRGS.....	21
Tabela 2. Intervalos de confiança (IC 95 %) dos coeficientes lineares (a) e angulares (b) das curvas de regressão linear obtidos nas comparações entre os extratores testados* e os valores t Student para as diferenças entre as médias.....	25
Tabela 3. Classificação, localização e teor de K extraível por Mehlich-1 e NH ₄ Cl de 12 solos do Rio Grande do Sul.....	35
Tabela 4. Intervalos de confiança (95%) dos coeficientes lineares (a) e angulares (b), valor de t de Student para as médias e coeficientes de correlação (r) das curvas de regressão linear obtidos nas comparações entre os extratores Mehlich-1 e NH ₄ Cl com o padrão AcNH ₄ , em diferentes períodos de agitação e decantação e de relação solo:solução.....	40
Tabela 5. Teor médio de K trocável/extraível, determinados pelos extratores Mehlich-1, NH ₄ Cl 1 mol L ⁻¹ e AcNH ₄ 1 mol L ⁻¹ , em diferentes períodos de agitação e decantação e de relação solo:solução.....	41
Tabela 6. Classificação, localização, textura e alguns atributos químicos de 12 solos representativos do Rio Grande do Sul utilizados no estudo em Laboratório.....	49
Tabela 7. Classificação, localização, textura e alguns atributos químicos de 30 solos representativos do Rio Grande do Sul utilizados no estudo em casa de vegetação.	56

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice I. Teor de K dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução Mehlich 1 em triplicata.	81
Apêndice II. Teor de K dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH_4Cl em triplicata.....	813
Apêndice III. Teor de Ca dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução Mehlich-1 em triplicata.....	815
Apêndice IV. Teor de Ca dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH_4Cl em triplicata.	817
Apêndice V. Teor de Mg dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução Mehlich-1 em triplicata.....	819
Apêndice VI. Teor de Mg dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH_4Cl em triplicata.	8191
Apêndice VII. Teor de Al dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH_4Cl em triplicata e KCl 1 mol L^{-1}	93
Apêndice VIII. Teor de Mn dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH_4Cl 1 mol L^{-1} em triplicata e KCl 1 mol L^{-1}	95
Apêndice IX. Massa seca e % de K na Massa seca de Milho do primeiro e segundo cultivo.....	97

1. INTRODUÇÃO GERAL

O potássio é o segundo macronutriente mais exigido em quantidade pela maioria das plantas cultiváveis, perdendo apenas para o nitrogênio. À medida que a agricultura torna-se mais intensiva e tecnificada, com maiores rendimentos, aumentam as exigências de nutrientes e, conseqüentemente, o potássio torna-se mais importante.

Neste novo cenário agrícola, são exigidos altos rendimentos e produtos de boa qualidade e, para isso, são necessárias quantidades suficientes e balanceadas de nutrientes. O vertiginoso crescimento da agricultura brasileira e as elevadas quantidades de K exigidas pelas culturas contrastam com os teores em geral insuficientes deste nutriente em solos brasileiros, o que tem levado a grande aumento no consumo de fertilizantes potássicos.

A grande variabilidade de solos, culturas e rotinas de adubação torna necessária a padronização da diagnose do potássio disponível existente no solo, bem como a elaboração de programas de recomendação de adubação adaptados por região e por cultura. Para isso, foram desenvolvidos vários métodos de análise de K em solos. A existência de várias metodologias torna mais complexa a padronização de um método, principalmente em regiões com grande diversidade de solos. Além disso, muitos extratores utilizados nos laboratórios de rotina são desenvolvidos para outros nutrientes, sendo adotados para o K pela facilidade de extração das formas trocáveis por várias soluções.

Com o advento de novas tecnologias nos laboratórios de análise de solo de rotina, principalmente pela determinação dos elementos por técnicas de análise multielementar, como a espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), soluções que extraem diversos elementos

simultaneamente têm sido preferidas para aumentar eficiência dos laboratórios de análises de solo.

Dentro deste contexto, nos últimos anos, tem se discutido a substituição dos extratores tradicionalmente utilizados nos laboratórios de análise de rotina, como Mehlich-1 e cloreto de potássio (KCl). Com a substituição destas soluções, extinguem-se também problemas de limitações químicas e operacionais, como a subestimação do teor de K extraído por Mehlich-1 em solos com alto poder tampão e superestimação do teor de Al^{+3} em solo quando a determinação em extrato de KCl é feita por titulação de retorno. Além disso, muitos autores relatam problemas operacionais na leitura de Ca e Mg em espectrômetro de absorção atômica, devido à deposição de cristais de KCl na fenda do queimador, causando entupimento do aparelho e contaminação de amostras posteriores com K.

A solução de cloreto de amônio (NH_4Cl) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ pode ser uma alternativa na extração de K trocável do solo, além de Ca, Mg, Al, Mn e Na, em um único extrato, e tornar os procedimentos laboratoriais mais eficientes. Possui o mesmo princípio químico de extração e íon extrator (NH_4^+) da solução considerada padrão para extração de K e demais cátions do solo (solução neutra de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$). Além disso, trabalhos conduzidos em diversos países, inclusive no Brasil, recomendam esta solução para extração de cátions e não relatam problemas químicos ou operacionais nos procedimentos utilizados. Porém, é necessário o desenvolvimento de estudos de correlação e calibração com a utilização desta solução como extratora de K em solos brasileiros, a fim de verificar a possibilidade de utilizá-la nos laboratórios de análise de solo de rotina em substituição aos extratores tradicionais.

Assim, o presente estudo tem por objetivos:

- a) verificar a possibilidade de substituir os extratores Mehlich-1, para a determinação de K, e cloreto de potássio, para a determinação de Ca, Mg, Na, Al e Mn, pelo extrator cloreto de amônio com determinação simultânea de K, Ca, Mg, Al, Mn e Na por espectrofotometria de emissão ótica;
- b) determinar o tempo de extração necessário e a relação solo:solução para obtenção de resultados comparativamente semelhantes aos obtidos pelos

métodos padrão, utilizados nos estudos de calibração de métodos e recomendação de fertilizantes nos estados do RS e SC;

c) correlacionar os valores obtidos pelas diferentes metodologias com as quantidades de K absorvidas pelas plantas;

d) comparar os métodos de determinação indireta de Al por titulometria com a determinação direta por espectrofotometria de emissão ótica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O elemento potássio (K) está distribuído em vários compartimentos na natureza. É parte importante de algumas rochas e de vários minerais primários e secundários. No solo, a maior parte do potássio (90-98%) faz parte da estrutura de minerais silicatados, forma indisponível para as plantas. Cerca de 2% do potássio no solo é considerado disponível e esta disponibilidade resulta da interação entre o potássio estrutural e as diferentes formas deste nutriente no solo. O conhecimento da mineralogia e das formas e da interação destas com atributos de solo na interfase solo/solução contribui para melhor previsão do suprimento e da biodisponibilidade desse nutriente para as plantas. Nas plantas, o K não faz parte de compostos específicos e não tem função estrutural, porém é o segundo nutriente exigido em quantidade, inferior apenas ao nitrogênio. É considerado o cátion de maior importância para a fisiologia vegetal, por atuar em inúmeras funções fisiológicas, entre elas a ativação de enzimas e a manutenção da turgidez das células.

2.1. Disponibilidade de potássio para as plantas

No solo, o potássio é classificado quanto à disponibilidade em não disponível, lentamente disponível e disponível às plantas. O K disponível, em geral, é entendido como a forma que pode ser absorvida pela planta para suprir sua necessidade desse elemento. Essa forma é constituída pelo K trocável ou extraível, que corresponde ao potássio da solução do solo e o que está ligado às cargas negativas dos grupos funcionais de superfície dos argilominerais ou

da matéria orgânica (MO), por meio de complexos de superfície de esfera externa (Sposito, 1984, 1989).

Além da forma trocável, no solo, parte do potássio está fixado nas entre-camadas de minerais 2:1 (K não-trocável), e outra parte é constituinte da estrutura dos minerais primários (potássio estrutural). A disponibilidade deste nutriente é o resultado da interação entre estas diferentes formas. Assim, a classificação do potássio no solo depende do critério adotado pelo pesquisador. Tisdale & Nelson (1975) classificam o potássio quanto à disponibilidade para as plantas em: relativamente indisponível, lentamente disponível e prontamente disponível. Ao adotar um critério químico para o potássio no solo, Ritchey (1982) o classifica em potássio estrutural, potássio temporariamente fixado nas entre camadas de argilas 2:1, potássio trocável e potássio presente na solução do solo.

O modo e a energia de ligação do K aos componentes da fase sólida do solo dão origem às diversas formas do elemento no solo (Ernani et al., 2007). Em geral, existe um equilíbrio entre essas formas. As plantas absorvem o potássio da solução, o qual é tamponado pelas formas trocáveis, que são reestabelecidas pelas formas não trocáveis e estruturais (Curi, et al., 2005). Em relação à nutrição de plantas, o equilíbrio mais importante está entre o K trocável e o da solução do solo, formas consideradas de disponibilidade imediata (Mielniczuk, 1982). Por outro lado, o potássio não-trocável representa a reserva a longo prazo. É liberado lentamente para a solução e pode ser absorvido pelas plantas, retido na CTC, fixado, erodido, lixiviado e/ou biociclado, formas essas que deveriam ser consideradas num programa de adubação de culturas perenes (Mielniczuk, 1982; Fonseca, 2004).

A disponibilidade de K para as plantas depende da interação entre as características químicas e mineralógicas do solo, sendo influenciada por fatores relacionados ao solo, às plantas e ao clima. O teor de potássio no solo, a atividade na solução, a sua participação no complexo de troca, a eficiência com que o K é reestabelecido para a solução à medida que é absorvido pelas plantas ou lixiviado e a taxa de transporte até a superfície das raízes constituem os principais fatores edáficos que influenciam sua disponibilidade.

A disponibilidade de potássio não depende somente da sua concentração na solução do solo, mas principalmente da capacidade das

outras formas de K em mantê-la (Mengel & Kirkby, 1978). Esta capacidade, mais comumente denominada poder tampão de potássio (PTK), é definida pela relação Q/I , em que Q (fator quantidade) representa o potássio na fase sólida, em equilíbrio imediato com a solução, e I (fator intensidade), a concentração de potássio na solução (Mielniczuk, 1982). Assim, se todas as formas de K estão ligadas quimicamente a este equilíbrio, estas, podem ser liberadas para a solução, tornando-se disponíveis. A velocidade desse processo depende das reações químicas envolvidas (complexo de superfície de esfera externa ou interna) e de características mineralógicas de cada solo.

As propriedades da planta que influenciam a disponibilidade de K são: morfologia do sistema radicular, taxa de demanda de cada espécie e parâmetros cinéticos de absorção (velocidade máxima, $I_{máx}$, constante de Michaelis-Menten, k_m , e concentração na solução em que o influxo deixa de existir, C_{min}) (Ernani et al., 2007).

A temperatura e a umidade do solo são os fatores relacionados com o clima que também influenciam a disponibilidade de K. A elevação da temperatura ambiente e do solo aumenta a absorção de K pelas plantas, porque favorece tanto a difusão de K no solo quanto o processo de absorção. O aumento do teor de água no solo também favorece a absorção de potássio por aumentar a taxa de deslocamento deste nutriente até as raízes pelos diferentes mecanismos de suprimento (Ernani et al., 2007).

O mecanismo de suprimento de K às raízes é semelhante ao do elemento fósforo. Ambos são transportados da solução do solo para a superfície radicular por difusão. No entanto, o teor de potássio na solução do solo é muitas vezes superior ao do fósforo, conferindo-lhe maior mobilidade em relação a este, conseqüentemente, o mecanismo de fluxo de massa tem, em geral, uma parcela contributiva importante no transporte até a zona de absorção (Costa et al., 2009).

Várias metodologias foram desenvolvidas para avaliação da disponibilidade de potássio para as plantas. No passado, o método utilizado, e desde sempre considerado método padrão, foi o que usa a solução neutra de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}(\text{AcNH}_4)$. No século passado, foram desenvolvidos diversos métodos por diferentes pesquisadores que utilizaram esta solução (Metson, 1956; Hesse, 1972; Chapman, 1965; Helmke & Sparks,

1996). Além do AcNH_4 , também podem ser adotadas técnicas que utilizam soluções ácidas diluídas (Mehlich, 1953), soluções salinas como, NH_4Cl , NH_4NO_3 , ou ainda a técnica de eletroultrafiltração (EUF) (Németh, 1979) e a resina iônica (Raij, 1991).

A técnica de eletroultrafiltração é utilizada em países como o Canadá (Lierop & Sen Tran, 1985), Escócia (Sinclair, 1982) e diversos outros países da Europa. Segundo Németh (1979), essa técnica pode ser utilizada pra determinar, além do K, cálcio, magnésio, sódio, cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, níquel, amônio, nitrato sulfato e fosfato. No Brasil, esse procedimento não foi implantado em laboratórios de análises de solos.

No Brasil, os métodos mais utilizados para avaliar a disponibilidade de K para as plantas são a solução de Mehlich-1, a resina de troca iônica e a solução neutra de acetato de amônio, e utilizada quase sempre como padrão para ajustes de outras metodologias. Porém, em muitos trabalhos, o K extraído por qualquer uma delas, quando usado como um índice isoladamente, não tem sido adequado para estimar a disponibilidade deste nutriente para as plantas (Grimme & Nemeth, 1979; Ritchey, 1982; Silva & Meurer 1988; Meurer & Anghinoni, 1993). A estimativa da disponibilidade de K com base apenas em um parâmetro pode não ser adequado, pois a dinâmica do K na rizosfera depende da interação entre diferentes fatores de solo, clima e planta.

Estudos de disponibilidade e cinética de liberação de potássio para a solução do solo foram desenvolvidos em solos do Rio Grande do Sul por Silva & Meurer (1988) e Meurer & Anghinoni (1993), os quais utilizaram solos com diferentes características químicas, físicas e mineralógicas, derivados de argilito, siltito, arenito, basalto e granito. Nesses trabalhos, o índice K trocável, isoladamente, explicou apenas 59 e 52% da variação de K absorvido pelas culturas de trigo e sorgo, respectivamente. Os autores constataram que a predição da disponibilidade de K para as plantas pôde ser significativamente melhorada pela discriminação dos solos em diferentes faixas de CTC, prática que já é adotada nas recomendações de adubação para o Cerrado brasileiro (Souza & Lobato, 2002) e para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004), e para o estado de Minas Gerais quando houver necessidade de adubação corretiva com K (CFS/MG, 1999).

Para os solos do RS e SC, o teor crítico de K (extraído pela solução de Mehlich-1) é de 45, 60 e 90 mg dm⁻³, para solos com CTC_{pH7,0} inferior a 5,0, de 5,1 a 15 e >15 cmol_c dm⁻³, respectivamente (CQFS-RS/SC (2004). Brunetto et al. (2005) verificaram que o teor crítico de K extraído pela solução de Mehlich-1 em um Argissolo com CTC baixa, cultivado sob sistema plantio direto (SPD), foi de 42 mg dm⁻³, próximo do valor 45 mg dm⁻³ adotado pela CQFS-RS/SC (2004). Porém, mesmo com os solos classificados por faixas de CTC, o K extraível (ou trocável) nem sempre é um índice eficiente para prever a disponibilidade de K, principalmente em solos que contêm teores altos de minerais do tipo 2:1 (ilita e vermiculita) e/ou com CTC maior que 20 cmol_c dm⁻³, indicando a necessidade de um índice complementar ao potássio trocável para mensurar a disponibilidade deste nutriente para as plantas. McArthur (1991), em estudo realizado com solos do sudoeste australiano, constatou que o potássio na forma trocável é uma medida inadequada para avaliar a disponibilidade deste nutriente, uma vez que a concentração desta forma no solo, em qualquer período, é pequena em relação a perdas a longo prazo pela remoção de culturas e lixiviação, e fornece pouca informação sobre as reservas potencialmente disponíveis de K.

Uma alternativa ao uso do K trocável isoladamente é a inclusão do atributo CTC do solo na interpretação dos resultados. Desse modo, a capacidade tampão do solo também é considerada, uma vez que, a participação do K na CTC está diretamente relacionada com a sua disponibilidade (Schneider & Villemin, 1993). Portanto, a porcentagem de K na CTC, um índice de saturação por potássio, eventualmente pode ser utilizado para explicar respostas à adubação potássica mesmo em situações em que somente o valor de K-trocável não o faça (Lopes, 1984; Bortoluzzi et al., 2005). Schneider & Villemin (1993) sugeriram que a saturação ideal desse nutriente na CTC_{pH7,0} deve ser entre 3 a 4%. Assim, este parâmetro pode ser utilizado como critério auxiliar ao teor de potássio trocável para interpretação e recomendação de adubação potássica.

A taxa de troca de íons em solos é dependente do tipo e quantidade de componentes orgânicos e inorgânicos. A carga e o raio do elemento, também devem ser considerados (Sposito, 1989). Em solos com predomínio de argilominerais como a caulinita, em que apenas sítios de troca externos estão

presentes, a troca iônica é rápida. Em solos com argilominerais 2:1, que contêm sítios de troca externos e internos, particularmente com vermiculita e micas, em que existem sítios nos espaços interlamelares, a cinética de troca é mais lenta. Nesses tipos de argilas, íons como o K^+ se difundem lentamente para os espaços entre camadas e o deslocamento iônico pode ser tortuoso e o processo de troca muito lento (Sparks, 2003). A carga do íon também afeta a cinética de troca iônica. Geralmente, a taxa de troca diminui à medida que a carga das espécies trocáveis aumenta (Helffferich, 1962).

Extratores sensíveis ao poder tampão do solo, como a solução de Mehlich-1, apresentam limitações pela dificuldade de extrair o íon K^+ adsorvido nos sítios interlamelares, subestimando a disponibilidade deste nutriente para as plantas. Outro fator a ser considerado é o princípio de extração desse método, com base na dissolução ácida, cuja ação pode ser restrita aos sítios planares de adsorção.

2.2. Avaliação da disponibilidade de K no solo

A análise de solo é a técnica mais utilizada e muito eficiente para avaliar a disponibilidade de K para os vegetais. A maioria das regiões brasileiras apresentam curvas de calibração de potássio para grande parte das espécies de interesse comercial. Nesse modelo, a avaliação de disponibilidade dos nutrientes e recomendação de adubação são feitas por estudos de correlação e calibração de métodos. Nestes estudos, é determinado o nível crítico de cada nutriente no solo para a região de estudo; posteriormente, são elaboradas as tabelas com as respectivas classes de fertilidade (muito baixo, baixo, médio, alto, etc.) e são definidas as doses a serem aplicadas.

Os valores de K fornecidos pela análise são comparados com os valores de tabelas pré-estabelecidas com estudos de curvas de resposta à aplicação do nutriente para determinada cultura. Dependendo da classe de fertilidade estabelecida para um determinado valor analítico, recomenda-se a fertilização potássica. Eventualmente, para valores muito altos de K no solo, é possível a não indicação de adubação ou o uso de quantidade suficiente apenas para a reposição daquela retirada pelos grãos (CQFS-RS/SC, 2004). As doses recomendadas nas tabelas podem ser aumentadas ou diminuídas, dependendo

do nível tecnológico do produtor, da disponibilidade de recursos financeiros, do histórico da área e da expectativa de rendimento, dentre outros fatores ou condições aplicáveis à região (Ernani et al., 2007).

Para fins da avaliação da fertilidade do solo, denomina-se o K que consta nos resultados das análises de “extraível”, “disponível” ou “trocável”. No Brasil, o K disponível é extraído do solo com uma mistura de ácidos diluídos (Mehlich-1), ou com solução neutra de acetato de amônio 1,0 mol por L⁻¹, ou, ainda, com resina de troca de íons. Todos estes métodos quantificam valores semelhantes de K (Villa et al., 2004; Bortolon et al., 2010). Essas determinações são fáceis, rápidas, baratas, e os valores extraídos representam a forma de K no solo que mais se correlaciona com a quantidade de K absorvido pelas plantas (Villa et al., 2004; Ernani et al., 2007).

2.2.1. Solução de acetato de amônio

A solução de acetato de amônio 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0 (AcNH₄) é referência na extração de K e de outros cátions trocáveis do solo. É considerada a que melhor simula o ambiente solo-solução. O método com AcNH₄ é simples, rápido, de baixo custo e de boa precisão e, em geral, possui alta correlação com a quantidade de K absorvido pelas culturas (Nachtingall & Raij, 2005; Schindwein & Gianello, 2005; Bortolon et al., 2009, 2010).

O princípio de extração dessa solução se baseia na troca de cátions, em que uma solução com alta concentração de um cátion, no caso o NH₄⁺, é misturada ao solo. Este é saturado pelo cátion amônio, que desloca os demais cátions trocáveis para a fase líquida. O extrato é separado do solo por filtração e/ou centrifugação e após é efetuada a determinação dos cátions. Esta pode ser feita por titulometria (quando não tamponada), espectrofotometria de absorção atômica (AA) e/ou de emissão óptica (ICP-EOS) (Pansu & Gautheyrou, 2006). A vantagem da utilização do cátion NH₄⁺ está na sua baixa concentração natural no complexo de troca do solo.

A solução de AcNH₄ pode ser utilizada tamponada ou não a um determinado pH, normalmente a pH 7,0. A solução não tamponada extrai os cátions do solo a um pH próximo do natural, sendo utilizada para determinar a CTC efetiva. Esta solução é eficiente para a maioria dos solos, exceto naqueles

que receberam doses de calcário e/ou gesso ou ainda que tenham altos teores de sais solúveis, nos quais pode ocorrer a solubilização destes componentes, superestimando o teor de cátions trocáveis para estes solos (Pansu & Gautheyrou, 2006).

A solução de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ foi originalmente utilizada no início do século XX para a determinação de potássio trocável (Prianishnikov, 1913). Em seguida, Schollenberger (1927) sugeriu esta solução para extração de hidrogênio trocável e determinação da reação do solo. Posteriormente, o AcNH_4 foi utilizado para determinação da CTC e cátions trocáveis (Schollenberger & Simons, 1945; Peech et al., 1947). Foi a partir desses dois últimos trabalhos que a solução passou a ser considerada padrão para determinação de cátions trocáveis e da CTC do solo.

Na segunda metade do século XX, a solução de acetato de amônio foi intensamente estudada e foram desenvolvidos vários métodos que a utilizam, os quais são recomendados por diversos pesquisadores (Metson, 1956, 1971; Chapman, 1965; Helmke & Sparks, 1996), tornando-se sua utilização uma referência internacional AFNOR NF X31-130 (1993).

Um procedimento muito citado na literatura foi descrito por Metson (1971), no qual os cátions (K, Ca, Mg e Na) são extraídos com acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, na relação solo:solução 1:20 e 30 minutos de agitação. Outro procedimento que utiliza esta solução foi proposto por Chapman (1965) para determinar a CTC. Neste, é utilizada a relação solo:solução 1:5 (v/v) e 16 horas de decantação (durante a noite). O autor não especificou um tempo determinado de agitação para este procedimento. Já Helmke & Sparks (1996) sugeriram dois procedimentos para extrair o potássio trocável: com filtração ou com centrifugação. No procedimento com filtração, são adicionados 40 mL de solução de AcNH_4 a 10 g de solo. A mistura solo-solução é agitada e deixada em repouso por 1 hora. Após este período, é filtrada em filtro de papel Whatman no. 40 ou 42. No protocolo com centrifugação, são adicionados 25 mL de solução de AcNH_4 a 5 g de solo (relação 1:5, m/v). A mistura solo-solução é agitada por 30 min e, em seguida, centrifugada a 2000 rpm por 10 min. As determinações em ambos os extratos podem ser feitas em fotômetro de chama, absorção atômica e/ou ICP (Helmke & Sparks, 1996).

Conforme demonstrado, existem várias metodologias que utilizam a solução de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ como extrator para a determinação do K trocável do solo. Assim, a partir da década de 1990, um método foi recomendado como padrão internacional para análise dos cátions trocáveis (K, Ca, Mg e Na) e CTC pela Associação Francesa de Normas Técnicas (AFNOR NF X31-130,1993). Neste método, a relação solo/solução utilizada é 1:20 (v/v), com agitação (não há especificação de tempo) e 1 hora de decantação. Mais recentemente, a solução foi recomendada como extrator de cátions pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2004) e pela Sociedade Canadense de Ciência do Solo (CSSS, 2008).

No Brasil, a solução de acetato de amônio é utilizada em diversos trabalhos como padrão de comparação para calibração de metodologias de análise de cátions trocáveis e CTC do solo (Villa et al., 2004; Bortoluzzi et al. 2009; Bortolon et al., 2010). No entanto, nem sempre é adequada para a determinação da CTC, principalmente em solos brasileiros, na sua maioria ácidos e com altos teores de Al^{3+} , que não é extraído pela solução neutra de acetato de amônio. Logo, a utilização desta solução nos laboratórios de análise de solo de rotina tem pouca viabilidade, uma vez que ela foi desenvolvida em países onde a maioria dos solos possuem pH próximo à neutralidade.

2.2.2. Solução de Mehlich

No caso de extratores ácidos, o mecanismo não envolve somente a troca iônica, pois o íon H^+ do ácido é adsorvido pelo solo, bloqueando uma carga negativa, o que se deve ao caráter de ácido fraco das posições de troca iônica dos grupos funcionais de superfície, liberando o cátion para a solução do solo (Nachtigall & Raij, 2005).

Os laboratórios da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (ROLAS) e os da região do Cerrado brasileiro utilizam a solução Mehlich-1 para extração de P e K disponíveis no solo (CQFS-RS/SC, 2004; Sousa & Lobato, 2002). A solução Mehlich-1 foi proposta em 1953 (Mehlich, 1953), para extração de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio, manganês e zinco em solos ácidos. É composta por uma mistura de ácidos fortes diluídos ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4$

0,0125 mol L⁻¹) cujo pH varia de 2 a 3 (Mehlich, 1953). O método proposto por Mehlich teve alguns procedimentos modificados para ser adaptado aos solos e à estrutura dos laboratórios de rotina brasileiros (Raij et al., 1987; Tedesco et al., 1995; Embrapa, 1997).

A quantidade extraída de potássio pelo método Mehlich-1 corresponde à parte da fração trocável mais fracamente adsorvida à fase sólida do solo. Esta fração é, proporcionalmente, menor nos solos em que predominam argilominerais 2:1. A fração do K não extraída por este método provavelmente é constituída de K adsorvido a sítios de troca que possuem grau maior de seletividade para K. Esses sítios são mais acessíveis ao acetato de amônio a pH 7,0, do que pela mistura ácida utilizada no método Mehlich-1 (Nachtigall & Raij, 2005). Sendo assim, há estreita relação entre as quantidades extraídas de K por ambos os métodos, contudo as quantidades extraídas pelo método Mehlich-1, em geral, são menores que as extraídas por AcNH₄ (Boeira et al., 2004; Bortolon et al., 2009, 2010).

Devido às limitações do método Mehlich-1, em 1984 foi proposta a solução Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Esta é composta por uma mistura de sais, ácidos forte e fracos e agentes quelantes (CH₃COOH 0,2 mol L⁻¹ + NH₄NO₃ 0,25 mol L⁻¹ + NH₄F 0,015 mol L⁻¹ + HNO₃ 0,25 mol L⁻¹ + EDTA 0,001 mol L⁻¹). Segundo o autor, esse método é eficaz na extração de P, K, Ca, Mg, Na, Mn, Zn e Cu em solos ácidos. Essa solução possui um maior espectro de ação, e em diversos trabalhos não se tem observado diferença quanto à extração de K do solo em relação à solução de acetato de amônio (Boeira et al., 2004; Schlindwein & Gianello, 2005; Bortolon et al., 2009, 2010). Com a solução de Mehlich-3, além do princípio de dissolução, também ocorre a troca do íon K dos sítios de troca dos coloides do solo com o íon NH₄⁺, presente nessa solução.

Nos últimos anos, é crescente o número de pesquisadores que defendem a substituição do Mehlich-1 nos laboratórios de análise de rotina por outros métodos, devido a problemas relacionados principalmente à extração de fósforo (Gattiboni, 2003; Bortolon, 2005). Dentro deste contexto, são convenientes estudos de correção e de calibração de novas metodologias também para a extração de potássio.

