



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

JANDEILSON ALVES DE ARRUDA

**SORÇÃO DE POTÁSSIO E EFICIÊNCIA DE EXTRATORES DE POTÁSSIO
DISPONÍVEL EM SOLOS DO SEMIÁRIDO COM ARGILAS 2:1**

MOSSORÓ

2023

JANDEILSON ALVES DE ARRUDA

**SORÇÃO DE POTÁSSIO E EFICIÊNCIA DE EXTRATORES DE POTÁSSIO
DISPONÍVEL EM SOLOS DO SEMIÁRIDO COM ARGILAS 2:1**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo de Solo e Água

Orientador: Prof. Fábio Henrique Tavares de Oliveira

MOSSORÓ

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

AA779 Arruda, Jandeilson Alves de.
s Sorção de potássio e eficiência de extratores
de potássio disponível em solos do semiárido com
argilas 2:1 / Jandeilson Alves de Arruda. - 2023.
82 f. : il.

Orientador: Fábio Henrique Tavares de Oliveira
. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2023.

1. Disponibilidade de K. 2. Fixação de K. 3.
Acetato de Amônio. 4. Análise de solo. I. , Fábio
Henrique Tavares de Oliveira, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JANDEILSON ALVES DE ARRUDA

**SORÇÃO DE POTÁSSIO E EFICIÊNCIA DE EXTRATORES DE POTÁSSIO
DISPONÍVEL EM SOLOS DO SEMIÁRIDO COM ARGILAS 2:1**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo de Solo e Água

Defendida em: 15 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **FABIO HENRIQUE TAVARES DE OLIVEIRA**
Data: 29/02/2024 13:27:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Fábio Henrique Tavares de Oliveira – UFERSA
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **HEMMANUELLA COSTA SANTOS**
Data: 28/02/2024 10:02:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Hemmannuella Costa Santos – IFPE
Examinadora externa

Documento assinado digitalmente
 **MONTESQUIEU DA SILVA VIEIRA**
Data: 28/02/2024 21:34:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Montesquieu da Silva Vieira – IFPB
Examinador externo

Documento assinado digitalmente
 **TALITA BARBOSA ABREU DIÓGENES**
Data: 26/02/2024 14:50:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Talita Barbosa Abreu Diógenes – UFERSA
Examinadora interna

Documento assinado digitalmente
 **MARIA REGILENE DE FREITAS COSTA PAIVA**
Data: 27/02/2024 13:07:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Maria Regilene de Freitas Costa Paiva – PMM
Examinadora externa

Francisca Lúcia do Carmo (In Memoriam).

A todos os meus familiares, em especial à minha esposa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, saúde e todas as bençãos.

Ao povo brasileiro, por financiar a educação pública brasileira, da qual tenho usufruído desde o ensino fundamental até o doutorado.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pela oportunidade de cursar o doutorado, principalmente ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, pela concessão do afastamento para qualificação, especialmente ao campus Picuí.

A todos os docentes e servidores técnico-administrativos da UFERSA, que contribuíram para a minha formação durante o curso.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Prof. Fábio Henrique Tavares de Oliveira, pelo companheirismo e ensinamentos, não só no doutorado, mas em toda a minha vida acadêmica. Seu apoio foi muito importante para minha trajetória.

Agradeço à minha esposa, Juliana Vithória Mesquita de Oliveira, por todo o companheirismo, amor, cuidado e paciência.

Aos meus familiares, por todo carinho, amor e incentivo, em especial à minha mãe, Francisca Lúcia do Carmo (*in memoriam*).

Aos membros da banca, pela disponibilidade e por todas as contribuições para a melhoria do trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo, especialmente ao amigo Antônio Savio dos Santos, que dividiu comigo a maior parte das atividades do experimento da tese.

Agradeço aos colegas de curso, pela ajuda, companheirismo, troca de conhecimentos e experiências, bem como por compartilhar comigo as angústias, dificuldades e alegrias, sobretudo durante o período mais crítico da pandemia. Sem vocês tudo teria sido mais difícil.

Ainda dá tempo de buscar conhecimento
na literatura que te traz o crescimento.
O estudo é escudo, é tudo. Sem ele é
como se você ficasse mudo [invisível]

MV Bill

RESUMO GERAL

A disponibilidade de potássio (K) para as plantas varia bastante em solos do semiárido brasileiro e sua avaliação é complexa, sobretudo naqueles com maior quantidade de minerais do tipo 2:1 que apresentam alta capacidade de sorção e fixam K. Foram realizados três experimentos, utilizando amostras de solo coletadas na camada de 0-30 cm de seis solos do semiárido, sendo um Argissolo Vermelho Amarelo, um Neossolo Flúvico, dois Cambissolos Háplicos, um Chernossolo Rêndzico e um Vertissolo Háplico. No primeiro experimento, objetivou-se quantificar a sorção de K em seis solos da região semiárida brasileira e correlacioná-la com atributos do solo que refletem a disponibilidade de K. As concentrações iniciais de K das soluções utilizadas para quantificação da sorção corresponderam a 0; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; 1750; 2000, 2250 e 2500 mg L⁻¹ de K. A quantidade de K sorvida foi calculada pela diferença na concentração inicial e final de K na solução. As isotermas de Langmuir e de Freundlich foram ajustadas utilizando regressão não-linear e estimados os valores dos parâmetros desses modelos, que foram correlacionados com características do solo que refletem a disponibilidade de K. As isotermas mostraram-se adequadas para quantificar a sorção de K nos solos do semiárido, com valores de capacidade máxima de sorção de K (CMSK) variando de 5,45 g kg⁻¹ a 15,46 g kg⁻¹. Os teores de argila e a CTC foram os atributos que melhor se correlacionaram com a CMSK. A maior sorção de K foi encontrada para os solos menos desenvolvidos, com maior CTC e maiores teores de argila em comparação aos solos mais arenosos e, ou, mais desenvolvidos. No segundo experimento objetivou-se avaliar a cinética de sorção de K nesses mesmos seis solos e correlacioná-la com atributos dos solos que refletem a disponibilidade de K. Duas concentrações iniciais de K (50 e 200 mg L⁻¹) foram adicionadas aos solos, em triplicata, e agitadas por 11 tempos (1, 5, 20, 40, 60, 120, 180, 600, 960 e 1440 minutos). Após a agitação as suspensões foram filtradas e o teor de K quantificado por fotometria de chama. Com os valores de concentração final de K foi ajustado o modelo $C = kt^{-n}$. Os parâmetros desse modelo foram correlacionados com características do solo que refletem a disponibilidade de K. O modelo apresentou bom ajuste para todos os solos na menor concentração, mas apenas para os solos de maior CMSK quando utilizada a solução de 200 mg L⁻¹. A sorção de potássio foi muito grande nos primeiros instantes de contato do K com os solos, decresceu até aproximadamente 60 minutos e tendeu a se manter estável até 24 h. A quantidade de potássio sorvido no solo e a taxa de sorção foi maior no Chernossolo Rêndzico e no Vertissolo Háplico, sendo que a sorção de K foi diretamente relacionada com a CMSK e a CTC do solo. No terceiro experimento objetivou-se avaliar a eficiência dos extratores acetato de amônio, cloreto de amônio, Mehlich-1 e resina de troca iônica mista para quantificação do K disponível para plantas de milho nos mesmos solos dos experimentos anteriores. Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados, com seis solos e cinco doses de K, com três repetições. Cada unidade experimental consistiu em um vaso plástico contendo 3,0 dm³ de solo, onde foram cultivadas duas plantas de milho durante 35 dias em casa de vegetação. Para cada extrator, o K disponível foi correlacionado com o K acumulado na parte aérea das plantas de milho. Todos os extratores avaliados mostraram boa correlação com o K acumulado pela planta. A resina de troca iônica apresentou menor capacidade de extração de K nos solos mais argilosos, com maior CTC e maior quantidade de minerais 2:1, não sendo recomendada para solos com essas características. O extrator Mehlich-1 sofreu desgaste na sua capacidade de extração em solos alcalinos com teores elevados de CaCO₃ equivalente, não devendo ser utilizado para esse tipo de solo. O extrator acetato de amônio extraiu as maiores quantidades de K dos solos e não apresentou limitações em nenhum solo, sendo o mais recomendado para a avaliação da disponibilidade de potássio em solos do semiárido.

Palavras-chave: Disponibilidade de K. Fixação de K. Acetato de Amônio. Análise de Solo.

ABSTRACT

The availability of potassium (K) for plants varies greatly in the soils of the Brazilian semi-arid region and its assessment is complex, especially in those with a greater quantity of 2:1 minerals that have a high sorption capacity and fix K. Three experiments were carried out using soil samples collected in the 0-30 cm layer of six soils from the semi-arid region: one Red-Yellow Argisol, a Fluvic Neosol, two Haplic Cambisol, a Rendzic Chernosol and a Haplic Vertisol. In the first experiment, the aim was to quantify K sorption in six soils from Brazil's semi-arid region and correlate it with soil attributes that reflect K availability. The initial concentrations of K in the solutions used to quantify sorption corresponded to 0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250 and 2500 mg L⁻¹ of K. The amount of K sorbed was calculated by the difference in the initial and final concentration of K in the solution. The Langmuir and Freundlich isotherms were adjusted using non-linear regression and the parameter values of these models were estimated, which were correlated with soil characteristics that reflect K availability. The isotherms proved to be suitable for quantifying K sorption in semi-arid soils, with maximum K sorption capacity (MKSC) values ranging from 5.45 g kg⁻¹ to 15.46 g kg⁻¹. Clay content and CEC were the attributes that correlated best with MKSC. The greatest sorption of K was found for less developed soils with higher CEC and higher clay contents compared to sandier or more developed soils. The aim of the second experiment was to assess K sorption kinetics in these same six soils and correlate it with soil attributes that reflect K availability. Two initial concentrations of K (50 and 200 mg L⁻¹) were added to the soils in triplicate and stirred for 11 times (1, 5, 20, 40, 60, 120, 180, 600, 960 and 1440 minutes). After stirring, the suspensions were filtered and the K content quantified by flame photometry. The final K concentration values were used to adjust the $C = kt^{-n}$ model. The parameters of this model were correlated with soil characteristics that reflect K availability. The model showed a good fit for all the soils at the lowest concentration, but only for the soils with the highest MKSC when the 200 mg L⁻¹ solution was used. Potassium sorption was very high in the first moments of K contact with the soils, decreased until approximately 60 minutes and tended to remain stable until 24 hours. The amount of potassium sorbed in the soil and the sorption rate were higher in the C Rendzic Chernosol and Haplic Vertisol, and K sorption was directly related to the MKSC and CEC of the soil. The aim of the third experiment was to assess the efficiency of the ammonium acetate, ammonium chloride, Mehlich-1 and mixed ion exchange resin extractors for quantifying K available for maize plants in the same soils as the previous experiments. The treatments were distributed in randomised blocks, with six soils and five doses of K, with three replications. Each experimental unit consisted of a plastic pot containing 3.0 dm³ of soil, where two maize plants were grown for 35 days in a greenhouse. For each extractant, the available K was correlated with the accumulated K in the aerial part of the maize plants. All the extractants evaluated showed a good correlation with the K accumulated by the plant. The ion exchange resin showed lower K extraction capacity in clayier soils, with higher CEC and a greater quantity of 2:1 minerals, and is not recommended for soils with these characteristics. The Mehlich-1 extractant suffered a drop in its extraction capacity in alkaline soils with high CaCO₃ equivalents and should not be used for this type of soil. The ammonium acetate extractant extracted the highest amounts of K from the soils and did not present limitations in any soil, making it the most recommended for assessing potassium availability in semi-arid soils.

Keywords: K availability. K fixation. Ammonium acetate. Soil Analysis.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	11
LITERATURA CITADA.....	13
CAPÍTULO 1.....	15
ISOTERMAS DE SORÇÃO DE POTÁSSIO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	16
RESUMO.....	16
ABSTRACT.....	17
INTRODUÇÃO.....	18
MATERIAL E MÉTODOS.....	19
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
CONCLUSÕES.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
CAPÍTULO 2.....	32
CINÉTICA DE SORÇÃO DE POTÁSSIO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	33
RESUMO.....	33
ABSTRACT.....	34
INTRODUÇÃO.....	35
MATERIAL E MÉTODOS.....	37
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
CAPÍTULO 3.....	49
EFICIÊNCIA DE EXTRATORES DE POTÁSSIO DISPONÍVEL EM SOLOS DO SEMIÁRIDO COM ARGILAS 2:1.....	50
RESUMO.....	50
ABSTRACT.....	51
INTRODUÇÃO.....	52
MATERIAL E MÉTODOS.....	54
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57

CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
APÊNDICE	71

INTRODUÇÃO GERAL

O potássio (K) é, geralmente, o segundo nutriente mais absorvido pelas culturas agrícolas (Hawkesford et al., 2012), desempenhando papéis cruciais em vários processos fisiológicos que influenciam o crescimento, a produção, a qualidade e a resistência da planta ao estresse, sendo um elemento chave para o atendimento da demanda crescente por alimento e energia, sobretudo na perspectiva das mudanças climáticas (Zörb; Senbayram; Peiter, 2014).

No solo, o elemento é encontrado nas formas solúvel (presente na solução do solo como íon K^+), trocável (ligado por forças eletrostáticas à superfície de minerais e da matéria orgânica), não trocável (retido nas entrecamadas dos minerais 2:1) e estrutural (preso na rede cristalina dos minerais), que se encontram em equilíbrio dinâmico e controlam a disponibilidade do elemento para as plantas (Helmke e Sparks, 1996).

Apesar de ser extensivamente estudado, assim como N e P, o comportamento do elemento ainda não é bem esclarecido, principalmente em solos que apresentem minerais 2:1 capazes de fixar K (Bilias e Barbayannis, 2019), como é o caso dos solos da região semiárida compreendida entre os vales dos rios Jaguaribe-CE e Piranhas-Açu-RN.

Essa região contempla importantes áreas de produção de hortaliças, culturas anuais e frutíferas, com destaque para a bananeira e meloeiro, duas culturas bastante exigentes em K. Os solos da área são caracterizados, em sua maioria, pelo baixo grau de desenvolvimento e a presença significativa de argilas de atividade alta, pH variando entre 7,0 e 7,5, saturação por bases elevada e disponibilidade de K alta (Brasil, 1971; Oliveira e Holanda, 2017), realidade essa predominante nos solos do semiárido brasileiro. Podem apresentar ainda elevados teores de $CaCO_3$, quando originados de rochas calcárias.

A despeito da boa disponibilidade natural de K apresentada por esses solos, o cultivo de espécies de alto rendimento tende a exauri-los, de modo que a adubação potássica é uma prática necessária para prevenção da perda da fertilidade. Porém, a presença de minerais 2:1, que podem fixar K, tem gerado implicações sobre o manejo da adubação potássica e, às vezes, ausência de resposta à sua aplicação. Esse fato pode estar relacionado à contribuição de formas não trocáveis (fixada) ou, principalmente, a problemas relacionados aos métodos de extração empregados para a avaliação da disponibilidade de K.

Avaliar, interpretar e traduzir em recomendações de adubação eficientes os teores disponíveis de K do solo medido por extratores químicos é uma tarefa difícil e importante em solos com poder tampão de K e capacidade de fixação de K elevados (Rees, Pettygrove e Southard, 2013). Nesses solos, o potássio disponível (fator quantidade) sozinho pode não ser

um bom estimador da disponibilidade de K (Bell, Thompson e Moody, 2021). Assim, para uma melhor avaliação da disponibilidade do elemento nesses solos, uma medida do PTK (fator capacidade), pode auxiliar na melhor interpretação da disponibilidade de K e na otimização da recomendação de adubação potássica (Breker et al., 2019).

A CTC do solo tem sido empregada para a separação de grupos de solos com diferentes capacidades tampão para K (Gatiboni, Silva e Anghinoni, 2016; Vilela, Sousa e Silva, 2017), normalmente sendo quantificada pela soma dos teores trocáveis de Ca, Mg, K, Na, H e Al. Porém, para solos pouco desenvolvidos de ambientes semiáridos, os teores solúveis desses elementos podem ser consideráveis e, geralmente, não são removidos através de pré-tratamentos nos laboratórios de rotina, de modo que pode haver superestimação desse atributo, comprometendo as recomendações de adubação para K. Assim, outras medidas relacionadas ao PTK podem ser mais eficientes para atingir esse objetivo.

A capacidade de sorção de K é um atributo químico que se relaciona com o PTK e que poderia ser utilizada como medida indireta para a separação de solos com diferentes tamponamentos para K. Dessa forma, entender esse processo, no que diz respeito à sua magnitude e cinética, é importante e pode auxiliar na otimização da interpretação da disponibilidade de K e recomendação de adubação potássica.

No tocante aos métodos de análise do K disponível, os laboratórios de análise de solo da região semiárida brasileira têm empregado o extrator Mehlich-1 e, mais raramente, a resina de troca iônica mista, para essa finalidade. Apesar disso, poucos trabalhos têm sido realizados avaliando extratores de K ou disponível em solos dessa região (Boeira et al., 2004; Medeiros et al., 2010).

Medeiros et al (2010) apontaram que a resina de troca iônica mista apresenta limitações para avaliação da disponibilidade de K em solos mais argilosos, com maiores CTC e proporção de minerais 2:1, enquanto Medeiros et al. (2021) verificaram que o Mehlich-1 sofre desgaste da sua acidez e, conseqüentemente, na sua capacidade de extração em solos ricos em CaCO_3 , indicando a necessidade de investigação de outros extratores para avaliação do K disponível em solos com essas características.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho: a) avaliar a cinética de sorção de K em solos do semiárido e correlacioná-la com atributos do solo que refletem a disponibilidade de K; b) quantificar a sorção de K em solos do semiárido brasileiro e correlacioná-la com atributos do solo que refletem a disponibilidade de potássio e c) avaliar a eficiência dos extratores acetato de amônio, cloreto de amônio, Mehlich-1 e resina de troca iônica mista para quantificação do K disponível para plantas de milho em solos do semiárido brasileiro.

LITERATURA CITADA

- BELL, M.J.; THOMPSON, M.L.; MOODY, P.W. Using Soil Tests to Evaluate Plant Availability of Potassium in Soils. In: MURREL, T.S.; MIKKELSEN, R.L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M.L. **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**. Suíça: Springer, 2012. p.191-218. DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7>
- BILIAS, F.; BARBAYIANNIS, N. Potassium availability: An approach using thermodynamic parameters derived from quantity-intensity relationships. **Geoderma**, v. 338, p. 355-364, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.026>
- BOEIRA, R.C.; RAIJ, B. van, SILVA, A.S.; MAXIMILIANO, V.C.B. Extração simultânea de alumínio, cálcio, magnésio, potássio e sódio do solo com solução de cloreto de amônio. **Rev. Bras. Ci. Solo**. v.28, p. 929-936. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500015>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA–SUDENE/DRN. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife, 1971, 531p. (Boletim Técnico, 21). Disponível em: <https://embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/330796/levantamento-exploratorio-reconhecimento-de-solos-do-estado-do-rio-grande-do-norte>. Acesso em: 10 de out. 2022.
- BREKER, J.S.; DESUTTER, T.; RAKKAR, M.K.; SHARMA, L.; FRANZEN, D.W. Potassium Requirements for Corn in North Dakota: Influence of Clay Mineralogy. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 83, p. 429-436. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0376>
- GATIBONI, L.C.; SILVA, L.S.; ANGHINONI, I. Diagnóstico da fertilidade do solo e recomendação da adubação. In: COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLOS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Santa Maria: SBCS-NRS, 2016. cap.6, p. 89-286. Disponível em: https://www.sbc-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf. Acesso em 24 de out. de 2023.
- HAWKESFORD, M.J.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; SKRUMSAGER MOLLER, I; WHITE, P. Function of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition**. 3rd ed. Elsevier Ltd., Oxford, UK. c. 6, p. 135-189, 2012.
- HELMKE, P.A.; SPARKS, D.L. Lithium, sodium, rubidium and cesium. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMNER, M.E. eds. **Methods of soil analysis chemical methods**. Madison, SSSA/ASA, 1996. Part 3. p.551-574 (Book Series, 5).
- MEDEIROS, J.S.; OLIVEIRA, F.H.T.; ARRUDA, J.A.; VIEIRA, M.S. FONTES, M.P.F. Eficiência de extratores de potássio disponível em solos do estado da Paraíba com graus de

desenvolvimento pedogenético diferentes. **Rev. Bras. Ci. Solo.** v. 34, n.1, p. 183-194. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100019>.

MEDEIROS, M.D.O.N.; OLIVEIRA, F.H.T.; PRESTON, W. PAIVA, M.R.F.C.; GÓIS, H.M.M.N. Comparison of methods for extracting available phosphorus from soils of the semi-arid. **Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, p. e20207633, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210062>.

OLIVEIRA, F.H.T.; HOLANDA, J.S. Fertilidade dos Solos do Nordeste e do Rio Grande do Norte. **Boletim Informativo do NRNE/SBCS**, vol. 1, n. 2, p.49-51, 2017. Disponível em: https://www.sbc-nrne.org.br/anexos/Boletim_Informativo_NRNE_SBCS_v.1,_n_.2__2017_.pdf. Acesso em: 14 de jun. 2021.

VILELA, L.; SOUSA, D.M.G.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. cap. 7. p.169-184. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/555355/cerrado-correcao-do-solo-e-adubacao>. Acesso em 24 de out. de 2023.

CAPÍTULO 1

ISOTERMAS DE SORÇÃO DE POTÁSSIO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

O comportamento do K em solos do semiárido brasileiro ainda não foi bem elucidado, sobretudo quanto ao processo de sorção. Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho quantificar a sorção de K em seis solos da região semiárida brasileira e correlacioná-la com atributos que refletem a disponibilidade de K. Foram utilizadas amostras, coletadas na camada de 0-30 cm, de seis solos: um Argissolo Vermelho Amarelo, um Neossolo Flúvico, dois Cambissolos Háplicos, um Chernossolo Rêndzico e um Vertissolo Háplico. As concentrações iniciais de K das soluções utilizadas para quantificação da sorção corresponderam a 0; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; 1750; 2000, 2250 e 2500 mg L⁻¹ de K. A quantidade de K sorvida foi calculada pela diferença na concentração inicial e final. As isotermas de Langmuir e de Freundlich foram ajustadas por meio da técnica de regressão não-linear e estimados os valores dos parâmetros desses modelos, que foram correlacionados com características do solo que refletem a disponibilidade de K. As isotermas mostraram-se adequadas para quantificar a sorção de K nos solos do semiárido, com valores de capacidade máxima de sorção de K (CMSK) variando de 5,45 g kg⁻¹ a 15,46 g kg⁻¹. Os teores de argila e a CTC foram os atributos que melhor se correlacionaram com a capacidade máxima de sorção de K. A maior sorção de K foi encontrada para os solos menos desenvolvidos, com maior CTC e maiores teores de argila em comparação aos solos mais arenosos e, ou, mais desenvolvidos.

Palavras-chave: Adsorção. Isoterma de Langmuir. Isoterma de Freundlich. Fixação de K.

POTASSIUM SORPTION ISOTHERMS IN BRAZILIAN SEMI-ARID SOILS

ABSTRACT

The behavior of K in soils from the Brazilian semiarid region is not well understood, especially about the sorption process. This study aimed to quantify K sorption in six soils from the Brazilian semiarid region and to correlate it with characteristics reflecting K availability. Samples were taken from the 0-30 cm layer of six soils: one Red-Yellow Argisol, a Fluvic Neosol, two Haplic Cambisol, a Rendzic Chernosol and a Haplic Vertisol. The initial concentrations of K in the solutions used to quantify sorption were 0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, and 2500 mg L⁻¹ K. The amount of K sorbed was calculated from the difference between the initial and final concentrations. The Langmuir and Freundlich isotherms were fitted using the non-linear regression technique and the parameter values of these models were estimated and correlated with soil characteristics reflecting K availability. The isotherms were found to be suitable for quantifying K sorption in semi-arid soils, with maximum K sorption capacity (MKSC) values ranging from 5.45 g kg⁻¹ to 15.46 g kg⁻¹. Clay content and CEC were the attributes best correlated with maximum K sorption capacity. The highest K sorption was found for less developed soils with higher CEC and higher clay content compared to sandier and/or more developed soils.

Keywords: Adsorption. Langmuir isotherm. Freundlich isotherm. K fixation.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) é, geralmente, o segundo elemento mais requerido pelas culturas (Hawkesford et al., 2012). O nutriente desempenha papel crucial em vários processos fisiológicos que influenciam o crescimento, produção, qualidade e resistência das plantas a estresses (Zörb et al., 2014).

A despeito de sua importância, o comportamento do K nos solos ainda não é bem esclarecido, em virtude da complexidade dos processos que controlam o predomínio das diferentes formas do K nos solos e sua disponibilidade para plantas, principalmente naqueles que possuem minerais 2:1 capazes de fixar ou liberar K (Bilias e Barbayiannis, 2019), como é o caso dos solos da região semiárida brasileira.

Os solos da região semiárida brasileira são, de modo geral, pouco desenvolvidos, levemente ácidos a alcalinos e com presença significativa de minerais 2:1 pouco intemperizados (Oliveira e Holanda, 2017) que, além de apresentar elevada CTC, possuem sítios específicos de sorção de K, de modo que a retenção do elemento pelo solo pode ser grande. Essas características imprimem a esses solos Poder Tampão de Potássio elevado (PTK) (Santos et al., 2013). O PTK é entendido como a capacidade de o solo manter constante a concentração de K na solução do solo e é dado pela relação entre os fatores quantidade e intensidade, influenciando diretamente a disponibilidade do K e o manejo da adubação potássica (Pal et al., 1999).

O potássio trocável sozinho não é um bom indicador da disponibilidade de K, sobretudo em solos ricos em minerais 2:1 (Abaslou e Abtahi, 2008), de forma que uma medida do PTK pode ser usada para melhorar o entendimento da dinâmica de K e sua disponibilidade nos solos (Adesanwo, Odu e Thompson, 2013). Assim, conhecer a capacidade de sorção de K pelos solos é essencial para otimizar as recomendações de fertilização potássica (Ali et al., 2013; Nazli et al., 2018).

A sorção de K tem sido estudada, principalmente, pelo emprego das isotermas de Langmuir e Freundlich (Pal et al., 1999; Bangroo et al., 2012; Ali et al., 2013; Kassa, Haile e Kebede, 2019). Essas isotermas permitem estimar parâmetros que refletem a capacidade de sorção de K e que se relacionam com o PTK, podendo ser utilizadas na otimização da interpretação da disponibilidade do elemento, permitindo o agrupamento de solos com diferentes capacidades sortivas e potencial de resposta à aplicação de fertilizantes potássicos (Kenyanja et al., 2014). Além disso, essas informações são importantes para a modelagem da dinâmica do K em agroecossistemas (Wang et al., 2017; Brouder et al., 2021).

A capacidade de sorção de K pelos solos está diretamente relacionada aos seus atributos químicos, físicos e mineralógicos, principalmente com a quantidade e tipo de minerais argilosos, capacidade de troca catiônica e teor de matéria orgânica (Nazli et al., 2018).

Poucos estudos têm sido realizados no Brasil com o intuito de quantificar a capacidade de sorção de K pelos solos, tendo em vista que o território brasileiro é composto principalmente por solos muito desenvolvidos e com baixo PTK, como os de Freitas et al. (2018) e Chaves et al. (2019). Outras pesquisas se dedicaram a estudar o fenômeno em solos da Índia (Bangroo et al., 2012), Quênia (Kenya, Muthengia e Mbuvi, 2013), Turquia (Demirkaya et al., 2018), Etiópia (Auge, et al., 2018; Misskire et al., 2019) e Iraque (Saeed, 2021).

Ao estudarem a sorção de K em dois Vertissolos do estado da Paraíba, sob duas condições de manejo (mata nativa e solo cultivado ou roçado), Chaves et al. (2019) verificaram valores de capacidade máxima de sorção de K de 1,40 g kg⁻¹ para o solo sob cultivo e 7,97 g kg⁻¹ para o solo sob mata nativa.

Embora esses dados sejam importantes para a compreensão da dinâmica de K em solos do semiárido brasileiro, informações sobre a sorção de K para solos de regiões de importância agrícola, como é o caso da região localizada entre os vales dos rios Jaguaribe (CE) e Piranhas/Açu (RN), ainda são escassas. Essa região é importante pólo de produção agrícola, principalmente de espécies frutíferas destinadas à exportação, em especial melão e banana que são culturas exigentes em K.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi quantificar a sorção de K em solos do semiárido brasileiro e correlacioná-la com atributos do solo que refletem a disponibilidade de potássio.

MATERIAL E MÉTODOS

A sorção de potássio foi avaliada em amostras coletadas na camada superficial (0-30 cm) de seis solos representativos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Jaguaribe-CE e Piranhas/Açu-RN, sob vegetação nativa e sem histórico de aplicação de fertilizantes.

Esses solos foram formados a partir de diferentes materiais de origem, sendo quatro solos derivados de calcário: Cambissolo Háplico, coletado em Baraúna-RN (CX1; 05°05'42.2"S; 37°36'46.7"W), Cambissolo Háplico, coletado em Quixeré-CE (CX2; 05°05'07.7"S; 037°51'35.1"W), Chernossolo Rêndzico, coletado em Mossoró-RN (MD; 05°26'54.7"S; 037°11'19.9"W) e Vertissolo Háplico, coletado em Mossoró-RN (VX;

05°25'26.4"S; 037°12'26"W); um solo formado de sedimentos aluviais: Neossolo Flúvico, coletado em Carnaubais-RN (RY; 05°22'33.2"S; 036°50'42.2"W) e um solo derivado de sedimentos do grupo Barreiras: Argissolo Vermelho Amarelo, coletado em Mossoró-RN (PVA; 05°09'58.5"S; 037°11'57.6"W) (BRASIL, 1971; BRASIL, 1973).

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha para caracterização química e física, conforme Teixeira et al. (2017) (Tabela 1).

Para a quantificação da sorção de K utilizou-se amostras dos seis solos e onze concentrações de equilíbrio (0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250 e 2500 mg L⁻¹ de K, na forma de KCl).

Em tubos Falcon de 50 mL foram colocados 2,5 g de cada solo e 25 mL de uma solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ contendo K. De acordo com as concentrações das soluções de equilíbrio, sendo então agitados por duas horas e as suspensões obtidas filtradas. A concentração final de K na solução de equilíbrio foi quantificada por fotometria de chama. A quantidade de K sorvida ao solo foi estimada pela diferença entre o valor da concentração inicial de K na solução de equilíbrio e o valor da concentração de K que permaneceu após a agitação e filtragem. Esse procedimento foi repetido três vezes.

Para cada solo, o ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de Langmuir foi feito por meio da técnica de regressão não-linear, de acordo com a equação:

$$Q = (abC)/(1+aC) \quad (1)$$

Onde:

“Q” = quantidade de K sorvida no solo (mg g⁻¹);

“C” = concentração de K na solução de equilíbrio (mg L⁻¹);

“a” = constante do modelo que dá uma ideia da “energia de ligação do K ao solo” (L mg⁻¹);

“b” = constante do modelo, cuja estimativa é a capacidade máxima de sorção de K pelo solo (mg g⁻¹).

Também, por meio da técnica de regressão não-linear, foi ajustado o modelo da isoterma de Freundlich, conforme equação 2:

$$Q = kC^{1/n} \quad (2)$$

Onde:

“Q” = quantidade de K sorvida no solo (mg g⁻¹);

“C” = concentração de K na solução de equilíbrio (mg L⁻¹);

“k” e “n” são constantes do modelo relacionadas à capacidade do solo em sorver K da solução de equilíbrio.

Tabela 1 – Características físicas e químicas de seis solos do semiárido brasileiro⁽¹⁾

Característica	Solo ⁽²⁾					
	PVA	RY	CX1	CX2	MD	VX
Areia (g kg ⁻¹)	850	640	660	380	290	290
Silte (g kg ⁻¹)	20	220	70	220	160	320
Argila (g kg ⁻¹)	130	140	270	400	550	390
Densidade do solo (kg dm ³)	1,57	1,35	1,42	1,37	1,20	1,28
pH	4,1	6,5	6,6	6,7	7,6	8,0
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	7,5	6,2	9,4	11,0	14,4	7,0
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	4,2	60,7	4,5	4,8	3,1	1,6
K (mg dm ⁻³)	35,7	137,3	144,8	149,5	185,8	64,0
Na (mg dm ⁻³)	20,1	133,1	54,0	116,3	47,1	76,2
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,74	6,94	6,04	11,50	40,33	35,73
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,29	3,10	1,17	1,29	4,77	5,60
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
(H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	4,02	1,19	1,58	1,97	0,15	0,0
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,20	10,97	7,81	13,68	45,78	41,83
t (cmol _c dm ⁻³)	1,81	10,97	7,81	13,68	45,78	41,83
CTC (cmol _c dm ⁻³)	5,22	12,16	9,39	15,65	45,93	41,83
V (%)	23	90	83	87	100	100
Saturação de K (%) ⁽³⁾	1,7	2,9	3,9	2,4	1,0	0,4
PST (%)	2	5	3	3	0	1
Equivalente CaCO ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	1,59	8,22	4,23	9,49	27,53	254,56

⁽¹⁾Análises químicas e físicas realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). ⁽²⁾PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-RN); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN). ⁽³⁾Saturação de K = (K⁺/CTC)x100. ⁽⁴⁾ Dados extraídos de MEDEIROS et al. (2021).

A partir das estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados para as duas isotermas de sorção de K, foram realizadas análises de correlação entre os valores dos parâmetros dessas isotermas e os respectivos valores das características químicas e físicas dos solos relacionadas com a disponibilidade de K do solo para as plantas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

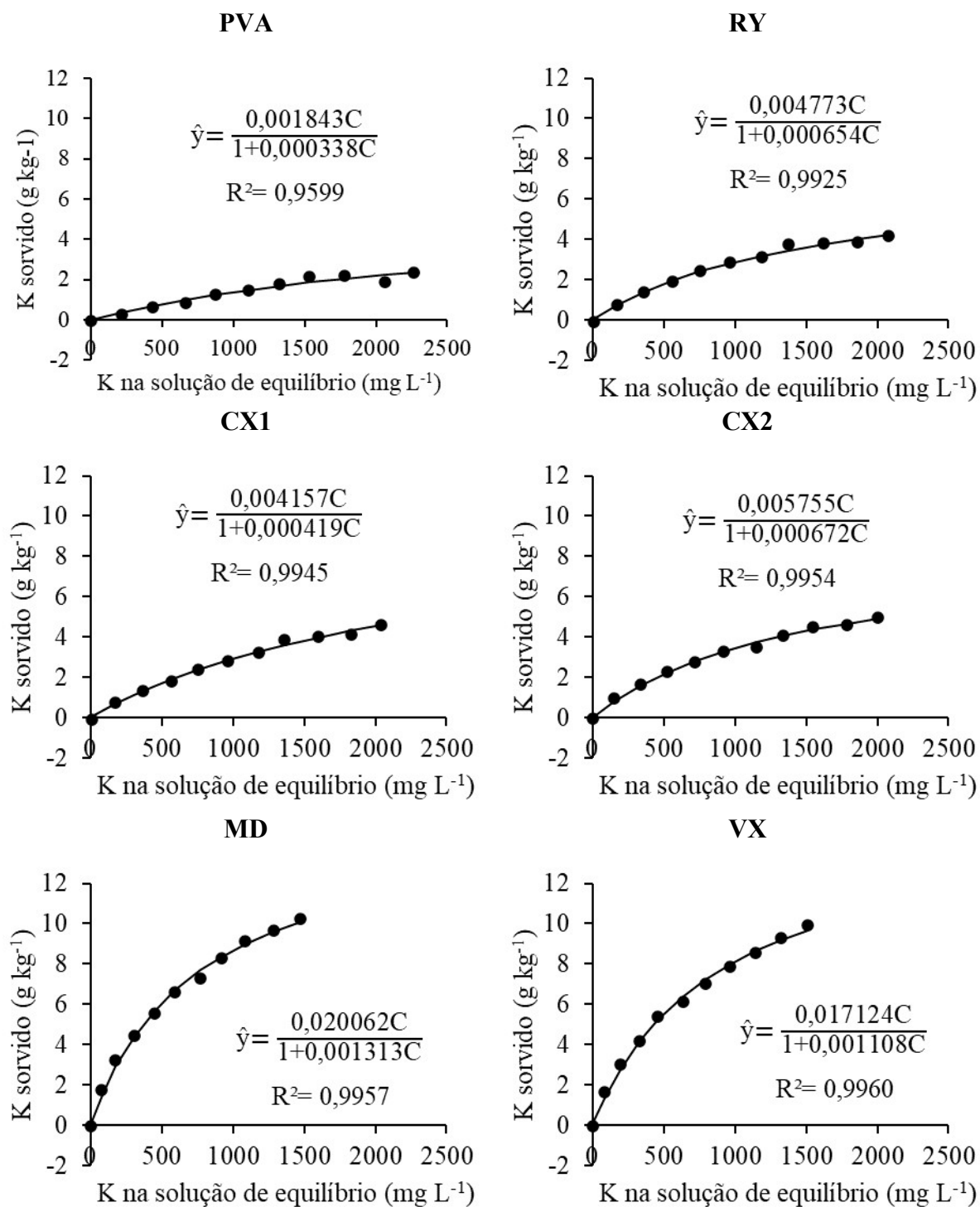
Os elevados coeficientes de determinação (R^2) mostram bom ajuste e capacidade preditiva do modelo hiperbólico de Langmuir para a sorção de K, gerando estimativas de K sorvido muito próximas dos valores encontrados experimentalmente (Figura 1), com R^2 variando de 0,9599 no PVA a 0,9960 no VX (Figura 1). Esses resultados indicam que este modelo descreve adequadamente a sorção de K nos solos estudados, como verificado por Binner et al. (2017), Freitas et al. (2018), Demirkaya et al. (2018), Chaves et al. (2019), Misskire et al. (2019) e Darunsontay, Jindaluang e Kunmala (2020).

A sorção de K aumentou em resposta à elevação da concentração de K nas soluções de equilíbrio em todos os solos estudados, porém, com tendência à estabilização e formação de platô, o que possibilitou a estimativa da CMSK (Figura 1 e Tabela 2).

A CMSK variou de 5,45 g kg⁻¹ no PVA a 15,46 g kg⁻¹ no VX, valor aproximado ao verificado para o MD (15,27 g kg⁻¹). Os demais solos apresentaram sorção intermediária, com valores iguais a 7,30 g kg⁻¹ (RY), 8,55 g kg⁻¹ (CX2) e 9,9 g kg⁻¹ (CX1) (Tabela 2). Esses dados indicam que a sorção de K nos solos VX e MD é quase três vezes superior à verificada para ao PVA e que há variação na capacidade sortiva de K nos solos estudados, em razão da heterogeneidade dos atributos químicos, físicos (Tabela 1) e, provavelmente, mineralógicos.

Os valores de CMSK encontrados neste trabalho foram superiores aos verificados por Freitas et al. (2018), em amostras de um Latossolo Amarelo do estado de Pernambuco coletadas nas camadas 0-20; 20-40 e 40-60 cm, com exceção ao PVA que apresentou valor semelhante ao encontrado por esses autores para a camada 40-60 cm. Valores inferiores de CMSK em um Vertissolo do município de Queimadas-PB também foram observados por Chaves et al. (2019), mas para o Vertissolo coletado no distrito de Galante (Campina Grande-PB), em área sob mata, o valor de CMSK (7,97 g kg⁻¹) foi semelhante aos do RY, CX1 e CX2, embora seja aproximadamente a metade dos valores de sorção máxima do MD e do VX. Já para solos da Turquia, Demirkaya et al. (2018) encontraram valores de CMSK de 1,74 g kg⁻¹, 3,07 g kg⁻¹ e 8,89 g kg⁻¹ para solos de textura franco arenosa, franca e muito argilosa, respectivamente, tendo apenas o último apresentado similaridade com os resultados encontrados no presente trabalho. O valor de CMSK para dez Vertissolos da Etiópia foram quantificados por Misskire et al. (2019) e variaram de 0,2701 g kg⁻¹ a 3,3333 g kg⁻¹, valores inferiores aos apresentados neste trabalho.

Figura 1– Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de sorção de Langmuir para os dados de quantidade de K sorvida como variável da concentração de K na solução de equilíbrio para seis solos do semiárido brasileiro. PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 2- Estimativas dos parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich para seis solos do semiárido brasileiro

Solo ⁽¹⁾	Isoterma de Langmuir		Isoterma de Freundlich	
	CMSK	a	k	n
	g kg ⁻¹	L mg ⁻¹	L g ⁻¹	
PVA	5,45	0,000338	0,0081	1,3552
RY	7,30	0,000654	0,0379	1,6102
CX1	9,90	0,000420	0,0215	1,4152
CX2	8,55	0,000672	0,0480	1,6307
MD	15,27	0,001314	0,1838	1,8021
VX	15,46	0,001108	0,1417	1,7164
Média	10,32	0,000752	0,0735	1,5883

⁽¹⁾PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).