2.2.3. Solução de cloreto de amônio

O cloreto de amônio (NH_4Cl) é quimicamente considerado um sal neutro, assim como o acetato de amônio. Logo, se assume que a capacidade extrativa das soluções são semelhantes, mantidas a mesma concentração em ambas, por possuírem princípio semelhante de extração (solução salina) e o mesmo cátion extrator (NH_4^+).

Diversos pesquisadores, em vários países do mundo, têm recomendado a solução de NH_4Cl para a extração de cátions trocáveis do solo (Ca, Mg, K, Al, Mn e Na). Em alguns trabalhos, essa solução é indicada como alternativa ao acetato de amônio, para determinação direta da capacidade de troca de cátions a pH do solo ($\text{CTC}_{\text{efetiva}}$) em solos ácidos, por permitir também a extração de manganês (Mn) e alumínio (Al).

Wada & Okamura (1980) sugeriram a solução de cloreto de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ para determinar a CTC a um determinado pH. No método sugerido pelos autores, é possível mensurar as cargas negativas do solo em uma faixa de pH que varia de 4,0 a 8,0. Uma vantagem é a determinação tanto da CTC efetiva quanto da CTC a pH 7,0, a critério do pesquisador. O princípio do método é semelhante ao do acetato de amônio, em que o solo é saturado com NH_4^+ e a quantidade retida é quantificada por destilação do amônio, sendo o teor determinado atribuído à CTC. Trata-se de um método simples, rápido e barato, sendo aplicável a uma grande gama de solos, inclusive solos tropicais. Outro método descrito em Tucker & Beatty (1974) é recomendado para mensurar a CTC e o teor dos cátions trocáveis do solo. O método também utiliza a saturação do solo por NH_4^+ , porém a solução é tamponada a pH 8,5, o que não seria aplicável em solos tropicais, pois os mesmos possuem pH abaixo de 6,0.

Robarge & Fernandes (1986) descrevem outra metodologia que utiliza o NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ como extrator de cátions, em solos do estado de Oregon-EUA, a qual foi utilizada por Kraske et al. (1989) para mensurar os teores de K, Ca, Mg, Mn, e Na em solos de florestas comerciais da Nova Inglaterra-EUA. O método foi eficaz como extrator de todos os cátions nos solos estudados, não diferindo do extrator padrão acetato de amônio a pH 7,0.

Alva (1993) comparou uma solução de $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de NH_4Cl com as de Mehlich-1 e Mehlich-3 e a de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, na extração de Ca, Mg, P e K em solos da Florida, EUA. No procedimento com NH_4Cl $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, é utilizada a relação solo:solução de 1:5, com 30 minutos de agitação e 10 minutos de centrifugação. O sobrenadante é filtrado em filtro de papel tipo Whatman no. 42 e as concentrações dos cátions trocáveis são mensuradas por ICP-OES. O autor concluiu que o extrator foi eficiente em determinar o teores de Ca, Mg e K trocáveis do solo, não diferindo das soluções Mehlich-3 e AcNH_4 .

Shuman & Duncan (1990) utilizaram 221 amostras de solos ácidos do estado da Georgia, EUA e Porto Rico, para comparar a solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ com a de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 e a de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, como extratores de Al, Ca, Mg, Na e K do solo. Os autores concluíram que a solução de cloreto de amônio foi eficaz em mensurar o teor de todos os cátions básicos e ácidos estudados, podendo ser utilizada como alternativa às soluções de AcNH_4 e KCl nos laboratórios de análise de solo.

No Brasil, existem poucos trabalhos em que a solução de cloreto de amônio foi usada como extrator de cátions do solo. Boeira et al. (2004) utilizaram 64 solos, parte (50) proveniente do município de Petrolina-PE, com predomínio de Argissolos, e os demais do município de Jaguariúna-SP de um Latossolo Vermelho distroférico. A solução utilizada pelos autores foi NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, na relação solo:solução de 1:10 (5,0 g de solo e 50 mL de solução). A mistura solo-solução foi agitada por 5 min em agitador orbital, a 120 ciclos/min, e deixada em repouso durante a noite. Os autores não especificaram o diâmetro orbital da mesa agitadora, que, possivelmente, tem pouca influência na extração de K. Nesse procedimento, os extratos límpidos são pipetados e a determinação feita por espectrofotometria de absorção atômica com gás acetileno para Ca, Mg, e Mn, e com gás óxido nitroso para Al. O K foi determinado por espectrometria de emissão (fotometria). Segundo os autores, a extração simultânea de todos os cátions estudados com NH_4Cl foi comparável, quanto aos valores, às soluções de Mehlich-1 e de KCl .

Assim, a solução de cloreto de amônio é um extrator multielementar que pode ser uma alternativa aos laboratórios de análise de solo de rotina em substituição aos extratores tradicionalmente utilizados que possuem alguma limitação, química ou operacional, principalmente naqueles que dispõem da

técnica de espectrofotometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

3. ESTUDO I

SOLUÇÃO DE CLORETO DE AMÔNIO COMO EXTRATOR ALTERNATIVO PARA DETERMINAÇÃO DE CÁTIONS TROCÁVEIS DO SOLO

RESUMO:

A maioria dos laboratórios brasileiros de análise de solo usam a solução Mehlich-1 para a determinação de fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na), e a de cloreto de potássio ($\text{KCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$) para cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn) e alumínio (Al), em amostras de solos agrícolas. Os demais utilizam uma combinação de dois extratores, resina de troca iônica, e solução de $\text{KCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Com a recente adoção da técnica de espectrofotometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) pelos laboratórios de análise de solo de rotina, a extração dos cátions trocáveis do solo com cloreto de amônio ($\text{NH}_4\text{Cl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$) tornou-se uma alternativa, devido à possibilidade de determinar todos os elementos passíveis de troca em apenas uma extração (Ca, Mg, K, Mn, Na e Al). Para avaliar o desempenho da solução de NH_4Cl , um experimento foi realizado com 37 amostras de solos representativos do estado do Rio Grande do Sul. Duas soluções extratoras, Mehlich e NH_4Cl , com 3 tempos de agitação (5, 30 e 60 min) e relação solo:solução 1:10 e 1:20 (v/v), respectivamente, foram comparadas às soluções padrão de KCl (para os elementos Al e Mn) e de acetado de amônio (AcNH_4) (para os elementos Ca, Mg e K) com agitação por 30 minutos e relação solo:solução 1:20 (v/v). Os coeficientes de correlação entre todos os métodos foram altos. No entanto, os valores obtidos pela solução de Mehlich-1 foram, em geral, menores que os obtidos por AcNH_4 e NH_4Cl , mesmo quando o tempo de agitação foi aumentado de cinco para 30 ou 60 minutos de agitação. Para o método Mehlich-1, as quantidades extraídas de Ca e de Mg aumentaram com o incremento no tempo de agitação, assim como as de fósforo. No caso de P, isso não é desejável, pois os estudos de correlação e de calibração foram efetuados com o tempo de cinco minutos de agitação. As quantidades obtidas de Ca, Mg e K, e as de Al e Mn pela solução $\text{NH}_4\text{Cl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$, com tempo de agitação de 60 minutos, foram semelhantes as obtidas pelos procedimentos

padrão de AcNH_4 (K) e de KCl (Ca, Mg, Mn, Al e Na). A determinação de Al por titulometria do extrato de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, proporcionou resultados um pouco maiores do que aqueles obtidos por determinação direta em ICP-OES em extrato de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Em geral, os resultados obtidos indicam que é possível substituir as soluções tradicionais Mehlich-1 e KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, na extração de cátions trocáveis do solo pela solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, com tempo de agitação de 60 minutos e relação solo:solução de 1:20.

Palavras chaves: Potássio trocável, Extração multielementar.

3.1. INTRODUÇÃO

Os nutrientes trocáveis do solo podem ser determinados por diversos procedimentos e muitos destes apresentam resultados comparáveis. A escolha de qual método usar depende do tipo de solo, da disponibilidade de equipamentos e, em algumas situações, exclusivamente da preferência do pesquisador. Os laboratórios de análise de solo do Brasil têm usado a solução de Mehlich-1 e a resina de troca iônica para determinar o fósforo e o potássio disponíveis no solo e a solução de cloreto de potássio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e resina de troca iônica para extração de cálcio, magnésio, potássio, sódio, alumínio, e manganês (Raij, 2011).

Historicamente, a solução de acetato de amônio (AcNH_4) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, tamponada a pH 7,0 é usada para estimar K, Ca e Mg trocáveis no solo, sendo considerada um procedimento referência. Todos os outros extratores, em geral, são comparados com essa solução para a determinação dos cátions trocáveis (Cantarella et al., 2001). Com a modernização da instrumentação e das técnicas de análise, no entanto, o uso de extratores universais que permitem a medição de maior número de elementos em uma única extração tem sido muito estimulado. Exemplo disso é a solução de Mehlich-3 (Bortolon et al., 2010), em cujo extrato podem ser determinados até 13 elementos, incluindo Al, Mn, B e S. Como este método não é utilizado no Brasil em análise de solo de rotina, todos os laboratórios de análise de solo são forçados a usar $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ KCl como método padrão para determinação de Al e Mn.

Em um procedimento mais frequentemente utilizado, fósforo e potássio, extraídos por Mehlich-1, são determinados por espectrofotometria visível (colorímetro) e fotometria de chama, respectivamente; cálcio, magnésio,

manganês e alumínio, extraídos por solução de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, são determinados por espectrofotometria de absorção atômica (AA) (Ca, Mg e Mn) e por titulometria (Al). Além de todas estas etapas envolvidas, no caso da determinação em equipamento de absorção atômica, há a possibilidade de formação de depósitos de sal na fenda do queimador e obstrução frequente do nebulizador (Stuanes et al., 1984). No caso do ICP-OES, todo o sistema de introdução de amostra é afetado, diminuindo o fluxo de solução que é injetado no plasma. Estas dificuldades são superadas somente com a frequente limpeza e recalibração dos instrumentos. É inviável a determinação de potássio em qualquer desses equipamentos sem uma intensa limpeza do sistema de entrada de amostras, devido à alta concentração de cloreto de potássio na solução utilizada para a extração dos cátions trocáveis.

Considerando a recente introdução da técnica ICP em muitos laboratórios de análise de solo do Brasil, a utilização de uma solução como agente de extração que permitisse a determinação de Ca, Mg, K, Na, Al e Mn no mesmo extrato e não apresentasse os problemas mencionados acima seria, provavelmente, muito vantajosa. A solução de NH_4Cl pode ser usada alternativamente à de KCl, por permitir a extração simultânea de Ca, Mg, K, Na, Mn e Al e sua determinação simultânea em ICP-OES, o que aumenta significativamente a eficiência dos laboratórios. Shuman e Duncan (1990) compararam a solução de NH_4Cl com a de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 e a de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Concluíram que o cloreto de amônio pode ser utilizado como o único agente de extração para os elementos citados acima, conquanto a terminação de Al seja feita por ICP ou por absorção atômica com a utilização de gás óxido nitroso como comburente.

O objetivo deste trabalho foi comparar quatro métodos de extração de K, Ca, Mg, Al, e Mn: acetato de amônio (AcNH_4), cloreto de potássio (KCl), Mehlich-1 e cloreto de amônio (MH_4Cl), considerando a solução de AcNH_4 como padrão para a extração de Ca, Mg e K e a de KCl como padrão para os elementos alumínio e Mn.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado nas instalações do Laboratório de Análises de Solo do Departamento de Solos, da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foram selecionadas amostras de 37 solos representativos do estado, com grande variabilidade das propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Tabela 1). A maior parte dos solos incluídos no estudo pertence à ordem Latossolos e alguns deles às ordens Argissolos, Vertissolos e Chernossolos. Todas as amostras foram coletadas a uma profundidade de 0-20 cm, secas em estufa a 45°C e tamisadas em peneira com malha de 2 mm de diâmetro.

Os extratores utilizados como referência neste estudo foram as soluções de acetato de amônio (AcNH_4) 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0 para a extração de Ca, Mg, K, trocáveis e a solução de KCl 1,0 mol L⁻¹ para Al e Mn. A solução Mehlich-1 foi incluída como extrator de K por ser utilizada, na maioria das regiões do Brasil, como indicador da quantidade de K disponível para as culturas. O procedimento sugerido neste trabalho para substituir a solução de KCl, utilizada em todos os laboratórios brasileiros de análise de solos para a extração de Ca, Mg, Al e Mn, à exceção dos que utilizam a resina trocadora de íons, é a solução de NH_4Cl 1,0 mol L⁻¹. Nesta solução, além dos cátions Ca, Mg, Na e Al e Mn é possível a extração do elemento potássio. Os resultados obtidos com esta solução são comparados aos obtidos pelos procedimentos padrão descritos acima.

O procedimento utilizado para o acetato de amônio foi uma modificação de Helmke & Sparks (1996), em que 2,5 mL de solo foram colocados num frasco Erlenmeyer de 125 mL sendo acrescentados, em seguida, 50 mL da solução de AcNH_4 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0. Os frascos foram imediatamente agitados por 30 min em agitador horizontal de movimento alternado e, após, deixados em repouso pelo período de duas horas. Em sequência, foram pipetados 5,0 mL do sobrenadante para um frasco plástico com capacidade de 50 mL e adicionados 25 mL de água deionizada. Aproximadamente 10 mL dessa solução foram transferidos para tubos de plástico para a determinação de K, Ca, Mg por espectrofotometria de emissão ótica (ICP-OES), Perkin Elmer 7200.

Tabela 1. Algumas propriedades físicas e químicas dos solos utilizados no estudo I selecionados do banco de solos do LAS-UFRGS

Amostra	Solos	Argila M.O. ¹		pH ²	P ³	Cátions trocáveis ⁴				T	V%
		%				K	Al	Ca	Mg		
		-----%			mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----					%
1	Neossolo	33	2,4	4,4	17,3	0,41	15,0	7,0	2,6	62	16
2	Chernossolo	40	2,6	6,1	52,3	0,33	0	16,0	3,6	23	87
3	Chernossolo	28	4,6	7,2	295,6	2,66	0	19,5	4,4	29	95
4	Latossolo	51	3,0	5,0	3,9	0,10	0,8	11,6	4,3	24	66
5	Neossolo	20	2,0	4,9	7,8	0,17	1,6	2,0	0,4	7	39
6	Cambissolo	32	5,5	4,9	5,7	0,26	1,4	5,1	2,9	21	39
7	Latossolo	37	4,3	5,5	11,5	0,17	0	6,0	2,7	15	60
8	Latossolo	48	5,8	5,8	11,6	0,46	0	9,1	3,5	18	72
9	Cambissolo	10	12,5	5,5	22,9	0,16	0	8,5	2,5	20	55
10	Argissolo	19	3,0	7,2	15,1	0,34	0	15,6	3,7	21	96
11	Argissolo	3	1,4	5,6	19,0	0,39	0	3,6	0,9	8	60
12	Latossolo	30	5,4	5,9	17,0	0,50	0	8,8	4,9	19	78
13	Argissolo	4	2,5	5,5	74,7	0,29	0	3,8	0,7	8	60
14	Latossolo	40	7,7	5,8	20,0	0,44	0	13,9	4,6	22	85
15	Latossolo	22	3,8	6,0	31,6	0,73	0	7,8	2,5	15	75
16	Latossolo	30	6,3	6,9	135,8	0,82	0	17,5	3,4	23	95
17	Argissolo	19	2,6	4,9	5,1	0,29	1,2	2,2	1,1	9	40
18	Neossolo	20	3,1	7,1	113,3	0,89	0	12,3	4,2	19	91
19	Neossolo	10	1,6	5,8	18,5	0,44	0	3,6	1,1	10	53
20	Vertissolo	27	4,0	5,6	5,4	0,66	0	12,5	4,2	23	75
21	Latossolo	32	1,7	6,6	4,7	0,28	0	6,2	4,4	13	83
22	Latossolo	34	2,4	5,9	14,3	0,63	0	7,5	2,5	15	70
23	Latossolo	60	2,6	5,1	17,8	0,12	0,3	5,7	2,2	13	61
24	Latossolo	41	2,9	5,6	13,6	0,39	0	6,5	2,8	15	64
25	Chernossolo	21	2,5	5,9	42,4	0,81	0	15,2	4,8	23	89
26	Latossolo	38	3,7	5,3	9,4	0,45	0,2	6,1	2,1	16	56
27	Cambissolo	40	3,6	4,6	19,3	0,60	2,5	4,7	1,4	23	29
28	Argissolo	6	1,0	6,0	9,6	0,14	0	1,2	0,6	4	52
29	Neossolo	37	4,8	4,8	4,8	0,28	4,7	3,4	1,7	28	19
30	Latossolo	51	5,1	6,0	53,2	0,86	0	16,1	7,8	27	91
31	Argissolo	10	1,6	5,2	9,9	0,23	0,5	1,2	0,4	6	28
32	Argissolo	11	3,4	5,6	48,8	0,63	0	6,5	2,0	12	75
33	Latossolo	42	2,0	6,7	26,9	0,44	0	11,7	2,6	16	91
34	Latossolo	42	3,5	5,5	9,8	0,84	0	11,4	2,9	21	73
35	Argissolo	12	1,8	4,6	149,1	0,14	1,2	1,4	0,4	15	13
36	Latossolo	48	3,4	5,4	12,5	0,54	0,1	5,6	1,4	13	57
37	Latossolo	33	3,9	6,1	4,7	3,29	0	7,9	4,8	19	85

¹Tedesco et al.(1995); ² pH em H₂O, relação solo:solução 1:10; ³Mehlich-1; ⁴ KCl 1,0 mol L⁻¹.

O procedimento descrito anteriormente é considerado padrão para a extração e determinação dos cátions trocáveis Ca, Mg e K, sendo os demais

métodos de extração comparados com ele. Para os métodos de NH_4Cl e KCl , o mesmo protocolo descrito acima foi usado, exceto para o cloreto de amônio, em que foram incluídos mais dois tempos de agitação: 5 e 60 minutos. Para os três tempos de agitação, os teores de Ca, Mg, K, Al e Mn extraídos por NH_4Cl , foram comparados aos métodos padrão. O Al extraído pelo KCl também foi determinado pela técnica titulométrica e é considerado valor de referência para fins de comparação com o extraído por NH_4Cl .

O procedimento utilizado no método Mehlich-1 foi uma modificação de Mehlich (1953), em que 3,0 mL de solo foram colocados num frasco Erlenmeyer de 50 mL e acrescentados 30 mL de solução duplo ácido (H_2SO_4 0,125 mol L^{-1} e HCl 0,05 mol L^{-1}). A mistura solo-solução foi agitada em agitador orbital de movimento alternado, a 125 ciclos/min durante 5 minutos e, após, deixada em repouso pelo período de duas horas. Em seguida, o sobrenadante foi filtrado em tela de seda com orifícios de 63 μm de diâmetro. Aproximadamente 10 mL do filtrado límpido foram transferidos para tubos de plástico e a determinação de K feita por espectrofotometria de emissão ótica (ICP). Com o objetivo de verificar o efeito do tempo de agitação na quantidade de K extraído por este método foram incluídos os tempos de agitação de 5 e 60 minutos.

A análise de regressão simples foi utilizada para avaliar as diferenças nas capacidades de extração entre os métodos. Os parâmetros "a" (intercepção) e "b" (inclinação) da reta de regressão foram comparados com os valores ideais de zero e um (1), com intervalo de confiança de 95% (Miller & Miller 2005). Foi realizado também um teste t entre os pares de média dos diferentes métodos.

As determinações dos elementos em todos os métodos foram realizadas em triplicata e foram utilizados os valores médios na confecção de gráficos e tabelas.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Potássio

A quantidade de potássio extraída pela solução de Mehlich-1 foi significativamente diferente da extraída por AcNH_4 . O ângulo de inclinação e o intercepto das equações de regressão (Figura 1A, 1B e 1C) foram diferentes de "1" e "0", respectivamente, independentemente do período de agitação (Tabela 2), indicando que os dois métodos extraíram diferentes quantidades de potássio dos solos utilizados no experimento.

Uma comparação pelo teste "t" entre as médias do método Mehlich-1 com as determinadas pelo AcNH_4 , indicou diferença muito significativa até 30 minutos de agitação (AcNH_4 – Mehlich-1) com valores de 4,53 e 3,61 ($p < 0,01$) (Tabela 2), para os tempos de 5 e 30 minutos de agitação, respectivamente. No entanto, com 60 minutos de agitação, o teste "t" a 1% de significância, não indicou diferença. Apesar do elevado coeficiente de correlação ($r = 0,95$), é evidente que a solução de Mehlich-1 não extrai a mesma quantidade de K que a solução de acetato de amônio, principalmente em solos com elevado teor de potássio. No entanto, quantidades semelhantes de K foram extraídas nos solos com teor menor que $0,30 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ (Figura 1A, 1B e 1C). Estes resultados são confirmados em estudos feitos recentemente por vários outros autores (Zbiral & Nemeč, 2005; Hosseinpour & Samavati, 2008; Bortolon et al., 2010). Pode ser especulado que a maior capacidade de extração da solução de acetato de amônio é devido à capacidade do cátion NH_4^+ em substituir K na região interlamelar de minerais 2:1. Por outro lado, a solução Mehlich-1 pode não ter força suficiente em solos altamente tamponados e/ou com alta capacidade de troca de cátions (CTC).

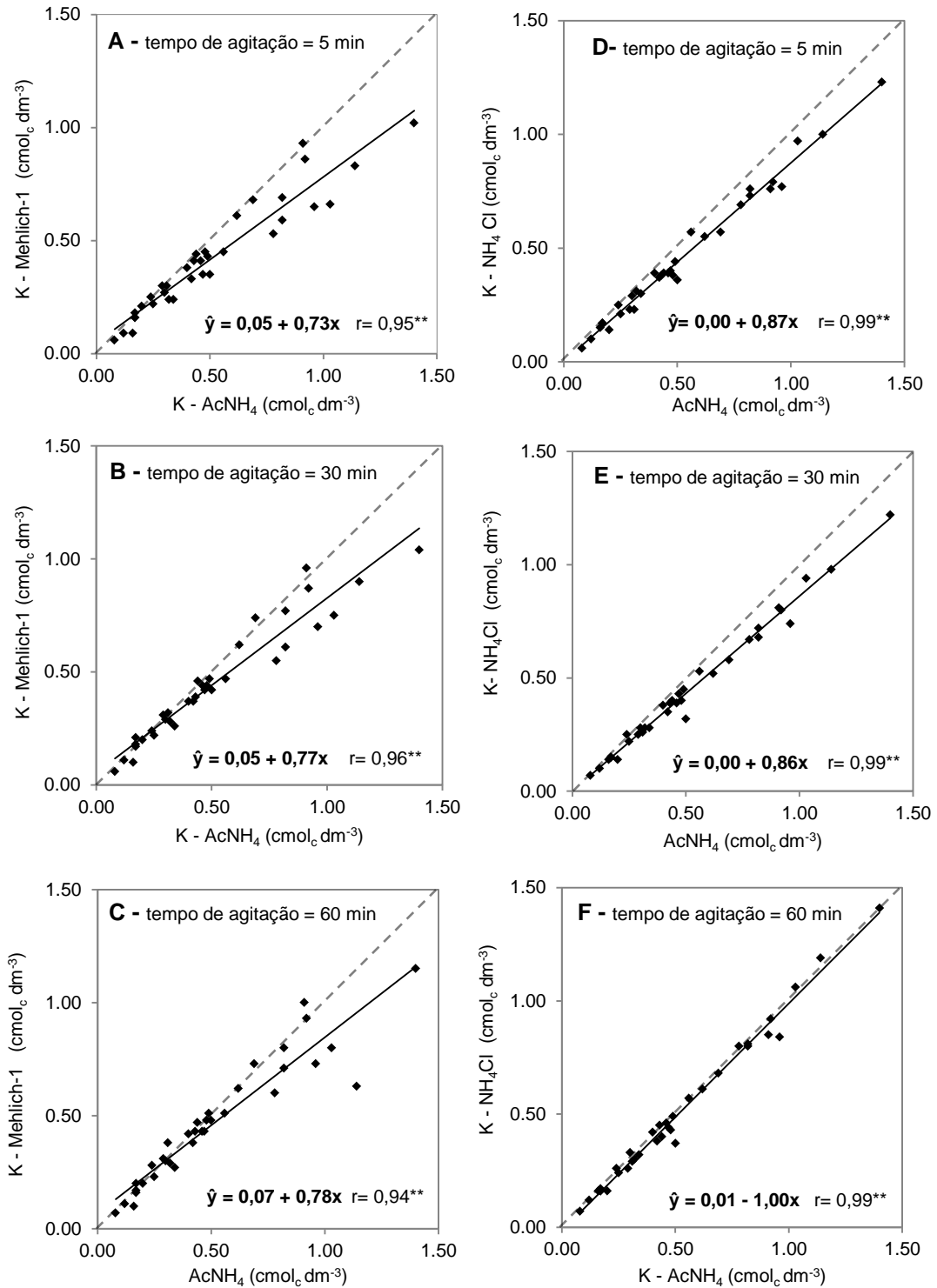


Figura 1. Relação entre as quantidades extraídas de potássio pela solução de Mehlich-1 e de NH_4Cl 1,0 mol L^{-1} em três tempos de agitação e a quantidade extraída pela solução padrão de AcNH_4 1,0 mol L^{-1} . [A linha pontilhada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos estariam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos)].

A relação entre K trocável extraído por NH_4Cl e AcNH_4 é apresentada nas Figuras 1D, 1E e 1F, para os tempos de 5, 30 e 60 minutos de agitação,

respectivamente. Os valores de intercepto da equação de regressão não foram significativamente diferentes de zero (Tabela 2) para os tempos de 5 e 30 minutos. A inclinação da regressão, no entanto, difere significativamente de "1", em ambos os períodos, indicando, de acordo com Miller & Miller (2005), ter ocorrido um erro sistemático. Para a solução de NH_4Cl com 60 minutos de agitação, os valores de "a" (intercepto) e "b" (inclinação) não foram significativamente diferentes de zero e um, respectivamente (Tabela 2). Logo, há evidência de que as duas soluções, nestes procedimentos, extraem quantidades equivalentes de K trocável dos solos utilizados no estudo. Ao se comparar as médias pelo teste "t" ($t=2,24$, $p<0,01$), confirmou-se a semelhança entre os procedimentos (Tabela 2). O eventual erro manifestado anteriormente foi corrigido com o aumento do tempo de agitação.

Tabela 2. Intervalos de confiança (IC 95 %) dos coeficientes lineares (a) e angulares (b) das curvas de regressão linear obtidos nas comparações entre os extratores testados* e os valores t Student para as diferenças entre as médias

Nutriente	Extrator (tempo em minutos)	IC "a" ($p < 0,05$)	IC "b" ($p < 0,05$)	t
K	M-1 ₍₅₎ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	0,00 ; 0,10	0,65 ; 0,81	4,53 ^{**}
K	M-1 ₍₃₀₎ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	0,01 ; 0,10	0,70 ; 0,85	3,61 ^{**}
K	M-1 ₍₆₀₎ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	0,01 ; 0,13	0,68 ; 0,87	2,30 [*]
K	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(5)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,02 ; 0,02	0,83 ; 0,91	7,65 ^{**}
K	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(30)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,02 ; 0,02	0,82 ; 0,89	8,63 ^{**}
K	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(60)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,04 ; 0,01	0,96 ; 1,04	2,24 [*]
Ca	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(5)}$ (\hat{y}): NH_4Ac_4 (x)	-0,22 ; 0,41	0,89 ; 0,97	4,30 ^{**}
Ca	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(30)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,19 ; 0,34	0,94 ; 1,00	2,25 [*]
Ca	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(60)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,16 ; 0,33	0,98 ; 1,03	-2,11 [*]
Mg	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(5)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,12 ; 0,07	0,96 ; 1,03	1,37 ^{ns}
Mg	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(30)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,15 ; 0,06	0,96 ; 1,03	1,69 ^{ns}
Mg	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(60)}$ (\hat{y}): NH_4Ac (x)	-0,04 ; 0,20	0,96 ; 1,04	-2,47 [*]
Al	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(30)}$ (\hat{y}): KCl (x)	0,02 ; 0,09	0,71 ; 0,77	2,10 [*]
Al	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(60)}$ (\hat{y}): KCl (x)	0,00 ; 0,08	0,81 ; 0,88	1,57 ^{ns}
Al	KCl ICP (\hat{y}): KCl (x)	0,00 ; 0,15	1,14 ; 1,29	3,93 ^{**}
Al	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(60)}$ (\hat{y}): KCl ICP (x)	0,05 ; 0,15	0,98 ; 1,09	-5,22 ^{**}
Mn	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(30)}$ (\hat{y}): KCl ICP (x)	0,00 ; 0,02	0,79 ; 0,87	4,42 ^{**}
Mn	$\text{NH}_4\text{Cl}_{(60)}$ (\hat{y}): KCl ICP (x)	0,00 ; 0,02	0,85 ; 0,94	2,70 ^{**}

*Foram usados o tempo de decantação de duas horas para todos os métodos, relação solo:solução de 1:10 para Mehlich-1 e Mehlich-3 e de 1:20 para AcNH_4 , NH_4Cl e KCl .