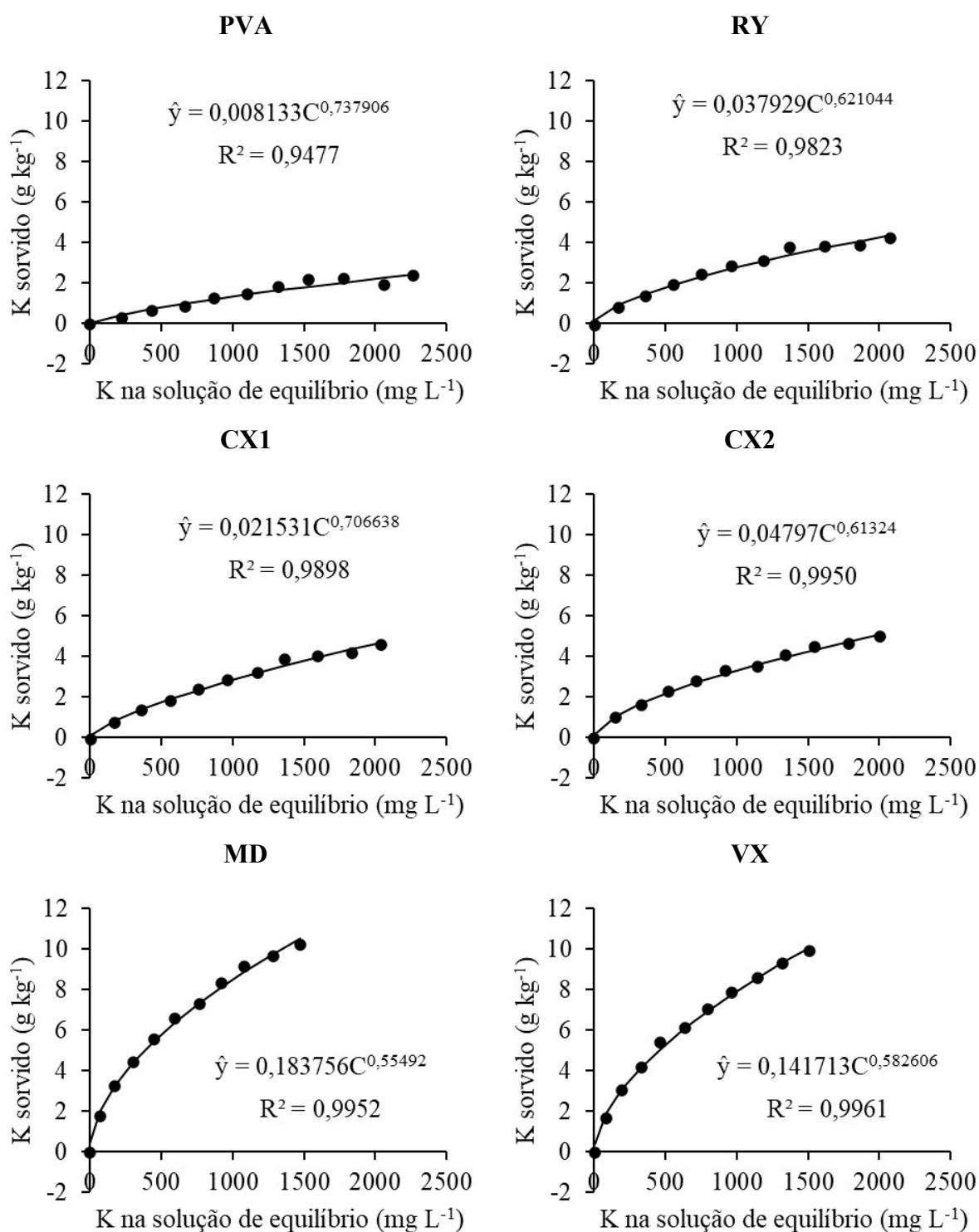
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com relação à energia de ligação (a), os valores estimados foram 0,000338 a 0,001314 L mg⁻¹, para o PVA e MD respectivamente, indicando que o K é retido com 3,9 vezes mais energia no MD em relação ao PVA (Tabela 2), possivelmente devido à presença de sítios sorção específicos para K presentes no MD, dada à sua condição de pedogênese que resulta em argila rica em minerais 2:1.

Os valores de R² verificados para as equações ajustadas utilizando a isoterma de Freundlich mostram que esse modelo também apresenta habilidade para descrever a sorção de K nos solos em estudo (Figura 2). Para essa isoterma, os valores de R² variaram de 0,9477 no PVA a 0,9961 no VX. Pal et al. (1999), Kenya, Muthengia e Mbuvi (2013), Freitas et al. (2018), Nazli et al. (2018) Misskire et al. (2019) e Kassa, Haile e Kebde (2021) também verificaram bom ajuste desse modelo para estimar a sorção de K em solos.

Quando utilizada a equação de Freundlich, o valor estimado de “k” variou de 0,0081 L g⁻¹ no PVA a 0,1838 L g⁻¹ no VX. Já para os valores de “n” as estimativas variaram de 1,3552 no PVA a 1,8021 no VX. Com esses dados é possível estabelecer uma separação de três grupos de solos com base nos valores de “k”, de modo semelhante ao realizado com os valores de CMSK estimados pela isoterma de Langmuir: PVA com menor capacidade sortiva; RY, CX1 e CX2 com sorção de K intermediária e MD e VX com elevada capacidade de sorção de K (Tabela 2), reflexo das variações nos atributos químicos, físicos (Tabela 1) e, possivelmente, mineralógicos desses solos.

Figura 2- Ajuste da isoterma de sorção de Freundlich para os dados de quantidade de K sorvida como variável da concentração de K na solução de equilíbrio para seis solos do semiárido brasileiro. PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Kenyanya, Muthengia e Mbuvi (2013) ao estudarem a sorção de K em cinco amostras de Nitossolo coletados no condado de Nyamira, no Quênia, encontraram valores para o coeficiente “k” de Freundlich variando de 0,004977 a 0,011091 L g⁻¹, com valor médio de 0,006993 L g⁻¹, valores aproximados aos verificados para os solos com menor capacidade sortiva de K e inferiores aos estimados para o MD e VX. Os valores de “k” de Freundlich também foram superiores aos encontrados por Chaves et al. (2019) para dois Vertissolos do estado da Paraíba.

Do ponto de vista prático, esses dados mostram que parte do K aplicado aos solos será sorvido com grande energia, reduzindo as perdas por lixiviação, e que, provavelmente, haverá formação de K não-trocável, pela fixação do K nas entrecamadas de minerais 2:1, principalmente naqueles com maior sorção (MD e VX), que, possivelmente, possuem maior quantidade de minerais 2:1. Isso implicará na redução da taxa de recuperação do elemento por extratores de K disponível e pelas plantas, o que influenciará nas recomendações de adubação, em razão do maior tamponamento esperado para esses solos, mostrando a necessidade de utilização de alguma medida do PTK para otimização das interpretações dos resultados de análise do K disponível e das recomendações de adubação potássica.

A CMSK e o valor “k” apresentaram alta correlação positiva com o teor de argila ($r = 0,8305^*$ para CMSK e $r = 0,8409^*$ para “k”) e, principalmente, com a CTC do solo ($r = 0,9504^{**}$ e $r = 0,9933^{**}$ para as duas variáveis, respectivamente), porém, esses atributos não se correlacionaram com os teores de MOS dos solos (Tabela 3). Além disso, a CMSK e o valor de “k” também apresentaram alta correlação ($0,9286^{**}$). Esses dados indicam que o teor de argila e a CTC podem ser utilizadas como indicadores da capacidade sortiva de potássio nos solos estudados, bem como medida do PTK.

Tendo em vista o maior coeficiente de correlação e o maior nível de significância verificados para as correlações entre a CMSK e o valor de k de Freundlich com a CTC, deve-se preferir esse atributo em detrimento ao teor de argila, pois a CTC reflete não só a quantidade de argila, mas também a qualidade ou a composição mineralógica dos solos. Isso fica claro quando se compara os CX2 com o VX, pois apesar dos mesmos apresentarem teor similar de argila (400 e 390 g kg⁻¹ respectivamente) a CTC do segundo (41,83 cmol_c kg⁻¹) é 2,7 vezes maior do que a do CX2 que possui CTC igual a 15,65 cmol_c kg⁻¹ (Tabela 1). Essa grande diferença na CTC se dá, possivelmente, pela maior quantidade de minerais 2:1 que o VX deve possuir, principalmente do grupo das esmectitas.

Diversos autores têm recomendado o uso da CTC para o agrupamento de solos segundo faixas de CTC como forma de melhorar a predição da disponibilidade de K para as plantas (VILLA et al., 2004; KAMINSKI et al., 2007; VIEIRA et al., 2016).

Santos et al. (2013) verificaram que o PTK do solo se correlacionou com a CTC (0,95**), com o teor de argila (0,60*), de silte (0,61*) e com o índice Ki (0,81**), mas o PTK não apresentou correlação significativa com o teor de carbono orgânico total. Os autores justificaram que a menor correlação entre o PTK e o teor de argila se dá em virtude da variação na composição mineralógica dos solos, que regula a atividade da fração argila.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação linear simples⁽¹⁾ entre parâmetros das isotermas de sorção de Langmuir e de Freundlich e características do solo que refletem o fator capacidade de potássio em seis solos do semiárido brasileiro

	CMSK	a	k	n
Argila	0,8305*	0,8258*	0,8409*	0,7803 ^{ns}
MOS	0,4454 ^{ns}	0,4971 ^{ns}	0,5321 ^{ns}	0,4546 ^{ns}
CTC	0,9504**	0,9795**	0,9933**	0,8757*
n	0,7736 ^{ns}	0,9477**	0,8846*	-
k	0,9286**	0,9865**	-	-
a	0,8971*	-	-	-

⁽¹⁾* = significativo a 5%; ** = significativo a 1%; ns = não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

CONCLUSÕES

Os teores de argila e a CTC foram os atributos que melhor se correlacionaram com a capacidade máxima de sorção de K.

A maior sorção de K foi encontrada para os solos menos desenvolvidos, com maior CTC e maiores teores de argila em comparação aos solos mais arenosos e, ou, mais desenvolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABASLOU, H; ABTAHI, A. Potassium quantity-intensity parameters and its correlation with selected soil properties in some soils of Iran. **Journal of Applied sciences**, v. 8, n. 10, p. 1875-1882, 2008. DOI: 10.3923/jas.2008.1875.1882
- ADESANWO, O. O.; ODU, U. V.; THOMPSON, O. F. Dynamics of potassium in representative soil series of southwestern Nigeria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, p. 3259–3266, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.840837>
- ALI, W.; HUSSAIN, M.; ALI, M.; MUBUSHAR, M.; TABASSAM, M. A. Z.; MOHSIN, M.; NASIR, H. A. Evaluation of Freundlich and Langmuir isotherm for potassium adsorption phenomena. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 6 p. 1048-1054, 2013.
- AUGE, K.D.; ASSEFA, T.M.; WOLDEYOHANNES, W.H.; ASFWA, B.T. Potassium adsorption characteristics of five diferente textured soils under enset (*Ensete ventricosom Cheesman*) farming systems of Sidama zone, South Ethiopia. **Journal of Soil Science and Environmental Management**, v. 9, n.1, p. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2017.0666>
- BANGROO, S.A; MANI, M.A; TAHIR, A.; MALIK, M.A; KIRMANI, N.A; SAFI, J.A; RASOOL, F. Potassium adsorption characteristics of soils under long term maize-legume cropping sequence. **African Journal of Agricultural Research**, v. 48, p. 6502-6507, 2012. DOI: 10.5897/AJAR12.1751
- BILIAS, F.; BARBAYIANNIS, N. Potassium availability: an approach using thermodynamic parameters derived from quantity-intensity relationships. **Geoderma**, v. 338, p. 355–364, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.026>
- BINNER, I.; DULTZ, S.; SCHELLHORN, M.; SCHENK, M.K. Potassium adsorption and release properties of clays in peat-based horticultural substrates for increasing the cultivation safety of plants. **Applied Clay Science**, v. 145, p. 28–36, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.013>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA–SUDENE/DRN. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife, 1971, 531p. (Boletim Técnico, 21). Disponível em: <https://embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/330796/levantamento-exploratorio-reconhecimento-de-solos-do-estado-do-rio-grande-do-norte>. Acesso em: 10 de out. 2022.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA–SUDENE/DRN. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Ceará**. Recife, 1973, 301p. (Boletim Técnico, 28). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/->

/publicacao/331170/levantamento-exploratorio---reconhecimento-de-solos-do-estado-do-ceara. Acesso em: 10 de out de 2022.

BROUDER, S.M.; VOLENEC, J.J.; MURREL, T.S. The potassium cycle and its relationship to recommendations. In: MURREL, T.S.; MIKKELSEN, R.L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M.L. **Improving potassium recommendations for agricultural crops**. Springer, cap. 1, 2021, p. 1-46. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59197-7>. Acesso em: 10 de jun de 2022.

CHAVES, L.H.G.; VASCONCELOS, A.C.F.; LIMA, W.B.; FERNANDES, J.D.; CHAVES, I.B.; MENDES, J.S. Uso e manejo na relação quantidade/intensidade e adsorção de potássio em Vertissolo. **Revista de Ciências Agrárias**, v.42, n.3, p. 638-647, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.17516>

DARUNSONTAYA, T.; JINDALUANG, W.; KUNMALA, P. Soil potassium status and adsorption characteristics of Thai lowland vertisols. **Khon Kaen Agriculture Journal**, v. 48, n.5, p. 1172-1183, 2020. DOI:10.14456/kaj.2020.104

DEMIRKAYA, S.; GÜLSER, C. The Potassium Fixation Capacities of Different Textural Soils. **Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences**, v. 28, p. 169-175, 2018. Número Especial. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/617759>. Acesso em: 25 de jan. de 2022

FREITAS, J.M.A.S.; NETTO, A.M.; CORRÊA, M.M.; XAVIER, B.T.L.; ASSIS, F.X. Potassium adsorption in soil cultivated with sugarcane. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n.1, p. 541-555, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160910>

HAWKESFORD, M.J.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; SKRUMSAGER MOLLER, I; WHITE, P. Function of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition**. 3rd ed. Elsevier Ltd., Oxford, UK. c. 6, p. 135-189, 2012.

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D.F.; RHEINHEIMER, D. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1003-1010, 2007. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500017>

KASSA, M.; HAILE, W.; KEBEDE, F. Evaluation of Adsorption Isotherm Models for Potassium Adsorption under Different Soil Types in Wolaita of Southern Ethiopia. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, p. 4, 388-401, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1563097>

KENYANYA, O.; MBUVI, H.M.; MUTHENGIA, J.M.; Omayo, E.K. Use of adsorption isotherm models to determine potassium fertilizer acreage doses for optimum maize growth and yields in Nyamira County, Kenya. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**. v. 8, n. 15, p. 1525-1536, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/9387274/Use_of_Adsorption_Isotherm_Models_to_Determine_Potassium_Fertilizer_Acreage_Doses_for_Optimum_Maize_Growth_and_Yields_in_Nyamira_County_Kenya. Acesso em: 10 de jan. de 2022.

KENYANYA, O; MUTHENGIA, J.; HARUN, M. Determination of Potassium Levels in Intensive Subsistence Agricultural Soils in Nyamira County, Kenya. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v. 3, n. 7, p. 294-302, 2013. DOI: 10.5923/j.ijaf.20130307.06

MEDEIROS, M.D.O.N.; OLIVEIRA, F.H.T.; PRESTON, W. PAIVA, M.R.F.C.; GÓIS, H.M.M.N. Comparison of methods for extracting available phosphorus from soils of the semi-arid. **Ciência Agrônômica**, v. 52, n. 4, p. e20207633, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210062>

MISSKIRE, Y.; MAMO, T.; TADDESSE, A.M.; YERMIYAHU, U. Potassium adsorption and release characteristics on vertisols of North Western Ethiopian Highlands. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.50, n. 9, p. 1132-114, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1604732>

NAZLI, F.; BUSH, A.; IQBAL, M.M.; BIBI, F.; ZAFAR-UL-HYE; KASHIF, M.R.; AHMAD, M. Modeling the potassium requirements of potato crop for yield and quality optimization. **Asian Journal of Agriculture and biology**, v. 6, n.2, p. 169-180, 2018. Disponível em: https://www.asianjab.com/wp-content/uploads/2018/06/5.-OK_Modeling-the-potassium-requirements-of-potato-crop-for-yield-and-quality-optimization_21.pdf. Acesso em 17 de mai. de 2022.

OLIVEIRA, F.H.T.; HOLANDA, J.S. Fertilidade dos Solos do Nordeste e do Rio Grande do Norte. **Boletim Informativo do NRNE/SBCS**, vol. 1, n. 2, p.49-51, 2017. Disponível em: https://www.sbc-snrne.org.br/anexos/Boletim_Informativo_NRNE_SBCS_v.1,_n__2__2017_.pdf. Acesso em: 14 de jun. 2021.

PAL, Y.; WONG, M.T.F.; GILKES, R. J. The forms of potassium and potassium adsorption in some virgin soils from South-Western Australia. **Australian Journal of Soil Research**, v. 37 p. 695–710, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR98083>

SAEED, K.S. Potassium Adsorption Phenomenon in Calcareous Soils of Shahrazur Plain. **Kurdistan Journal of Applied Research**, v. 6, n. 1, p. 95-109, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24017/science.2021.1.10>

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; HOFFMANN, R. B.; SANTOS, D. Relações quantidade/intensidade de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba - Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 4, p. 338-346, 2013. Disponível em: <https://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/968>. Acesso em 10 de nov. de 2022.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. eds. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 3 ed. revista e ampliada, Brasília: Embrapa Solos, 2017. 573p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 10 de fev. de 2022.

VIEIRA, M.S.; OLIVEIRA, F.H.T.; SANTOS, H.C.; MEDEIROS, J.S. Capacidade de suprimento de potássio em doze classes de solos em função de cultivos sucessivos de milho. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n.3, p. 219-227, 2016. Disponível em: <https://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/1910>. Acesso em: 10 de fev. de 2022.

VILLA, M.R.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V. Formas de potássio e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 649-658, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000400007>

WANG, C.; BOITHIAS, L.; NING, Z.; HAN, Y.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ J.M.; KURAMOCHI, K.; HATANO, R. Comparison of Langmuir and Freundlich adsorption equations within the SWAT-K model for assessing potassium environmental losses at basin scale. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 205-211, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.001>

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture - Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**. v.171, p. 656-669, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>

CAPÍTULO 2

CINÉTICA DE SORÇÃO DE POTÁSSIO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Compreender a cinética de sorção de K pode auxiliar no manejo da adubação potássica. Nesse sentido, objetivou-se, com este trabalho, avaliar a cinética de sorção de K em seis solos do semiárido e correlacioná-la com atributos do solo que refletem a disponibilidade de K. Foram utilizadas amostras coletadas na camada de 0-30 cm de seis solos, sendo um Argissolo Vermelho Amarelo, um Neossolo Flúvico, dois Cambissolos Háplicos, um Chernossolo Rêndzico e um Vertissolo Háplico. Duas concentrações iniciais de K (50 e 200 mg L⁻¹) foram adicionadas aos solos, em triplicata, e agitadas por 11 tempos (1, 5, 20, 40, 60, 120, 180, 600, 960 e 1440 minutos). Após a agitação as suspensões foram filtradas e o teor de K quantificado por fotometria de chama. Com os valores de concentração final foi ajustado o modelo $C = kt^{-n}$. Os parâmetros desse modelo foram correlacionados com características do solo que refletem a disponibilidade de K. A concentração de K, independente da concentração inicial, foi reduzida em função do tempo de contato do K com o solo. O modelo apresentou bom ajuste para todos os solos na menor concentração, mas apenas para os solos de maior sorção quando utilizada a solução de 200 mg L⁻¹. Os coeficientes do modelo cinético se correlacionaram com atributos do solo que refletem a disponibilidade de K. Com base nos resultados, conclui-se que a sorção de potássio foi muito grande nos primeiros instantes de contato do K com os solos, decresceu até aproximadamente 60 minutos e tendeu a se manter estável até 24 h, que a quantidade de potássio sorvido no solo e a taxa de sorção foram maiores no Chernossolo Rêndico e no Vertissolo Háplico e que a sorção de K é diretamente relacionada com a capacidade máxima de sorção de K e a CTC do solo.

Palavras-chave: Adsorção; Fixação de K; Equação cinética.