M-1= Mehlich-1, AcNH_4 = acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4Cl = cloreto de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, KCl = cloreto de potássio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (titulação de retorno), KCl ICP = cloreto de potássio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (determinação em ICP-OES). ^{ns} = não significativo; *, ** significativo ($p < 0,05$) e ($p < 0,01$), respectivamente.

Os resultados demonstraram claramente que a solução de NH_4Cl , quando o período de agitação foi aumentado para 30 e 60 minutos, extraiu a mesma quantidade de K que o procedimento padrão com AcNH_4 , apresentando coeficientes de correlação muito próximos a "1" (0,99 e 0,98, respectivamente), independente do período de agitação, com um desempenho melhor do que a solução de Mehlich-1. Esses resultados também são confirmados na literatura por diversos autores (Shuman & Duncan 1990; Boeira et al. 2004; Bortolon et al. 2010).

3.3.2. Cálcio e Magnésio

O parâmetro "a" da equação de regressão linear para a relação entre teores de Ca e Mg trocáveis extraídos pelas soluções de NH_4Cl (y) e AcNH_4 (x) não foi significativamente diferente de zero (Tabela 2) para os três períodos de agitação, indicando que a solução de NH_4Cl extrai quantidades semelhantes desses elementos àqueles extraídos pela solução padrão de acetato de amônio, independente do período de agitação utilizado (Figura 2) para os solos estudados. No entanto, o coeficiente angular da reta para os teores de Ca, no tempo de 5 minutos de agitação, foi significativamente menor do que 1 (Figura 2A).

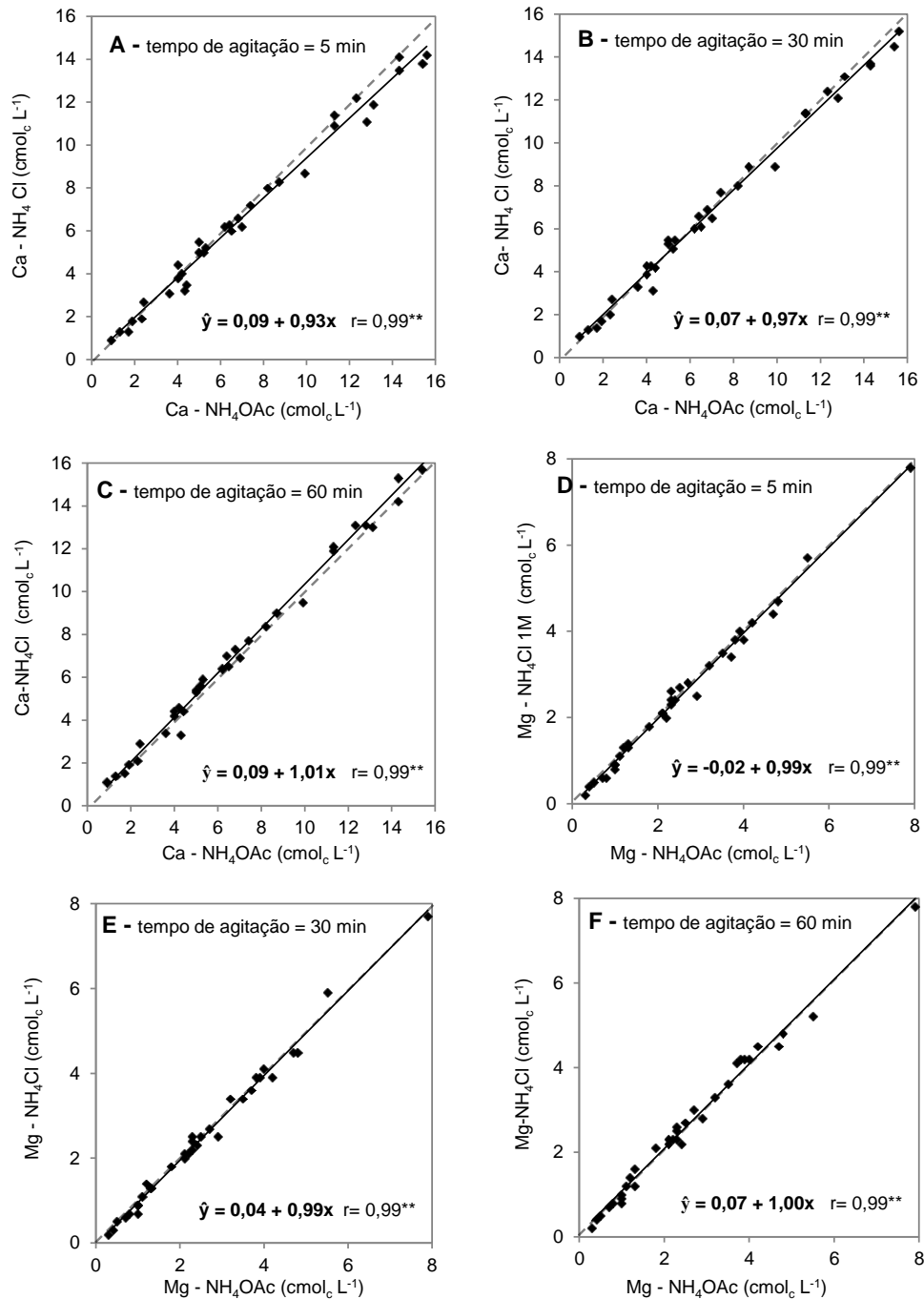


Figura 2. Relação entre as quantidades de Ca e Mg trocáveis extraídas pela solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ em três tempos de agitação e a quantidade extraída por AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. [A linha pontilhada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos estariam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos)].

O tempo de 5 minutos, provavelmente não foi suficiente para todo o Ca ser deslocado pelo cátion NH_4^+ , uma vez que no procedimento padrão com AcNH_4 o tempo de agitação é de 30 minutos. Para os tempos de 30 e 60

minutos de agitação, os coeficientes de correlação foram próximos de “1” ($r=0,99$), assim como os coeficientes angulares (Figura 2B e 2C). O teste “t” para as médias indicou diferença muito significativa para o tempo de agitação de 5 minutos ($t = 4,30$ $p<0,01$), indicando, que este tempo de agitação não é suficiente para deslocar todo o cálcio trocável existente nos solos.

Os valores de Mg extraído por NH_4Cl (y) e AcNH_4 (x) foram semelhantes para todos os solos estudados e não foram afetados pelo período de agitação. O coeficiente linear e a inclinação da equação ajustada não diferiram significativamente de zero e 1, respectivamente, para todos os períodos de agitação estudados (Tabela 2). Os coeficientes de correlação foram muito altos (0,99) e não se alteraram quando foram utilizados diferentes tempos de agitação para o NH_4Cl . Esta solução é altamente eficiente na extração de Mg trocável do solo. Os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados por Shuman & Duncan (1990) e com resultados de Ulrika et al. (2002), que após um estudo com 221 amostras de solos dos Estados Unidos e 38 amostras da Noruega concluíram ser uma solução adequada para a determinação do teor de Ca e de Mg em solos.

A capacidade de extração semelhante de ambos os métodos (NH_4Cl 1,0 mol L^{-1} e AcNH_4 1,0 mol L^{-1}) pode estar relacionada às características químicas das soluções. Além da mesma concentração, ambas têm o mesmo cátion extrator (NH_4^+) e, por consequência, princípio semelhante de extração. Outra vantagem para os laboratórios de análise de solo está no tempo mais longo de armazenamento do NH_4Cl , quando comparado ao tempo de prateleira do acetato de amônio.

3.3.3. Alumínio e manganês

Para os cátions Al e Mn, a comparação foi feita com períodos de agitação de 30 e 60 minutos somente, tendo em vista que a maioria dos laboratórios de análise de solo no Brasil utiliza a solução de KCl 1,0 mol L^{-1} e 30 minutos de agitação como procedimento padrão. A quantidade de Al trocável extraído por NH_4Cl 1,0 mol L^{-1} , com 30 minutos de extração e posterior determinação direta por ICP, foi menor que o teor obtido por leitura indireta de titulação no extrato de KCl mol L^{-1} (Figura 3A). A interseção e a inclinação da

equação de regressão foram diferentes de zero e 1, respectivamente (Tabela 2). No entanto, com maior tempo de agitação (Figura 3B) não foram observadas diferenças significativas no parâmetro "a" (intercepto) entre os dois extratores, embora o valor "b" (inclinação) seja significativamente diferente de 1 ($b = 0,84$). Provavelmente, isto se deve a um erro sistemático com a técnica de titulação de retorno, uma vez que o íon a ser titulado é, de fato, o hidrogênio e não o alumínio o que pode levar a uma superestimação de alumínio trocável no solo. Comportamento semelhante foi observado quando se compararam os valores de alumínio obtidos por titulação de retorno com aqueles obtidos pela técnica de ICP em extrato de KCl (Figura 3C).

A figura 3D mostra boa concordância entre o alumínio extraído com NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, quando determinados pela técnica de ICP. Resultados semelhantes foram obtidos por Boeira et al. (2004), utilizando a técnica de absorção atômica com gás óxido nítrico para determinar Al extraído por ambas as soluções.

A solução de cloreto de amônio foi eficiente também na extração de manganês trocável (Figura 3E e 3F). O intercepto da equação de regressão não diferiu significativamente de zero em ambos os períodos de extração. No entanto, a declividade foi significativamente diferente de "1", mesmo quando o tempo de extração foi aumentado para 60 minutos. Além deste fato, os coeficientes de correlação foram muito próximo de 1 ($r = 0,99$) para ambos os tempos de agitação. A observação atenta da Figura 3F indica que, para valores de até $0,30 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ as quantidades de manganês extraído por ambos os métodos são semelhantes. Para análise de rotina do solo, valores elevados são de pouca importância, uma vez que em solos ácidos (maioria dos solos do estado do Rio Grande do Sul), com a correção da acidez o pH será aumentado para próximo a 6,0 e a quantidade de manganês trocável tende sempre estar abaixo de $0,30 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$. É possível concluir, portanto, que o cloreto de amônio também é adequado para a determinação de manganês trocável do solo.

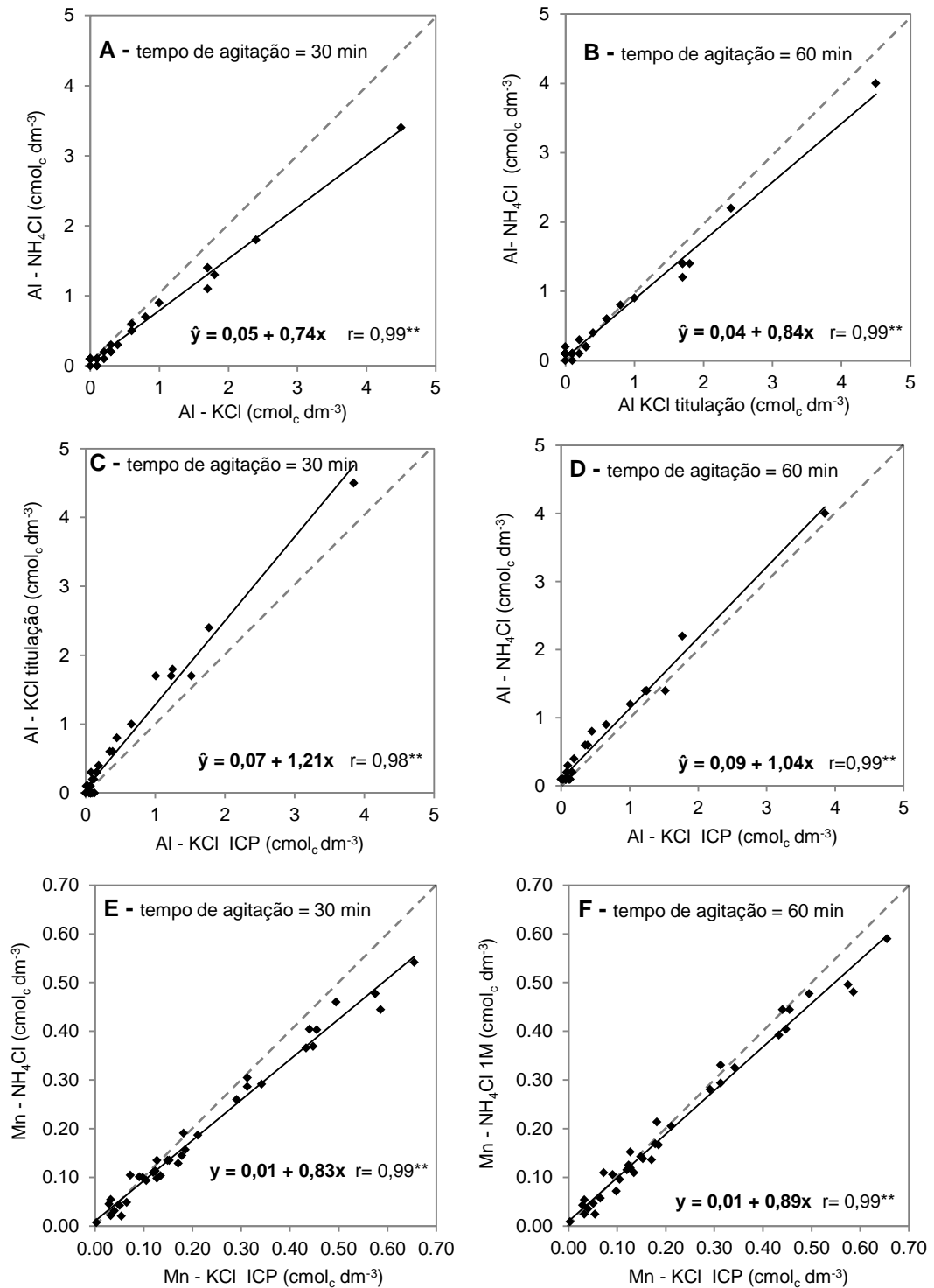


Figura 3. Relação entre quantidades de Al trocável e de Mn extraídas por diferentes procedimentos: Al e Mn por NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹, em dois períodos de agitação e por KCl 1,0 mol L⁻¹, determinado por titulação de retorno (Al) e ICP (Al e Mn). [A linha pontilhada indica a relação de 1:1 (ou seja, onde os pontos estariam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos).]

3.4. CONCLUSÕES

1 - A solução Mehlich-1 extrai quantidades menores de K trocável do solo em relação à solução padrão de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, mesmo quando o tempo de agitação é aumentado até 60 minutos.

2 - O teor de Al trocável é superestimado quando determinado pela técnica de titulometria em relação à determinação direta por espectrofotometria de emissão ótica (ICP-OES), independente do extrator, KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ou NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$.

3 - A solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ com 60 minutos de agitação é eficaz na extração de Ca, Mg, K, Mn e Al nos solos estudados, não diferindo das soluções padrão de AcNH_4 e KCl, podendo ser utilizada para substituir as extrações de K por Mehlich-1, e Ca, Mg, Al e Mn por KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, quando for utilizada a técnica de espectrofotometria de emissão ótica (ICP-OES).

4 - Laboratórios que não utilizam a técnica de espectrofotometria de emissão ótica (ICP-OES) não têm vantagem na substituição da solução de KCl por NH_4Cl , pois esta não permite a determinação de Al trocável por titulação de retorno.

3.5. AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado, em parte, pelos projetos de extensão do Laboratório de Análise de Solo (LAS) do Departamento de Solos da UFRGS e pela FAURGS (Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

4. ESTUDO II

CALIBRAÇÃO DOS PERIODOS DE AGITAÇÃO E DE DECANTAÇÃO E DA RELAÇÃO SOLO:SOLUÇÃO PARA A SOLUÇÃO DE CLORETO DE AMÔNIO COMO EXTRATOR DE POTÁSSIO TROCÁVEL EM SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

RESUMO

Estudo de correlação de métodos é definido, em geral, como a relação entre a quantidade extraída de um nutriente por um método de laboratório e a quantidade absorvida pelas plantas. Contudo etapas de preliminares devem ser executadas a fim de se calibrar cada método para os solos da região de interesse. Para isso, foi desenvolvido um estudo no Laboratório de Análises da Faculdade de Agronomia-UFRGS, com 12 solos representativos do Estado do Rio Grande do Sul. O teor de K disponível/extraível dos solos foi determinado pelas soluções extratoras Mehlich-1 e NH_4Cl em diferentes procedimentos (Relação solo:solução de 1:5, 1:10 e 1:20; tempo de agitação de 5, 30 e 60 minutos e tempo de decantação de 2 e 16 horas). Os diferentes procedimentos foram comparados ao método padrão com acetato de amônio a pH 7,0. A capacidade de extração de K da solução de cloreto de amônio, para os solos estudados, foi pouco influenciada pela relação solo:solução e tempo de decantação quando o tempo de agitação igual ou superior a 30 minutos. O potássio extraído pela solução de Mehlich-1 de solos muito tamponado (alta CTC) e com altos teores de K é menor, pois sua capacidade de extração é muito menor que a do método padrão de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, independente do aumento na relação solo:solução ou dos tempos de agitação e/ou decantação. Em regiões com solos pouco tamponados e com características mineralógicas semelhantes, o método Mehlich-1 conforme o procedimento proposto por Tedesco et al. (1995)

extrai quantidades de K semelhantes ao K trocável extraído pela solução padrão de acetato de amônio.

4.1. INTRODUÇÃO

Correlação de métodos de análise de solos é definida, em geral, como a relação entre a quantidade extraída de um nutriente por um método de laboratório e a quantidade absorvida por plantas cultivadas por curto espaço de tempo em casa-de-vegetação. Contudo, é necessária a execução de inúmeras etapas anteriores a esse estudo, para o desenvolvimento ou adaptação do(s) método(s) proposto(s). Exceto poucas exceções, os métodos utilizados no Brasil, se constituem em modificações ou adaptações daqueles desenvolvidos em outras partes do mundo nas décadas de 1950 a 1980. Assim, a escolha da maioria dos métodos e seus procedimentos foram feitos com o objetivo de facilitar o processo de rotina laboratorial. O exemplo elucidativo disso foi a alteração do tempo de decantação da mistura solo-solução do método Mehlich-1 para os laboratórios do sul do Brasil. Em vez da filtragem logo após a agitação, deixa-se decantar por 16 horas (Anghinoni & Bohnen, 1974). Não houve qualquer princípio técnico envolvido e sim econômico. À época, o custo do papel filtro era muito elevado, pois o de alta qualidade era importado, além da não disponibilidade no mercado interno. Logo, a solução para o problema foi deixar decantar por 16 horas, período correspondente à pausa do laboratório. Quando do desenvolvimento ou adaptação da metodologia no Brasil, não houve a preocupação de selecionar soluções extratoras com capacidade multielementar, à exceção dos cátions trocáveis, cuja extração sempre foi feita por, pelo menos, duas soluções. Uma para a extração de Ca, Mg, Mn e Al (solução de KCl 1 mol L⁻¹ ou resina de troca iônica) e outra para a extração de K e Na (solução de Mehlich-1 ou resina de troca iônica). Com o advento da técnica de espectrofotometria de emissão ótica com capacidade multielementar, surgiram novas soluções e novos procedimentos. Foi assim com método Mehlich-3 (Mehlich, 1984) em que, em circunstâncias específicas de regiões norte americanas, é possível a determinação de até 11 elementos (P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Na, Fe, S, B e Al). Esse método, no entanto, não é adequado para solos do Brasil devido a sua mineralogia (Bortolon et al., 2010).

Uma solução extratora promissora para ser utilizada em laboratórios de rotina com tecnologia ICP é o cloreto de amônio (NH_4Cl) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Nesta solução, podem ser determinados todos os cátions trocáveis, inclusive o alumínio. Contudo, são poucos os trabalhos em que essa solução foi testada, pois a utilização da mesma em substituição à solução de cloreto de potássio (KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$) é desvantajosa, por não permitir a determinação de alumínio por titulometria. Para que seja possível sua utilização em laboratórios que possuem a tecnologia de determinação de elementos por espectrofotometria de emissão ótica (ICP), é necessário o desenvolvimento de procedimentos analíticos adequados a esta técnica e que reproduzam os valores obtidos pelos métodos padrão em uso na rotina de laboratórios de solos de determinada região.

Os métodos utilizados pelos laboratórios no Brasil têm procedimentos distintos, dependendo da região em que foram desenvolvidos ou adaptados. Assim, na descrição desses, podem ser encontrados diferentes tempos de agitação e de decantação e diferentes relações solo:solução. Para a extração dos cátions Ca, Mg, Al e Mn pela solução de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, por exemplo, utiliza-se a relação solo:solução 1:20, com tempo de agitação de 30 minutos e 16 horas de decantação; para o Mehlich-1, a relação solo:solução é 1:10, com 5 minutos de agitação e 16 horas de decantação (Embrapa, 1997; Tedesco et al., 1995). O tempo de decantação de 16 horas, proposto por estes autores não está relacionado à capacidade de extração do método, mas à adequação da rotina dos laboratórios de análise. Assim, as amostras são preparadas durante a tarde e deixadas em repouso durante a noite para que ocorra a decantação do solo tornando possível a retirada de uma alíquota límpida do sobrenadante. No extrato, é possível que para alguns elementos ocorra alteração no valor obtido quando o tempo de repouso alterado em relação ao estabelecido na descrição original do método.

Para o NH_4Cl 1 mol L^{-1} , Shuman & Duncan (1990) utilizaram a relação solo:solução 1:10, com 30 minutos de agitação e posterior centrifugação a 2500 rpm. Em seguida, o sobrenadante foi filtrado e a determinação de K feita nesta solução. Já Boeira et al. (2004) utilizaram a relação solo:solução 1:10 com 5 minutos de agitação, permanecendo a mistura solo-solução em repouso durante a noite. Portanto, o mero uso de um ou outro procedimento pode levar

a resultados diferentes. O ajuste do protocolo analítico do método a ser utilizado é importante a fim de que os valores se assemelhem àqueles obtidos pelos métodos padrão que foram usados nos estudos de correlação e calibração para um grupo de solos de determinada região.

O presente estudo tem por objetivo avaliar o efeito do tempo de extração e de decantação e da relação solo:solução das soluções de Mehlich-1 e de cloreto de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ na quantidade de K extraído em solos do Rio Grande do Sul.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Os solos utilizados para esse estudo foram selecionados dentre os 30 solos coletados para o estudo de comparação de métodos (Estudo III, item 4.2). Dentre os solos coletados, foram escolhidos 12 com base na diferença de extração entre os extratores Mehlich-1 e NH_4Cl e em diferentes tipos de mineralogia (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação, localização e teor de K extraível por Mehlich-1 e NH_4Cl de 12 solos do Rio Grande do Sul

Amostra	Solos	Município	K	K	Diferença*
			(NH_4Cl)	(M1)	
			----- mg dm^{-3} -----		
1 PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	Cachoeira do Sul	70	70	0
2 RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Bagé	509	435	74
3 VEO	Vertissolo Ebânico órtico	Uruguaiana	252	137	115
4 SXe	Planossolo Háplico eutrófico	São Lourenço do Sul	107	105	2
5 PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	São Gabriel	75	71	4
6 RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Santiago	453	403	50
7 CHa	Cambissolo. Húmico alumínico	São Francisco de Paula	37	39	-2
8 RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Nova Bassano	858	572	285
9 RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Severiano	372	317	55
10 Mek	Chernossolo ebânico carbonático	Aceguá	661	437	224
11 LVaf	Latossolo Vermelho aluminoférrico	Erechim	115	119	-3
12 LVdf	Latossolo Vermelho distroférico	Boa Vista das Missões	153	162	-9

*K extraído pela solução de NH_4Cl (Relação solo:solução 1:20 e 30 minutos de agitação) menos o K extraído pela solução de Mehlich-1 (Relação solo:solução 1:10 e 5 minutos de agitação).

Seis dos solos apresentaram de 50 a 278 mg dm⁻³ de K a mais quando extraídos com a solução de NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹ em relação à solução de Mehlich-1, utilizada como padrão em laboratórios de rotina do RS e SC. Nos demais solos, os valores de K obtidos pelas duas soluções foram semelhantes.

O estudo foi realizado no Laboratório de Análise de Solos do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O teor de K disponível/extraível dos solos foi determinado por diferentes soluções extratoras e procedimentos, descritos a seguir.

4.2.1. Procedimento acetato de amônio

A solução extratora de acetato de amônio (AcNH₄), 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0, foi utilizada como padrão para a extração de K trocável em solo. Neste procedimento, 2,5 mL de solo foram transferidos para frasco erlenmeyer com capacidade de 125 mL. Foram adicionados, em seguida, 50 mL de solução de AcNH₄ descrita acima, e a mistura solo-solução foi agitada por 30 minutos (min) a 120 ciclos/min em agitador horizontal com comprimento de haste de 22 cm, fixa na base, com deslocamento horizontal de 50 mm na parte superior. Após este período, o frasco permaneceu em repouso por duas horas, com a finalidade de separar o solo do sobrenadante. Em seguida, parte da mistura foi filtrada, cuidadosamente para evitar a transferência de solo, em malha de nylon com diâmetro de orifícios de 63 µm para eliminar qualquer resíduo do sobrenadante. Uma alíquota de 5,0 mL foi transferida para frasco plástico e acrescentados 25 mL de água deionizada como diluidor. Aproximadamente 10 mL da solução diluída foi transferida para tubo plástico com capacidade de 15 mL e o teor de K foi determinado por espectrofotometria de emissão ótica Perkin Elmer 7200 (ICP-OES). Foram feitas três repetições para cada solo, e os valores de K utilizados nas figuras são as respectivas médias. Os valores obtidos foram comparados aos obtidos pelos procedimentos de Mehlich-1 e de NH₄Cl descritos a seguir.

4.2.2. Procedimento Mehlich-1

A solução extratora utilizada neste trabalho foi a descrita em Tedesco et

al. (1995), porém o procedimento foi modificado conforme descrito a seguir. O volume de 3,0 mL de solo foi transferido para frasco erlenmeyer com capacidade de 50 mL. Foram adicionados em seguida 30 mL da solução de Mehlich-1 e a mistura solo-solução foi agitada por 5 min a 120 ciclos/min em agitador orbital de eixo excêntrico com diâmetro orbital (deslocamento do centro) de 50 mm. Após repouso de 2 horas para decantar o solo, a mistura solo-solução foi filtrada, com cuidado para não deslocar o solo do fundo do frasco, em malha de nylon com diâmetro de orifícios de 63 μm para eliminar qualquer resíduo que eventualmente estivesse no sobrenadante. Aproximadamente 10 mL do filtrado foram transferidos para tubo plástico com capacidade de 15 mL e o teor de K da solução foi determinado por espectrofotometria de emissão ótica (ICP-OES). O procedimento descrito é protocolo padrão em laboratório que utiliza essa tecnologia para determinar fósforo e potássio simultaneamente. Para a relação solo:solução 1:5 e 1:20, foram adicionados 6,0 e 1,5 mL de solo, respectivamente, a frasco erlenmeyer de 50 mL e acrescentados 30 mL de solução e foi aplicado o procedimento descrito anteriormente. O procedimento padrão, com relação solo:solução 1:10, também foi aplicado para os tempos de extração de 30 e 60 minutos e para o tempo de decantação de 16 horas. Todas as análises foram feitas em triplicata.

4.2.3. Procedimento cloreto de amônio

A solução de cloreto de amônio foi preparada na concentração de 1,0 mol L⁻¹ e armazenada para posterior utilização. Em frasco erlenmeyer de 125 mL, foram adicionados 2,5 mL de solo e 50 mL da solução de cloreto de amônio. A mistura solo-solução foi agitada a 120 ciclos/min em agitador horizontal com comprimento de haste de 22 cm, fixa na base e com deslocamento horizontal de 50 mm na parte superior, pelos tempos de 5, 30 e 60 minutos. O tempo de agitação de 30 minutos foi considerado padrão. Após o período de agitação, os frascos com a mistura solo:solução permaneceram em repouso por 2 horas para separar o solo do sobrenadante. Em seguida, parte da mistura foi filtrada, cuidadosamente, para evitar a transferência de solo, em malha de nylon com diâmetro de 63 μm para eliminar qualquer resíduo do sobrenadante. Uma alíquota de 5,0 mL foi transferida para frasco plástico e

acrescentados 25 mL de água deionizada como diluidor. Aproximadamente 10 mL da solução diluída foram transferidos para tubo plástico com capacidade de 15 mL e o teor de K determinado por espectrofotometria de emissão ótica (ICP). Para a relação solo:solução 1:5 e 1:10, foram adicionados 10,0 e 5,0 mL de solo, respectivamente, a frascos de 125 mL de capacidade e acrescentados 50 mL da solução de NH_4Cl 1,0 mol L^{-1} , seguindo-se o procedimento padrão descrito anteriormente. Para o tempo de decantação de 16 horas, também foi utilizado o procedimento descrito, com tempo de agitação de 30 minutos.

Os dados obtidos pelas soluções de Mehlich-1 e NH_4Cl , em diferentes tempos de agitação e de decantação e relação solo:solução, foram comparados pelo teste de linhas de regressão linear com os valores obtidos pelo método padrão da solução de acetato de amônio a pH 7,0, e os valores dos parâmetros “a” (intersecção) e “b” (declividade) comparados com os valores ideais de 0 (zero) e 1, respectivamente, pelo teste do limite de confiança a 95 % (Miller & Miller, 2005), aplicando-se, também, o teste “t” de Student entre os pares de médias para todos os parâmetros testados.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de K extraído pelas duas soluções (Mehlich-1 e NH_4Cl) com diferentes tempos de extração, relação solo:solução e período de decantação são mostrados nas figuras 4, 5 e 6, respectivamente. O tempo de decantação de 2 horas foi escolhido para permitir a determinação durante uma jornada de trabalho de 8 horas. Este tempo somente é viável quando a mistura for filtrada após esse período para eliminar todas as partículas maiores que 63 μm de tamanho, que podem interferir na determinação por ICP. O período de 16 horas de decantação foi utilizado por se tratar de procedimento padrão usado por todos os laboratórios da ROLAS do RS e SC. Nesse procedimento (16 horas de decantação), embora se possa optar pela filtragem, esta etapa não é exigida.

As quantidades de K extraído pela solução de Mehlich-1, nos três tempos de agitação testados (5, 30 e 60 min), foram significativamente inferiores as obtidas com a solução padrão de acetato de amônio. Os valores dos coeficientes angulares das equações de regressão, ajustadas entre os

extratores Mehlich-1(y) e AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (x) (Figura 4A) foram significativamente diferentes de “1”, independente do aumento no tempo de agitação (Tabela 4), indicando que as duas soluções extraem teores diferentes de K do solo. Outro fator, diferente do tempo de agitação, influenciou na menor capacidade de extração dessa solução, uma vez que os coeficientes lineares não diferiram de “0” (Miller & Miller, 2005). No entanto, quando foram comparadas as médias de cada solo nos três tempos de extração com a média de cada solo extraído com solução de AcNH_4 , houve diferença estatística pelo teste “t” a 1% de significância, apenas para o tempo de 5 minutos (AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ - Mehlich-1) com $t=3,48_{(p<0,01)}$ (Tabela 4).

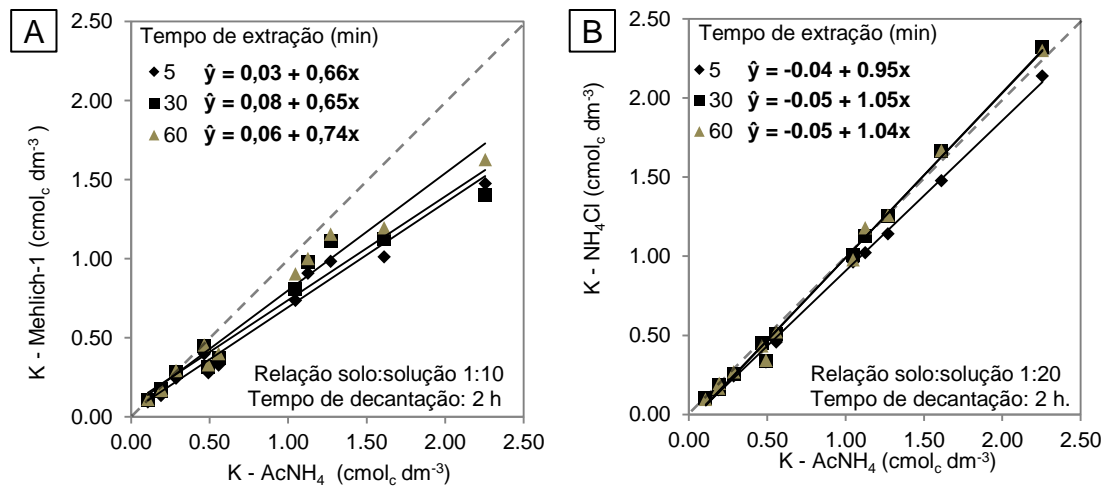


Figura 4. Relação entre as quantidades extraídas de K trocável pelas soluções de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e Mehlich-1 em diferentes tempos de agitação (5, 30 e 60 minutos) e a quantidade extraída por AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS. [A linha tracejada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos).]

Tabela 4. Intervalos de confiança (95%) dos coeficientes lineares (a) e angulares (b), valor de t de Student para as médias e coeficientes de correlação (r) das curvas de regressão linear obtidos nas comparações entre os extratores Mehlich-1 e NH_4Cl com o padrão AcNH_4 , em diferentes períodos de agitação e decantação e de relação solo:solução

Nutriente	Extrator (Tempo/Relação/Decantação)	ICa _(p < 0,05)	ICb _(p < 0,05)	t	r
K	M-1 ₍₅₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,04; 0,11	0,58 ; 0,74	3,48**	0,99
K	M-1 ₍₃₀₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,03 ; 0,19	0,55 ; 0,76	2,68 *	0,97
K	M-1 ₍₆₀₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,03 ; 0,14	0,65 ; 0,82	2,70 *	0,99
K	M-1 _(1:5) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,03 ; 0,20	0,32 ; 0,55	3,23**	0,93
K	M-1 _(1:10) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,04; 0,11	0,58 ; 0,74	3,48**	0,99
K	M-1 _(1:20) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,05 ; 0,15	0,71 ; 0,91	2,16 ^{ns}	0,98
K	M-1 _(2h) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,04; 0,11	0,58 ; 0,74	3,48**	0,99
K	M-1 _(16h) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,27 ; 0,16	0,71 ; 0,90	1,99 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl ₍₅₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,08 ; -0,01	0,91 ; 0,99	5,75**	0,99
K	NH_4Cl ₍₃₀₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,10 ; -0,01	1,00 ; 1,09	1,19 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl ₍₆₀₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,10 ; 0,01	0,99 ; 1,09	1,02 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl _(1:5) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,09 ; 0,03	0,90 ; 1,02	3,62**	0,99
K	NH_4Cl _(1:10) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,10 ; 0,01	0,97 ; 1,08	1,70 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl _(1:20) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,10 ; -0,01	1,00 ; 1,09	1,19 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl _(2h) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,09 ; 0,01	1,02 ; 1,11	-0,46 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl _(16h) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,10 ; 0,01	1,01 ; 1,11	-0,30 ^{ns}	0,99
Solos com teores menores que 1,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$					
K	M-1 _(2h) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,09; 0,06	0,66 ; 0,87	3,64**	0,99
K	M-1 _(16h) (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,08 ; 0,07	0,85 ; 1,06	1,58 ^{ns}	0,99
K	NH_4Cl ₍₅₎ (\hat{y}): AcNH_4 (x)	-0,08 ; -0,02	0,85 ; 0,99	3,98**	0,99

IC = intervalo de confiança; M-1 = Mehlich-1; AcNH_4 = acetato de amônio 1,0 mol L^{-1} a pH 7,0; NH_4Cl = cloreto de amônio 1,0 mol L^{-1} ;

(₅), (₃₀) e (₆₀) = tempos de agitação, para a relação solo:solução 1;10 e tempo de decantação de 2 horas para ambos os métodos;

(_{1:5}) (_{1:10}) e (_{1:20}) = relação solo:solução, para tempo de decantação de 2 horas para ambos os métodos e tempos de agitação de 5 e 30 min para Mehlich-1 e NH_4Cl , respectivamente;

(_{2h}) e (_{16h}) = tempo de decantação;

*, ** significativo ($p < 0,05$) e ($p < 0,01$), respectivamente.

Para os tempos de agitação de 30 e 60 minutos, foi observada diferença pelo teste “t”, em relação ao método padrão, apenas ao nível de 5% indicando que outro parâmetro interferiu na capacidade de extração da solução de Mehlich-1. Esses resultados são semelhantes, de modo geral, aos de Zbíral & Nemeč (2005), Hosseinpur & Samavati (2008) e Bortolon et al. (2010), em que a solução de AcNH_4 1,0 mol L^{-1} extraiu mais K de diferentes solos do que a

solução de Mehlich-1. Uma das hipóteses é que a solução não tenha íons H^+ em quantidade suficiente para deslocar todos os cátions de solos com alto poder tampão, o que pode ser observado no gráfico da figura 4A. A dispersão de pontos é maior em solos com maior teor de K, o que está diretamente relacionado ao aumento da CTC e ao poder tampão do solo. Assim, é possível afirmar que a solução de Mehlich-1 extrai parcialmente o K trocável nos solos estudados.

A alteração da relação solo:solução do método Mehlich-1, de 1:10 para 1:5 (Figura 5A), como se esperaria após o estudo do tempo de extração, diminuiu ainda mais a capacidade de extração. O coeficiente angular para a relação 1:10 com tempo de agitação de 5 min (Figura 5A) diminuiu de 0,66 para 0,44 com a relação solo:solução 1:5.

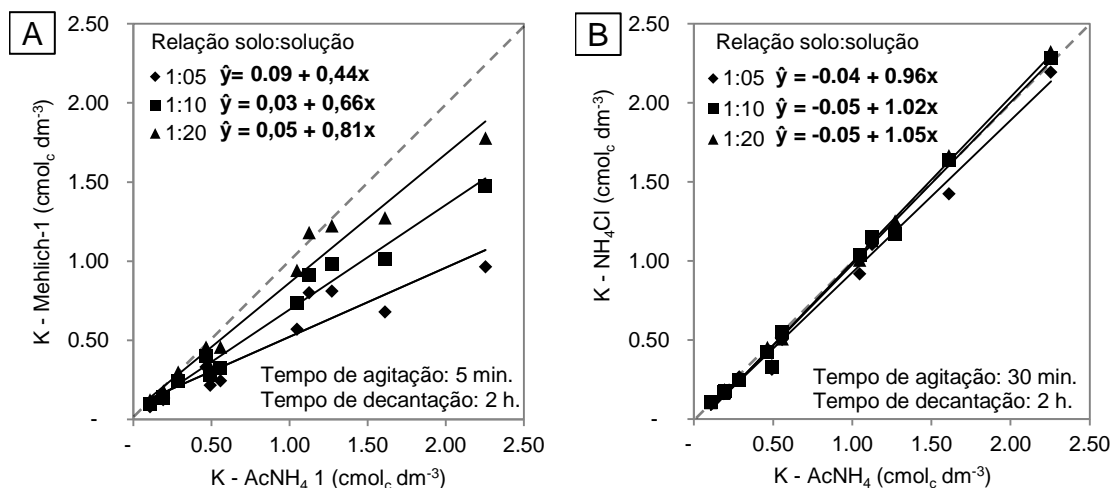


Figura 5. Relação entre as quantidades extraídas de K trocável pelas soluções de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e Mehlich-1 em diferentes relações solo:solução (1:05, 1:10 e 1:20 v/v) e a quantidade extraída por $AcNH_4$ $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS. [A linha tracejada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos).]

Com o aumento da quantidade de solução de Mehlich-1 na mistura (relação solo:solução 1:20), a diferença entre ambos os métodos ($AcNH_4$ – Mehlich-1) diminuiu (Tabela 5) no tempo de agitação 5 min, porém o coeficiente angular “b” (0,81) da reta de regressão (Figura 5A) ainda é estatisticamente diferente de “1” (Tabela 4).

Tabela 5. Teores médios de K trocável/extraível determinados pelos extratores Mehlich-1, NH₄Cl 1 mol L⁻¹ e AcNH₄ 1 mol L⁻¹, em diferentes períodos de agitação e decantação e de relação solo:solução

Mehlich 1				NH₄Cl				AcNH₄			
T1(min) ¹	RSS(v/v) ²	T2(horas) ³	Média ⁴	T1(min)	RSS(v/v)	T2(horas)	Média	T1(min)	RSS(v/v)	T2(horas)	Média
5	1:5	2	0,44	5	1:20	2	0,72	30	01:20	2	0,80
5	1:10	2	0,56								
5	1:10	16	0,71	30	1:05	2	0,73				
5	1:20	2	0,70	30	1:10	2	0,77				
				30	1:20	2	0,78				
30	1:10	2	0,61			16	0,81				
60	1:10	2	0,65	60	01:20	2	0,78				
Retirando-se solos Vertissolos, Chernossolos e Neossolos											
5	1:5	2	0,19	5	1:20	2	0,24	30	01:20	2	0,29
5	1:10	2	0,22								
5	1:10	16	0,28	30	1:05	2	0,24				
5	1:20	2	0,26	30	1:10	2	0,24				
				30	1:20	2	0,25				
30	1:10	2	0,25			16	0,26				
60	1:10	2	0,26	60	01:20	2	0,25				
Somente Vertissolos, Chernossolos e Neossolos											
5	1:5	2	0,68	5	1:20	2	1,20	30	01:20	2	1,31
5	1:10	2	0,91								
5	1:10	16	1,14	30	1:05	2	1,23				
5	1:20	2	1,14	30	1:10	2	1,30				
				30	1:20	2	1,31				
30	1:10	2	0,97			16	1,35				
60	1:10	2	1,05	60	01:20	2	1,32				

¹ tempo de agitação, ² relação solo:solução, ³ tempo de decantação, ⁴ teor médio de K (coml_c dm⁻³).

O teste “t” para as médias indica diferença significativa a 1% de probabilidade na capacidade de extração dos métodos, apenas para a relação solo:solução 1:5 $t=3,23(p<0,01)$, confirmando que a quantidade maior de solução de Mehlich-1 na mistura permite maior extração do potássio trocável do solo (Tabela 4).

A relação entre o tempo de decantação do extrato de Mehlich-1 e a quantidade de K extraído em comparação à solução padrão de AcNH_4 é mostrada na Figura 6A. A alteração do tempo de decantação de 2 para 16 horas ocasionou o aumento no coeficiente angular de 0,66 a 0,81. Contudo ambos os valores são estatisticamente diferentes de “1” (Tabela 4). Os coeficientes lineares ajustados para a relação Mehlich-1(y) e AcNH_4 1,0 mol L⁻¹(x), para os tempos 2 e 16 horas de decantação, não foram diferentes de “0” (Tabela 4). Estes resultados evidenciam a baixa eficiência do Mehlich-1 como extrator de potássio trocável em relação ao AcNH_4 1,0 mol L⁻¹, em solos com altos teores de K e/ou alto poder tampão (alta CTC). O tempo de decantação não teve qualquer influência na quantidade de K extraído pela solução de cloreto de amônio para o conjunto de solos estudados (Figura 6B).

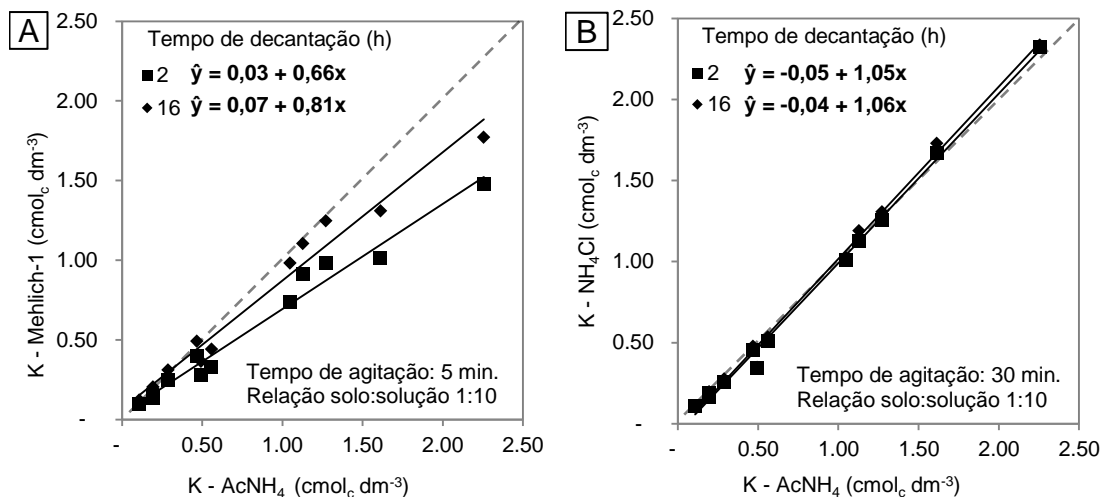


Figura 6. Relação entre as quantidades extraídas de K trocável pelas soluções de NH_4Cl 1,0 mol L⁻¹ e Mehlich-1 em diferentes tempos de decantação (duas e 16 horas) e a solução de AcNH_4 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0, em solos do RS. [A linha tracejada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos).]

Isso permite flexibilidade na atividade laboratorial de rotina não havendo necessidade de estabelecer tempos exatos para a determinação de K após a etapa de extração com NH_4Cl , podendo ser feita entre um período de 2 a 16 horas. A retirada dos pontos acima de $1,3 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ (solos de número 8 e 10 da tabela 3) aumentou o coeficiente linear de 0,66 para 0,76, com um período de decantação de 2 horas (Figura 7A), porém ainda diferente “1” (Tabela 4). Contudo, se for utilizado o período de decantação de 16 horas (Figura 7B), conforme proposto no procedimento descrito em Tedesco et al. (1995), os coeficientes linear “a” e angular “b” não diferem significativamente de “0” e “1”, respectivamente.

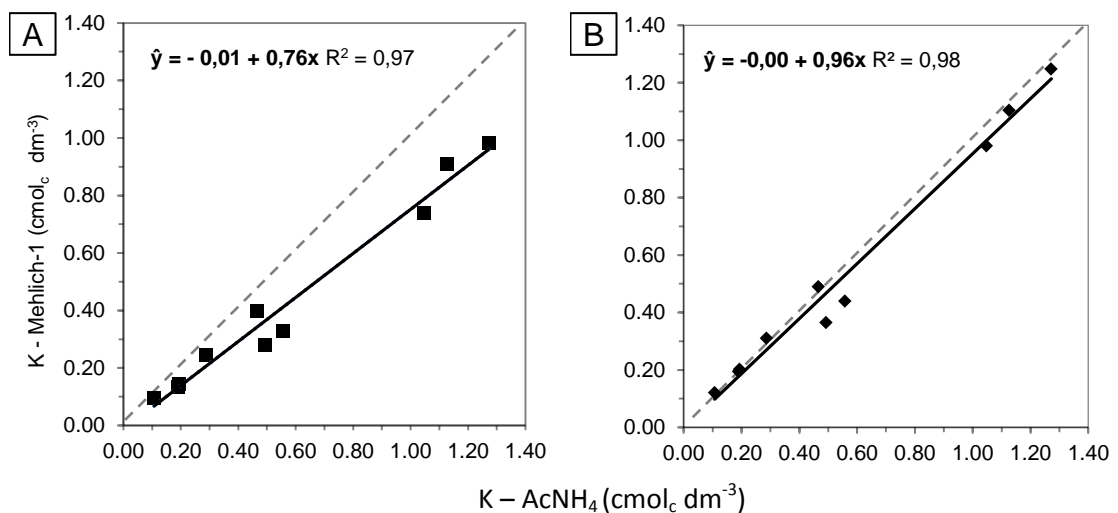


Figura 7. Relação entre as quantidades de K extraído pela solução de Mehlich-1 na relação solo:solução 1:10 (v/v) e tempo de decantação de 2 horas (A) e 16 horas (B), para solos com valores de K inferiores a $1,5 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ e a quantidade extraída pelo procedimento padrão de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, em solos do RS. [A linha tracejada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos).]

Assim, pode-se concluir que o procedimento recomendado por Tedesco et al., 1995 permite extrair o equivalente em K trocável de solos pouco tamponados, principalmente naqueles com médio a baixo teor de K trocável. Os resultados também indicam que há um efeito do tempo de decantação no teor de K extraído pela solução de Mehlich-1 no solos estudados. Esse é um aspecto importante, pois para efeitos de adubação, no sistema atual de

recomendação nos estados do RS e SC, a faixa adequada de K no solo, em que se requer adubação de manutenção de K, varia de 0,23 a 0,46 $\text{cmol}_c \text{L}^{-1}$. Acima deste valor, o sistema recomenda apenas a adubação de reposição de potássio (CQFS-RS/SC, 2004). Assim, valores discrepantes de K extraído entre os métodos, quando esses são muito altos no solo, acima da faixa Alto, não influenciam nas quantidades recomendadas de fertilizante potássico.

A relação entre as quantidade extraídas de K pelas soluções de NH_4Cl 1,0 mol L^{-1} e AcNH_4 1,0 mol L^{-1} a pH 7,0, para os tempos de agitação de 5, 30 e 60 minutos, é mostrada na figura 4B. Os valores de intersecção da linha de regressão não diferem significativamente de “0” (Tabela 4), para o tempo de agitação de 5 minutos, indicando que as duas soluções não diferiram quanto à quantidade extraída de K para os solos estudados. Porém, com esse tempo de agitação, a declividade (coeficiente angular) foi diferente de “1”, indicando a ocorrência de algum tipo de erro sistemático (Miller & Miller, 2005), ou a presença de solos, cujas características mineralógicas impedem a remoção, pela solução de NH_4Cl , de todo o K trocável presente, com esse tempo de agitação. Para os tempos de agitação de 30 e 60 minutos (Figura 4B), os parâmetros “a” (intersecção) e “b” (declividade) não diferiram de 0 e 1, respectivamente (Tabela 4). Para esses tempos de agitação, as soluções se equivaleram na extração de K trocável dos solos estudados. Esses resultados também foram confirmados pela aplicação do teste t de Student para as médias de K dos 12 solos com valores de “t” de 1,19 e 1,02 ($p < 0,01$), indicando que a menor quantidade de K extraído com o tempo de 5 minutos de agitação deveu-se, possivelmente, ao fator tempo de agitação.

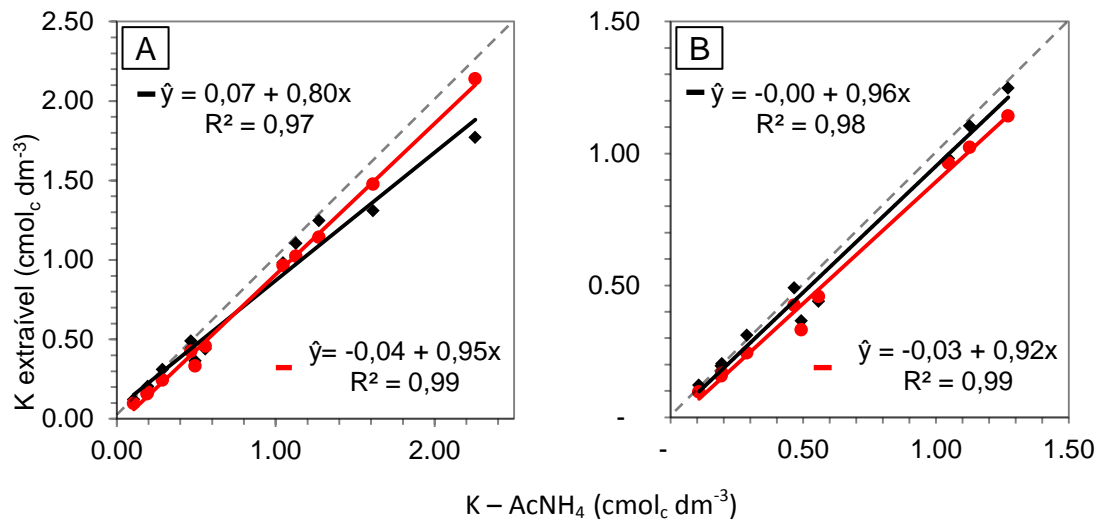
A quantidade de K extraído pela solução de NH_4Cl na relação solo:solução 1:10 e 1:20 (v/v) não foi significativamente diferente da extraída pela solução padrão de AcNH_4 (Figura 5B). Os coeficientes angulares e lineares não foram diferentes dos valores ideais de “0” e “1”, respectivamente (Tabela 4), indicando que a solução na mistura pode ser diminuída sem que ocorra diminuição de capacidade de extração de K, mesmo em solos com alto teor desse elemento. Logo, em sistema de rotina com elevado número de amostras, isso pode representar uma economia substancial para o laboratório.

Os resultados de K extraído pela solução de NH_4Cl , com tempos de decantação de 2 e 16 horas, e os obtidos pelo procedimento padrão de AcNH_4

são mostrados na Figura 6B. Para o cloreto de amônio não se observou diferença significativa entre os diferentes tempos de decantação. Os coeficientes lineares das equações não diferiram de “0” (Tabela 4), indicando que o período de decantação não interferiu na capacidade de extração da solução de cloreto de amônio em relação a de acetato de amônio. O teste “t” também não indicou diferença entre os extratores, independentemente do tempo em que a mistura solo-solução permaneceu em repouso.

A Inclusão do tempo de 5 min de agitação para a solução de cloreto de amônio teve por objetivo agilizar o procedimento laboratorial. Assim, o número de amostras que poderiam ser agitadas seria 6 vezes aquele do período de 30 minutos, tempo padrão usado para o método da solução de NH_4Cl . No entanto, com esse tempo de agitação, houve diferença estatística entre os valores determinados pelo método padrão e pela solução de NH_4Cl . A utilização do tempo de 5 min de agitação requer estudo de correlação e eventualmente o ajuste do teor crítico de potássio no sistema de recomendação de adubação utilizado.

Ao se comparar os extratores Mehlich-1 e NH_4Cl , ambos com período de agitação de 5 minutos, tempo padrão do Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995), com a solução padrão de AcNH_4 , verifica-se claramente que o menor desempenho do M1 se deve à presença dos solos com altos teores de K trocável na relação (Figura 8A). Com a retirada desses solos (Figura 8B), conforme demonstrado anteriormente, a eficiência deste procedimento aumenta significativamente, se igualando a relação 1:1 (Tabela 4). Já a solução de acetato de amônio, a retirada dos dois solos não interferiu no seu desempenho, apresentando coeficiente angular “b”, ainda diferente de “1” para o tempo de 5 minutos (Tabela 4).



— Mehlich-1 1:10, 5 min. 16 horas — NH₄Cl 1:20, 5 min. 2 horas

Figura 8. Relação entre as quantidades de K extraído pelas soluções Mehlich-1 e NH₄Cl 1 M L⁻¹, para todos os solos (A) e para solos com valores de K inferiores a 1,5 cmol_c L⁻¹ (B) e a quantidade extraída pelo procedimento padrão de AcNH₄ 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0, em solos do RS. [A linha tracejada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos).]