KINETICS OF POTASSIUM SORPTION IN BRAZILIAN SEMI-ARID SOILS

ABSTRACT

Understanding K sorption kinetics can help in the management of potassium fertilization. This study aimed to assess K sorption kinetics in six semi-arid soils and correlate it with soil attributes that reflect K availability. Samples were taken from the 0-30 cm layer of six soils: one Red-Yellow Argisol, a Fluvic Neosol, two Haplic Cambisol, a Rendzic Chernosol and a Haplic Vertisol. Two initial concentrations of K (50 and 200 mg L⁻¹) were added to the soils in triplicate and stirred for 11 times (1, 5, 20, 40, 60, 120, 180, 600, 960 and 1440 minutes). After stirring, the suspensions were filtered and the K content was quantified by flame photometry. The $C = kt^{-n}$ model was fitted to the final concentration values. The parameters of this model were correlated with soil characteristics that reflect K availability. The concentration of K, regardless of the initial concentration, was reduced as a function of the contact time of the K with the soil. The model showed a good fit for all the soils at the lowest concentration, but only for the soils with the highest sorption when the 200 mg L⁻¹ solution was used. The kinetic model coefficients correlated with soil attributes that reflect K availability. Based on the results, it can be concluded that potassium sorption was very high in the first moments of K contact with the soils, decreased until approximately 60 minutes, and tended to remain stable until 24 h, that the amount of potassium sorbed in the soil and the sorption rate were higher in Chernosol and Haplic Vertisol. and that K sorption is directly related to the maximum K sorption capacity and the CEC of the soil.

Keywords: Adsorption; K fixation; Kinetic equation.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) é um dos nutrientes absorvidos em maiores quantidades pelas plantas e desempenha importantes papéis fisiológicos como a abertura e fechamento de estômatos, ativação de enzimas e translocação de assimilados, além de contribuir com a sanidade das plantas (Malavolta, 2006).

No solo, o elemento está presente em diferentes formas, a depender do tipo e da energia de interação com a fase sólida: K solúvel (presente na solução do solo), K trocável (retido às cargas elétricas dos coloides minerais e orgânicos), K não-trocável (fixado nas entrecamadas de minerais 2:1 e na estrutura de minerais facilmente intemperizáveis) e K estrutural (quando presente na estrutura de minerais mais estáveis e de difícil intemperização) (Sparks e Huang, 1985). Desse modo, a disponibilidade do K depende da sua dinâmica no solo, que é variável em função da magnitude do equilíbrio entre as várias formas de K (Ali et al., 2013).

As frações de K no solo encontra-se em equilíbrio dinâmico, de modo que a alteração na concentração do elemento na solução do solo, seja pela adubação, pela absorção ou lixiviação, irá causar alteração nas demais, sobretudo da fração trocável e não-trocável (Medeiros et al., 2014). Esse equilíbrio depende de fatores termodinâmicos e cinéticos (Mouhamad, Alsaede e Iqbal, 2016). Dessa forma, as taxas e as direções das reações, sobretudo as que ocorrem entre a solução e as formas trocáveis de K, determinam se o elemento ao ser aplicado ao solo, será lixiviado para camadas inferiores, absorvido pelas plantas ou convertido em formas não-trocáveis (Sparks, 2000). Isso ajuda a explicar o movimento de K no sistema solo-solução-plantas em relação às forças motrizes e a entender as constantes mudanças que ocorrem na relação entre as formas lábil e não-lábil de K (Yawson et al., 2011).

As reações de equilíbrio que controlam a dinâmica do K no solo são variáveis em virtude da taxa de intemperismo, das propriedades físico-químicas do solo e, principalmente, pela composição mineralógica e pelas propriedades de troca iônica ou de sorção (Lalitha e Dhakshinamoorthy, 2013).

Muitos modelos têm sido utilizados para descrever a cinética de sorção de K a exemplo das equações de zero ordem, de primeira ordem, de segunda ordem, pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Elovich e parabólica de difusão (Sparks et al., 1980; Jardine e Sparks, 1984; Rezaei e Movahedi Naeini, 2009; Aurangzei et al., 2021).

Panda et al. (1978) ao estudarem a cinética de sorção de P em solos indianos, sugeriram a equação $C = K.t^{-n}$, onde C é a concentração de equilíbrio (mg L^{-1}) medido no tempo t (minutos), a constante “k” denota a concentração do elemento nos primeiros instantes do contato com o solo (mg L^{-1}) e o índice “n” está relacionado com a taxa de sorção do elemento pelo solo ($\text{mg L}^{-1}\text{minuto}^{-1}$). Essa equação foi utilizada por Santos et al. (2011), que quantificaram a cinética e sorção de P em solos com diferentes graus de desenvolvimento pedognético do Estado da Paraíba e por Vieira (2017) para avaliar a a cinética de sorção de P em solos do semiárido, com ambos os trabalhos verificando boa capacidade preditiva e facilidade de ajuste do modelo com uso de regressão não-linear.

O semiárido brasileiro apresenta uma pedodiversidade muito grande. A maioria dos solos cultivados é pedogeneticamente pouco desenvolvido, com presença significativa de argilas de atividade alta, pH variando entre 6,5 e 8,0, saturação por bases elevada e boa disponibilidade de K (Oliveira e Holanda, 2017). Esses solos apresentam ampla variação de teores de silte, argila e minerais predominantes na fração argila, de modo que o K se apresenta em formas e disponibilidades variadas para as plantas (Medeiros et al., 2010), principalmente devido à presença de minerais 2:1, como ilita e vermiculita, que possuem sítios específicos de sorção do K (Billias e Barbayannis, 2019) que alteram a sua dinâmica.

Essa realidade é verificada nos solos da região semiárida situada entre os vales dos rios Jaguaribe, no Ceará, e Piranhas-Açu, no Rio Grande do Norte, onde há intensa atividade agrícola, sobretudo de culturas irrigadas destinadas à exportação, a exemplo do melão e da banana.

Em sistemas agrícolas que empregam elevado nível tecnológico, os altos rendimentos das culturas levam a uma grande extração e exportação de K do solo. Isso causa diminuição na disponibilidade desse nutriente nos solos, resultando na necessidade de reposição do K desses solos via fertilização. Porém, a eficiência da adubação potássica e a resposta das culturas à adubação com esse nutriente, é muito influenciada pela sorção de K no solo.

Diante desse quadro, o entendimento da dinâmica do K nesses solos torna-se fundamental para a otimização da avaliação da disponibilidade deste nutriente no solo e do manejo da adubação potássica. Apesar disso, poucas informações acerca da cinética de sorção de K em solos do semiárido brasileiro foram encontradas na literatura.

Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho avaliar a cinética de sorção de potássio em solos do semiárido e correlacioná-la com atributos do solo que refletem a disponibilidade de potássio.

MATERIAL E MÉTODOS

A cinética de sorção de potássio foi avaliada em amostras coletadas na camada superficial (0-30 cm) de seis solos representativos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Jaguaribe-CE e Piranhas/Açu-RN, sob vegetação nativa e sem histórico de aplicação de fertilizantes.

Esses solos foram formados a partir de diferentes materiais de origem, sendo quatro solos derivados de calcário: Cambissolo Háplico, coletado em Baraúna-RN (CX1; 05°05'42.2"S; 37°36'46.7"W), Cambissolo Háplico, coletado em Quixeré-CE (CX2; 05°05'07.7"S; 037°51'35.1"W), Chernossolo Rêndzico, coletado em Mossoró-RN (MD; 05°26'54.7"S; 037°11'19.9"W) e Vertissolo Háplico, coletado em Mossoró-RN (VX; 05°25'26.4"S; 037°12'26"W); um solo formado de sedimentos aluviais: Neossolo Flúvico, coletado em Carnaubais-RN (RY; 05°22'33.2"S; 036°50'42.2"W) e um solo derivado de sedimentos do grupo Barreiras: Argissolo Vermelho Amarelo, coletado em Mossoró-RN (PVA; 05°09'58.5"S; 037°11'57.6"W) (BRASIL, 1971; BRASIL, 1973).

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha para caracterização química e física, conforme Teixeira et al. (2017) (Tabela 1).

Para avaliar a cinética de sorção de K utilizou-se amostras dos seis solos, duas concentrações iniciais de K (50 e 200 mg L⁻¹ de K, na forma de KCl), dez tempos de equilíbrio (1, 5, 20, 40, 60, 120, 180, 600, 960 e 1440 minutos) e três repetições.

Em frascos erlenmeyer de 125 mL, foram colocados 2,5 g de cada solo e 25 mL de uma solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ contendo as concentrações iniciais de K em estudo (50 ou 200 mg L⁻¹), sendo agitados pelo tempo correspondente a cada tratamento. Ao final de cada tempo de equilíbrio, as suspensões obtidas foram filtradas e a concentração final de K na solução de equilíbrio foi quantificada por fotometria de chama. A quantidade de K sorvida ao solo foi estimada pela diferença entre o valor da concentração inicial de K na solução de equilíbrio e o valor da concentração de K que permaneceu após a agitação e filtragem.

O percentual de K sorvido em cada solo foi calculado pela equação 1:

$$\% \text{ K Sorvido} = \{[(CI-CF)]/CI\} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

CI = Concentração de equilíbrio inicial (mg L⁻¹);

CF = Concentração de equilíbrio final (mg L⁻¹).

Tabela 1 – Características físicas e químicas de seis solos do semiárido brasileiro⁽¹⁾

Característica	Solo ⁽²⁾					
	PVA	RY	CX1	CX2	MD	VX
Areia (g kg ⁻¹)	850	640	660	380	290	290
Silte (g kg ⁻¹)	20	220	70	220	160	320
Argila (g kg ⁻¹)	130	140	270	400	550	390
Densidade do solo (kg dm ³)	1,57	1,35	1,42	1,37	1,20	1,28
pH	4,1	6,5	6,6	6,7	7,6	8,0
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	7,5	6,2	9,4	11,0	14,4	7,0
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	4,2	60,7	4,5	4,8	3,1	1,6
K (mg dm ⁻³)	35,7	137,3	144,8	149,5	185,8	64,0
Na (mg dm ⁻³)	20,1	133,1	54,0	116,3	47,1	76,2
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,74	6,94	6,04	11,50	40,33	35,73
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,29	3,10	1,17	1,29	4,77	5,60
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
(H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	4,02	1,19	1,58	1,97	0,15	0,0
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,20	10,97	7,81	13,68	45,78	41,83
t (cmol _c dm ⁻³)	1,81	10,97	7,81	13,68	45,78	41,83
CTC (cmol _c dm ⁻³)	5,22	12,16	9,39	15,65	45,93	41,83
V (%)	23	90	83	87	100	100
Saturação de K (%) ⁽³⁾	1,7	2,9	3,9	2,4	1,0	0,4
PST (%)	2	5	3	3	0	1
Equivalente CaCO ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	1,59	8,22	4,23	9,49	27,53	254,56

⁽¹⁾Análises químicas e físicas realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). ⁽²⁾PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-RN); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN). ⁽³⁾Saturação de K = (K⁺/CTC)x100. ⁽⁴⁾ Dados extraídos de MEDEIROS et al. (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para cada solo e em cada concentração inicial de K na solução de equilíbrio, utilizando os dados de concentração final de K na solução de equilíbrio em função do tempo de agitação do K com o solo, foi ajustado, pela técnica de regressão não-linear, o modelo de regressão sugerido por Panda et al. (1978) para fósforo, expresso na equação 2:

$$C = k.t^{-n} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

C = concentração final de K na solução de equilíbrio (mg L^{-1});

t = tempo de agitação ou de equilíbrio do K com o solo (minuto);

“k” = concentração de K nos primeiros instantes de contato com o solo (mg L^{-1});

“n” = constante relacionada à taxa de sorção ($\text{mg L}^{-1} \text{ minuto}^{-1}$).

Os parâmetros da equação cinética foram correlacionados com características químicas e físicas dos solos relacionadas com a disponibilidade de K para as plantas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A concentração de K na solução de equilíbrio decresceu com o aumento do tempo de contato do K com o solo, independente do tipo de solo e da concentração inicial de K (Tabela 2). A magnitude dessa variação foi maior no MD e VX em comparação aos demais solos e de modo semelhante nas duas concentrações iniciais de K.

Para o PVA, a concentração de K na solução variou de 48,7 a 46,0 mg L^{-1} , de modo que o percentual de K sorvido variou de 2,6 a 7,9 %, quando se utilizou a menor concentração de K (50 mg L^{-1}), e de 16,6 a 13,9 mg L^{-1} para o MD, com o uso dessa mesma concentração, o que representa um percentual de K sorvido de 67,6 e 72 %, respectivamente (Tabela 2). Considerando a média dos solos, a percentagem de K sorvido variou de 32 a 39% (Tabela 2), para a concentração inicial de 50 mg L^{-1} .

Quando a concentração inicial foi de 200 mg L^{-1} a remoção de K da solução do solo pela fase sólida apresentou comportamento semelhante ao verificado para a menor concentração, com a concentração final de K variando de 193,8 a 178,4 mg L^{-1} no PVA, correspondendo a um percentual de remoção de K de 3,1 e 10,8%, e de 67,7 a 58,1 mg L^{-1} no MD (percentuais de K sorvido de 66,2 e 71,0 %) , com valores muito próximos aos verificados para a concentração inicial de 50 mg L^{-1} .

Tabela 2 – Concentração média final de K na solução de equilíbrio em função do tempo de agitação de duas soluções contendo K (50 e 200 mg L⁻¹), em seis amostras de solos do semiárido brasileiro

Solo ⁽¹⁾	Tempo de equilíbrio (minutos)									
	1	5	20	40	60	120	180	600	960	1440
-----mg L ⁻¹ -----										
Concentração inicial de K na solução de equilíbrio igual a 50 mg L ⁻¹										
PVA	48,7	48,5	47,9	47,9	49,4	48,1	47,2	46,0	46,6	46,2
RY	41,8	41,6	40,1	40,1	42,1	40,0	39,8	38,1	37,4	38,3
CX1	44,4	44,6	44,0	43,4	44,4	42,3	41,5	41,7	39,1	42,1
CX2	32,2	30,9	30,9	31,3	31,3	29,1	28,1	27,7	27,4	28,5
MD	15,7	16,1	15,7	15,7	16,2	14,9	14,9	13,9	14,4	13,9
VX	20,8	19,3	19,8	18,6	17,5	18,0	17,6	18,2	18,1	17,0
Média	33,9	33,5	33,1	32,8	33,5	32,1	31,5	30,9	30,5	31,0
KS⁽²⁾ (%)	32	33	34	34	33	36	37	38	39	38
Concentração inicial de K na solução de equilíbrio igual a 200 mg L ⁻¹										
PVA	193,8	182,8	184,2	182,8	183,5	184,2	185,0	189,4	178,4	180,6
RY	158,5	154,1	151,9	148,3	150,5	149,7	152,7	156,3	146,8	140,2
CX1	154,1	154,9	154,1	150,5	152,7	150,5	151,2	155,6	147,5	149,7
CX2	141,7	135,8	133,6	132,1	133,6	135,1	131,4	138,7	129,9	128,8
MD	67,7	64,2	61,9	62,7	62,7	62,3	62,7	63,5	61,1	58,1
VX	79,6	74,2	75,0	70,8	73,1	70,8	72,3	72,7	70,0	67,3
Média	132,6	127,7	126,8	124,5	126,0	125,4	125,9	129,4	122,3	120,8
KS⁽²⁾ (%)	34	36	37	38	37	37	37	35	39	40

⁽¹⁾PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo (Mossoró-RN). ⁽²⁾Porcentagem de potássio sorvido para cada tempo de agitação do K com o solo (média de seis solos).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os dados mostram que para os solos PVA, MD e VX não houve efeito da concentração inicial sobre o percentual de K sorvido, porém para os solos RY e CX1 a elevação da concentração inicial de K resultou em um aumento na quantidade de K sorvida, enquanto que no CX2 a resposta foi inversa, com redução na sorção de K.

As diferenças nas quantidade de K sorvidas estão relacionadas à variação nos atributos químicos e físicos dos solos (Tabela 1) e, provavelmente, na composição mineralógica dos

mesmos. A CTC dos solos MD e VX é de 45,93 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 41,83 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ respectivamente, o que representa, aproximadamente, nove e oito vezes a CTC do PVA (5,22 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), resultando em elevada quantidade de sítios de sorção de K. Esses dois solos, pelas suas condições de pedogênese, são os que provavelmente apresentam maior quantidade de minerais 2:1.

Com os dados da tabela 2, para cada solo e em cada concentração inicial de K na solução de equilíbrio, foi ajustado o modelo sugerido por Panda et al. (1978), por meio de regressão não-linear, para descrever a variação da concentração de K na solução em função do tempo de contato do K com o solo (Figuras 2 e 3).

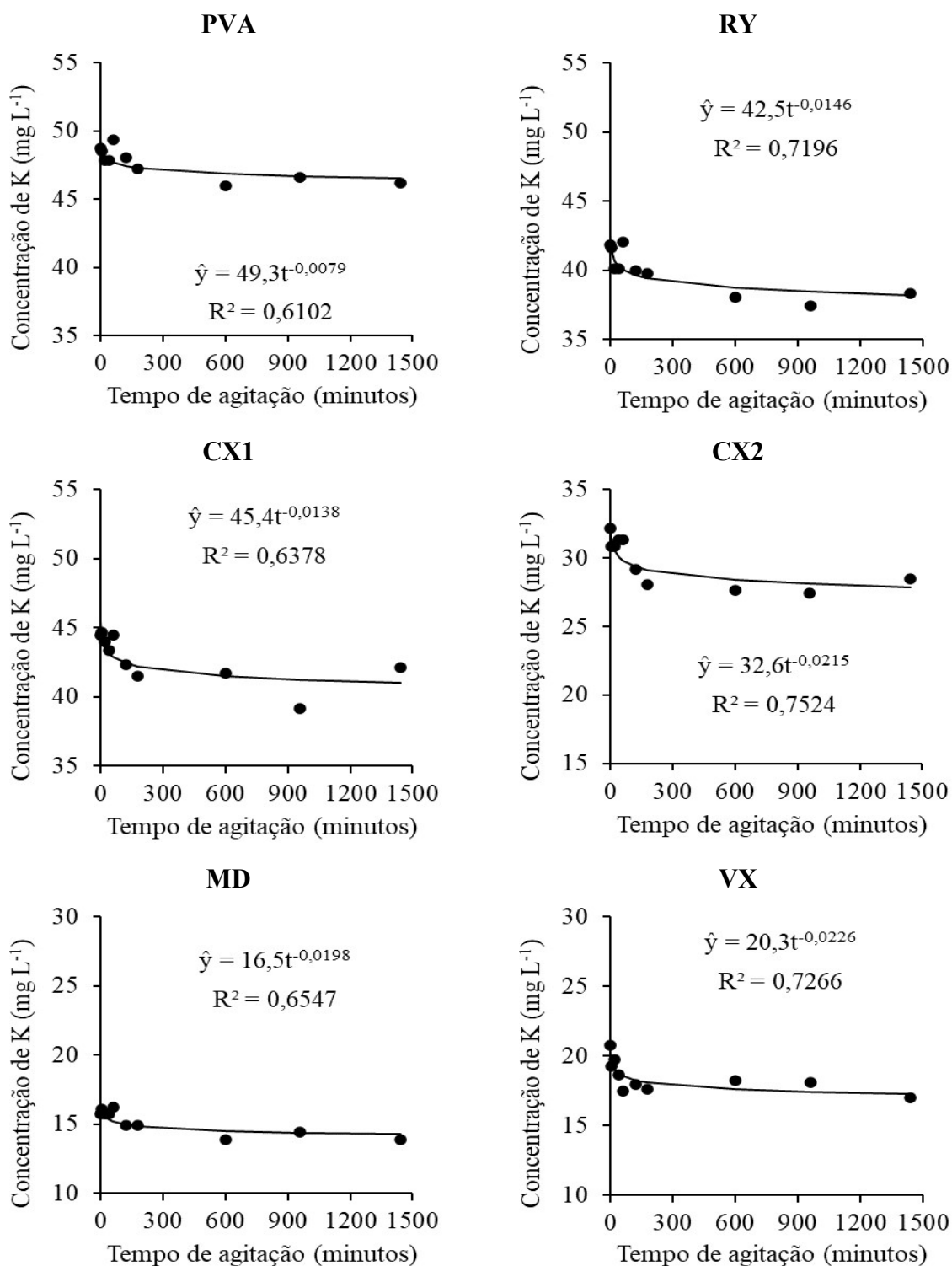
O ajuste do modelo foi melhor para os dados da concentração inicial de 50 mg L^{-1} , com valores de R^2 variando de 0,6102 no PVA a 0,7522 no MD (Figura 2). Quando a concentração inicial de K foi de 200 mg L^{-1} (Figura 3), os coeficientes de determinação foram inferiores a 0,5000 nos solos com menor capacidade de sorção (PVA, RY, CX1 e CX2), mostrando que essa concentração é muito elevada para avaliar a cinética de sorção de K nesses solos. Para os solos MD e VX houve similaridade nos valores de R^2 para as duas concentrações, em razão da elevada quantidade de sítios de sorção de K que esses solos possuem, evidenciada pela alta CTC (Tabela 1).

As curvas traçadas com os dados estimados pelo modelo (Figuras 1 e 2), em ambas as concentrações, mostram uma sorção de K muito rápida nos primeiros instantes de contato do elemento com o solo (tempo inferior a um minuto), com redução abrupta da concentração de equilíbrio, seguida por uma fase rápida que segue até 60 minutos de contato do K com os solos. Após esse tempo, a concentração de K na solução de equilíbrio diminui lentamente ou tende a permanecer estável até 24 horas.

De acordo com Jardine e Sparks (1984), a cinética de sorção de K ocorre tipicamente em duas fases: uma rápida e uma lenta, sendo a fase rápida relacionada ao processo de adsorção do elemento às cargas elétricas do solo e, portanto, dependente da CTC e das relações entre os cátions que ocupam o complexo de troca, enquanto que a fase lenta se deve ao processo de difusão do elemento nas entrecamadas dos minerais 2:1.

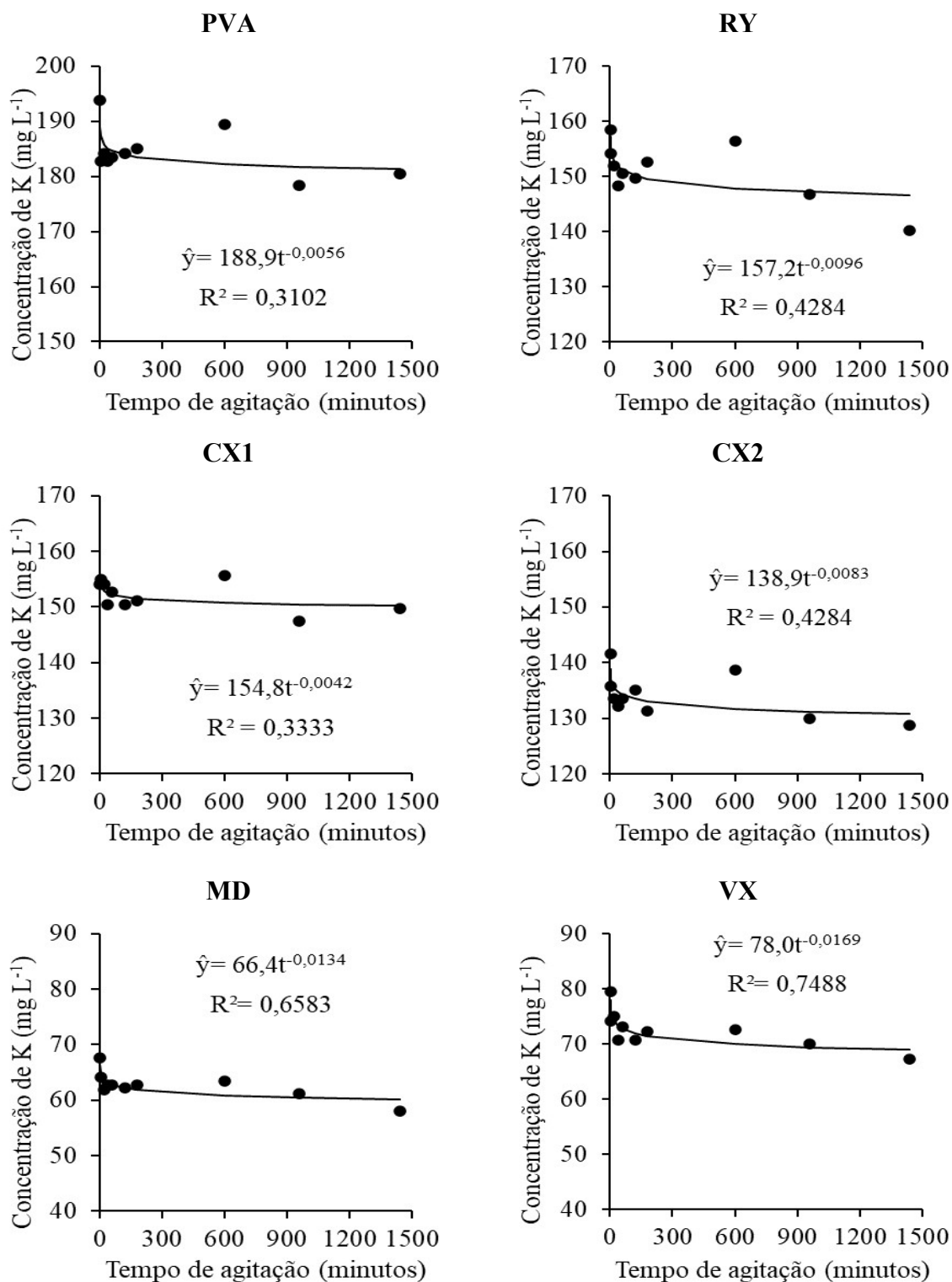
Sparks et al. (1980) estudaram a cinética da sorção de potássio em dois solos dos condados de Greenville e Nottoway, na Virgínia-EUA e observaram que o equilíbrio foi atingido mais rapidamente quando menores concentrações iniciais de K (cinco e 25 mg L^{-1}) foram usadas, porém, salientaram que pode haver variação nesse comportamento em virtude da composição mineralógica do solo. Essa hipótese é reforçada pelos achados de Jardine e Sparks (1984), que verificaram que a taxa de sorção de K é mais lenta em vermiculita em comparação com montmorilonita e caulinita.

Figura 1 - Variação da concentração de potássio na solução de equilíbrio, em função do tempo de contato do potássio com amostras de seis solos do semiárido brasileiro, para a concentração inicial de potássio igual a 50 mg L⁻¹. PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 2 - Variação da concentração de potássio na solução de equilíbrio, em função do tempo de contato do potássio com amostras de seis solos do semiárido brasileiro, para a concentração inicial de potássio igual a 200 mg L⁻¹. PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A constante “k” do modelo cinético variou de 49,3 a 16,5 mg L⁻¹ nos solos PVA e MD respectivamente, quando utilizada a concentração inicial de 50 mg L⁻¹ (Tabela 3). Essa constante reflete a concentração de K logo nos primeiros instantes de contato do elemento com o solo. Assim, fica claro que o solo PVA apresenta uma sorção inicial mais lenta, tendo em vista que a remoção de K da solução foi pequena, enquanto que para os solos MD e VX, a redução da concentração do elemento foi rápida e intensa (Tabelas 2 e 3), provavelmente em razão da CTC que esses solos apresentam (Tabela 1), o que diminui a atração do K pelo solo.

Tabela 3 – Valores estimados das constantes do modelo de regressão não linear ($C = k.t^{-n}$) que descreve a sorção de K nos solos em relação ao tempo de contato, nas duas concentrações iniciais de K (50 e 200 mg L⁻¹) em seis solos do semiárido brasileiro

Solo ⁽¹⁾	Concentração inicial = 50 mg L ⁻¹		Concentração inicial = 200 mg L ⁻¹	
	k	n	k	n
	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹ min ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹ min ⁻¹
PVA	49,3	0,0079	188,9	0,0056
RY	42,5	0,0146	157,2	0,0096
CX1	45,4	0,0138	154,8	0,0042
CX2	32,6	0,0215	138,9	0,0083
MD	16,5	0,0198	66,4	0,0134
VX	20,3	0,0226	78,0	0,0169

⁽¹⁾PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo (Mossoró-RN).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Comportamento similar foi verificado quando se utilizou a concentração inicial de K igual a 200 mg L⁻¹ (Tabela 3), com o maior valor estimado para a constante “k” no PVA (188,9 mg L⁻¹) e o menor para o MD (66,4 mg L⁻¹).

Com relação a constante “n”, verifica-se valores variando de 0,0079 a 0,0226 para o PVA e VX, respectivamente, quando utilizada a concentração inicial de 50 mg L⁻¹. Quando a concentração inicial de K foi elevada para 200 mg L⁻¹ houve redução no valor de “n” (com variação de 0,0056 no PVA a 0,0169 no VX), evidenciando que a taxa de sorção é reduzida em maiores concentrações iniciais de K. Segundo Ioannou et al. (1994), quando concentrações mais elevadas de potássio são utilizadas há redução na cinética de sorção do elemento, o que

pode ser explicado pelo aumento do potencial elétrico positivo na superfície dos colóides devido à adsorção de potássio e aumento da interação entre moléculas de adsorvatos.

Do ponto de vista prático, esses dados indicam que após a aplicação de K no solo via adubação, esses solos rapidamente conseguem retirar parte do K da solução, evitando sua perda por lixiviação ou consumo de luxo por parte das culturas. Mesmo no caso do PVA, onde o percentual de K sorvido foi muito baixo, esse resultado é importante, pois sugere que quando a aplicação de K se dá em pequenas doses, como em uma fertirrigação, as perdas do elemento por lixiviação serão pequenas, tendo em vista a rápida resposta do solo em reduzir a concentração do elemento na solução.

Os valores de “k” do modelo cinético, para ambas as concentrações iniciais de K, se correlacionaram negativamente com a capacidade máxima de sorção de K, com o valor k da isoterma de Freundlich, com o teor de Argila e com a CTC do solo, porém, não houve correlação significativa com a MO (Tabela 4). Foi verificada correlação significativa entre o coeficiente “k” e o teor de silte, ainda que com menor coeficiente de correlação e menor significância, indicando que essa fração também pode contribuir para a sorção ou fixação de K, possivelmente devido à presença de minerais micáceos que podem ocorrer no tamanho do silte em solos do semiárido (Medeiros et al., 2014).

Tabela 4 – Coeficientes de correlação entre os parâmetros da equação de cinética de sorção de potássio e características do solo relacionadas ao fator capacidade de potássio de seis solos do semiárido brasileiro, para as concentrações iniciais de potássio iguais a 50 e 200 mg L⁻¹

	Concentração inicial = 50 mg L ⁻¹		Concentração inicial = 200 mg L ⁻¹	
	k ⁽¹⁾	n ⁽¹⁾	k ⁽¹⁾	n ⁽¹⁾
CMSK ⁽²⁾	-0,9115*	0,7475°	-0,9704**	0,8049°
Kf ⁽³⁾	-0,9656**	0,7066 ^{ns}	-0,9763**	0,8696*
Argila	-0,8998*	0,8031°	-0,8791*	0,5885 ^{ns}
Silte	-0,7987°	0,8928*	-0,7551°	0,7457°
M.O.	-0,5387 ^{ns}	0,3769 ^{ns}	-0,5097 ^{ns}	0,0962 ^{ns}
CTC	-0,9719**	0,7411°	-0,9852**	0,9021*

⁽¹⁾Constantes do modelo $C = k \cdot t^{-n}$ ajustado para cada solo, em que C é a concentração final de K na solução de equilíbrio (mg L⁻¹), t = tempo de equilíbrio do K com o solo (minuto); ⁽²⁾CMSK = Capacidade máxima de sorção de K; ⁽³⁾Constante k da isoterma de Freundlich. ^{ns}, °, *, **, = não significativo, significativos a 10, 5 e 1%, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O coeficiente “n” da equação cinética apresentou correlação significativa com a CMSK, com os teores de argila e silte e com a CTC quando utilizada a menor concentração (50 mg L^{-1}), não sendo verificada correlação significativa com o valor k da isoterma de Freundlich (Tabela 4). Quanto utilizada a concentração de 200 mg L^{-1} , o valor “n” apresentou correlação significativa com a CMSK, valor k de Freundlich, teor de silte e com a CTC do solo, não havendo correlação significativa com o teor de argila. Para as ambas as concentrações esse coeficiente não se correlacionou com o teor de matéria orgânica do solo (Tabela 4).

Essas correlações reforçam que as cargas elétricas do solo rapidamente retiram K da solução do solo, reduzindo assim a concentração do elemento logo nos primeiros instantes de contato com o solo. Isso fica mais claro quando levado em consideração as correlações dos coeficientes com a CTC do solo.

Outro ponto importante que cabe destacar é que o coeficiente “k” parece ser um bom indicador da sorção de K pelos solos e pode ser utilizado na separação e agrupamento dos solos quanto à capacidade sorbiva de K. Estratégia semelhante já é utilizada para fósforo, através do fósforo remanescente (Alvarez. V. et al., 2000), medida que se correlaciona bem com o fator capacidade de P.

CONCLUSÕES

A sorção de potássio foi muito grande nos primeiros instantes de contato do K com os solos, decresceu até aproximadamente 60 minutos e tendeu a se manter estável até 24 h;

A quantidade de potássio sorvido no solo e a taxa de sorção foram maiores no Chernossolo Rêndzico e no Vertissolo Háplico;

A sorção de K é diretamente relacionada com a capacidade máxima de sorção de K e a CTC do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, W.; HUSSAIN, M.; ALI, M.; MUBUSHAR, M.; TABASSAM, M.A.Z.; MOHSIN, M.; NASIR, H.A. Evaluation of Freundlich and Langmuir Isotherm for Potassium Adsorption Phenomena. **Int. J. Agric. Crop Sci.**; v. 6, p.1048-1054, 2013.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo**, SBCS, v. 25, p. 27-32, 2000.

AURANGZEI, M.; HUSSAIN, H.; REHIM, A.; BASHIR, M.A.; RAZA, M.A. Extraction methods and adsorption kinetics of potassium in calcareous soils of Multan. **Pakistan Journal of Agriculture, Agricultural Engineering and Veterinary Sciences**. v.37, v.2, p.87-96, 2021. DOI:<https://doi.org/10.47432/2021.37.2.3>

BILIAS, F.; BARBAYIANNIS, N. Potassium availability: an approach using thermodynamic parameters derived from quantity-intensity relationships. **Geoderma**, v. 338, p. 355–364, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.026>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA–SUDENE/DRN. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife, 1971, 531p. (Boletim Técnico, 21).

IOANNOU, A.; DIMIRKOU, A.; MITSIOS, J.; DOULA, M. Kinetics of potassium adsorption by Alfisols of Greece. **Comm. Soil sci. plant anal.** v. 25, n. 9-10, p. 1401-1415, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103629409369123>.

JARDINE, P.M. SPARKS, D.L. Potassium-Calcium Exchange in a Multireactive Soil System: I. Kinetics. **Soil Sci. Soc. AM. J.**, v. 48, p. 39-45, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010007x>

LALITHA M., DHAKSHINAMOORTHY M. Forms of soil potassium-a review. **Afr. J. Agric. Res.** v.35, n.1, p. 64-68. 2013. DOI: 10.5958/j.0976-0741.35.1.008.

MALAVOLTA, E. **Funções dos macro e micronutrientes**. In: Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Ceres, 2006. cap.4, p. 126-402.

MEDEIROS, J. S.; OLIVEIRA, F.H.T.; ARRUDA, J.A.; VIEIRA, M.S.; FONTES, M.P.F. Eficiência de extratores de potássio disponível em solos do Estado da Paraíba com graus de desenvolvimento pedogenético diferentes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 183-194, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100019>.

MEDEIROS, J. S.; OLIVEIRA, F.H.T.; SANTOS, H.C.; ARRUDA, J.A.; VIEIRA, M.S. Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2, p. 417-426, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000200025>.

MEDEIROS, M.D.O.N.; OLIVEIRA, F.H.T.; PRESTON, W. PAIVA, M.R.F.C.; GÓIS, H.M.M.N. Comparison of methods for extracting available phosphorus from soils of the semi-arid. **Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, p. e20207633, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210062>

MOUHAMA, D.R.; ALSAEDE, A; IQBAL, M. Behavior of Potassium in Soil: A mini review. **Chemistry International**, v.2, n.1, p. 58-69, 2016.

OLIVEIRA, F.H.T.; HOLANDA, J.S. Fertilidade dos Solos do Nordeste e do Rio Grande do Norte. **Boletim Informativo do NRNE/SBCS**, vol. 1, n. 2, p.49-51, 2017. Disponível em: https://www.sbc-nrne.org.br/anexos/Boletim_Informativo_NRNE_SBCS_v.1_n__2__2017_.pdf. Acesso em: 14 de jun. 2021.

PANDA, D.; MOHAPATRA, J.S.; MISRA, C.; PANDA, N. Movement and retention of phosphate in Lateritic soil cores. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 26 p. 25-32, 1978.

REZAEI, M.; MOVAHEDI NAEINI, S.R. Effects of ammonium and iranian natural zeolite on potassium adsorption and desorption kinetics in the loess soil. **International Journal of Soil Science**. v.4, n. 2, p.3335-3342, 2009. DOI: 10.3923/ijss.2009.27.45.

SANTOS, H.C.; OLIVEIRA, F.H.T.; SALCEDO, I.H.; SOUZA, A.P.; SILVA, V.D.M. Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1301-1310, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400024>.

SPARKS, D. L. Chemistry of soil potassium in atlantic coastal plain soils. **Communication in soil science and Plant Analysis**, v. 11 n. 5, p. 435-449, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628009367051>

SPARKS, D.L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbok of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.38-52.

SPARKS, D.L.; HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1985. p.201-276.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. eds. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 3 ed. revista e ampliada, Brasília: Embrapa Solos, 2017. 573p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 10 de fev. de 2022.

VIEIRA, M.S. **Sorção de fósforo em solos do semiárido**. 2017. 37 p. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água)- Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/6c80f393-d8fb-4cad-8ad5-391f557c1180/content>. Acesso em: 20 de jul. de 2022.

YAWSON, D.O.; KWAKYE, P.K.; ARMAH, F.A.; FRIMPONG, K.A. The dynamics of potassium (K) in representative soil series of Ghana. **ARPN J. Agric. Biol. Sci.** v.6, n. 1, p. 1990-6145, 2011. Disponível em: https://ir.ucc.edu.gh/xmlui/bitstream/handle/123456789/5102/The_Dynamics_of_Potassium_K_in_Represent.pdf?sequence=1. Acesso em: 21 de abr. 2022

CAPÍTULO 3

EFICIÊNCIA DE EXTRATORES DE POTÁSSIO DISPONÍVEL EM SOLOS DO SEMIÁRIDO COM ARGILAS 2:1

RESUMO

A disponibilidade de potássio (K) em solos do semiárido brasileiro varia bastante entre solos e sua avaliação é complexa, sobretudo nos solos com maior quantidade de minerais do tipo 2:1 que fixam K. Neste trabalho objetivou-se avaliar a eficiência dos extratores acetato de amônio, cloreto de amônio, Mehlich-1 e resina de troca iônica mista para quantificação do K disponível para plantas de milho em solos do semiárido brasileiro. Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados, com seis solos (um Argissolo Vermelho Amarelo, um Neossolo Flúvico, dois Cambissolos Háplicos, um Chernossolo Rêndzico e um Vertissolo Háplico) e cinco doses de K, com três repetições. Cada unidade experimental consistiu em um vaso plástico contendo 3,0 dm³ de solo, onde foram cultivadas duas plantas de milho durante 35 dias em casa de vegetação. Para cada extrator, o K disponível foi correlacionado com o K acumulado na parte aérea das plantas de milho. Todos os extratores avaliados mostraram boa correlação com o K acumulado pela planta. A resina de troca iônica apresentou menor capacidade de extração de K nos solos mais argilosos, com maior CTC e maior quantidade de minerais 2:1, não sendo recomendada para solos com essas características. O extrator Mehlich-1 sofreu desgaste na sua capacidade de extração em solos alcalinos com teores elevados de CaCO₃ equivalente não devendo ser utilizado para esse tipo de solo. O extrator acetato de amônio extraiu as maiores quantidades de K dos solos e não apresentou limitações em nenhum solo, sendo o mais recomendado para a avaliação da disponibilidade de potássio em solos do semiárido.

Palavras-chave: Acetato de Amônio. Mehlich-1. Resina. Cloreto de Amônio. Análise de Solo.

EFFICIENCY OF AVAILABLE POTASSIUM EXTRACTORS IN SEMIARID SOILS WITH 2:1 CLAYS

ABSTRACT

The availability of potassium (K) in Brazilian semi-arid soils varies greatly between soils and its evaluation is complex, especially in soils with a greater amount of 2:1 minerals that fix K. this study aimed to evaluate the efficiency of ammonium acetate, ammonium chloride, Mehlich-1 and mixed ion exchange resin extractors for quantifying K available for maize plants in Brazilian semi-arid soils. The treatments were distributed in randomized blocks, with six soils (one Red-Yellow Argisol, a Fluvic Neosol, two Haplic Cambisol, a Rendzic Chernosol and a Haplic Vertisol) and five doses of K, with three replicates. Each experimental unit consisted of a plastic pot containing 3.0 dm³ of soil, in which two maize plants were grown for 35 days in a greenhouse. For each extractant, the available K was correlated with the accumulated K in the aerial part of the maize plants. All the extractants evaluated showed a good correlation with the K accumulated by the plant. The ion exchange resin showed lower K extraction capacity in clayier soils, with higher CEC and a greater quantity of 2:1 minerals, and is not recommended for soils with these characteristics. The Mehlich-1 extractant suffered a drop in its extraction capacity in alkaline soils with high CaCO₃ contents, and should not be used for this type of soil. The ammonium acetate extractant extracted the highest amounts of K from the soils and did not present limitations in any soil, making it the most recommended for assessing potassium availability in semi-arid soils.