Os resultados demonstram que a solução de NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹ não apresentou diferença na extração de K trocável nos solos estudados em relação à solução padrão de acetato de amônio 1,0 mol L⁻¹, com tempo de agitação mínimo de 30 minutos independente da relação solo:solução (Tabela 4). Os coeficientes de correlação entre o cloreto de amônio e o acetato de amônio foram muito próximos de “1”, independentemente do tempo de agitação e relação solo:solução testados, obtendo-se desempenho superior do NH₄Cl na extração de K trocável em relação à solução de Mehlich-1. Estes resultados concordam, em geral, com os encontrados por Shuman & Duncan (1990), Boeira et al. (2004) e Bortolon et al. (2010), indicando que, principalmente em solos alta CTC, o ter de K extraído por Mehlich-1 não corresponde ao potássio trocável do solo.

4.4. CONCLUSÕES

1. A capacidade de extração de K da solução de cloreto de amônio, para os solos estudados, foi pouco influenciada pela relação solo:solução e tempo de decantação quando o tempo de agitação igual ou superior a 30 minutos.
2. O potássio extraído pela solução de Mehlich-1 de solos muito tamponado (alta CTC) e com altos teores de K é menor, pois sua capacidade de extração é muito menor que a do método padrão de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, independente do aumento na relação solo:solução ou dos tempos de agitação e/ou decantação.
3. Os resultados permitem concluir que para regiões com solos pouco tamponados e com características mineralógicas semelhantes, o método Mehlich-1 conforme o procedimento proposto por Tedesco et al. (1995) extrai quantidades de K semelhantes ao K trocável extraído pela solução padrão de acetato de amônio.

Tabela 6. Classificação, localização, textura e alguns atributos químicos de 12 solos representativos do Rio Grande do Sul utilizados no estudo em Laboratório

Amostra	Solo	Município	Argila ¹	MO ¹	K ²	H+Al ¹	Ca ²	Mg ²	T	pH ³	
			-----%-----	mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----						
1	PVA	Arg. Vermelho-Amarelo	Cachoeira do Sul	11	3,1	106	4,4	5,4	2,3	12,3	5,1
2	RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Bagé	27	4,5	418	5,5	9,8	6,4	22,8	5,2
3	RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Uruguiana	39	4,0	131	5,5	20,6	8,4	34,9	5,5
4	SXe	Planossolo Háplico eutrófico	São Lourenço do sul	11	2,5	54	3,1	10,1	2,4	15,7	5,9
5	PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	São Gabriel	25	2,6	63	5,5	8,5	3,1	17,2	5,2
6	RLe	Neo. Litólico eutrófico	Santiago	16	2,8	342	3,9	6,7	1,6	13,0	5,1
7	CHa	Cambissolo Húmico alumínico	São F ^o de Paula	16	10,0	66	27,4	12,6	4,8	45,0	4,8
8	NVdf	Nit. Verm. distroférico	Nova Bassano	47	3,5	866	4,4	16,3	6,3	28	5,3
9	RLe	Neo. Litólico eutrófico	Severiano	37	3,9	304	3,9	12,2	4,2	21,1	5,6
10	Mek	Chern. ebânico carbonático	Aceguá	51	4,1	669	3,5	23,3	8,5	36,2	5,5
11	LVaf	Lat. Verm. aluminoférrico	Erechim	64	4,6	115	21,8	10,8	3,9	36,7	4,3
12	LVdf	Lat. Verm. distroférico	Boa V. das Missões	70	3,2	165	4,9	6,7	2,8	14,8	4,8

¹Tedesco et al.(1995); ²Acetato de Amônio 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0; ³pH em H₂O, relação solo:solução 1:10

5. ESTUDO III

ESTIMATIVA DO POTÁSSIO DISPONÍVEL ÀS PLANTAS PELAS SOLUÇÕES DE ACETATO DE AMÔNIO, CLORETO DE AMÔNIO, MEHLICH-1 E MEHLICH-3 EM SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

RESUMO

A disponibilidade de potássio para as plantas é, em geral, avaliada pelo teor de K-trocável do solo. No Rio Grande do Sul e Santa Catarina, como em outras regiões do Brasil, a estimativa do K disponível é feita pela extração desse elemento com a solução de Mehlich-1, utilizada para a avaliação do P disponível para as plantas. Com o surgimento de equipamentos para laboratório de solos de rotina capazes de determinação simultânea de vários elementos, são preferidas soluções com capacidade de extração multielementar pela maior eficiência analítica que esse processo confere ao sistema. A substituição de um método de análise de solo por outro requer um estudo de correlação a fim de comparar a eficiência do método proposto com àquela do método a ser substituído. Para isso, um estudo de correlação foi desenvolvido em casa de vegetação com 30 solos do Rio Grande do Sul, em que foram comparadas a solução padrão de Mehlich-1 e as soluções alternativas de Mehlich-3, de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e de cloreto de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Foram correlacionados os índices K trocável e a relação K trocável/CTC (capacidade de troca de cátions) com o teor de K acumulado por plantas de milho em dois cultivos. Todas as soluções testadas foram eficientes em prever a disponibilidade de K para as plantas, e qualquer uma pode ser utilizada em substituição à solução padrão de Mehlich-1. Os coeficientes de correlação entre o K trocável, estimado pelas diferentes soluções, foram

elevados; contudo, em solos com argilominerais 2:1, os valores de K trocável foram maiores para a mesma quantidade de K absorvido. A separação por grupos de solos com características semelhantes propiciou aumento nos coeficientes de correlação. A relação K-trocável/CTC foi mais eficiente para estimar a disponibilidade de K para as plantas, dispensando o grupamento de solos por tipo de argilomineral presente.

Palavras-chave: Saturação por potássio, potássio trocável, fertilidade do solo.

5.1. INTRODUÇÃO

O objetivo de um programa recomendação de adubação para as culturas é fornecer um guia de manejo da fertilidade do solo por meio de relações determinadas experimentalmente entre as propriedades químicas e/ou físicas do solo e o crescimento das culturas. Para isto, são desenvolvidos estudos de correlação e de calibração de métodos para determinado nutriente ou propriedade em determinada região com um grupo específico de culturas. Existe um grande número de soluções extratoras para determinar o teor de nutrientes no solo, porém a quantidade extraída não é indicativo de suprimento do nutriente ao sistema radicular, sendo necessária a correlação desse índice com o teor absorvido pelas plantas e posterior processo de calibração do método a campo (Alva, 1993).

O extrator clássico para determinar o potássio (K) trocável do solo é a solução de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 (Metson, 1956), cujo mecanismo envolve a troca do cátion K^+ pelo cátion amônio (NH_4^+) por efeito de massa (Nachtigall & Raij, 2005). Para solos tropicais, a determinação do K trocável pode ser feita por outras metodologias, como é o caso de ácidos fortes diluídos e da resina trocadora de íons, conjuntamente ao nutriente fósforo (Raij, 1991). Nos estados do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC), a solução de Mehlich-1 é utilizada como extrator de K disponível do solo (Tedesco et al., 1995). Esta solução foi proposta por Mehlich (1953) para extração de P, K, Ca, Mg, Na, Mn e Zn em solos ácidos e, posteriormente, foi estudada e adaptada por vários pesquisadores em solos do Rio Grande do Sul, entre eles Anghinoni & Bohnen (1974), Galvão & Volkweiss (1981), Anghinoni &

Volkweiss (1984) e mais recentemente por Schlindwein & Gianello (2005), Bortolon et al. (2009, 2010).

Na década de 1980, a solução de Mehlich-3 (Mehlich, 1984) foi proposta em substituição a de Mehlich-1 por possibilitar a determinação simultânea de até 11 elementos em algumas regiões dos USA. Nos estudos feitos no RS, os coeficientes de correlação entre o K extraído pela solução de Mehlich-3 e a quantidade absorvida por plantas foram altos, e os valores de K disponível foram quantitativamente semelhantes àqueles obtidos para K trocável pela solução de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (AcNH_4) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 (Bortolon et al., 2010). Assim, para maior eficiência dos laboratórios de análises de solo, soluções que extraem diversos elementos simultaneamente são preferíveis àquelas monoelementares, especialmente quando estão disponíveis técnicas de análise multielementar, como a espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) (Bortolon et al., 2010).

A solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ pode ser uma alternativa à solução de Mehlich-1 na extração de K disponível do solo, com a vantagem de substituir também a solução de cloreto de potássio (KCl) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ para a determinação de Ca, Mg, Al, Mn e Na trocáveis (Raij, 2011), o que pode tornar os procedimentos laboratoriais mais práticos, eficientes e com menor risco de erros, por eliminar etapas nos procedimentos. Muitos trabalhos indicam que a solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ se equivale ao acetato de amônio como extrator de cátions do solo (Robarge & Fernandes, 1986; Shuman & Duncan, 1990; Alva, 1993; Boeira et al., 2004), porém são poucos os estudos de correlação em que esse extrator foi incluído, por não ser adequado a laboratórios que não dispõem da técnica de determinação simultânea por espectrofotometria de emissão ótica.

Shuman & Duncan (1990) compararam a solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ com as de AcNH_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, quanto à capacidade de extração de Ca, Mg, K e Na. Constataram que a solução de cloreto de amônio foi tão eficiente quanto a de NH_4OAc e pode ser utilizada como extrator único dos cátions trocáveis do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Boeira et al. (2004) em solos do estado de São Paulo. Porém, em ambos os estudos citados, não foram feitos estudos de correlação entre o teor extraído por cloreto de amônio e o teor de nutrientes absorvido por plantas.

Nos últimos anos, tem sido observado que em muitas amostras de solos analisadas no Laboratório de Análises de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) houve diferença muito grande entre os valores de K disponível obtidos pela solução de Mehlich-1 e os de K trocável obtidos pela solução de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (dados não publicados). Um exame detalhado da origem dessas amostras indicou serem provenientes de regiões como o Alto Uruguai, Campanha e Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, onde existem solos menos intemperizados e/ou com presença significativa de minerais 2:1 e/ou com altos teores de matéria orgânica. Estas características podem diminuir a capacidade extrativa da solução de Mehlich-1, resultando em valores menores de K disponível comparativamente à solução de NH_4Cl .

Além do K trocável, muitos pesquisadores sugerem a utilização de outros parâmetros do solo para auxiliar na predição da disponibilidade desse nutriente às plantas. O parâmetro mais indicado tem sido a CTC (Meurer & Anghinoni, 1993; Bortolon et al., 2010). Nesse caso, a disponibilidade diminui com o aumento da CTC, de tal modo que o valor de K disponível para um bom desenvolvimento das plantas aumenta proporcionalmente (CQFS, 2004). Noutros casos, a disponibilidade pode ser expressa por índices, como por exemplo, a relação K trocável/CTC (Meurer & Anghinoni, 1993), em que a CTC continua como principal parâmetro desta relação, por ser este um dos melhores indicadores das variações de textura, mineralogia e poder tampão do solo.

O presente estudo teve por objetivo determinar a capacidade de predição do K disponível para plantas de milho pelas soluções de acetato de amônio (AcNH_4), Mehlich-1 (M_1), Mehlich-3 (M_3) e cloreto de amônio (NH_4Cl) em solos do Rio Grande do Sul.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Análises de Solos (LAS) e em casa-de-vegetação pertencente ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Para o experimento conduzido em casa-de-vegetação, foram coletados 30 solos de áreas representativas do estado do Rio Grande do Sul. Alguns locais de coleta foram escolhidos com base em amostras de solos recebidas no LAS no ano de

2012. O critério de seleção foi a diferença nos valores de potássio extraído entre as soluções de Mehlich-1 e de NH_4Cl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, optando-se por aqueles solos que apresentaram valores de K extraído com a solução de NH_4Cl superiores em 50% aos obtidos com a solução de Mehlich-1. Feita a seleção, cada proprietário selecionado foi contatado e, após a concordância do mesmo, o solo foi coletado. Os demais locais foram escolhidos utilizando-se o banco de dados de solos armazenados junto ao Departamento de Solos, e o critério de escolha foi uma ampla variabilidade química, física e mineralógica. Em todos os locais foram coletados aproximadamente 150 kg de solo da camada de 0-20 cm de espessura. A classificação dos solos utilizados, a localização, o teor de argila e alguns atributos químicos são mostrados na Tabela 7.

À medida que os solos foram coletados, procedeu-se a secagem, tamisação em peneira com malha de 4 mm de diâmetro, homogeneização e armazenagem em local seco.

A acidez dos solos, quando necessário, foi corrigida elevando-se o $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (relação solução:solução 1:1, v/v) para 6,0. A quantidade de corretivo de acidez para cada solo foi determinada pelo pH SMP de acordo com o procedimento descrito por Tedesco et al. (1995). O corretivo de acidez utilizado foi uma mistura de CaO e MgO na proporção de 3:1, respectivamente, com PRNT (poder relativo de neutralização total) de 103%. O tempo de estabilização foi de 15 dias.

Após esse período, cada solo foi transferido para vasos com capacidade de 7 L, sendo preenchidos com 6 litros de solo. Antes de cada cultivo foi adicionada, em todos os vasos e para todos os solos, uma dose equivalente a 400 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 140 kg ha^{-1} de N na forma de fosfato diamônico (DAP), 4 kg ha^{-1} de sulfato de zinco, 2 kg ha^{-1} de sulfato de cobre e 2 kg ha^{-1} de ácido bórico. Para o cálculo da dose, considerou-se o volume de dois milhões de litros de solo por hectare. Após a adição dos fertilizantes, o solo, dentro de cada unidade experimental, foi umedecido a aproximadamente 80% da capacidade de campo, homogeneizado vigorosamente e deixado em repouso, coberto com plástico por outros 15 dias para estabilização. Após esse período, foram retirados de cada unidade experimental $0,05 \text{ dm}^{-3}$ de solo com um trado calador para determinação de potássio, e em seguida foram semeadas seis sementes de milho (*Zea mays*), híbrido Pioneer 30F53. As unidades

experimentais foram dispostas em um delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, totalizando 90 vasos. Após a germinação das sementes, foi feito o desbaste, deixando-se as três plântulas mais vigorosas. Aos 15 dias após a emergência foi adicionado o equivalente a 100 kg ha^{-1} de N na forma de ureia. O experimento foi conduzido pelo período de 25 dias após a emergência,

Tabela 7. Classificação, localização, textura e alguns atributos químicos de 30 solos representativos do Rio Grande do Sul utilizados no estudo em casa de vegetação

Amostra	Solo	Município	Argila	MO	K	H+Al	Ca	Mg	T	pH	
			-----%-----		mg dm ⁻³		----- cmol _c dm ⁻³ -----				
1	PVA	Arg. Vermelho-Amarelo	Tupanciretã	16	1,2	37	3,9	3,0	1,0	8,0	4,8
2	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Cruz Alta	34	1,8	76	6,9	6,9	3,2	17,3	5,0
3	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Passo Fundo	32	2,0	56	4,4	7,0	3,4	14,9	5,3
4	LVdf	Lat. Verm. distroférico	Santo Angelo	73	3,1	93	5,5	7,2	3,1	16,1	5,1
5	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Ibirubá Mata	52	5,1	144	4,9	9,7	3,6	18,6	5,0
6	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Boa Vista do Cadeado	32	2,5	103	5,5	5,6	2,2	13,5	4,7
7	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Boa Vista do Cadeado	27	2,8	205	4,9	4,9	2,6	12,9	4,9
8	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Ibirubá	59	2,2	166	4,4	9,0	3,2	17,0	5,1
9	PVA	Arg. Vermelho-Amarelo	Cachoeira do Sul	11	3,1	106	4,4	5,4	2,3	12,3	5,1
10	PVA	Arg. Vermelho-Amarelo	São Gabriel	25	2,6	63	5,5	8,5	3,1	17,2	5,2
11	RLe	Neossolo Litólico eutrófico	Bagé	27	4,5	418	5,5	9,8	6,4	22,8	5,2
12	Mek	Chern. Ebânico carbonático	Aceguá	51	4,1	669	3,5	23,3	8,5	36,2	5,5
13	VEo	Verti. Ebânico ortico	Uruguaiana	46	5,8	88	2,8	33,6	12,1	48,7	5,9
14	RLe	Neo. Litólico eutrófico	Uruguaiana	39	4,0	131	5,5	20,6	8,4	34,9	5,5
15	MEo	Chern. Ebânico ortico	Caçapava do Sul	29	4,8	56	6,2	13,3	9,1	28,8	5,5
16	SXe	Plan. Háplico eutrófico	São Lourenço do sul	11	2,5	54	3,1	10,1	2,4	15,7	5,9
17	MTf	Chern. Argilúvico férrico	Três Coroas	48	3,7	52	5,5	9,1	3,3	18,1	5,2
18	MXo	Chern. Háplico ortico	Taquara	13	2,7	142	1,7	12,8	5,2	20,1	6,2
19	CHa	Camb. Húmico alumínico	São Fran. ^{co} de Paula	16	10,0	66	27,4	12,6	4,8	45,0	4,8
20	CX	Cambissolo Háplico	Carlos Barbosa	35	2,8	184	4,9	6,8	2,1	14,3	5,2
21	LVd	Lat. Vermelho distrófico	Passo Fundo	35	2,8	62	9,7	7,2	2,9	20,0	4,7
22	RLe	Neo. Litólico eutrófico	Severiano	37	3,9	304	3,9	12,2	4,2	21,1	5,6
23	LVaf	Lat. Verm. aluminoférrico	Erechim	64	4,6	115	21,8	10,8	3,9	36,7	4,3

Continuação...

Tabela 7. Continuação...

Amostra		Solo	Município	Argila	MO	K	H+Al	Ca	Mg	T	pH
24	NVdf	Nit. Verm. distroférico	Rodeio Bonito	51	2,7	151	3,5	8,4	3,0	15,2	5,5
25	LVdf	Lat. Verm. distroférico	Boa Vista das Missões	70	3,2	165	4,9	6,7	2,8	14,8	4,8
26	PBAc	Arg. Bruno-Acizentado	Soledade	48	4,5	130	13,7	9,9	4,9	28,9	4,8
27	PVd	Arg. Vermelho distrófico	São Jeronimo	28	2,5	146	5,5	4,8	2,2	12,8	4,9
28	LVEf	Lat. Vermelho eutrófico	Ibirubá	41	3,3	233	3,9	9,8	2,7	17,0	5,5
29	RLe	Neo. Litólico eutrófico	Santiago	16	2,8	342	3,9	6,7	1,6	13,0	5,1
30	CHa	Camb. Húmico alumínico	Vacaria	46	6,2	119	13,7	9,2	3,9	27,2	4,7

¹Tedesco et al.(1995); ²Acetato de Amônio 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0; ³pH em H₂O, relação solo:solução 1:10

com irrigação diária, mantendo-se a umidade a 80% da capacidade de campo. Após esse período, as plantas foram cortadas à altura de um cm do solo.

Antes do segundo cultivo, foi feita outra amostragem de solo de cada unidade experimental, retirando-se o mesmo volume e utilizando-se o mesmo procedimento de coleta do primeiro cultivo. Em seguida, foi novamente adicionada a dose equivalente a 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 140 kg ha⁻¹ de N na forma de fosfato diamônico (DAP), 4 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco, 2 kg ha⁻¹ de sulfato de cobre e 2 kg ha⁻¹ de ácido bórico. Em seguida, foi feita a semeadura do milho do híbrido Pioneer 20F53 para o segundo cultivo. A condução experimental foi feita de modo semelhante a do primeiro, quanto à irrigação, tempo de cultivo e procedimento de corte das plantas.

A parte aérea das plantas de ambos os cultivos foi colocada em recipientes de papel e deixada em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C, por 72 horas. Após esse período, a massa seca (MS) da parte aérea do milho foi pesada e em seguida triturada em moinho de facas tipo Willey, sendo armazenada para posterior análise química. O procedimento utilizado para digestão da MS foi uma modificação do método descrito por Tedesco et al. (1995), em que a determinação de K foi feita por digestão nítrico-perclórica ao invés da digestão sulfúrica sugerida. O teor de K na solução nítrico-perclórica foi determinado por espectrofotometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

As amostras de solo foram secas em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 45 °C, por 72 horas. Posteriormente, o solo foi triturado em moinho de solo, tamisado em peneira com malha de 2 mm de diâmetro e armazenado para análise química.

As soluções extratoras testadas para a determinação de K disponível para as plantas foram: acetato de amônio (CH₃COONH₄) 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0 (Metson, 1956), Mehlich-1 (Mehlich, 1953, modificado por Tedesco et al., 1995), Mehlich-3 (Mehlich, 1984) e NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹ com 60 minutos de agitação e relação solo:solução 1:20 em frascos erlenmeyer de 125 mL de capacidade. Para os métodos Mehlich-1 (M₁) e Mehlich-3 (M₃), o tempo de repouso da mistura solo-solução foi alterado de 16 (Tedesco et al., 1995) para 2 horas. Após esse período, a mistura foi filtrada por um filtro de nylon com diâmetro de orifícios malha de 63 µm. O filtrado foi deixado decantar por outras

2 horas sendo, em seguida, transferidos aproximadamente 10 mL para tubos de ensaio plásticos e o K determinado por ICP-OES. Para as soluções de NH_4Cl e AcNH_4 , após a agitação de 60 e 30 min respectivamente, a mistura solo-solução foi deixada decantar por 16 horas. Após esse período, 5 mL do sobrenadante foram pipetados para um recipiente plástico e foram acrescentados 25 mL de água deionizada com a finalidade de diluição do extrato. Em seguida, aproximadamente 10 mL do extrato diluído foram transferidos para tubos de ensaio plásticos e o K determinado por ICP-OES. Nesse extrato, também foram determinados cálcio e magnésio para o cálculo da soma de bases dos solos. A acidez potencial (H+Al) foi estimada pelo índice SMP, conforme equação proposta por Kaminski et al. (2001). A CTC a pH7,0 foi obtida pela soma dos cátions trocáveis de reação básica (Ca, Mg e K) e dos cátions ácidos (H+ Al), expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O índice de saturação por K foi obtido dividindo-se os valores de K trocável ou K disponível, expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, pela CTC a pH 7,0 e multiplicando-se o resultado por 100, para expressar o resultado em percentagem.

Foram feitas regressões lineares, nos dois cultivos, entre as quantidades extraídas de K pelos métodos em estudo e a quantidade acumulada de K absorvido pelas plantas de milho. A capacidade preditiva de K disponível pelos diferentes métodos foi estimada, principalmente, pela análise dos coeficientes de correlação. A comparação da capacidade de predição da disponibilidade pelo índice de saturação por K, para os diferentes extratores, foi feita por análise de regressão, utilizando-se, principalmente, os coeficientes de determinação. As diferenças entre os coeficientes foram avaliadas pelo teste Tukey a 5%.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As relações entre a quantidade de K absorvido pelas plantas, no primeiro cultivo, e os teores extraídos pelas diferentes soluções testadas são apresentadas na Figura 1. Todos os coeficientes de correlação (r) foram superiores a 0,89, indicando que métodos testados foram eficientes em estimar a disponibilidade desse nutriente para as plantas. A análise mais detalhada nos gráficos mostra que os solos podem ser divididos em dois grupos diferentes,

para ambos os cultivos (Figuras 1 e 2), ou seja, a quantidade absorvida de K pelas plantas se correlaciona de forma diferente com o índice potássio trocável ou disponível, em cada grupo destacado, indicando que a capacidade do índice potássio trocável em estimar a disponibilidade de K para as plantas pode ser diferente para grupos de solos distintos em suas características físico-químicas.

Existem inúmeras características intrínsecas a cada tipo de solo que podem influenciar o suprimento de potássio às culturas, tais como a mineralogia, o K não-trocável (Nachtigall & Vahl, 1991), a matéria orgânica e, conseqüentemente, a CTC (Meurer & Anghinoni, 1993). Isso, em parte, pode explicar os resultados apresentados, uma vez que os solos estudados apresentam grande variabilidade química, física e mineralógica. A separação dos solos em dois grupos evidencia que os valores de K trocável ou disponível é muito maior em um do que no outro grupo para a mesma quantidade de K absorvido pelas plantas (Ibirubá, Bagé, Aceguá, Uruguaiana, Severiano e Santiago). Os solos com quantidade maior de K diferenciam-se dos demais por apresentarem alta CTC, presença de minerais 2:1 e, em alguns casos, alto teor de matéria orgânica (Tabela 7), conferindo a este grupo de solos um alto poder tampão de potássio.

A separação dos solos em dois grupos e a análise de regressão por grupos resultou em coeficientes de correlação mais altos em ambos os cultivos, principalmente para os solos do grupo 2, mais tamponados (Figuras 9 e 10).

As soluções extratoras de AcNH_4 e de NH_4Cl não diferiram estatisticamente entre si na predição da disponibilidade de K para as plantas, pelo índice K trocável, em ambos os cultivos e em todos os solos estudados (Figuras 9A, 9B, 10A e 10B). Os coeficientes de correlação para os dois extratores foram de 0,87, independente do cultivo, o que indica confiabilidade e periodicidade, características desejáveis em extratores de rotina.

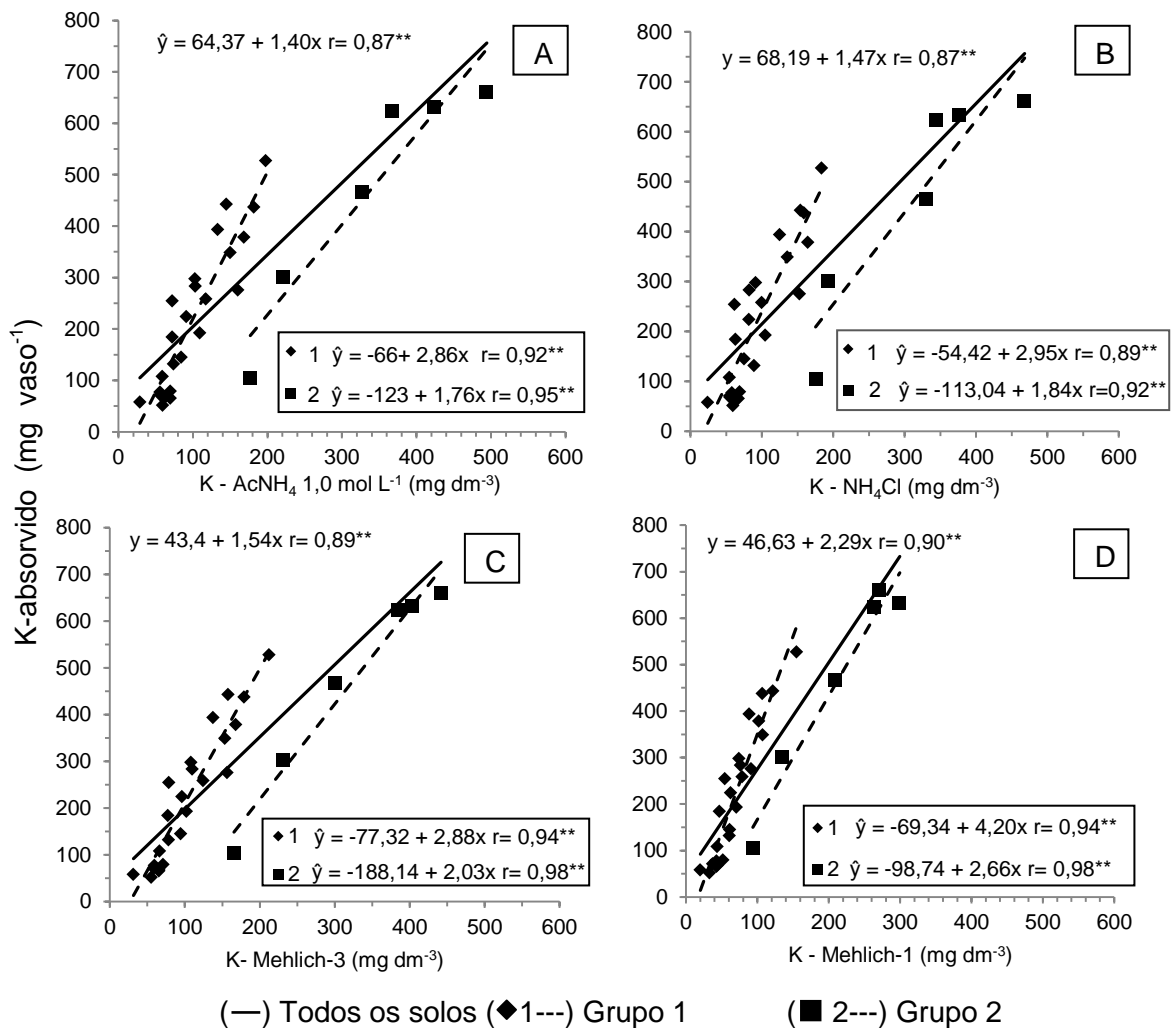


Figura 9. Relação entre a quantidade de K absorvido por plantas de milho e a extraída dos solos pelas diferentes soluções (1^o cultivo).

Os coeficientes de correlação (r) entre a quantidade de K absorvido e o estimado pela solução de AcNH₄, ao se separar os solos em dois grupos, foram de 0,92 e 0,95 para os grupos 1 (G1) e 2 (G2), respectivamente, no primeiro cultivo; no segundo cultivo, foram de 0,84 para G1 e de 0,94 para G2. Para a solução de NH₄Cl, os coeficientes de correlação entre K absorvido por plantas de milho e o K extraído foram de 0,89 e 0,92 para o G1 e G2, no primeiro cultivo, respectivamente e de 0,81 para G1 e de 0,94 para G2, no 2^o cultivo.

Os resultados indicam que a diferença na dinâmica de disponibilidade de K entre os grupos de solos foi constatada por ambos os extratores e que a divisão dos solos em grupos melhora a predição de disponibilidade. Desse modo o estabelecimento de teores críticos de potássio para as plantas deveria considerar a natureza mineralógica dos solos. Na prática, a separação dos solos em grupos de acordo com sua classificação, anterior ao envio da amostra de solo para o laboratório análise, é inviável por parte do agricultor. Este não possui conhecimento suficiente para classificar o solo quanto à sua natureza mineralógica e dependeria da disponibilidade de um pedólogo, o qual, quase sempre, não estaria disponível.

As relações entre a quantidade extraída de K pelo método Mehlich-3 e a absorvida por plantas de milho são apresentadas nas Figuras 9C e 10C, para o primeiro e segundo cultivos, respectivamente. Os coeficientes de correlação (r) entre essas relações foram de 0,89 e de 0,85 para o primeiro e segundo cultivo, respectivamente, indicando que este extrator foi eficiente na predição da disponibilidade de K para as plantas. Porém, a solução de M_3 também detectou uma diferença entre os grupos de solos, principalmente no primeiro cultivo, com o valor de ' r ' de 0,94 para o G1 e 0,98 para o G2. No segundo cultivo, no entanto, essa diferença foi menos pronunciada e não houve mudança significativa nos coeficientes de correlação quando os solos foram separados em dois grupos (Figura 10C). Isso decorre do exaurimento de K do solo pelas plantas no primeiro cultivo, principalmente nos solos do G1. A análise mais detalhada da localização desses pontos no gráfico da figura 10C, e de modo semelhante para os demais gráficos, indica que apenas alguns solos estão deslocados da reta geral de regressão e não um grupo distinto de solos. Assim, é possível que para solos com pouco teor de K não ocorra essa diferenciação em grupos de acordo com algumas de suas características de mineralógicas.

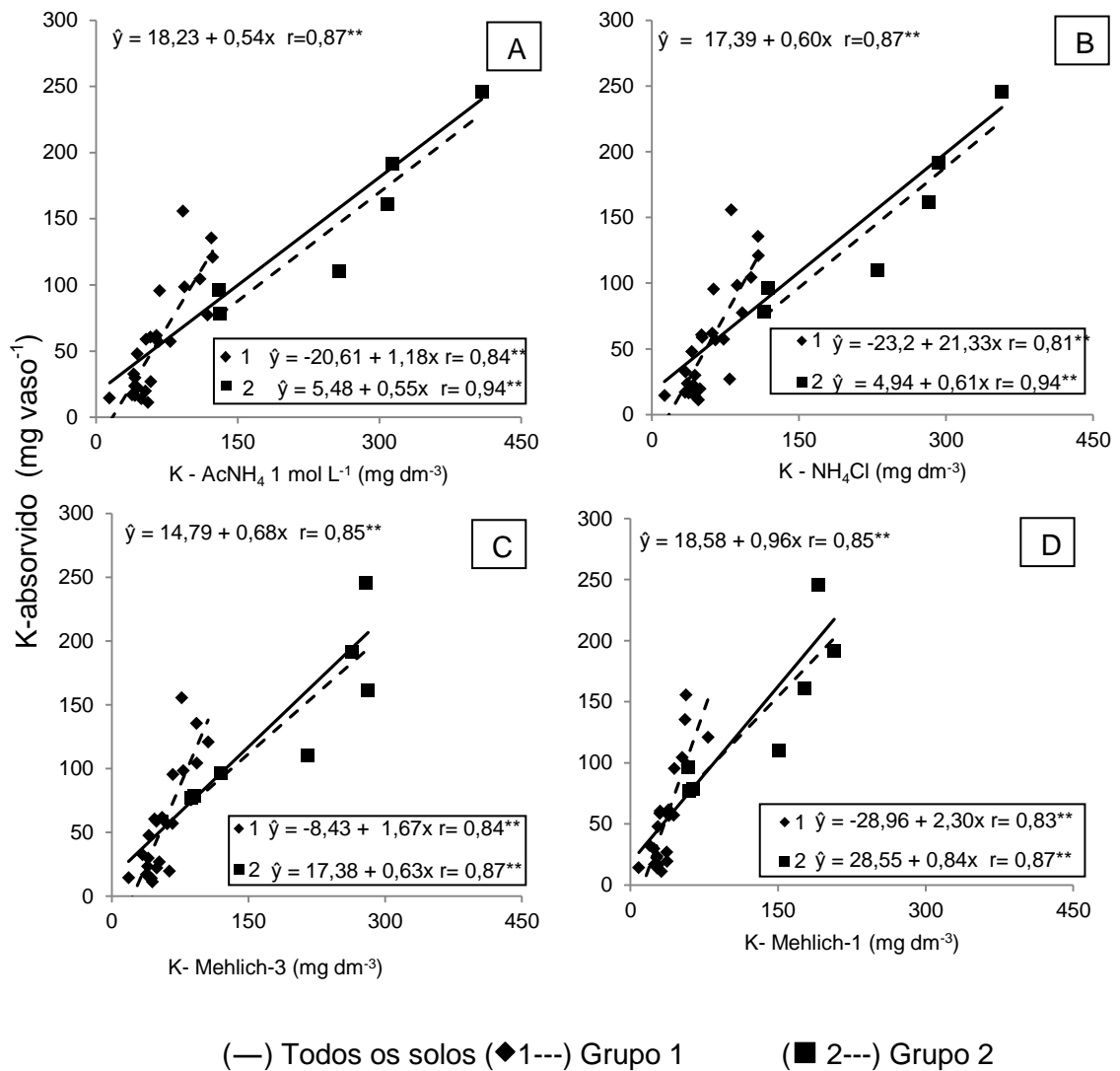


Figura 10. Relação entre a quantidade de K absorvido por plantas de milho e a extraída dos solos pelas diferentes soluções (2^o cultivo).

O potássio trocável é o que está ligado às cargas negativas dos grupos funcionais de superfície dos argilominerais ou da matéria orgânica (MO), por meio de complexos de superfície de esfera externa (Sposito, 1984, 1989). Por princípio, essa forma de potássio é de fácil troca por outro cátion da solução do solo, sendo considerada disponível as plantas. Assim, ao se adicionar ao solo uma solução que libera cátions, estes deveriam trocar com o K e outros cátions do complexo de troca e, desta forma, extraí-los. Esse conceito se aplica às soluções de M₁ e M₃; porém, em alguns solos, o K extraído por estas soluções não corresponde ao trocável extraído por acetato de amônio, procedimento considerado padrão para a determinação de K trocável do solo (Bortolon et al. 2010). Isso decorre da maior sensibilidade destas soluções ácidas ao

tamponamento dos solos, principalmente para o M_1 , que em solos com alto poder tampão diminui a capacidade de extração dos nutrientes, o que não ocorre com a solução de acetato de amônio a pH 7,0.

As relações entre a quantidade extraída de potássio pela solução de Mehlich-1 e a absorvida pela cultura de milho no primeiro e segundo cultivos, são apresentadas nas figuras 9D e 10D, respectivamente. Em ambos os cultivos, a quantidade extraída de K pela solução de M_1 apresentou alta correlação com o K absorvido pelas plantas de milho com coeficientes (r) de 0,89 e 0,85, para o 1º e o 2º cultivos, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Schlindwein & Gianello (2005) e Bortolon et al. (2009), para solos do RS e por Steirner et al. (2009) para solos do estado do Paraná.

A separação dos solos em dois grupos, no 1º cultivo (Figuras 9D), para a solução M_1 , de modo semelhante ao que ocorreu para os demais extratores, aumentou o coeficiente de correlação de 0,90 com todos os solos para 0,94 e 0,98, para G1 e G2, respectivamente. Observa-se, porém, que no 2º cultivo, a separação em dois grupos de solos, como explicado anteriormente, teve pouco efeito nos coeficientes de correlação (Figura 10D).

Todos os métodos foram eficientes em estimar a disponibilidade de K às plantas nos solos estudados. Resultados semelhantes foram obtidos por Bortolon et al. (2010) em solos do Rio grande do Sul, com altos coeficientes de correlação entre a quantidade extraída de K por M_1 e M_3 e a absorvida pelas culturas estudadas. Porém, neste estudo, se observa que as quantidades de potássio extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 (Figura 9 e 10), são menores que as extraídas pelas soluções de $AcNH_4$ e NH_4Cl , o que evidencia a menor capacidade de extração de K dessas soluções ácidas propostas por Mehlich (1953, 1984) nos solos estudados, principalmente naqueles com alto poder tampão.

A análise detalhada das figuras 9 e 10 mostra que os valores de K trocável ou disponível diminuíram do primeiro para o segundo cultivo. Estes resultados são esperados, pois a quantidade de K retirada pela cultura de milho não foi repostada no segundo cultivo. O menor teor de K no solo, principalmente para o grupo 1 (G1), tem um efeito significativo na reta de regressão, pois os solos desse grupo, com menor teor de K, tendem a se agrupar na parte mais

baixa da reta de regressão, fato já mencionado anteriormente. Como os solos mais tamponados (G2) mantiveram alto teor de K no segundo cultivo, houve maior influência desses no estabelecimento da equação e no valor de “r”. Assim, diferentemente do primeiro cultivo em que a reta da regressão para todos os solos é uma média das retas de regressão dos dois grupos, no segundo cultivo, a reta de regressão para todos os solos se aproxima daquela do grupo dois (solos mais tamponados). Isso pode indicar que em solos cultivados por muito tempo, cujo valor de K esteja próximo do teor crítico, não haveria ganhos na separação desses por características mineralógicas.

O uso da saturação por potássio da CTC a pH 7,0 tem sido enfatizada por alguns pesquisadores (Meurer & Anghinoni, 1993; Schneider & Villemin, 1993). Em alguns casos, isso pode acarretar em teores de K no solo relativamente altos, sem que haja a contrapartida na absorção pelas plantas, ou eventualmente, num consumo excessivo (consumo de luxo) sem correspondência no rendimento. Neste trabalho, contudo, foram estabelecidas relações entre a percentagem de saturação por potássio da CTC a pH 7,0 (índice de saturação de K) (calculada pela relação entre o K extraído pelas diferentes soluções e a CTC) e o K acumulado pelas plantas de milho com o objetivo de melhor estimar a disponibilidade de K para grupos de solos com diferentes características mineralógicas. Essas relações são apresentadas nas Figuras 11 e 12, para o primeiro e segundo cultivo, respectivamente.

A relação entre o índice de saturação de K, com o uso solução de AcNH_4 e o K acumulado pelas plantas de milho é mostrada nas figuras 11A e 12A, para o 1º e 2º cultivos, respectivamente. Os coeficientes de determinação (R^2) foram 0,83 e 0,72, respectivamente. Para o K determinado com o uso da solução de NH_4Cl , as relações entre K acumulado por plantas de milho e o índice de saturação de K são mostradas nas Figuras 11B e 12B, respectivamente para o primeiro e segundo cultivos. Os coeficientes de determinação foram de 0,81 (1º cultivo) e de 0,69 (2º cultivo).

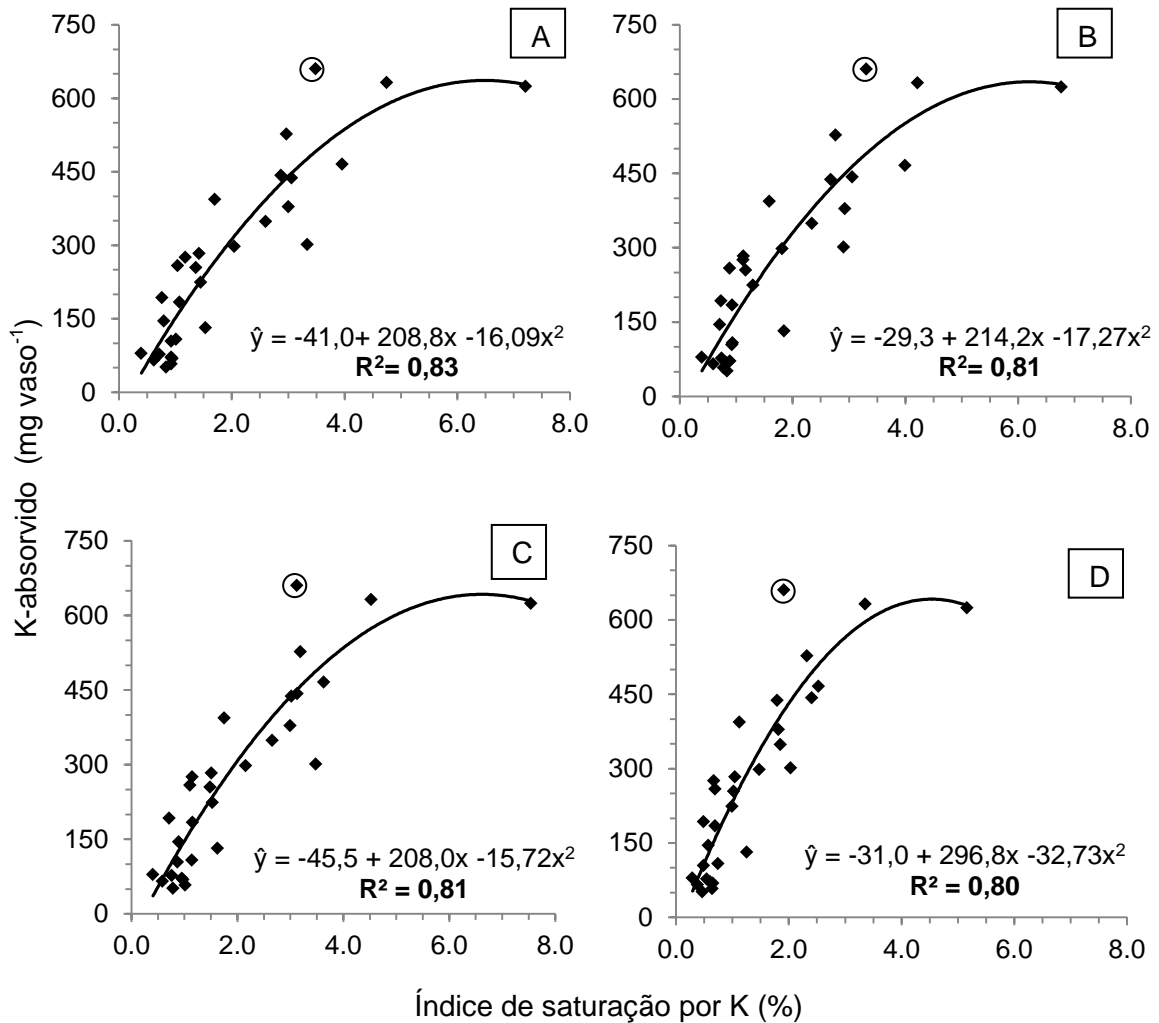


Figure 11. Relação entre a quantidade absorvida de K por plantas de milho e o índice saturação por potássio na CTC dos solos (1^o cultivo). (A = extração de K trocável por AcNH₄; B = extração do K trocável por NH₄Cl; C = extração do K disponível pela solução de Mehlich-3; D = extração do K disponível pela solução de Mehlich-1).

A relação entre o índice de saturação de K, com o uso solução de AcNH₄ e o K acumulado pelas plantas de milho é mostrada nas figuras 11A e 12A, para o 1^o e 2^o cultivos, respectivamente. Os coeficientes de determinação (R²) foram 0,83 e 0,72, respectivamente. Para o K determinado com o uso da solução de NH₄Cl, as relações entre K acumulado por plantas de milho e o índice de saturação de K são mostradas nas Figuras 11B e 12B, respectivamente para o primeiro e segundo cultivos. Os coeficientes de determinação foram de 0,81 (1^o cultivo) e de 0,69 (2^o cultivo). Coeficientes de determinação semelhantes foram encontrados por Bortolon et al. (2010), para o índice K trocável, em solos do Rio Grande do Sul. Meurer & Anghinoni, (1993),

utilizando a solução de AcNH_4 obtiveram um valor de R^2 de 0,51 para a relação entre o potássio trocável e o acumulado por plantas de sorgo, em onze amostras de solos do RS. Os autores concluíram que o K trocável, quando usado isoladamente, não foi suficiente para explicar a variação no K absorvido.

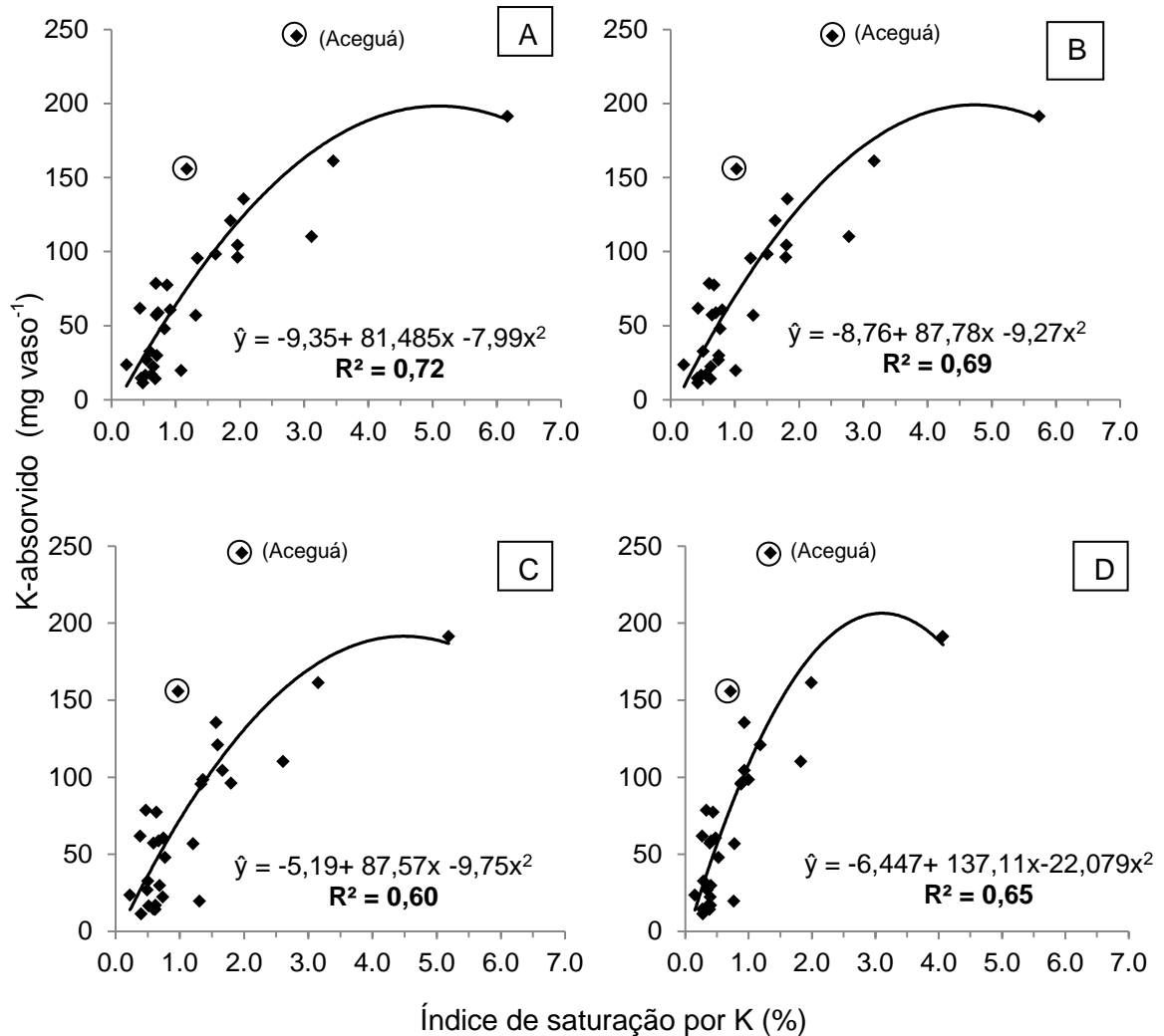


Figure 12. Relação entre a quantidade absorvida de K por plantas de milho e o índice saturação por potássio na CTC do solo (2º cultivo). (A = extração de K trocável por AcNH_4 ; B = extração do K trocável por NH_4Cl ; C = extração do K disponível pela solução de Mehlich-3; D = extração do K disponível pela solução de Mehlich-1).

Assim, os resultados obtidos neste trabalho indicam que o índice de saturação de K é um parâmetro mais adequado para estimar a disponibilidade de K no solo para as culturas, a curto prazo, e pode ser mais útil para definir a recomendação de adubação potássica para os solos do estado do Rio Grande do Sul.

Contudo, para a solução M_3 os coeficientes de determinação foram de 0,81 no primeiro cultivo (Figura 11C) e de 0,60 no segundo (Figura 12C) e para solução de M_1 os coeficientes de determinação foram de 0,80 (1º cultivo) e de 0,65 (2º cultivo) (Figuras 11D e 12D). Observa-se nas Figuras 11 e 12 que o ponto que corresponde ao solo Aceguá (destacado nos gráficos), tem comportamento diferente dos demais no primeiro cultivo (Figura 9). Porém para as soluções extratoras de acetato de amônio e cloreto de amônio, não ocorre melhora nos coeficientes de determinação com a retirada deste ponto no primeiro cultivo. Já para os extratores M_3 e M_1 o R^2 aumenta para 0,83 e 0,84, demonstrando que o tamponamento deste solo tem efeito sobre estas soluções.

Os resultados indicam que o índice de saturação por K é uma alternativa aos métodos existentes, para predizer a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Verificou-se que houve menor dispersão de pontos, não sendo possível a discriminação de dois grupos independentes de solos, principalmente no primeiro cultivo, em que os coeficientes de determinação foram maiores. Os resultados deste trabalho concordam, em geral, com os obtidos por Meurer & Anghinoni (1993), quando utilizaram o índice de saturação de K, em substituição ao K trocável, para estimar a disponibilidade desse nutriente para as plantas em solos do Rio Grande do Sul. No entanto, ao se utilizar esse índice, deve ser considerado o extrator de K, uma vez que o valor K/CTC (K trocável ou disponível/CTC) é influenciado pela solução extratora. Pode ser observado, em ambos os cultivos (Figuras 11 e 12), que a solução de Mehlich-1 extrai menos potássio do solo que as demais testadas e, conseqüentemente, o índice de saturação por K é menor em relação aos demais extratores. Nesse caso, a faixa adequada para o índice de saturação de K para as culturas é diferente para diferentes soluções extratoras.

No segundo cultivo ocorreu maior dispersão dos pontos e os coeficientes de determinação foram menores. Um exame detalhado dos gráficos mostra que, em parte, a maior dispersão ocorreu devido a dois pontos específicos, correspondentes aos solos Aceguá (Chernossolo ebânico carbonático) e Taquara (Chernossolo Háplico órtico). Esses solos têm altos teores de K, porém valores de CTC proporcionalmente ainda maiores (Tabela 7), o que representa uma baixa saturação por K, mas alta quantidade de K disponível,

resultando em maior absorção deste nutriente pelas plantas em relação aos outros solos estudados. Quando retirados da relação, houve um aumento significativo nos coeficientes de determinação com todas as soluções extratoras, passando de 0,72, 0,69, 0,60 e 0,65 para 0,81, 0,79, 0,73 e 0,76 para as soluções de AcNH_4 , NH_4Cl , M_3 e M_1 , respectivamente. Os menores coeficientes de determinação obtidos no segundo cultivo são explicados, em parte, pela grande depleção nos teores de K via absorção e, conseqüentemente, diminuição acentuada na saturação por potássio da CTC. Como explicado acima, o decréscimo do teor de K não foi significativo nos solos Aceguá e Taquara do primeiro para o segundo cultivo.

O índice de saturação de K é um parâmetro que gera muita controvérsia e não é aceito pela maioria dos pesquisadores em fertilidade do solo e adubação. Contudo, um exame mais atento nos sistemas de recomendação de adubação utilizados no Brasil indica que o uso da CTC a pH 7,0 como critério auxiliar de disponibilidade de K para as plantas é muito comum. Para a região do cerrado, os solos são divididos em duas faixas de CTC, $<4,0$ e $>4,0$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para a recomendação de adubação de correção e de manutenção (Vilela et al, 2007). Nos estados do RS e SC, os solos são classificados em três classes de CTC, $<5,0$ de 5,0 a 15 e >15 (CQFS-RS/SC, 2004). Em ambos os sistemas de recomendação, os teores críticos são estabelecidos para cada classe, o que na prática corresponde a um ajuste da saturação por K na CTC, embora nesses manuais, isso é explicitado como um parâmetro auxiliar para interpretação das análises e para a recomendação de fertilizante potássico. Na verdade, a inclusão da CTC no sistema de recomendação é um modo de estabelecer um mínimo de saturação de K que varia entre 2 e 4% para a região do cerrado e de 1,5 a 2,2% para a região do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004; Vilela et al., 2007). O sistema de recomendação de adubação de Minas Gerais (CFS/MG, 1999) estabelece, para fins de adubação de correção de K que a dose seja suficiente para atingir valores de saturação por K entre 3 a 5%, para solos com textura média a argilosa.

Os resultados obtidos neste trabalho, suportados por outros da literatura (Nachtigall & Vahl, 1991; Meurer & Anghinoni, 1993), indicam que o número de faixas de CTC estabelecido pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, poderia ser ampliado a fim de manter a saturação por K entre valores

de 2 a 5 % e não de 1,5 a 2% como ocorre atualmente, com valores mais altos, no caso de uso da solução de NH_4Cl , e menores, para as soluções de M_1 e M_3 . O limite de $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ é muito baixo e deveria ser aumentado com correspondência na elevação do teor crítico de K. Mudança semelhante foi sugerida para a cultura do arroz irrigado em solos do RS e SC (XXIX RTCAI, 2012). Assim, nesse sistema de cultivo, solos com CTC a pH 7,0 maior que $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ devem ser corrigidos com 20 kg de K_2O a mais do que o recomendado pela CQFS-RS/SC (2004). Com base nos resultados deste trabalho, sugere-se a adoção de cinco faixas de CTC, <5,0; 5-10; 10-15; 15-20 e >20 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com os respectivos níveis críticos: 40; 80; 120; 160 e 220 mg dm^{-3} de K trocável/extraível, o que corresponderia um mínimo de 1,8 % da CTC a pH 7,0 ocupada por K. Desse modo, seria abrangido maior número de solos, incluindo principalmente solos com característica de argilominerais 2:1, com a manutenção da proporção entre as classes de CTC e o teor de K trocável no solo. Porém, estudos de calibração são necessários para se verificar a campo as respostas das culturas a estes níveis de saturação, a fim de se determinar os níveis críticos para os solos do Rio Grande do Sul.