Keywords: Ammonium Acetate. Mehlich-1. Resin. Ammonium Chloride. Soil Analysis

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de potássio (K) é controlada pelo predomínio das formas do elemento presentes no solo (solúvel, trocável, não trocável e estrutural), que se encontram em equilíbrio dinâmico, e são influenciadas por diversos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (Zörb; Senbayram; Peiter, 2014).

Uma grande diversidade de solos é encontrada na região semiárida brasileira, que variam de pouco a muito desenvolvidos (Medeiros, et al., 2021), com predomínio daqueles pouco desenvolvidos, levemente ácidos a alcalinos e com presença significativa de minerais 2:1 pouco intemperizados (Oliveira e Holanda, 2017) que, além de apresentar elevada CTC, possuem sítios específicos de sorção de K, de modo que a retenção do elemento pelo solo pode ser grande. Essas características imprimem a esses solos poder tampão de potássio elevado (PTK) (Santos et al., 2013).

Em solos mais desenvolvidos, o K se encontra, principalmente, na solução do solo (K solúvel) e ligado às cargas elétricas negativas das superfícies dos coloides minerais e orgânicos (K trocável). No entanto, nos solos pouco desenvolvidos pode haver a presença de minerais 2:1 que possuem sítios específicos de sorção de K (Bilias e Barbayiannis, 2019), fixando parte do K do solo nas entrecamadas desses minerais (K não trocável), conferindo-lhes forte tamponamento de K (Santos et al., 2013). Como os vários métodos de extração de K disponível do solo têm preferência na retirada de diferentes frações de K do solo, é difícil escolher um extrator de K disponível que seja adequado para todos os solos de uma região de pedodiversidade elevada.

Diversos extratores químicos têm sido empregados no mundo para avaliar a disponibilidade deste nutriente para as plantas, sendo o acetato de amônio 1 mol L⁻¹ o método considerado padrão (Helmke e Sparks, 1996, Breker et al., 2019). No Brasil, o K disponível do solo tem sido avaliado com a solução Mehlich-1 (Teixeira et al., 2017) e pela resina de troca iônica mista (Raij e Quaggio, 2001). A solução Mehlich-3 também tem sido utilizada para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Silva et al. 2016). Recentemente, a solução de cloreto de amônio 1 mol L⁻¹ tem sido avaliada como extrator do K disponível, mas estudos com essa finalidade ainda são escassos (Amorim, Rogeri, Gianello, 2021).

O acetato de amônio e o cloreto de amônio possuem como mecanismo de ação a troca iônica dos ions K⁺ por NH₄⁺, conseguindo extrair as frações solúvel, trocável da superfície dos minerais e de alguns sítios de adsorção específicos para K nas entrecamadas de minerais 2:1, enquanto a ação do extrator Mehlich-1 se dá por troca iônica do ions de K⁺ por H⁺, que

acontece apenas em sítios de adsorção presentes nas superfícies e bordas dos minerais e da matéria orgânica dos solos, e por dissolução. Já a resina de troca iônica apresenta como mecanismo de ação a formação de gradiente de concentração entre a fase sólida e a solução, causada pela retenção dos íons pelas cargas da resina, simulando a ação das raízes das plantas na absorção do K (Bell, Thompson e Moody, 2021).

Apesar da grande diversidade de solos encontrada no semiárido brasileiro, poucos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar extratores de K disponível nos solos dessa região, a exemplo de Boeira et al. (2004).

Medeiros et al. (2010), ao avaliarem os extratores Mehlich-1, resina de troca iônica Mista e Mehlich-3 em solos do Estado da Paraíba, com diferentes graus de desenvolvimento pedogenético, verificaram que todos esses extratores foram eficientes para avaliação da disponibilidade de K nos solos muito desenvolvidos. Porém, nos solos menos desenvolvidos, coletados na região semiárida, a resina de troca iônica mista extraiu teores de K menores do que o Mehlich-1 e o Mehlich-3, especialmente nos solos mais argilosos e com maior ocorrência de minerais 2:1.

Ao estudarem a eficiência de extratores de fósforo disponível em solos do semiárido, Medeiros et al. (2021) verificaram que para solos pouco desenvolvidos e ricos em CaCO_3 equivalente, as soluções extratoras ácidas (Mehlich-1 e Mehlich-3) podem perder sua capacidade de extração, em razão da reação de íons H^+ com o CaCO_3 . Esse comportamento dos extratores também traz implicações sobre a extração de potássio, em razão da menor quantidade de íons H^+ para realizar reações de troca com íons de K na superfície dos colóides, o que resultaria em subestimação da disponibilidade de K para as plantas e na maior probabilidade de erros analíticos e de interpretação dos resultados.

Assim, fica claro que os métodos empregados para quantificação do K disponível nos laboratórios de rotina no país (Mehlich-1 e resina) podem não ser adequados para os solos do semiárido, sobretudo naqueles com maiores quantidades de minerais do tipo 2:1 e, ou, de CaCO_3 equivalente, havendo necessidade de estudos que avaliem métodos que se mostrem mais eficientes para essa finalidade e apresentem praticidade suficiente que possibilitem o uso deles em laboratórios de rotina.

Ante o exposto, com este trabalho objetivou-se avaliar a eficiência dos extratores acetato de amônio, cloreto de amônio, Mehlich-1 e resina de troca iônica mista para quantificação do K disponível para plantas de milho em solos do semiárido brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras na camada superficial (0-30 cm) de seis solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Jaguaribe-CE e Piranhas/Açu-RN, sob vegetação nativa e sem histórico de aplicação de fertilizantes.

Esses solos foram formados a partir de diferentes materiais de origem, sendo quatro solos derivados de calcário: Cambissolo Háplico, coletado em Baraúna-RN (CX1; 05°05'42.2"S; 37°36'46.7"W); Cambissolo Háplico, coletado em Quixeré-CE (CX2; 05°05'07.7"S; 037°51'35.1"W); Chernossolo Rêndzico, coletado em Mossoró-RN (MD; 05°26'54.7"S; 037°11'19.9"W) e Vertissolo Háplico, coletado em Mossoró-RN (VX; 05°25'26.4"S; 037°12'26"W); um solo formado de sedimentos aluviais: Neossolo Flúvico, coletado em Carnaubais-RN (RY; 05°22'33.2"S; 036°50'42.2"W); e um solo derivado de sedimentos do grupo Barreiras: Argissolo Vermelho Amarelo, coletado em Mossoró-RN (PVA; 05°09'58.5"S; 037°11'57.6"W) (BRASIL, 1971; BRASIL, 1973).

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 4 mm de abertura de malha. Uma subamostra foi retirada e passada por peneira de 2 mm de abertura de malha para caracterização química e física, conforme Teixeira et al. (2017), já o potássio remanescente (K-rem) foi quantificado com a agitação, por cinco minutos, de 50 mL de solução de CaCl_2 10 mmol L^{-1} contendo 75 mg L^{-1} de K e 5 g de solo, correspondendo à concentração de K que permaneceu na solução após o equilíbrio (Santos, 2022) (Tabela 1).

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), seguindo o delineamento em blocos casualizados, com três repetições, sendo aplicadas cinco doses de K (0, 50, 100, 200 e 300 mg dm^3) em seis solos (PVA, RY, CX1, CX2, MD e VX). As unidades experimentais foram constituídas de vasos plásticos sem dreno contendo 3,0 dm^3 de solo, onde foram cultivadas duas plantas de milho híbrido BRS 2022.

A necessidade de calagem dos solos foi calculada pelo método da saturação por bases (Raij et al., 1997) e pelo método da neutralização do Al^{3+} e elevação dos teores de Ca^{2+} e de Mg^{2+} (Ribeiro et al., 1999), sendo utilizada a média dos dois métodos. Apenas o solo PVA precisou receber calagem, sendo o corretivo utilizado composto por uma mistura de CaCO_3 (p.a.) e MgCO_3 (p.a.) com relação molar de 4:1 e aplicado em 100 % do volume de solo do vaso.

As doses de K foram aplicadas em um volume de 3,3 dm^3 de solo, na forma de KCl (p.a.), via solução. O KCl foi diluído em água deionizada em quantidade correspondente a 50% da porosidade total dos solos. Em seguida, as amostras de solo foram levadas ao laboratório, onde permaneceram incubadas, em sacos plásticos escuros com pequena abertura para permitir

Tabela 1 – Características físicas e químicas de seis solos do semiárido brasileiro⁽¹⁾

Característica	Solo ⁽²⁾					
	PVA	RY	CX1	CX2	MD	VX
Areia (g kg ⁻¹)	850	640	660	380	290	290
Silte (g kg ⁻¹)	20	220	70	220	160	320
Argila (g kg ⁻¹)	130	140	270	400	550	390
Densidade do solo (kg dm ³)	1,57	1,35	1,42	1,37	1,20	1,28
K-rem (mg L ⁻¹) ⁽³⁾	73,4	58,0	61,3	43,2	21,1	25,7
CMSK (mg g ⁻¹) ⁽⁴⁾	5,45	7,30	9,90	8,55	15,27	15,46
pH	4,1	6,5	6,6	6,7	7,6	8,0
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	7,5	6,2	9,4	11,0	14,4	7,0
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	4,2	60,7	4,5	4,8	3,1	1,6
K (mg dm ⁻³)	35,7	137,3	144,8	149,5	185,8	64,0
Na (mg dm ⁻³)	20,1	133,1	54,0	116,3	47,1	76,2
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,74	6,94	6,04	11,50	40,33	35,73
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,29	3,10	1,17	1,29	4,77	5,60
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	4,02	1,19	1,58	1,97	0,15	0,00
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,20	10,97	7,81	13,68	45,78	41,83
t (cmol _c dm ⁻³)	1,81	10,97	7,81	13,68	45,78	41,83
CTC (cmol _c dm ⁻³)	5,22	12,16	9,39	15,65	45,93	41,83
V (%)	23	90	83	87	100	100
Equivalente CaCO ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	1,59	8,22	4,23	9,49	27,53	254,56
pH inicial de extração com Melichh-1 ⁽⁶⁾	1,15	1,32	1,25	1,34	1,55	5,72
pH final de extração com Melichh-1 ⁽⁶⁾	1,24	1,34	1,33	1,46	2,08	6,51

⁽¹⁾Análises físicas e químicas realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). ⁽²⁾PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN). ⁽³⁾CMSK = capacidade máxima de sorção de K estimada pela isoterma de Langmuir. ⁽⁴⁾K-rem = potássio remanescente. Dados extraídos de SANTOS (2022). ⁽⁵⁾Dados extraídos de MEDEIROS et al. (2021). ⁽⁶⁾pH inicial e final da suspensão solo:solução para a extração realizada com Mehlich-1. Dados extraídos de MEDEIROS et al. (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

trocas gasosas, por 30 dias. Semanalmente as amostras foram pesadas e, quando necessária, a quantidade de água evaporada foi repostada pela adição de água deionizada.

Após o período de incubação, todas as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em peneira de 4 mm de malha e, em seguida, transferidas para os vasos. Antes da semeadura do milho, foi coletada uma amostra de $0,3 \text{ dm}^3$ do solo de cada vaso, para análise dos teores de K extraídos do solo pelos extratores acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0 (Helmek; SPARKS 1996), cloreto de amônio 1 mol L^{-1} (Boeira et al., 2004), Mehlich-1 (Teixeira et al., 2017) e resina de troca iônica mista (Raij et al., 2001). O procedimento de extração para os três primeiros extratores foi realizado com relação solo: solução (m/v) de 1:10 e tempo de agitação de 5 minutos seguido por decantação por 16 horas, conforme procedimentos utilizados nos laboratórios de rotina.

Um dia antes do plantio todas as amostras dos solos dos vasos foram adubadas com solução nutritiva. As doses e as fontes dos nutrientes, com exceção do K, foram aplicadas de acordo com Medeiros et al. (2021): 50 mg dm^{-3} de N ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$); 200 mg dm^{-3} de P ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ e $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$); 4 mg dm^{-3} de Mn ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$); 4 mg dm^{-3} de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$); $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de B (H_3BO_3); $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mo ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e 5 mg dm^{-3} Fe ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dissolvido em solução de EDTA).

Em cada vaso foram semeadas cinco sementes de milho. Cinco dias após a emergência foi feito um desbaste, deixando-se duas plantas por vaso. Durante o cultivo das plantas, foram realizadas adubações de cobertura que corresponderam: 50 mg dm^{-3} de N e 57 mg dm^{-3} de S ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) na primeira semana; 50 mg dm^{-3} de N ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e ureia) e 23 mg dm^{-3} de S ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) na segunda semana, e 50 mg dm^{-3} de N (ureia) na terceira semana. Os vasos foram pesados diariamente e água deionizada foi adicionada aos solos para manter a umidade do solo correspondente a 50% da porosidade total de cada solo.

Após 35 dias de cultivo, a parte aérea das plantas de milho foi cortada a um centímetro acima do nível do solo do vaso. A parte aérea das plantas foi armazenada em sacos de papel perfurados para facilitar a secagem, a qual inicialmente foi feita sobre a bancada no laboratório, por um dia, e depois em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até massa constante.

Nas amostras secas, foi quantificada a massa da matéria seca da parte aérea das plantas. Na sequência, as amostras foram moídas e peneiradas ($< 1,7 \text{ mm}$) em moinho do tipo Willey e armazenados em recipientes plásticos. De cada amostra, foi transferido $0,5 \text{ g}$ para tubo de teflon e depois digerido com HNO_3 65% (p.a.) em sistema de digestão úmida em forno micro-ondas (Silva, 2009). Após a digestão, os extratos foram filtrados e a concentração de K foi quantificada por fotometria de chama, para quantificação do teor de K na parte aérea das plantas de milho. Com

base na massa da matéria seca e no teor de K na planta, calculou-se o conteúdo de K na parte aérea das plantas de cada vaso. O teor de K extraído pelas plantas foi obtido dividindo-se o conteúdo de K por vaso (extraído por duas plantas) pelo volume de solo do vaso (3 dm^3).

Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância e de regressão, para cada solo isoladamente. Foram ajustadas equações de regressão linear simples para os teores de K analisado pelos extratores e pela planta em função das doses de K aplicadas, para obtenção das taxas de recuperação de K pelos extratores. Uma análise de correlação linear simples foi feita entre essas taxas de recuperação de K pelos extratores e as características do solo relacionadas com a disponibilidade de K, a nível de significância de 1% e 5%.

Para avaliar a capacidade preditiva dos extratores quanto à disponibilidade de K dos solos para as plantas, foram ajustadas equações de regressão linear simples para os conteúdos de K na parte aérea das plantas em função dos teores de K disponível pelos extratores (Alvarez. V, 1996). Considerou-se adequado o método que apresentou valores de $R^2 > 0,70$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantidade de K extraída variou entre os métodos estudados. Os valores médios para K disponível obtidos pelo Acetato de Amônio variaram de 146,7 a 523,5 mg dm^{-3} , para o cloreto de amônio de 87,3 a 507,5 mg dm^{-3} , para o Mehlich-1 de 118,6 a 303,5 mg dm^{-3} e para a resina de troca iônica de 63,8 a 184,9 mg dm^{-3} , enquanto que para a planta essa variação foi de 72,6 a 233,4 mg dm^{-3} . Dessa forma, comparando os extratores e a planta quanto à sua capacidade de extração de K a ordem decrescente da quantidade média de K extraído do solo foi: acetato de amônio > cloreto de amônio > Mehlich-1 > resina > planta (Tabela 2).

Essas variações nos teores de K extraídos são devidas aos mecanismos de extração dos extratores e da planta. O acetato de amônio e o cloreto de amônio, por possuírem como mecanismo de ação a troca iônica dos ions K^+ por NH_4^+ , conseguem extrair além das frações solúvel e trocável o K retido em sítios de adsorção específicos para K, presentes nos poros ditrigonais das entrecamadas de minerais 2:1, em virtude da similaridade de seus raios iônicos hidratados e da energia hidratação (Bell, Thopson e Moody, 2021), o que explicariam os maiores teores verificados para esses elementos. Já o extrator Mehlich-1 consegue extrair apenas o K solúvel e o K trocável retido nas cargas elétricas da superfície dos colóides orgânicos e inorgânicos do solo (sítios de sorção planares de baixa especificidade para K) (Firmano et al., 2019) enquanto a resina de troca iônica e a planta baseiam-se na remoção de K da solução e a difusão do elemento até a superfície das esferas de resina ou das raízes, que é um processo lento.

Tabela 2- Teor de K disponível pelos extratores acetato de amônio (AA), cloreto de amônio (CA), Mehlich-1 e resina de troca iônica mista e extraído pela planta para diferentes doses de K aplicadas aos solos

Solo ¹	Dose	AA	CA	Mehlich-1	Resina	Planta ²
----- mg dm ⁻³ -----						
PVA	0	45,9	25,5	41,6	48,9	20,8
	50	78,5	47,5	70,6	78,0	52,2
	100	117,0	73,3	119,1	120,6	80,8
	200	215,9	125,8	194,8	192,4	100,5
	300	276,1	164,2	245,6	240,4	108,7
	Média	146,7	87,3	134,3	136,1	72,6
RY	0	128,4	78,5	138,5	82,7	119,2
	50	145,3	102,6	158,4	90,1	146,8
	100	164,2	122,4	179,2	88,0	142,8
	200	189,8	142,2	207,8	111,3	161,4
	300	237,8	172,0	252,6	129,7	179,7
	Média	173,1	123,5	187,3	100,4	150,0
CX1	0	169,7	106,9	153,4	108,7	88,3
	50	206,4	128,0	174,9	135,1	106,5
	100	261,8	177,1	226,2	165,1	153,2
	200	340,6	248,2	299,3	227,3	165,7
	300	409,4	311,9	388,8	288,5	204,4
	Média	277,6	194,4	248,5	184,9	143,6
CX2	0	295,5	200,4	216,1	123,9	99,6
	50	349,2	243,0	237,9	148,9	133,5
	100	371,2	275,8	278,5	153,3	118,6
	200	455,0	367,0	351,2	183,3	154,8
	300	532,8	430,8	433,8	245,6	212,9
	Média	400,7	303,4	303,5	171,0	143,9
MD	0	455,3	449,8	223,1	54,5	146,0
	50	489,2	480,8	249,6	54,5	161,6
	100	520,5	511,8	266,9	57,3	181,0
	200	538,0	526,3	292,0	71,4	212,7
	300	614,5	568,9	356,5	81,1	233,4
	Média	523,5	507,5	277,6	63,8	186,9
VX	0	438,0	398,2	84,8	62,1	158,3
	50	466,0	436,9	93,8	58,0	162,0
	100	494,0	491,1	108,6	63,3	199,8
	200	520,6	497,9	138,1	66,2	194,1
	300	597,6	540,5	167,6	80,0	237,4
	Média	503,2	472,9	118,6	65,9	190,3

¹PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixerê-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN). ²Conteúdo de K extraído por duas plantas de milho dividido pelo volume de solo do vaso.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa característica de extração do K pela resina explica os menores valores encontrados para esse extrator nos solos MD (63,98 mg dm⁻³) e VX (65,9 mg dm⁻³), que representam apenas 12 e 13% do K extraído pelo acetato de amônio. Esses solos são os que apresentam maiores teores de argila, maiores valores de CTC e de CMSK (Tabela 1) e, provavelmente, maior proporção de minerais 2:1, que fixam K em sítios específicos de sorção. Como a liberação de K pela fase sólida depende da concentração de K da solução e da difusão do elemento ao longo de um gradiente de concentração entre a solução e a fase sólida do solo, solos com elevada CTC e alto tamponamento deixam baixas concentrações de K na solução, limitando a formação do gradiente de concentração, gerado pela retirada do K da solução pela resina de troca iônica, necessário para que haja a liberação do K dos sítios de sorção (Bell, Thompson e Moody, 2021).

Medeiros et al. (2010) também verificaram menor capacidade de extração de K pela resina em solos mais argilosos e com maior teor de minerais 2:1 do estado da Paraíba, evidenciando que esse extrator apresenta baixa capacidade de extração da fração não trocável e é sensível ao poder tampão de K. Bortolon et al. (2010) verificaram que a resina extraiu menos de 50 % do teor extraído pelo acetato de amônio e que, apesar de mostrar correlação com o teor extraído pela planta, esse extrator apresenta menor poder de extração, o que reduziria as classes de disponibilidade e aumentaria a chance de erro analítico. Já Bortolon, Schilindwein e Gianello (2009) verificaram capacidade de extração de K semelhantes entre a solução Mehlich-1 e a resina em amostras de Latossolo e Argissolo do Rio Grande do Sul.