5.4. CONCLUSÕES

- 1- Todas as soluções extratoras foram eficientes em predizer a disponibilidade de K para as plantas nos solos estudados. Assim, a solução de NH_4Cl pode ser usada como alternativa aos extratores tradicionais.
- 2- O agrupamento dos solos por características mineralógicas ou físico-químicas semelhantes aumenta a eficiência do K-trocável como indicador de disponibilidade de potássio às plantas.
- 3- O índice de saturação por K pode ser utilizado como um único indicador da disponibilidade de potássio para as plantas.
- 4- Solos com predomínio de minerais 2:1 e com alta CTC, necessitam de teores maiores de K trocável para atingirem o mesmo rendimento de plantas que solos com predomínio de minerais 1:1.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de produção agrícola estão em constante evolução. Logo, os programas de análise e interpretação da fertilidade, além dos programas de recomendação de adubação e calagem necessitam ser reavaliados para que possam atender as expectativas deste setor do agronegócio. Assim, estudos de correlação como este devem ser desenvolvidos, a fim de corrigir alguns problemas existentes no sistema atual, e/ou como no caso do cloreto de amônio, adaptar-se a novas tecnologias presentes nos laboratórios de análise de solo como o ICP-EOS.

No estado do Rio Grande do Sul os laboratórios de análise de solo adotam metodologias que foram adaptadas à tecnologia e demanda existente na época (duas últimas décadas do século XX), as quais foram calibradas para um sistema de recomendação de adubação e calagem funcional, porém ainda limitado, principalmente para os macronutrientes P e K. Este último, foco do presente estudo, dentre os macronutrientes primários, é o menos estudado quanto à determinação de sua disponibilidade para as plantas. Por conseguinte, surgem inúmeros questionamentos quanto aos índices de disponibilidade.

Neste estudo primeiramente procurou-se utilizar o cloreto de amônio como extrator da fração trocável do K, juntamente com outros cátions do solo, o que, para os solos utilizados, a solução se mostrou altamente eficiente e prática, podendo ser utilizada com esta finalidade nos laboratórios de análise de solo. Porém, com o desenvolvimento dos trabalhos ficou evidente que o índice potássio trocável isoladamente possui limitações em representar a disponibilidade deste nutriente para as plantas para os solos estudados. Logo, conforme recomendação da CQFS-RS/SC, a separação dos solos em faixas de

CTC melhora a previsão de disponibilidade, porém, um índice que deve ser considerado é a saturação por K na CTC.

Assim, estudos de calibração utilizando o NH_4Cl , envolvendo análises químicas e mineralógicas, são necessários para melhor se compreender a dinâmica do potássio em solos do RS. Com isso, pode-se identificar os índices que melhor representam a disponibilidade de K para as plantas, para desenvolver um sistema de análise, interpretação e recomendação de adubação com maior precisão e maiores ganhos para o produtor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, A. K. Comparisons of Mehlich 3, Mehlich 1, ammonium bicarbonate-DTPA, 1.0 M ammonium acetate, and 0.2 M ammonium chloride for extraction of calcium, magnesium, phosphorus, and potassium for a wide range soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 24, p. 603-612, 1993.

ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Avaliação da disponibilidade do fósforo para os solos do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 127-336, 1974.

ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S. J. Recomendações de uso de fertilizantes no Brasil. In: SIMPÓSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 1984, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA-DEP, 1984. p. 179-204.

BOEIRA R. C. et al. Extração simultânea de alumínio, cálcio, magnésio, potássio e sódio do solo com solução de cloreto de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. , p. 929-936, 2004.

BORTOLON, L. **Métodos de avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHILINDWEIN, J. A. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Sul do Brasil estimada por métodos multielementares. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 34, p. 1753-1761, 2010.

BORTOLON, L.; SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Métodos de extração de fósforo e potássio no solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 2400-2407, 2009.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetida à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 327-335, 2005.

BORTOLUZZI, E. D. et al. Contribuição de constituintes de solo à capacidade de troca de cátions obtida por diferentes métodos de extração. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v. 33, p. 507-515, 2009.

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.

CANADIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE. **Soil Sampling and methods of analysis**. 2nd edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. 196 p.

CANTARELLA, H. et al. Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In: VAN RAIJ, B. (Ed.). et al. **Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

CHAPMAN, H. D. Cation-exchange capacity. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis** - Chemical and microbiological properties. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1965. p. 891-901. (Série Agronomy, n. 9).

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5^a Aproximação. Viçosa, MG: SBCS, 1999. 359 p.

COSTA, J. P. V. et al. Fluxo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidade e de compactação. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 56-62, 2009.

CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L., (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 71-92.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p. (Embrapa – CNPS. Documentos, n. 1).

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F. (Ed.). et al. ; **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS/UFV. p. 551-594, 2007.

FONSECA, S. **Síntese das contribuições do projeto microbacia**: integração e extrapolação de resultados e alterações significativas no manejo do eucalipto. Aracruz: Arcel, 2004. (Workshop sobre microbacias).

GALRÃO, E. Z.; VOLKWEISS, S. J. Disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 5, p. 11-8, 1981.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GRIMME, H.; NEMETH, K. The evaluation of soil K status by means of soil testing. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., 1978, Bern. **Proceedings...** Bern: International Potash Institute, 1979. p. 99-108.

HELFFERICH, F. **Ion Exchange**. New York: McGraw-Hill, (1962b).

HELMKE, P. A.; SPARKS, D. L. Lithium, Sodium Potassium, Rubidium, and Cesium. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 3. Chemical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 551-574. (Book Series, n. 5).

HESSE, P. R. **A textbook of soil chemical analysis**. New York: Chemical Publishing, 1972. 520 p.

HOSSEINPUR, A. R.; SAMAVATI, M. Evaluation of chemical extractants for the determination of available potassium . **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. , p. 1559-1570, 2008.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BARTZ, H. R. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e SC. In.: REUNIÃO ANUAL DA ROLAS, 23., 2001, Frederico Westphalen. **Anais...** Frederico Westphalen: ROLAS/SBCS, 2001. p. 21-26.

KRASKE, C. R.; FERNANDEZ, I. J.; SPENCER, C. J. A comparison of methods for measuring extractable Ca, Mg, K, Na, Mn, Al, Fe and P from New England Forest soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 20, p. 439-464, 1989.

LIEROP, W. V.; SEN TRAN, T. Comparative potassium levels removed from soils by electro-ultrafiltration and some chemical extractants. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 65, p. 25-34, 1985.

LOPES, A. S. **Solos sob "cerrado"**: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 162 p.

MCARTHUR, W. M. **Reference Soils of South-Western Australia**. Aust., Perth: Dept. of Agri., 1991. p. 1-264.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. Soil Test Division Mimeo, North Carolina Department of Agriculture, Raleigh, NC, 1953. 8 p.(Mimiografado).

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 15, p. 1409-1416, 1984.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Potassium**. In: Principles of plant nutrition, Bern: International Potash Institute, 1987. 687 p.

METSON, A. J. **Methods of chemical analysis for soil survey samples**. New Zealand: NZ DSIR, 1971. p. 172. (NZ Soil Bureau Scientific Report n. 12).
 METSON, A. J. **Methods of chemical analysis for survey samples**. Wellington: D.S.I.R., 1956. 207p. (Soil Bureau Bulletin, n. 12).

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 375-382, 1993.

MIELNICZUK, J. **O potássio no solo**. 4. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto internacional da Potassa, 1982. 80 p. (Boletim Técnico, n. 2).

MILLER, J. N.; MILLER, J. C. **Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**. 5th ed. Harlow, UK: Pearson Education Ltd., 2005. 268 p.

NACHTIGALL, G. R.; RAIJ B. V. Análise e interpretação do potássio no solo. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS. 2005. p. 93-118.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 37-42, 1991.

NÉMETH, K. The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultrafiltration (EUF). **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 31, p. 155-187, 1979.

NF X31-108. **Détermination des cations Ca, Mg, K, Na extractibles par l'acétate d'ammonium**. In: Qualité des sols. Paris: AFNOR, 1996. p. 59-65.

NF X31-130. **Détermination de la capacité d'échange cationique et des cations extractibles**. In: Qualité des sols. Paris: AFNOR, 1996. p. 103-116.

PANSU, M.; GAUTHEYROU, J. **Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 993 p.

PEECH, M. et al. **Methods of Soil Analysis for soil Fertility Investigations**. Washington, D.C.: US Department of Agriculture, 1947. 25 p.

PRIANISHNIKOV, D. Quantitative bestimmung der in boden vorhanden adsorptiv gebunden besen. **Landw. Vers. Stat.** n. 78/80, p. 667-680, 1913.

RAIJ B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170 p

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

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

RICH, C. I.; BLACK, W. R. Potassium exchange as affected by cation size, pH, and mineral structure. **Soil Science**, Washington, v. 97, p. 384-390, 1964.

RITCHEY, K. D. **O potássio nos oxissols e ultissols dos trópicos úmidos**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. 69 p. (Boletim Técnico, n. 7).

ROBARGE, W. P.; FERNANDEZ, I. J. **Quality assurance methods manual for laboratory analytical techniques**. Corvallis, Oregon: U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis Environmental Research Laboratory 1986. 90 p.

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

SCHNEIDER, A.; VILLEMIN, P. **Importance of texture and CEC in K fertilization advice**. Basel, Switzerland: Intern. Potash Institute, 1993. p. 34-37.

SCHOLLENBERGER, C. J. Exchangeable hydrogen and soil reaction. **Science**, v. 65, p. 552-553, 1927.

SCHOLLENBERGER, C. J.; SIMONS, R. H. Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soils. **Soil Science**, Washington, v. 59, p. 13-24, 1945.

SHUMAN, L. M.; DUNCAN, R. R. Soil exchangeable cations and aluminum measured by ammonium chloride, potassium chloride, and ammonium acetate. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 21, p. 1217-1218, 1990.

SILVA, J. R. J.; MEURER, E. J. Disponibilidade de potássio em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, n. 2, p. 137-142, 1988.

SINCLAIR, A. H. A comparison of electro-ultrafiltration and quantity/intensity measurements of soil potassium with its uptake by ryegrass in Scottish soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 64, p. 85-94, 1982.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400 p.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. XXIX Reunião técnica da cultura do arroz irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Itajaí, SC: SOSBAI, 2012. 179 p. (Boletim Técnico).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.

SPARKS, D. L. **Environmental Soil Chemistry**. USA: Academic Press, Elsevier Science, 2003. 352 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.

SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1984. 234 p.

STEINER, F. et al. Disponibilidade de potássio para a soja em solos do estado do paraná extraído pelas soluções de acetato de amônio, mehlich-1, mehlich-3 e bray-1. **Synergismus Scyentifica UTFPR** , Pato Branco , v. 4, n. 1 , 2009.

STUANES, A. O.; OGNER, G.; OPEM, M. Ammonium nitrate as extractant for soil exchangeable cations, exchangeable acidity and aluminum. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 15, p. 776-778, 1984

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

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan Publishing, 1975. 694 p.

TUCKER, B. M.; BEATTY, H. J. Exchangeable cations and cation exchange capacity. In: **Methods for Analysis of Irrigated Soils**. London : H.M. Stationery Office, 1974. (Commonwealth Bureau of Soil, Technology Communication. n. 54).

ULRIKA, J. B. et al. A comparative study of two methods for determination of pH, exchangeable base cations, and aluminum. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, p. 3809– 3824, 2002.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Survey Laboratory Methods Manual**. Soil Survey Investigations Report n. 42. Lincoln, Nebraska: USDA, 2004. 700 p.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; SOUSA, D. M. G. de. Aduba o potássica e com micronutrientes. In: MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. de (Ed.). **Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. cap. 8, p. 179-187.

VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 649-658, 2004.

WADA, K.; OKAMURA, Y. Electric charge characteristics of Ando A₁ and buried A₁ horizons soils. **Soil Science**, Washington, v. 31, p. 307-314, 1980.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**. Washington, v. 37, p. 29–38, 1934.

ZBÍRAL, J.; NEMEC, C. Comparison of Mehlich 2, Mehlich 3, CAL, Schachtschabel, 0.01 M CaCl₂ and aqua regia extractants for determination of potassium in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, p. 795-803, 2005.

8. APÊNDICES

Apêndice I. Teor de K dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução Mehlich 1 em triplicata

Solos	5 Minutos				30 Minutos				60 Minutos				
	Padrão	Mehlich-1			Média	Mehlich-1			Média	Mehlich-1			Média
		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
-----Cmol _c dm ⁻³ -----													
1	0,56	0,45	0,44	0,44	0,45	0,44	0,48	0,49	0,47	0,54	0,50	0,49	0,51
2	0,42	0,32	0,31	0,34	0,33	0,38	0,37	0,36	0,37	0,40	0,39	0,35	0,38
3	3,58	3,27	2,72	2,88	2,96	3,18	3,32	2,82	3,11	3,68	3,31	3,20	3,39
4	0,16	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,11	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10	0,10
5	0,17	0,17	0,15	0,16	0,16	0,18	0,19	0,18	0,18	0,19	0,16	0,17	0,17
6	0,32	0,26	0,21	0,24	0,24	0,29	0,27	0,29	0,28	0,30	0,27	0,29	0,29
7	0,17	0,17	0,14	0,17	0,16	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,15	0,16	0,16
8	0,44	0,45	0,44	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,46	0,54	0,43	0,44	0,47
9	0,17	0,18	0,17	0,18	0,18	0,21	0,21	0,20	0,21	0,20	0,21	0,18	0,20
10	0,29	0,30	0,30	0,31	0,30	0,32	0,31	0,30	0,31	0,34	0,27	0,32	0,31
11	0,50	0,37	0,34	0,33	0,35	0,42	0,45	0,37	0,42	0,55	0,45	0,45	0,48
12	0,46	0,44	0,42	0,38	0,41	0,46	0,47	0,39	0,44	0,46	0,38	0,47	0,43
13	0,31	0,30	0,30	0,31	0,30	0,31	0,33	0,30	0,32	0,36	0,42	0,34	0,38
14	0,47	0,35	0,37	0,33	0,35	0,41	0,47	0,39	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
15	0,69	0,72	0,71	0,60	0,68	0,74	0,71	0,76	0,74	0,80	0,70	0,68	0,73
16	0,91	1,02	0,87	0,91	0,93	0,92	1,09	0,85	0,96	0,99	1,01	1,00	1,00
17	0,25	0,23	0,21	0,20	0,22	0,21	0,23	0,22	0,22	0,25	0,24	0,22	0,23
18	0,92	0,91	0,81	0,86	0,86	0,77	0,96	0,87	0,87	0,95	0,96	0,87	0,93
19	0,48	0,46	0,46	0,43	0,45	0,45	0,42	0,45	0,44	0,50	0,47	0,46	0,48
20	0,82	0,61	0,59	0,55	0,59	0,64	0,60	0,60	0,61	0,71	0,73	0,69	0,71

Continuação...

Apêndice I. Continuação...

21	0,34	0,25	0,24	0,21	0,24	0,28	0,25	0,25	0,26	0,30	0,26	0,25	0,27
22	0,96	0,68	0,61	0,66	0,65	0,69	0,74	0,67	0,70	0,78	0,69	0,72	0,73
23	0,12	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,12	0,10	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11
24	1,14	0,95	0,74	0,81	0,83	0,97	0,90	0,84	0,90	0,95	0,01	0,94	0,63
25	0,62	0,65	0,63	0,55	0,61	0,56	0,66	0,65	0,62	0,64	0,60	0,61	0,62
26	0,43	0,45	0,38	0,40	0,41	0,39	0,41	0,37	0,39	0,44	0,43	0,40	0,43
27	0,78	0,55	0,51	0,53	0,53	0,56	0,58	0,53	0,55	0,62	0,59	0,57	0,60
28	0,20	0,23	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,17	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
29	0,30	0,27	0,27	0,27	0,27	0,30	0,30	0,26	0,29	0,33	0,28	0,28	0,30
30	1,40	1,02	1,12	0,92	1,02	1,03	1,15	0,94	1,04	1,22	1,14	1,10	1,15
31	0,24	0,26	0,27	0,23	0,25	0,24	0,28	0,22	0,24	0,27	0,00	0,30	0,19
32	0,82	0,76	0,67	0,65	0,69	0,77	0,83	0,71	0,77	0,82	0,78	0,82	0,80
33	0,40	0,39	0,37	0,39	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,40	0,45	0,41	0,42
34	1,03	0,74	0,61	0,63	0,66	0,73	0,79	0,72	0,75	0,80	0,80	0,78	0,80
35	0,08	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07
36	0,49	0,38	0,43	0,46	0,43	0,47	0,49	0,45	0,47	0,53	0,48	0,52	0,51
37	3,94	2,84	2,28	2,40	2,50	2,85	2,77	2,77	2,80	3,14	2,91	3,01	3,02

Apêndice II. Teor de K dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH₄Cl em triplicata

Solos	Padrão	5 Minutos				30 Minutos				60 Minutos			
		NH ₄ Cl				NH ₄ Cl				NH ₄ Cl			
		1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
----- Cmol _c dm ⁻³ -----													
1	0,56	0,52	0,63	0,55	0,57	0,52	0,54	0,53	0,53	0,56	0,58	0,57	0,57
2	0,42	0,36	0,39	0,36	0,37	0,34	0,39	0,34	0,35	0,36	0,38	0,40	0,38
3	3,58	2,92	3,43	3,25	3,20	2,88	3,09	2,88	2,95	3,15	3,29	3,21	3,22
4	0,16	0,16	0,14	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,16	0,15	0,16	0,16
5	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,15	0,16	0,15	0,15	0,19	0,16	0,17	0,17
6	0,32	0,30	0,31	0,30	0,31	0,30	0,28	0,27	0,28	0,31	0,28	0,30	0,30
7	0,17	0,15	0,17	0,18	0,17	0,15	0,17	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
8	0,44	0,36	0,43	0,38	0,39	0,36	0,45	0,40	0,40	-0,01	0,40	0,40	0,26
9	0,17	0,15	0,20	0,15	0,17	0,14	0,18	0,14	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16
10	0,29	0,23	0,21	0,24	0,23	0,22	0,29	0,23	0,25	0,27	0,25	0,25	0,26
11	0,50	0,38	0,34	0,36	0,36	0,29	0,35	0,34	0,32	0,39	0,39	0,35	0,37
12	0,46	0,37	0,37	0,43	0,39	0,37	0,43	0,37	0,39	0,42	0,39	0,56	0,46
13	0,31	0,24	0,19	0,24	0,23	0,28	0,26	0,25	0,26	0,29	0,29	0,29	0,29
14	0,47	0,42	0,36	0,42	0,40	0,41	0,45	0,42	0,43	0,46	0,44	0,43	0,44
15	0,69	0,59	0,52	0,60	0,57	0,54	0,64	0,55	0,58	0,75	0,65	0,62	0,68
16	0,91	0,72	0,75	0,81	0,76	0,76	0,90	0,77	0,81	0,92	0,84	0,78	0,85
17	0,25	0,20	0,20	0,23	0,21	0,20	0,24	0,23	0,22	0,26	0,25	0,23	0,24
18	0,92	0,78	0,71	0,88	0,79	0,74	0,87	0,80	0,80	1,01	0,92	0,84	0,92
19	0,48	0,36	0,36	0,42	0,38	0,38	0,44	0,38	0,40	0,48	0,40	0,41	0,43
20	0,82	0,76	0,65	0,79	0,73	0,72	0,65	0,66	0,68	0,88	0,75	0,81	0,81
21	0,34	0,30	0,26	0,32	0,30	0,26	0,30	0,28	0,28	0,34	0,31	0,31	0,32
22	0,96	0,75	0,69	0,87	0,77	0,62	0,83	0,76	0,74	0,90	0,80	0,82	0,84
23	0,12	0,09	0,08	0,12	0,10	0,08	0,11	0,10	0,10	0,13	0,12	0,12	0,12
24	1,14	0,88	0,98	1,14	1,00	0,85	1,13	0,98	0,98	1,35	1,20	1,02	1,19
25	0,62	0,50	0,54	0,60	0,55	0,45	0,58	0,53	0,52	0,62	0,64	0,56	0,61

Continuação...

Apêndice II. Continuação...

26	0,43	0,36	0,36	0,41	0,38	0,31	0,46	0,39	0,39	0,47	0,46	0,41	0,45
27	0,78	0,60	0,66	0,82	0,69	0,58	0,73	0,70	0,67	0,82	0,84	0,73	0,80
28	0,20	0,16	0,11	0,16	0,14	0,12	0,16	0,14	0,14	0,17	0,16	0,15	0,16
29	0,30	0,30	0,26	0,31	0,29	0,25	0,29	0,28	0,28	0,32	0,34	0,32	0,33
30	1,40	1,20	1,17	1,32	1,23	1,14	1,30	1,21	1,22	1,42	1,39	1,42	1,41
31	0,24	0,26	0,24	0,25	0,25	0,22	0,29	0,24	0,25	0,28	0,26	0,25	0,26
32	0,82	0,71	0,72	0,84	0,76	0,61	0,83	0,72	0,72	0,87	0,77	0,78	0,80
33	0,40	0,39	0,34	0,43	0,39	0,33	0,45	0,36	0,38	0,45	0,43	0,38	0,42
34	1,03	1,00	0,90	1,01	0,97	0,84	1,05	0,93	0,94	1,11	1,08	1,00	1,06
35	0,08	0,07	0,04	0,08	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
36	0,49	0,45	0,38	0,49	0,44	0,42	0,51	0,42	0,45	0,49	0,51	0,47	0,49
37	3,94	4,07	3,54	4,00	3,87	3,62	4,42	3,45	3,83	3,77	4,16	4,03	3,99

Apêndice III. Teor de Ca dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução Mehlich-1 em triplicata

Solos	5 Minutos					30 Minutos					60 Minutos				
	Padrão	Mehlich-1			Média	Mehlich-1			Média	Mehlich-1			Média		
	1	2	3	1		2	3	1		2	3				
	----- Cmol _c dm ⁻³ -----														
1	6,20	5,2	4,7	4,9	4,93	5,0	5,2	5,4	5,20	5,9	5,2	5,6	5,57		
2	14,30	13,7	11,5	13,0	12,73	14,5	13,9	13,6	14,00	14,7	14,0	13,4	14,03		
3	27,49	35,3	27,5	30,3	31,03	33,1	31,8	30,0	31,63	36,3	32,0	33,0	33,77		
4	11,30	10,0	8,1	9,0	9,03	9,5	9,8	9,4	9,57	10,7	9,0	9,4	9,70		
5	1,90	2,2	1,7	1,8	1,90	2,1	2,0	2,0	2,03	2,1	1,8	1,9	1,93		
6	4,00	5,1	3,7	4,3	4,37	5,3	4,7	5,0	5,00	5,3	4,8	5,2	5,10		
7	5,00	6,7	4,9	5,9	5,83	6,6	5,9	5,9	6,13	6,0	5,4	6,0	5,80		
8	8,70	10,4	8,6	9,8	9,60	9,9	10,1	10,6	10,20	10,8	9,8	9,6	10,07		
9	6,40	8,2	6,9	7,7	7,60	8,8	8,8	8,4	8,67	8,8	8,2	7,7	8,23		
10	31,53	35,8	30,2	35,4	33,80	37,4	32,7	34,2	34,77	38,5	30,9	37,5	35,63		
11	4,30	3,8	3,2	3,3	3,43	4,2	4,1	3,8	4,03	4,4	3,8	4,0	4,07		
12	6,80	8,5	7,2	7,0	7,57	8,9	8,6	7,4	8,30	9,0	7,3	8,4	8,23		
13	4,40	5,1	4,5	4,9	4,83	5,3	5,0	4,9	5,07	5,7	5,3	5,6	5,53		
14	13,10	11,9	10,8	10,5	11,07	13,4	13,8	12,5	13,23	12,9	13,4	13,6	13,30		
15	7,00	7,9	7,1	6,6	7,20	8,2	7,5	8,2	7,97	8,4	7,6	7,8	7,93		
16	30,56	43,8	34,8	38,1	38,90	42,7	44,5	42,1	43,10	42,6	42,7	46,3	43,87		
17	2,30	2,3	1,9	2,0	2,07	2,3	2,1	2,2	2,20	2,1	2,2	2,0	2,10		
18	12,80	14,8	12,1	14,3	13,73	13,0	14,9	14,6	14,17	15,7	15,6	14,8	15,37		
19	3,60	4,3	3,8	4,1	4,07	4,2	3,6	4,1	3,97	4,2	4,0	4,0	4,07		
20	14,30	12,1	10,3	10,6	11,00	12,4	11,1	11,6	11,70	13,0	13,7	13,4	13,37		
21	6,50	6,1	5,1	5,0	5,40	6,5	5,6	6,1	6,07	6,9	6,4	6,2	6,50		
22	9,90	9,0	7,2	8,4	8,20	9,1	8,8	8,8	8,90	10,0	9,0	9,1	9,37		
23	5,20	5,7	4,2	4,4	4,77	5,3	5,7	5,4	5,47	5,6	5,8	5,6	5,67		
24	15,60	12,9	9,5	11,4	11,27	13,4	11,5	11,9	12,27	12,8	0,6	13,3	8,90		
25	4,00	5,1	4,0	4,4	4,50	4,5	4,5	4,7	4,57	4,6	5,0	4,8	4,80		

Continuação...

Apêndice III. Continuação...