Apesar do Mehlich-1 ter, de modo geral, extraído maior quantidade de K em relação à resina, sua capacidade de extração de K foi reduzida em solos com maior teor de equivalente de CaCO₃. Para o VX, a quantidade de K extraída pelo Mehlich-1 representou apenas 24 % do K extraído pelo Acetato de Amônio (Tabela 2). Isso se dá devido ao desgaste do extrator pela neutralização de sua acidez pelo CaCO₃. Ao avaliarem a eficiência de extratores de P nesse solo, Medeiros et al. (2021) verificaram que o pH da suspensão solo utilizando Mehlich-1 para esse ele foi de 5,72 no início da extração, e de 6,51 ao final do processo, enquanto que para os demais solos estudados esse valor era inferior a 2,0, o que explicaria seus desgaste e perda da sua capacidade de extração de P.

A hipótese apresentada por Medeiros et al. (2021) para a menor extração de P no VX é plausível para explicar, também, a menor extração de K pelo Mehlich-1 no VX no presente estudo. Há de se considerar, ainda, para o Mehlich-1 que ao ocorrer a dissolução de CaCO₃ pelo extrator, há liberação de íons Ca²⁺ em solução, que poderiam extirar K, porém, essa hipótese se mostrou pouco efetiva, em razão do menor teor de K extraído pelo Mehlich-1 quando

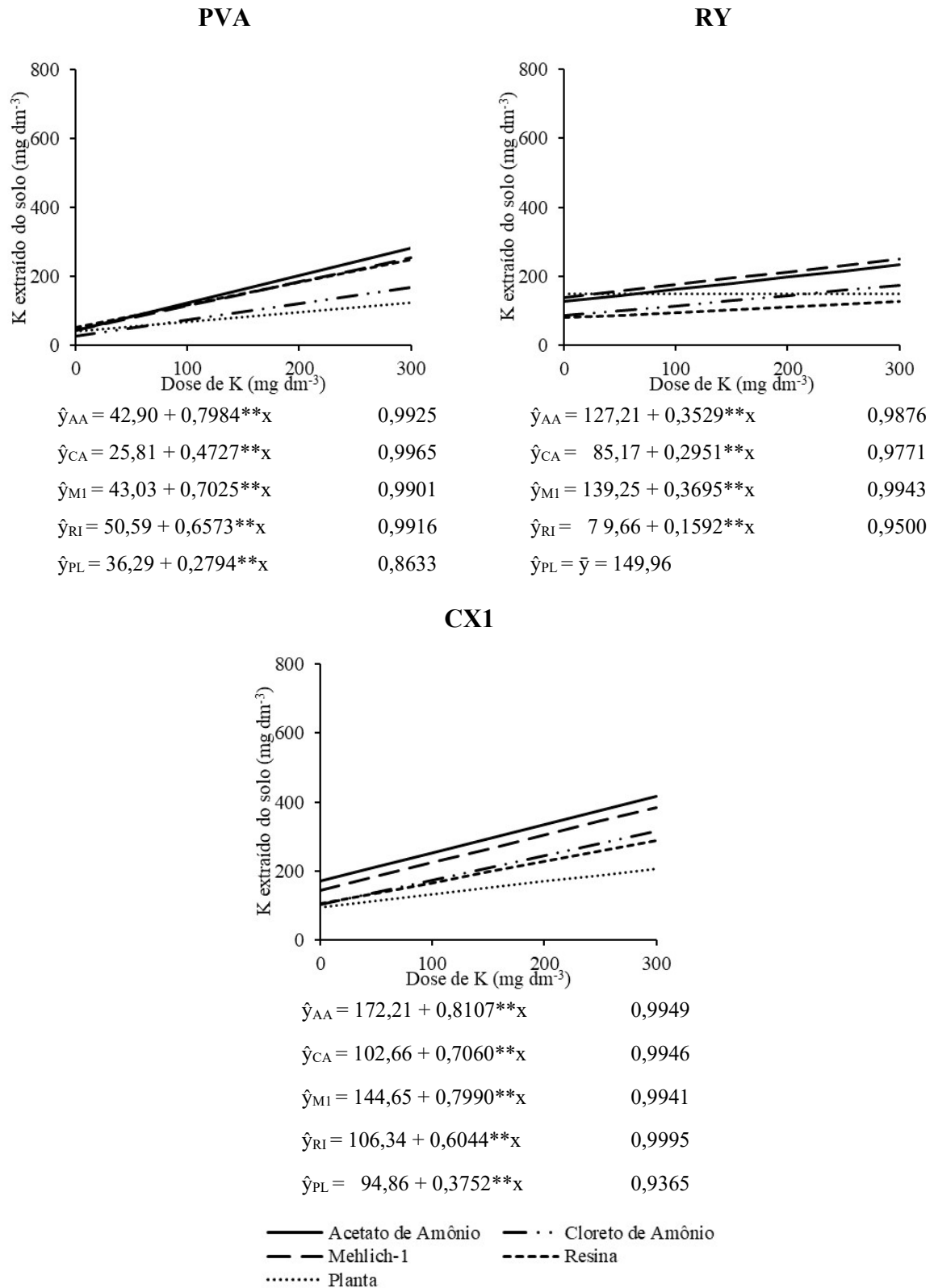
comparado ao Acetato de Amônio, possivelmente em virtude da menor eficiência de Ca^{2+} em remover K^+ em sítios de adsorção específicos. Bell, Thompson e Moody (2021) afirmam que íons como Ca^{2+} e Ba^{2+} apresentam esferas de hidratação muito estáveis, de modo que eles não conseguem perder água de solvatação e entrar nas entrecamadas 2:1 para assumir os sítios de sorção ocupados por K^+ .

Com relação ao extrator Cloreto de Amônio as quantidades de K extraídas foram menores do que o acetato de amônio, porém para os solos MD e VX, que são os que apresentam, provavelmente, maior quantidade de minerais do tipo 2:1, os resultados foram muito semelhantes, tendo o cloreto de amônio extraído 97 e 94% em relação às quantidades de K extraídas pelo acetato de amônio, respectivamente. Isso confirma a eficiência do NH_4^+ em extrair K^+ dos sítios de sorção presentes nas entrecamadas dos minerais 2:1. Resultados semelhantes foram encontrados por Amorim et al. (2021) em solos do Rio Grande do Sul.

A taxa de recuperação variou tanto quando comparados os extratores dentro de um mesmo solo, como quando a comparação foi feita para um mesmo extrator entre os solos estudados (Figuras 2 e 3). A menor variação entre os extratores foi verificada para os solos PVA, CX1 e CX2, com exceção do cloreto de amônio no primeiro solo e da resina de troca iônica mista nos dois últimos. Para os solos RY, MD e VX as taxas de recuperação dos extratores foram menores quando comparadas às dos demais solos, sendo esse efeito mais marcante para a resina, que extraiu apenas 15,9%, 9,7% e 6,2% do K adicionado a esses solos, respectivamente, evidenciando mais uma vez a menor eficiência desses extratores em retirar K dos solos mais argilosos, com maior CTC (Tabela 1) e, ou, com maior quantidade de minerais 2:1. A maior taxa de recuperação, considerando todos os solos, foi verificada para o extrator acetato de amônio, apesar disso, para o solo RY esse extrator recuperou apenas 35% do K adicionado.

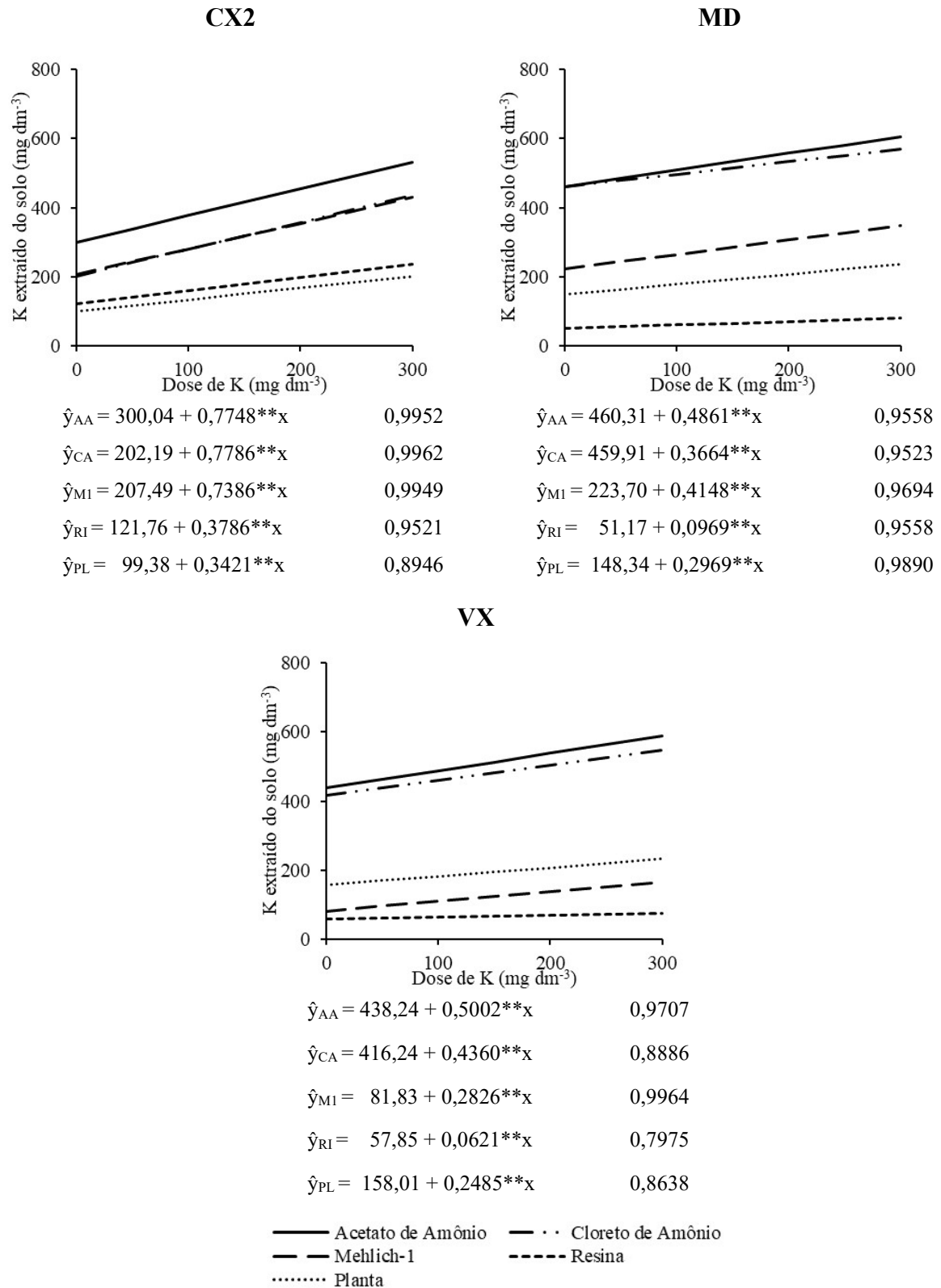
Em todos os solos, a taxa de extração foi inferior a 100% (Figuras 2 e 3), evidenciando que o processo de fixação é relevante nesses solos e que a sorção se dá em pontos de alta especificidade para o K, ficando inacessível aos extratores, mesmo aqueles que usam os íons NH_4^+ como íon trocador, como é o caso do acetato de amônio e do cloreto de amônio. De acordo com Firmano et al. (2019), nos sítios de adsorção específicos, a seletividade e a energia de retenção de K podem ser tão altas que o K não pode ser substituído por outros cátions com raio iônico semelhante, como NH_4^+ , tornando o tamponamento do K não trocável para K trocável muito lento.

Figura 2- Teores médios de K extraídos pelos extratores acetato de amônio (AA), cloreto de amônio (CA), Mehlich-1 (M1), resina de troca iônica mista (RI) e pela planta (PL) para diferentes doses de K aplicadas aos solos. PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 3- Teores médios de K extraídos pelos extratores acetato de amônio (AA), cloreto de amônio (CA), Mehlich-1 (M1), resina de troca iônica mista (RI) e pela planta (PL) para diferentes doses de K aplicadas aos solos. CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Esse comportamento não era esperado para o PVA, visto que esse solo é mais desenvolvido e provavelmente apresente predominância de caulinita e óxidos na mineralogia da fração argila. Essa fixação possivelmente pode estar relacionada a traços de minerais micáceos (principalmente ilita). Rêgo et al. (2016) encontraram ilita na fração argila desse mesmo solo e Mota et al. (2007) também encontraram esse mineral na argila, além de mica na fração silte, de um Argissolo e um Latossolo coletados em Mossoró-RN.

A análise de correlação mostrou que a taxa de recuperação de K do extrator acetato de amônio correlacionou-se com a dos demais extratores e que houve correlação significativa entre os extratores Mehlich-1 e a Resina (Tabela 3). As taxas de recuperação dos extratores não se correlacionaram significativamente com atributos do solo que refletem a disponibilidade de K e o poder tampão de K, com exceção da resina que apresentou correlação significativa com a CTC efetiva (-0,82*) e com o K-rem (0,82*) (Tabela 3), indicando que esse extrator recupera menor proporção da dose de K aplicada em solos que apresentam maiores valores de CTC efetiva, provavelmente pela maior fixação de K e ao maior tamponamento desses solos.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação linear simples entre as declividades das equações de regressão linear simples que estimam os teores de K disponível pelos extratores acetato de amônio (AA), Mehlich-1 (M1), resina de troca iônica mista (RTIM), cloreto de amônio (CA) e pela planta, como variável dependente das doses de K aplicadas, e características químicas e físicas dos solos

	T	t	Kf	CMSK	K-rem	Argila	Planta	CA	RTIM	M-1
AA	-0,54	-0,55	-0,55	-0,41	0,48	-0,14	0,79	0,83	0,88	0,91
M-1	-0,73	-0,74	-0,71	-0,61	0,64	-0,27	0,62	0,80	0,91	-
RTIM	-0,81	-0,82	-0,80	-0,70	0,82	-0,53	0,46	0,58	-	-
CA	-0,38	-0,38	-0,41	-0,21	0,19	0,12	0,74	-	-	-
Planta	0,08	0,06	0,07	0,22	-0,12	0,47	-	-	-	-
Argila	0,83	0,83	0,84	0,83	-0,91	-	-	-	-	-
K-rem	-0,96	-0,96	-0,95	-0,92	-	-	-	-	-	-
CMSK	0,95	0,96	0,93	-	-	-	-	-	-	-
Kf	0,99	0,99	-	-	-	-	-	-	-	-
T	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-

T = CTC a pH 7,0; t = CTC efetiva; K-rem = potássio remanescente; CMSK = capacidade máxima de sorção de K; Kf = constante K de Freundlich. Valores em negrito indicam correlação significativa a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Era de se esperar que houvesse correlação significativa com atributos que refletem a disponibilidade de K e o PTK, tendo em vista que essas refletem a capacidade de sorção de K e o equilíbrio dinâmico do K retido pela fase sólida e o K em solução, sobretudo a CTC e a CMSK, tendo esse fato ocorrido possivelmente em razão da elevada fixação de K pelos solos.

A falta de correlação entre atributos que refletem a disponibilidade de K e a taxa de recuperação do extrator Mehlich-1, também foi verificada por Medeiros et al. (2010) para solos menos desenvolvidos do Estado da Paraíba, enquanto para a resina esses autores verificaram correlação significativa entre a taxa de recuperação e a CTC (-0,81*), CTC efetiva (-0,82*), Silte/Argila (-0,69*), Ki (-0,84*) e Argila (-0,81*). Já Kalyani, Sailaja e Rao (2017) verificaram correlação com os teores de K extraídos por esse extrator e CTC (0,73**), carbono orgânico (0,65**) e argila (0,96**) em solos do distrito de Rangareddi, Índia.

Os dados de produção de matéria seca e de teor de K na planta em função de doses de K aplicadas aos solos (Tabela 4) indicam que o crescimento do milho não aumentou com o incremento da dose de K aplicada, mesmo no solo PVA que apresenta menor teor de K disponível (Tabela 1), embora em todos os solos o teor de K na matéria seca tenha aumentado (Tabelas 4 e 5), indicando possível consumo de luxo. Esse comportamento também foi verificado para plantas de milho cultivadas em solos com diferentes graus desenvolvimento pedogenético do estado da Paraíba (Medeiros et al., 2010).

Vale ressaltar que a máxima acumulação de matéria seca e de nutrientes pelas plantas de milho se dá em torno de 80 dias, com maior taxa de acúmulo entre 54 e 63 dias, enquanto a absorção de K é maior nos 30 primeiros dias (Borin, Lana e Pereira, 2010). Assim, espera-se que o K tenha sido absorvido em excesso no início do ciclo e que haja diluição do teor acumulado nos tecidos vegetais e que esse consumo de luxo deixe de existir.

Foram ajustadas equações de regressão linear simples que estimam os teores de K extraído do solo pela planta em função dos teores de K disponível extraído do solo pelos extratores acetato de amônio, cloreto de amônio, Mehlich-1 e resina (Tabela 6). Todos esses extratores mostraram-se eficientes para prever a disponibilidade de K para as plantas de milho, com valores de coeficiente de variação acima de 70%, conforme preconizado por Alvarez V. et al. (1996). Resultados semelhantes foram verificados por Steiner et al. (2009), Medeiros et al. (2010), Steiner et al. (2014) e Amorim et al. (2021).

Tabela 4- Produção de matéria seca e teor de K em plantas de milho para diferentes doses de K aplicadas aos solos

Solo ¹	Dose	MS	Teor K	Solo ¹	Dose	MS	Teor K
	mg dm ⁻³	g vaso ⁻¹	mg kg ⁻¹		mg dm ⁻³	g vaso ⁻¹	mg kg ⁻¹
PVA	0	6,5	9,6	CX2	0	14,2	21,4
	50	10,6	14,8		50	13,8	28,9
	100	11,6	21,2		100	13,1	28,7
	200	9,1	33,7		200	13,5	40,2
	300	8,3	39,5		300	15,0	42,8
	Média	9,2	23,7		Média	13,9	32,4
RY	0	16,9	21,8	MD	0	15,6	28,0
	50	16,2	27,2		50	16,4	29,8
	100	16,2	26,4		100	16,2	33,8
	200	17,5	27,5		200	16,9	37,8
	300	19,4	35,3		300	16,8	41,2
	Média	17,2	27,6		Média	16,4	34,1
CX1	0	15,8	16,6	VX	0	15,6	31,9
	50	14,8	21,7		50	15,0	32,5
	100	16,6	27,7		100	17,9	34,1
	200	15,2	32,6		200	16,8	35,3
	300	15,2	40,3		300	16,7	42,8
	Média	15,5	27,8		Média	16,4	35,3

¹PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD= Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX= Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Apesar de todos os métodos apresentarem eficiência para avaliação da disponibilidade de K, considerando o conjunto de solos, ressalva-se que a menor capacidade de extração da resina, sobretudo em solos mais argilosos e com maior CTC (Tabela 1) pode trazer dificuldades para interpretação da disponibilidade de K nesses solos. Além disso, para os solos com maior teor de CaCO₃, o extrator Mehlich-1 sofreu desgaste e não deve ser utilizado para solos com essa característica, pois seu resultado analítico gerará recomendações de adubação superestimadas. Além disso, devem ser considerados outros fatores na seleção de um método analítico, como custo, o tempo e a laboriosidade para realização das análises, além do grau de impacto ambiental provocado pelo descarte das soluções provenientes da realização dessas análises (Medeiros et al., 2010).