26	5,30	6,0	4,7	5,3	5,33	5,8	5,7	5,5	5,67	5,9	6,0	5,6	5,83
27	4,20	4,2	3,4	4,0	3,87	4,2	4,0	4,0	4,07	4,6	4,4	4,2	4,40
28	1,70	2,1	1,7	1,8	1,87	1,9	1,9	1,5	1,77	1,8	1,8	1,8	1,80
29	2,40	2,7	2,4	2,6	2,57	2,9	2,7	2,5	2,70	3,0	2,8	2,8	2,87
30	15,40	14,2	13,8	12,3	13,43	14,7	15,1	13,6	14,47	17,1	17,1	16,3	16,83
31	1,30	1,6	1,4	1,3	1,43	1,4	1,3	1,3	1,33	1,4	0,0	1,6	1,00
32	8,20	7,8	6,2	6,8	6,93	8,6	7,8	7,5	7,97	8,5	9,1	8,7	8,77
33	11,30	12,2	9,8	11,1	11,03	12,2	11,2	11,9	11,77	12,0	13,2	12,1	12,43
34	12,30	10,9	8,4	9,6	9,63	10,5	10,3	10,2	10,33	11,2	11,4	11,1	11,23
35	0,90	1,3	0,9	1,1	1,10	1,3	1,1	1,2	1,20	1,2	1,5	1,3	1,33
36	5,00	4,5	4,2	5,4	4,70	5,8	5,1	5,3	5,40	5,7	5,7	5,7	5,70
37	7,40	6,2	4,6	5,6	5,47	6,9	6,0	6,5	6,47	7,4	7,0	7,0	7,13

Apêndice IV. Teor de Ca dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH₄Cl em triplicata

Solos	5 Minutos					30 Minutos					60 Minutos				
	Padrão	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			Média		
		1	2	3		1	2	3		1	2	3			
		----- Cmol _c dm ⁻³ -----													
1	6,20	5,4	6,9	6,3	6,22	5,7	6,3	6,0	5,99	6,2	6,6	6,2	6,35		
2	14,30	12,6	14,2	13,8	13,54	12,6	14,8	13,3	13,57	13,7	14,4	14,5	14,17		
3	27,49	19,7	22,3	22,7	21,56	21,5	23,9	22,1	22,51	24,1	25,3	25,4	24,93		
4	11,30	10,7	11,4	12,0	11,37	11,0	11,9	11,2	11,39	11,8	12,2	11,7	11,90		
5	1,90	1,6	2,0	1,9	1,84	1,7	1,9	1,7	1,74	2,0	1,8	1,8	1,85		
6	4,00	4,0	4,5	4,5	4,37	4,3	4,5	4,3	4,34	4,7	4,2	4,4	4,43		
7	5,00	4,7	5,9	5,8	5,48	5,2	6,1	5,1	5,46	5,1	5,7	5,2	5,33		
8	8,70	7,5	9,1	8,3	8,33	7,9	9,8	9,1	8,93	0,2	9,1	9,0	6,07		
9	6,40	5,8	6,8	6,3	6,28	5,9	7,4	6,5	6,61	7,4	6,8	6,8	6,98		
10	31,53	20,5	19,5	23,1	21,02	19,1	27,7	23,4	23,42	28,0	26,6	25,2	26,60		
11	4,30	3,2	3,2	3,3	3,20	2,8	3,2	3,2	3,06	3,4	3,2	3,3	3,33		
12	6,80	6,1	6,5	7,1	6,59	6,3	7,5	6,8	6,87	7,4	7,2	7,2	7,27		
13	4,40	3,4	3,4	3,9	3,54	4,4	4,1	4,1	4,18	4,2	4,6	4,3	4,39		
14	13,10	11,6	11,4	12,7	11,89	12,3	13,9	13,1	13,08	13,0	13,1	12,9	12,97		
15	7,00	6,1	6,0	6,4	6,16	5,9	7,3	6,4	6,54	7,1	6,9	6,8	6,94		
16	30,56	19,3	20,3	22,7	20,75	21,6	27,9	24,6	24,68	28,3	27,5	22,6	26,11		
17	2,30	1,6	2,0	2,0	1,89	1,8	2,1	2,1	1,98	2,1	2,1	2,0	2,09		
18	12,80	10,4	10,7	12,2	11,10	11,0	12,9	12,3	12,06	13,6	13,7	12,0	13,10		
19	3,60	2,8	3,2	3,3	3,11	3,1	3,6	3,2	3,30	3,5	3,5	3,3	3,43		
20	14,30	14,0	13,4	14,8	14,08	13,3	14,2	13,7	13,71	15,7	14,7	15,4	15,27		
21	6,50	5,7	5,8	6,5	6,00	5,5	6,6	6,1	6,07	6,7	6,5	6,4	6,51		
22	9,90	8,2	8,3	9,5	8,65	7,8	9,6	9,1	8,85	9,6	9,5	9,5	9,52		
23	5,20	4,5	5,1	5,5	5,01	4,7	5,7	5,1	5,14	5,7	5,7	5,3	5,56		
24	15,60	12,5	14,5	15,6	14,21	13,3	17,0	15,2	15,16	18,7	16,9	14,9	16,84		
25	4,00	3,4	4,0	4,1	3,82	3,5	4,3	4,0	3,93	4,2	4,3	4,1	4,15		

Continuação...

Apêndice IV. Continuação...

26	5,30	4,8	5,2	5,6	5,22	4,5	6,3	5,7	5,46	6,0	6,1	5,7	5,92
27	4,20	3,4	4,1	4,5	4,00	3,6	4,7	4,5	4,26	4,8	4,6	4,4	4,59
28	1,70	1,2	1,2	1,4	1,26	1,2	1,7	1,4	1,41	1,5	1,6	1,5	1,51
29	2,40	2,5	2,7	2,8	2,67	2,4	2,8	2,8	2,66	2,9	3,0	2,9	2,93
30	15,40	13,1	13,7	14,7	13,83	13,4	15,6	14,7	14,55	15,7	15,6	15,9	15,72
31	1,30	1,2	1,3	1,3	1,27	1,2	1,5	1,3	1,32	1,4	1,4	1,3	1,35
32	8,20	7,3	8,0	8,6	7,95	7,1	9,2	7,8	8,04	8,5	8,1	8,5	8,39
33	11,30	10,6	10,6	11,5	10,89	10,1	13,2	11,0	11,40	12,8	12,2	11,4	12,12
34	12,30	12,1	11,8	12,8	12,23	11,0	13,7	12,6	12,42	13,2	13,5	12,7	13,10
35	0,90	0,9	0,9	1,0	0,90	0,9	1,1	0,9	0,98	1,2	1,0	1,0	1,06
36	5,00	4,9	4,7	5,4	4,98	4,8	6,0	5,2	5,31	5,5	5,6	5,3	5,44
37	7,40	7,2	7,1	7,4	7,22	6,8	8,7	7,5	7,68	7,4	8,0	7,8	7,73

Apêndice V. Teor de Mg dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução Mehlich-1 em triplicata

Solos	Padrão	5 Minutos				30 Minutos				60 Minutos			
		Mehlich-1				Mehlich-1				Mehlich-1			
		1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
----- Cmol _c dm ⁻³ -----													
1	2,30	2,0	1,8	1,9	1,90	1,9	2,0	2,1	2,00	2,3	2,1	2,1	2,17
2	3,50	3,7	3,2	3,5	3,47	3,8	3,7	3,7	3,73	4,0	3,8	3,6	3,80
3	4,48	6,1	5,1	5,4	5,53	6,1	5,9	5,3	5,77	6,7	5,9	6,0	6,20
4	3,90	3,6	3,0	3,3	3,30	3,4	3,6	3,4	3,47	4,3	3,6	3,6	3,83
5	0,40	0,5	0,4	0,4	0,43	0,4	0,4	0,5	0,43	0,5	0,4	0,4	0,43
6	2,50	3,1	2,3	2,6	2,67	3,0	2,8	2,9	2,90	3,1	2,8	3,1	3,00
7	2,30	3,1	2,2	2,6	2,63	3,0	2,8	2,7	2,83	2,7	2,4	2,7	2,60
8	3,20	3,9	3,6	3,6	3,70	3,8	3,7	4,1	3,87	4,3	3,7	3,8	3,93
9	2,10	2,6	2,2	2,4	2,40	2,7	2,7	2,6	2,67	2,8	2,6	2,4	2,60
10	3,32	6,8	5,8	6,3	6,30	7,4	6,9	6,8	7,03	8,3	6,7	7,8	7,60
11	1,00	0,9	0,9	0,9	0,90	1,0	1,0	0,9	0,97	1,2	1,0	1,0	1,07
12	3,80	4,8	4,1	3,9	4,27	4,9	5,0	4,3	4,73	5,3	4,3	4,8	4,80
13	0,80	0,9	0,8	0,8	0,83	0,8	0,8	0,8	0,80	0,9	0,8	0,9	0,87
14	4,00	3,8	3,5	3,3	3,53	4,1	4,4	4,0	4,17	4,2	4,3	4,3	4,27
15	2,20	2,5	2,3	2,1	2,30	2,5	2,4	2,6	2,50	2,7	2,4	2,4	2,50
16	3,72	6,4	5,5	5,7	5,87	6,6	7,1	6,2	6,63	7,2	7,2	7,4	7,27
17	1,00	1,1	0,9	0,9	0,97	1,0	1,0	1,1	1,03	1,1	1,0	1,0	1,03
18	3,70	4,7	3,9	4,4	4,33	4,0	4,9	4,6	4,50	5,2	5,3	4,6	5,03
19	1,00	1,1	1,0	1,0	1,03	1,1	1,0	1,1	1,07	1,1	1,1	1,1	1,10
20	4,20	3,8	3,3	3,3	3,47	3,9	3,5	3,7	3,70	4,3	4,4	4,3	4,33
21	4,80	4,7	4,0	3,8	4,17	4,9	4,4	4,7	4,67	5,3	4,7	4,6	4,87
22	2,90	2,7	2,2	2,5	2,47	2,7	2,7	2,6	2,67	3,0	2,7	2,8	2,83
23	2,10	2,4	1,8	1,8	2,00	2,1	2,4	2,2	2,23	2,3	2,4	2,3	2,33
24	4,70	4,3	3,3	3,8	3,80	4,6	3,9	4,0	4,17	4,4	0,2	4,5	3,03
25	1,10	1,4	1,2	1,2	1,27	1,2	1,3	1,3	1,27	1,3	1,3	1,3	1,30

Continuação...

Apêndice V. Continuação...

26	1,80	2,1	1,6	1,8	1,83	1,9	1,9	1,8	1,87	2,0	2,0	1,9	1,97
27	1,30	1,4	1,2	1,3	1,30	1,3	1,3	1,3	1,30	1,5	1,4	1,4	1,43
28	0,70	1,0	0,7	0,8	0,83	0,8	0,8	0,7	0,77	0,8	0,8	0,8	0,80
29	1,30	1,5	1,3	1,4	1,40	1,5	1,5	1,4	1,47	1,6	1,5	1,5	1,53
30	7,90	8,0	7,8	6,9	7,57	8,1	8,6	7,6	8,10	9,5	8,8	8,9	9,07
31	0,50	0,6	0,5	0,5	0,53	0,6	0,5	0,5	0,53	0,6	0,0	0,6	0,40
32	2,40	2,3	1,9	1,9	2,03	2,4	2,3	2,2	2,30	2,5	2,5	2,5	2,50
33	2,30	2,9	2,4	2,7	2,67	2,8	2,6	2,8	2,73	2,9	3,2	2,9	3,00
34	2,70	2,6	2,0	2,2	2,27	2,7	2,6	2,5	2,60	2,8	2,8	2,7	2,77
35	0,30	0,3	0,2	0,3	0,27	0,3	0,2	0,2	0,23	0,3	0,3	0,3	0,30
36	1,20	1,1	1,1	1,3	1,17	1,4	1,3	1,3	1,33	1,5	1,4	1,4	1,43
37	5,50	4,8	3,5	4,2	4,17	4,9	4,6	4,8	4,77	5,5	5,1	5,2	5,27

Apêndice VI. Teor de Mg dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH₄Cl em triplicata

Solos	5 Minutos					30 Minutos				60 Minutos			
	Padrão	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			Média
		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
		----- Cmol _c dm ⁻³ -----											
1	2,30	2,0	2,5	2,3	2,27	2,2	2,2	2,1	2,16	2,3	2,4	2,3	2,29
2	3,50	3,4	3,7	3,4	3,50	3,3	3,7	3,2	3,38	3,5	3,6	3,6	3,55
3	4,48	3,8	4,3	4,2	4,07	3,9	4,1	3,8	3,93	4,2	4,4	4,3	4,26
4	3,90	3,9	4,1	4,2	4,04	4,0	4,0	3,7	3,91	4,2	4,3	4,2	4,20
5	0,40	0,3	0,4	0,4	0,37	0,4	0,4	0,3	0,34	0,4	0,4	0,4	0,39
6	2,50	2,6	2,8	2,7	2,69	2,6	2,6	2,3	2,51	2,8	2,5	2,7	2,65
7	2,30	2,3	2,9	2,7	2,63	2,5	2,7	2,2	2,48	2,4	2,7	2,4	2,48
8	3,20	3,0	3,6	3,1	3,23	3,1	3,7	3,3	3,35	0,1	3,4	3,3	2,26
9	2,10	1,9	2,3	2,0	2,06	1,9	2,4	1,9	2,07	2,3	2,1	2,1	2,16
10	3,32	2,7	2,7	3,0	2,79	2,7	3,5	2,8	3,01	3,4	3,2	3,1	3,21
11	1,00	0,8	0,8	0,8	0,83	0,7	0,8	0,8	0,75	0,8	0,8	0,8	0,81
12	3,80	3,7	3,8	4,1	3,85	3,7	4,2	3,7	3,87	4,3	4,0	4,2	4,15
13	0,80	0,6	0,6	0,7	0,62	0,8	0,7	0,7	0,69	0,8	0,8	0,8	0,78
14	4,00	3,8	3,6	4,0	3,81	4,1	4,3	4,0	4,15	4,3	4,2	4,1	4,18
15	2,20	2,1	1,9	2,1	2,02	2,0	2,3	1,9	2,07	2,4	2,2	2,2	2,27
16	3,72	3,0	3,1	3,4	3,18	3,3	3,8	3,3	3,47	3,8	3,6	3,2	3,55
17	1,00	0,8	0,9	0,9	0,89	0,8	0,9	0,9	0,89	1,0	1,0	0,9	0,97
18	3,70	3,3	3,2	3,8	3,44	3,5	3,9	3,5	3,62	4,4	4,2	3,7	4,06
19	1,00	0,8	0,9	0,9	0,86	0,9	1,0	0,8	0,89	1,0	0,9	0,9	0,93
20	4,20	4,3	3,8	4,4	4,16	4,1	3,9	3,8	3,92	4,8	4,3	4,5	4,54
21	4,80	4,7	4,4	5,0	4,69	4,1	5,0	4,5	4,53	5,0	4,9	4,6	4,83
22	2,90	2,5	2,3	2,8	2,54	2,2	2,8	2,5	2,49	2,9	2,7	2,7	2,79
23	2,10	1,9	2,0	2,3	2,08	1,9	2,2	1,9	2,02	2,4	2,4	2,1	2,30
24	4,70	4,0	4,4	5,0	4,45	4,1	5,1	4,4	4,51	5,9	5,3	4,5	5,25
25	1,10	1,0	1,1	1,2	1,12	1,0	1,2	1,1	1,08	1,2	1,3	1,1	1,22

Continuação...

Apêndice VI. Continuação...

26	1,80	1,7	1,8	2,0	1,80	1,5	2,1	1,8	1,82	2,1	2,1	1,9	2,06
27	1,30	1,2	1,4	1,5	1,34	1,2	1,4	1,4	1,32	1,6	1,6	1,4	1,52
28	0,70	0,6	0,5	0,6	0,57	0,6	0,7	0,6	0,62	0,7	0,7	0,6	0,68
29	1,30	1,5	1,4	1,5	1,45	1,3	1,4	1,3	1,34	1,6	1,6	1,5	1,57
30	7,90	7,6	7,5	8,2	7,76	7,4	8,3	7,6	7,74	8,9	8,8	8,8	8,82
31	0,50	0,5	0,5	0,5	0,50	0,5	0,5	0,5	0,49	0,6	0,5	0,5	0,52
32	2,40	2,3	2,4	2,7	2,43	2,1	2,7	2,3	2,35	2,7	2,5	2,5	2,58
33	2,30	2,5	2,3	2,6	2,42	2,2	2,8	2,2	2,39	2,8	2,7	2,4	2,63
34	2,70	2,9	2,6	2,9	2,81	2,5	3,0	2,7	2,74	3,1	3,1	2,8	3,02
35	0,30	0,2	0,2	0,2	0,21	0,2	0,2	0,2	0,21	0,2	0,2	0,2	0,23
36	1,20	1,3	1,1	1,4	1,27	1,3	1,6	1,3	1,38	1,5	1,5	1,3	1,42
37	5,50	6,0	5,4	5,8	5,73	5,6	6,7	5,3	5,85	5,7	6,4	6,0	6,03

Apêndice VII. Teor de Al dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH₄Cl em triplicata e KCl 1 mol L⁻¹

Solos	5 Minutos				30 Minutos				60 Minutos				KCl ICP		
	Padrão (Titulação)	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			Média	30 min.	60 min.
		1	2	3		1	2	3		1	2	3		30 min.	60 min.
		-----Cmol _c dm ⁻³ -----													
1	13,5	14,3	12,7	13,5	13,52	12,5	12,7	11,9	12,35	12,9	13,3	12,5	12,91	12,80	13,17
2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,11	0,1	0,2	0,0	0,11	0,1	0,1	0,1	0,07	0,12	0,01
3	0	0,1	0,1	0,1	0,06	0,1	0,1	0,0	0,08	0,1	0,0	0,1	0,05	0,13	-0,01
4	0,6	0,5	0,6	0,5	0,54	0,6	0,7	0,6	0,61	0,6	0,5	0,6	0,58	0,39	0,26
5	1,8	1,4	1,4	1,4	1,39	1,3	1,4	1,2	1,27	1,5	1,3	1,3	1,36	1,25	1,22
6	1,7	1,2	1,3	1,3	1,27	1,5	1,4	1,3	1,37	1,6	1,4	1,4	1,44	1,23	1,13
7	0,3	0,3	0,2	0,2	0,22	0,2	0,2	0,1	0,19	0,3	0,2	0,2	0,23	0,16	0,03
8	0	0,1	0,1	0,1	0,10	0,1	0,1	0,0	0,07	-0,4	0,0	0,1	-0,12	0,00	-0,05
9	1	0,8	0,7	0,8	0,77	0,9	1,0	0,8	0,89	1,1	0,9	0,8	0,92	0,66	0,57
10	0	0,0	0,0	0,0	0,02	0,0	0,1	0,0	0,06	0,1	0,0	0,0	0,05	0,12	0,07
11	0,3	0,2	0,2	0,2	0,20	0,2	0,3	0,2	0,26	0,3	0,1	0,2	0,23	0,16	0,13
12	0	0,1	0,0	0,1	0,06	0,1	0,2	0,0	0,09	0,2	-0,1	0,1	0,07	0,03	0,02
13	0,1	0,1	0,1	0,1	0,11	0,1	0,1	0,1	0,10	0,2	0,1	0,1	0,14	0,07	0,05
14	0,1	0,0	0,1	0,1	0,07	0,1	0,2	0,0	0,10	0,1	0,1	0,2	0,11	0,03	0,03
15	0	0,1	0,1	0,1	0,11	0,1	0,2	0,0	0,12	0,3	0,0	0,1	0,13	0,07	0,04
16	0	0,1	0,0	0,1	0,06	0,1	0,1	0,0	0,07	0,3	0,0	0,0	0,08	0,07	0,04
17	1,7	1,0	1,0	1,0	1,00	1,0	1,1	1,0	1,05	1,4	1,1	1,0	1,15	1,01	1,01
18	0	0,0	0,0	0,0	0,03	0,1	0,1	0,0	0,06	0,1	0,0	0,0	0,03	0,00	0,01
19	0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,1	0,0	0,0	0,05	0,1	0,0	0,0	0,01	0,00	0,04
20	0	0,0	0,0	0,0	0,02	0,1	0,0	0,0	0,02	0,1	0,0	0,0	0,02	0,00	0,00
21	0	0,0	0,1	0,0	0,05	0,0	0,0	0,0	0,01	0,1	0,0	0,1	0,06	0,00	0,03
22	0,1	0,0	0,0	0,0	0,04	0,0	0,0	0,0	-0,01	0,1	0,0	0,0	0,03	0,00	0,01
23	0,4	0,3	0,4	0,3	0,31	0,3	0,3	0,2	0,27	0,5	0,4	0,3	0,40	0,19	0,22
24	0	0,0	0,1	0,1	0,06	0,0	0,0	0,0	0,01	0,1	0,0	0,0	0,04	0,00	0,01

Continuação...

Apêndice VII. Continuação...

25	0,6	0,5	0,5	0,5	0,51	0,4	0,5	0,5	0,46	0,7	0,6	0,5	0,62	0,35	0,40
26	0,3	0,1	0,2	0,2	0,16	0,1	0,3	0,1	0,17	0,3	0,2	0,1	0,21	0,08	0,08
27	2,4	1,6	1,8	1,7	1,70	1,5	2,1	1,8	1,79	2,4	2,3	1,9	2,18	1,77	1,71
28	0	0,1	0,1	0,1	0,10	0,1	0,1	0,0	0,07	0,2	0,1	0,1	0,12	0,07	0,07
29	4,5	3,2	3,4	3,3	3,30	3,3	3,6	3,3	3,39	4,2	4,1	3,8	4,04	3,85	3,71
30	0	0,1	0,1	0,1	0,11	0,1	0,1	0,0	0,08	0,2	0,1	0,1	0,16	0,09	0,06
31	0,8	0,6	0,7	0,7	0,66	0,6	0,7	0,6	0,67	0,9	0,8	0,7	0,79	0,45	0,33
32	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,0	0,1	0,0	0,03	0,2	0,0	0,1	0,09	0,00	0,03
33	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,1	0,0	0,10	0,01	0,04
34	0	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,2	0,1	0,09	0,2	0,1	0,1	0,11	-0,01	0,00
35	1,7	1,2	1,5	1,4	1,37	1,3	1,5	1,2	1,36	1,4	1,4	1,3	1,38	1,52	1,16
36	0,2	0,1	0,3	0,2	0,22	0,2	0,3	0,2	0,25	0,3	0,2	0,2	0,26	0,10	0,09
37	0	0,1	0,1	0,1	0,07	0,1	0,1	0,0	0,06	0,1	0,1	0,1	0,10	0,00	-0,01

Apêndice VIII. Teor de Mn dos 37 solos utilizados no estudo I, extraído pela solução NH_4Cl 1 mol L^{-1} em triplicata e KCl 1 mol L^{-1}

Solos	Padrão	30 Minutos			cmolc	60 Minutos			
	KCl 30	NH ₄ Cl			Média	NH ₄ Cl			
		1	2	3		1	2	3	Média
		----- Cmol _c dm ⁻³ -----							
1	0,29	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,29	0,28	0,28
2	0,50	0,44	0,51	0,43	0,46	0,46	0,48	0,48	0,48
3	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
4	0,59	0,41	0,47	0,45	0,44	0,47	0,50	0,48	0,48
5	0,21	0,19	0,20	0,18	0,19	0,22	0,20	0,20	0,21
6	0,13	0,11	0,11	0,10	0,10	0,12	0,10	0,11	0,11
7	0,11	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10
8	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10	0,00	0,11	0,10	0,07
9	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
10	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
11	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
12	0,15	0,13	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14
13	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06
14	0,17	0,12	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14
15	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05
16	0,03	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05
17	0,19	0,14	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,17
18	0,07	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11
19	0,31	0,27	0,31	0,27	0,29	0,31	0,30	0,27	0,29
20	0,34	0,29	0,30	0,29	0,29	0,33	0,31	0,33	0,33
21	0,18	0,17	0,21	0,20	0,19	0,22	0,21	0,21	0,21
0	1,1	0,83	1,00	0,95	0,93	1,02	1,00	1,01	1,01
23	0,45	0,34	0,40	0,36	0,37	0,41	0,41	0,39	0,40
24	0,46	0,36	0,44	0,40	0,40	0,46	0,46	0,41	0,44

Continuação...

Apêndice VIII. Continuação...

25	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
26	0,66	0,43	0,63	0,56	0,54	0,60	0,60	0,56	0,59
27	0,43	0,32	0,39	0,38	0,37	0,40	0,39	0,38	0,39
28	0,13	0,08	0,12	0,09	0,10	0,12	0,12	0,11	0,12
29	0,18	0,13	0,15	0,15	0,14	0,16	0,17	0,17	0,17
30	0,13	0,12	0,15	0,13	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15
31	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11	0,13	0,12	0,12	0,12
32	0,31	0,28	0,35	0,29	0,30	0,33	0,32	0,34	0,33
33	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11
34	0,44	0,37	0,44	0,40	0,40	0,44	0,46	0,43	0,44
35	0,12	0,11	0,12	0,10	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12
36	0,15	0,13	0,15	0,12	0,13	0,14	0,15	0,14	0,14
37	0,58	0,43	0,53	0,47	0,48	0,47	0,52	0,50	0,50

Apêndice IX. Massa seca e % de K na Massa seca de Milho do primeiro e segundo cultivo

Amostra	Solos	Cultivo I		Cultivo II	
		% de K	Massa Seca (g)*	% de K	Massa Seca (g)*
1	1	1,06	5,39	0,80	1,85
2	1	1,03	5,77	0,76	1,97
3	1	0,92	6,30	0,79	1,73
4	2	1,98	10,38	1,66	1,35
5	2	2,35	6,79	2,15	1,3
6	2	2,54	7,38	2,15	2,2
7	3	1,20	9,12	1,04	2,75
8	3	1,21	8,86	1,14	2,64
9	3	1,46	7,39	1,13	2,71
10	4	2,43	7,89	2,09	2,35
11	4	2,64	10,4	1,95	3,56
12	4	2,40	8,61	1,88	3,36
13	5	2,01	11,37	1,59	3,34
14	5	2,65	8,15	1,93	3,06
15	5	3,59	11,27	2,32	2,75
16	6	2,33	12,41	1,42	2,78
17	6	2,53	8,12	1,62	3,11
18	6	2,39	11,28	1,89	2,83
19	7	4,02	10,55	3,30	3,03
20	7	5,04	9,50	3,14	3,91
22	7	3,84	11,1	3,32	1,92
23	8	4,07	7,25	2,81	3,53
24	8	3,98	9,60	3,70	2,52
25	8	3,53	6,44	-	3,22
26	9	3,94	5,54	2,71	2,59
27	9	3,56	7,09	3,66	2,41
28	9	3,27	8,14	3,02	2,36
29	10	1,51	8,83	0,93	2,10
21	10	1,33	10,15	1,20	1,15
30	10	1,45	8,68	1,16	2,20
31	11	1,06	6,47	1,12	2,10
32	11	0,92	6,42	1,04	2,11
33	11	0,95	8,22	1,00	2,15
34	12	6,36	9,24	5,79	3,41
35	12	5,83	11,29	5,74	3,62
36	12	6,03	10,8	5,50	1,43
37	13	6,49	9,77	5,75	4,49
38	13	6,35	8,32	6,15	4,34
39	13	5,77	11,6	4,28	4,94
40	14	1,65	6,39	1,12	4,50
41	14	1,82	6,38	1,73	4,86

Continuação...

Apêndice IX. Continuação...

Amostra	Solos	Cultivo I		Cultivo II	
		% de K	Massa Seca (g)*	% de K	Massa Seca (g)*
42	14	1,75	5,20	1,82	5,54
43	15	3,40	10,26	2,56	3,39
44	15	2,64	7,62	2,38	3,01
45	15	2,92	9,45	2,73	2,69
46	16	1,03	5,45	0,82	2,09
47	16	0,94	8,46	0,80	1,65
48	16	0,90	6,75	0,19	1,70
49	17	1,14	5,79	0,89	1,31
50	17	0,93	8,31	1,00	1,14
51	17	1,03	6,83	1,21	2,29
52	18	1,03	6,21	0,90	1,04
53	18	1,03	3,93	1,14	1,43
54	18	1,22	4,10	0,98	1,69
55	19	3,75	12,15	3,36	4,49
56	19	3,41	11,00	3,89	3,97
57	19	2,94	11,94	3,06	5,30
58	20	1,98	3,85	1,74	1,61
59	20	1,76	4,56	1,53	1,45
60	20	1,71	4,74	1,75	1,16
61	21	4,43	7,73	3,02	2,68
62	21	4,08	10,61	4,57	2,11
63	21	3,85	9,36	3,94	3,45
64	22	4,82	11,34	6,05	2,45
65	22	5,30	10,89	5,70	3,34
66	22	4,86	10,35	6,80	3,56
67	23	1,14	6,60	0,82	2,15
68	23	1,12	5,86	1,11	1,34
69	23	1,01	8,83	0,98	1,72
70	24	4,91	7,50	4,84	1,87
71	24	4,95	5,29	4,52	2,60
72	24	5,25	8,90	5,41	2,26
73	25	2,14	8,44	2,58	2,50
74	25	2,71	7,07	2,77	1,78
75	25	2,47	8,36	3,04	2,35
76	26	5,03	8,30	5,21	3,68
77	26	4,86	8,87	4,80	2,6
78	26	4,72	9,83	3,53	2,55
79	27	4,95	8,47	3,89	3,75
80	27	3,99	7,06	3,06	2,04
81	27	3,50	9,88	3,24	2,67
82	28	3,00	10,64	2,42	2,56
83	28	3,45	7,11	1,95	3,00

Continuação...

Apêndice IX. Continuação...

Amostra	Solos	Cultivo I		Cultivo II	
		% de K	Massa Seca (g)*	% de K	Massa Seca (g)
84	28	3,08	6,84	2,43	2,10
85	29	4,07	8,75	2,58	3,36
86	29	2,07	11,19	1,59	3,04
87	29	2,58	11,89	2,01	1,77
88	30	4,91	10,77	4,21	2,27
89	30	4,62	13,19	3,39	3,16
90	30	4,33	10,24	4,17	3,84
91	31	5,47	8,85	6,29	3,70
92	31	5,74	12,76	5,97	3,18
93	31	6,94	9,45	5,65	2,68
94	32	2,44	4,83	1,94	1,18
95	32	2,07	6,62	1,80	1,65
96	32	2,67	6,45	2,28	1,23

* Digestão nitroperclórica, conforme Tedesco et al., (1995)