Tabela 5 – Equações de regressão que estimam a produção de matéria seca (y, em g/vaso) e o teor de K (y, em g kg⁻¹) em plantas de milho, em função de doses de K aplicadas (x, em mg dm⁻³) em solos do semiárido

Solo ¹	Característica	Equação	R ²
PVA	Matéria Seca	$\hat{y} = \hat{y} = 9,23$	0,9815
	Teor de K	$\hat{y} = 10,31 + 0,103425^{**}x$	
RY	Matéria Seca	$\hat{y} = \hat{y} = 17,24$	0,8266
	Teor de K	$\hat{y} = 22,88 + 0,036552^{**}x$	
CX1	Matéria Seca	$\hat{y} = \hat{y} = 15,55$	0,9796
	Teor de K	$\hat{y} = 17,88 + 0,076213^{**}x$	
CX2	Matéria Seca	$\hat{y} = \hat{y} = 13,92$	0,9323
	Teor de K	$\hat{y} = 23,15 + 0,071080^{**}x$	
MD	Matéria Seca	$\hat{y} = \hat{y} = 16,35$	0,9807
	Teor de K	$\hat{y} = 28,27 + 0,045086^{**}x$	
VX	Matéria Seca	$\hat{y} = \hat{y} = 16,42$	0,8717
	Teor de K	$\hat{y} = 30,89 + 0,034017^{**}x$	

¹PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2= Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 6 - Equações de regressão linear simples que estimam os teores de K extraídos do solo pela planta (y, em mg dm⁻³) em função dos teores de K disponível (x, em mg dm⁻³) extraídos do solo pelos extratores acetato de amônio, cloreto de amônio, Mehlich-1 e resina de troca iônica mista em solos do semiárido brasileiro

Solo ¹	Extrator	Equação	R ²
PVA	Acetato de amônio	$\hat{y} = 21,52 + 0,3483*x$	0,8612
	Cloreto de amônio	$\hat{y} = 20,61 + 0,5959*x$	0,8804
	Mehlich-1	$\hat{y} = 18,35 + 0,4039*x$	0,8989
	Resina	$\hat{y} = 13,88 + 0,4316*x$	0,8978
RY	Acetato de amônio	$\hat{y} = 63,70 + 0,4984*x$	0,8965
	Cloreto de amônio	$\hat{y} = 75,44 + 0,6033**x$	0,9283
	Mehlich-1	$\hat{y} = 59,91 + 0,4809*x$	0,9089
	Resina	$\hat{y} = 42,23 + 1,0734*x$	0,8810
CX1	Acetato de amônio	$\hat{y} = 14,13 + 0,4665**x$	0,9564
	Cloreto de amônio	$\hat{y} = 40,10 + 0,5325**x$	0,9452
	Mehlich-1	$\hat{y} = 27,26 + 0,4682**x$	0,9368
	Resina	$\hat{y} = 29,27 + 0,6184**x$	0,9300
CX2	Acetato de amônio	$\hat{y} = -35,32 + 0,4471**x$	0,9221
	Cloreto de amônio	$\hat{y} = 11,74 + 0,4355*x$	0,8824
	Mehlich-1	$\hat{y} = 3,69 + 0,4610*x$	0,8944
	Resina	$\hat{y} = -13,59 + 0,9208**x$	0,9762
MD	Acetato de amônio	$\hat{y} = -115,43 + 0,5780**x$	0,9248
	Cloreto de amônio	$\hat{y} = -206,70 + 0,7760**x$	0,9521
	Mehlich-1	$\hat{y} = -2,86 + 0,6837**x$	0,9303
	Resina	$\hat{y} = 2,61 + 2,8909**x$	0,9242
VX	Acetato de amônio	$\hat{y} = -64,52 + 0,5064**x$	0,9237
	Cloreto de amônio	$\hat{y} = -71,23 + 0,5531*x$	0,9152
	Mehlich-1	$\hat{y} = 86,35 + 0,8769*x$	0,8611
	Resina	$\hat{y} = -39,97 + 3,4938*x$	0,8281

¹Conteúdo de K extraído por duas plantas de milho dividido pelo volume de solo do vaso. ²PVA = Argissolo Vermelho Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

CONCLUSÕES

Todos os extratores avaliados mostraram boa correlação com o K acumulado pela planta.

A resina de troca iônica apresentou menor capacidade de extração de K nos solos mais argilosos, com maior CTC e maior quantidade de minerais 2:1, não sendo recomendada para solos com essas características.

O extrator Mehlich-1 sofreu desgaste na sua capacidade de extração em solos alcalinos com teores elevados de CaCO₃ equivalente não devendo ser utilizado para esse tipo de solo.

O extrator acetato de amônio extraiu as maiores quantidades de K dos solos e não apresentou limitações em nenhum solo, sendo o mais recomendado para a avaliação da disponibilidade de potássio em solos do semiárido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V., V. H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 615–646.

ALVAREZ V., V. H. et al. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, p. 27–32, 2000.

AMORIM, M.B.; ROGERI, D.A.; GIANELLO, C. Potassium Available to Corn Plants Extracted by Ammonium Acetate, Ammonium Chloride, Mehlich-1 and Mehlich-3 Solutions in Southern Brazilian Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 15, p. 1790-1797, 2021. DOI: 10.1080/00103624.2021.1892736

BELL, M.J.; THOMPSON, M.L.; MOODY, P.W. Using Soil Tests to Evaluate Plant Availability of Potassium in Soils. In: MURREL, T.S.; MIKKELSEN, R.L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M.L. **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**. Suíça: Springer, 2012. p.191-218. DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7>.

BILIAS, F.; BARBAYIANNIS, N. Potassium availability: An approach using thermodynamic parameters derived from quantity-intensity relationships. **Geoderma**, v. 338, p. 355-364, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.026>.

BOEIRA, R.C.; RAIJ, B. van, SILVA, A.S.; MAXIMILIANO, V.C.B. Extração simultânea de alumínio, cálcio, magnésio, potássio e sódio do solo com solução de cloreto de amônio. **Rev. Bras. Ci. Solo**. v.28, p. 929-936. 2004. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500015>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA–SUDENE/DRN. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife, 1971, 531p. (Boletim Técnico, 21). Disponível em: <https://embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/330796/levantamento-exploratorio-reconhecimento-de-solos-do-estado-do-rio-grande-do-norte>. Acesso em: 10 de out. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisa Pedológica. Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA–SUDENE/DRN. **Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. Recife, 1973, 301p. (Boletim Técnico, 28). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/331170/levantamento-exploratorio---reconhecimento-de-solos-do-estado-do-ceara>. Acesso em: 10 de out de 2022.

BREKER, J.S.; DESUTTER, T.; RAKKAR, M.K.; SHARMA, L.; FRANZEN, D.W. Potassium Requirements for Corn in North Dakota: Influence of Clay Mineralogy. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 83, p. 429-436. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0376>

FIRMANO, R.F.; MELO, V.F.; CASTRO, A.O.J.C.; ALEONNI, L.R.F. Soybean and Soil Potassium Pools Responses to Long-Term Potassium Fertilization and Deprivation under No-Till. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 83, p. 1819–1829. 2019. DOI:10.2136/sssaj2019.05.0142

GIANELLO, C.; AMORIM, M.B. Ammonium Chloride Solution as an Alternative Laboratory Procedure for Exchangeable Cations in Southern Brazilian Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. sup1, p. 94-103, 2015. DOI:10.1080/00103624.2014.988580

HELMKE, P.A.; SPARKS, D.L. Lithium, sodium, rubidium and cesium. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMNER, M.E. eds. **Methods of soil analysis chemical methods**. Madison, SSSA/ASA, 1996. Part 3. p.551-574 (Book Series, 5).

KALYANI, K.; SAILAJA, V.; RAO, R. Relationship of inorganic potassium fractions to yield of cauliflower (Brassica oleracea var. Botrytis) and soil properties of light textured soils of Rangareddy district. **Indian J. Agric. Res.**, v. 51, n.1, p. 59-63, 2017. DOI:10.18805/ijare.v51i1.7063

MEDEIROS, J.S.; OLIVEIRA, F.H.T.; ARRUDA, J.A.; VIEIRA, M.S. FONTES, M.P.F. Eficiência de extratores de potássio disponível em solos do estado da Paraíba com graus de desenvolvimento pedogenético diferentes. **Rev. Bras. Ci. Solo**. v. 34, n.1, p. 183-194. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100019>

MEDEIROS, M.D.O.N.; OLIVEIRA, F.H.T.; PRESTON, W. PAIVA, M.R.F.C.; GÓIS, H.M.M.N. Comparison of methods for extracting available phosphorus from soils of the semi-arid. **Ciência Agrônômica**, v. 52, n. 4, p. e20207633, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210062>

MOTA, J.C.A.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; AMARO FILHO, J.; ROMERO, R.E.; MOTA, F.O.B.; LIDARDI, P.L. Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi: RN. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v. 31, n. 3, p. 445-454. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300004>

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1997. 285p

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285p.

RÊGO, L.G.S.; MARTINS, C.M.; SILSA, E.F.; SILVA, J.J.A.; LIMA, R.N.S. Pedogenesis and soil classification of an experimental farm in mossoró, state of Rio Grande do Norte, Brazil. **Rev. Caatinga**. v. 29, n.4, p. 1036-1042. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n430rc>

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG, CFSEMG, 1999. 359p.

SANTOS, A.S. **Sorção de potássio em solos do semiárido estimada pelo potássio remanescente**. 2022. 29f. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/0944b765-ad53-4359-9c80-62e96f5e8bfa/content>. Acesso em: 10 de fev. de 2023.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; HOFFMANN, R. B.; SANTOS, D. Relações quantidade/intensidade de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba - Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 4, p. 338-346, 2013. Disponível em: <https://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/968>. Acesso em: 14 de jan. de 2023.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C.; ANGHINONI, I.; SOUZA, R.O. eds. **Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul - [s. l.]: Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, p. 376, 2016.

STEINER, F.; LANA, M.C.; FRANDOLOSO, J.F.; REY, R.; ZOZ, T. 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**. v. 4, n. 1, 2009. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/SysScy/article/viewFile/563/311>. Acesso em 17 de set. de 2022.

STEINER, F.; LANA, M. C.; ZOZ, T.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R. Extraction methods and potassium availability for soybean in the Paraná State's soils, Brazil. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 1, n. 2, p. 83-92, 2014. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v1i2.232>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

ZÖRB, C; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture - status and perspectives. **J Plant Physiol**. v.171, p. 656-669, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>

APÊNDICE

Tabela 1A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator acetato de amônio, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	54.497333	27.248667	0.463	0.6455
DOSE	4	39013.417333	9753.354333	165.605	0.0000**
erro	8	471.162667	58.895333		
Total corrigido	14	39539.077333			
CV (%) =	8.80				
Média geral:	87.2533333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 2A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator cloreto de amônio, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	32.817333	16.408667	0.962	0.4224
DOSE	4	111740.797333	27935.199333	1637.436	0.0000**
erro	8	136.482667	17.060333		
Total corrigido	14	111910.097333			
CV (%) =	2.82				
Média geral:	146.6866667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 3A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator Mehlich-1, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	77.904000	38.952000	0.580	0.5816
DOSE	4	86740.389333	21685.097333	323.114	0.0000**
erro	8	536.902667	67.112833		
Total corrigido	14	87355.196000			
CV (%) =	6.10				
Média geral:	134.3600000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 4A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator resina de troca iônica mista, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	359.721333	179.860667	5.245	0.0351*
DOSE	4	75829.577333	18957.394333	552.777	0.0000**
erro	8	274.358667	34.294833		
Total corrigido	14	76463.657333			
CV (%) =	4.30				
Média geral:	136.0533333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 5A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio extraídos pela planta, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	227.081333	113.540667	0.294	0.7532
DOSE	4	15729.797333	3932.449333	10.173	0.0032**
erro	8	3092.598667	386.574833		
Total corrigido	14	19049.477333			
CV (%) =	27.08				
Média geral:	72.6133333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 6A- Esquema de análise de variância para os valores de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	3.601333	1.800667	0.495	0.6270
DOSE	4	46.713333	11.678333	3.211	0.0752
erro	8	29.098667	3.637333		
Total corrigido	14	79.413333			
CV (%) =	20.66				
Média geral:	9.2333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 7A- Esquema de análise de variância para os teores foliares de potássio na parte aérea de plantas de milho, no solo PVA, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	19.769333	9.884667	0.841	0.4661
DOSE	4	1896.350667	474.087667	40.340	0.0000**
erro	8	94.017333	11.752167		
Total corrigido	14	2010.137333			
CV (%) =	14.43				
Média geral:	23.7533333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 8A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator acetato de amônio, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	81.541333	40.770667	1.703	0.2419
DOSE	4	21940.037333	5485.009333	229.164	0.0000**
erro	8	191.478667	23.934833		
Total corrigido	14	22213.057333			
CV (%) =	2.83				
Média geral:	173.0866667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 9A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator cloreto de amônio, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	9.689333	4.844667	0.145	0.8670
DOSE	4	15505.846667	3876.461667	116.272	0.0000**
erro	8	266.717333	33.339667		
Total corrigido	14	15782.253333			
CV (%) =	4.67				
Média geral:	123.5333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 10A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator Mehlich-1, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	34.661333	17.330667	2.809	0.1191
DOSE	4	23897.324000	5974.331000	968.444	0.0000**
erro	8	49.352000	6.169000		
Total corrigido	14	23981.337333			
CV (%) =	1.33				
Média geral:	187.2866667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 11A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator resina de troca iônica mista, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	7106.641333	3553.320667	6.758	0.0191*
DOSE	4	6079.566667	1519.891667	2.891	0.0941
erro	8	4206.205333	525.775667		
Total corrigido	14	17392.413333			
CV (%) =	15.29				
Média geral:	149.9666667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 12A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio extraídos pela planta, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	227.081333	113.540667	0.294	0.7532
DOSE	4	15729.797333	3932.449333	10.173	0.0032**
erro	8	3092.598667	386.574833		
Total corrigido	14	19049.477333			
CV (%) =	27.08				
Média geral:	72.6133333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 13A- Esquema de análise de variância para os valores de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	39.564000	19.782000	3.769	0.0703
DOSE	4	21.182667	5.295667	1.009	0.4570
erro	8	41.989333	5.248667		
Total corrigido	14	102.736000			
CV (%) =	13.29				
Média geral:	17.2400000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 14A- Esquema de análise de variância para os teores foliares de potássio na parte aérea de plantas de milho, no solo RY, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	11.769333	5.884667	0.386	0.6916
DOSE	4	281.220000	70.305000	4.615	0.0317*
erro	8	121.884000	15.235500		
Total corrigido	14	414.873333			
CV (%) =	14.13				
Média geral:	27.6333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 15A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator acetato de amônio, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	26.596000	13.298000	1.572	0.2655
DOSE	4	114941.000000	28735.250000	3397.405	0.0000**
erro	8	67.664000	8.458000		
Total corrigido	14	115035.260000			
CV (%) =	1.05				
Média geral:	277.6000000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 16A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator cloreto de amônio, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	542.229333	271.114667	1.733	0.2370
DOSE	4	87191.566667	21797.891667	139.328	0.0000**
erro	8	1251.597333	156.449667		
Total corrigido	14	88985.393333			
CV (%) =	6.43				
Média geral:	194.4333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 17A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator Mehlich-1, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	201.365333	100.682667	2.128	0.1816
DOSE	4	111730.777333	27932.694333	590.333	0.0000**
erro	8	378.534667	47.316833		
Total corrigido	14	112310.677333			
CV (%) =	2.77				
Média geral:	248.5133333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)**Tabela 18A-** Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator resina de troca iônica mista, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	4983.412000	2491.706000	7.421	0.0150*
DOSE	4	63608.484000	15902.121000	47.362	0.0000**
erro	8	2686.048000	335.756000		
Total corrigido	14	71277.944000			
CV (%) =	9.91				
Média geral:	184.9200000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)**Tabela 19A-** Esquema de análise de variância para os teores de potássio extraídos pela planta, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	1961.033333	980.516667	8.215	0.0115*
DOSE	4	26155.346667	6538.836667	54.783	0.0000**
erro	8	954.873333	119.359167		
Total corrigido	14	29071.253333			
CV (%) =	7.61				
Média geral:	143.6333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)**Tabela 20A-** Esquema de análise de variância para os valores de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	7.369333	3.684667	2.497	0.1437
DOSE	4	6.204000	1.551000	1.051	0.4390
erro	8	11.804000	1.475500		
Total corrigido	14	25.377333			
CV (%) =	7.81				
Média geral:	15.5533333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 21A- Esquema de análise de variância para os teores foliares de potássio na parte aérea de plantas de milho, no solo CX1, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	19.049333	9.524667	1.344	0.3138
DOSE	4	1031.750667	257.937667	36.408	0.0000**
erro	8	56.677333	7.084667		
Total corrigido	14	1107.477333			
CV (%) =	9.58				
Média geral:	27.7866667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 22A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator acetato de amônio, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	15.988000	7.994000	0.078	0.9254
DOSE	4	104954.029333	26238.507333	256.913	0.0000**
erro	8	817.038667	102.129833		
Total corrigido	14	105787.056000			
CV (%) =	2.52				
Média geral:	400.7600000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 23A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator cloreto de amônio, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	869.932000	434.966000	3.333	0.0885
DOSE	4	105873.146667	26468.286667	202.814	0.0000**
erro	8	1044.041333	130.505167		
Total corrigido	14	107787.120000			
CV (%) =	3.77				
Média geral:	303.4000000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 24A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator Mehlich-1, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	300.369333	150.184667	1.395	0.3023
DOSE	4	95416.710667	23854.177667	221.493	0.0000**
erro	8	861.577333	107.697167		
Total corrigido	14	96578.657333			
CV (%) =	3.42				
Média geral:	303.5133333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 25A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator resina de troca iônica mista, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	17105.833333	8552.916667	27.087	0.0003**
DOSE	4	26198.304000	6549.576000	20.743	0.0003**
erro	8	2526.040000	315.755000		
Total corrigido	14	45830.177333			
CV (%) =	10.39				
Média geral:	170.9866667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 26A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio extraídos pela planta, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	934.588000	467.294000	1.407	0.2994
DOSE	4	22768.776000	5692.194000	17.143	0.0005**
erro	8	2656.392000	332.049000		
Total corrigido	14	26359.756000			
CV (%) =	12.67				
Média geral:	143.8600000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 27A- Esquema de análise de variância para os valores de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	22.828000	11.414000	4.745	0.0438*
DOSE	4	6.190667	1.547667	0.643	0.6468
erro	8	19.245333	2.405667		
Total corrigido	14	48.264000			
CV (%) =	11.14				
Média geral:	13.9200000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 28A- Esquema de análise de variância para os teores foliares de potássio na parte aérea de plantas de milho, no solo CX2, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	19.881333	9.940667	0.422	0.6698
DOSE	4	942.936000	235.734000	9.998	0.0033**
erro	8	188.632000	23.579000		
Total corrigido	14	1151.449333			
CV (%) =	14.99				
Média geral:	32.3933333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 29A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator acetato de amônio, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	213.257333	106.628667	0.971	0.4191
DOSE	4	43015.189333	10753.797333	97.957	0.0000**
erro	8	878.242667	109.780333		
Total corrigido	14	44106.689333			
CV (%) =	2.00				
Média geral:	523.5066667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 30A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator cloreto de amônio, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	399.216000	199.608000	1.130	0.3696
DOSE	4	24536.176000	6134.044000	34.734	0.0000**
erro	8	1412.804000	176.600500		
Total corrigido	14	26348.196000			
CV (%) =	2.62				
Média geral:	507.5400000	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 31A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator Mehlich-1, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	77.809333	38.904667	0.831	0.4700
DOSE	4	30889.569333	7722.392333	164.968	0.0000**
erro	8	374.490667	46.811333		
Total corrigido	14	31341.869333			
CV (%) =	2.46				
Média geral:	277.6266667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 32A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator resina de troca iônica mista, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	1840.929333	920.464667	28.795	0.0002**
DOSE	4	1716.913333	429.228333	13.428	0.0013**
erro	8	255.730667	31.966333		
Total corrigido	14	3813.573333			
CV (%) =	8.87				
Média geral:	63.7666667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 33A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio extraídos pela planta, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	10882.297333	5441.148667	8.714	0.0098**
DOSE	4	15508.300000	3877.075000	6.209	0.0142*
erro	8	4995.496000	624.437000		
Total corrigido	14	31386.093333			
CV (%) =	13.37				
Média geral:	186.9333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 34A- Esquema de análise de variância para os valores de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	24.969333	12.484667	7.166	0.0165*
DOSE	4	3.230667	0.807667	0.464	0.7613
erro	8	13.937333	1.742167		
Total corrigido	14	42.137333			
CV (%) =	8.07				
Média geral:	16.3533333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 35A- Esquema de análise de variância para os teores foliares de potássio na parte aérea de plantas de milho, no solo MD, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	118.817333	59.408667	4.239	0.0556
DOSE	4	360.666667	90.166667	6.433	0.0128*
erro	8	112.129333	14.016167		
Total corrigido	14	591.613333			
CV (%) =	10.97				
Média geral:	34.1333333	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 36A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator acetato de amônio, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	64.549333	32.274667	0.234	0.7964
DOSE	4	44845.600000	11211.400000	81.367	0.0000**
erro	8	1102.304000	137.788000		
Total corrigido	14	46012.453333			
CV (%) =	2.33				
Média geral:	503.2666667	Número de observações:	15		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 37A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator cloreto de amônio, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	891.721333	445.860667	1.186	0.3540
DOSE	4	37228.496000	9307.124000	24.754	0.0001**
erro	8	3007.912000	375.989000		
Total corrigido	14	41128.129333			
CV (%) =	4.10				
Média geral:	472.9266667	Número de observações:		15	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 38A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator Mehlich-1, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	89.625333	44.812667	2.631	0.1324
DOSE	4	13941.513333	3485.378333	204.609	0.0000**
erro	8	136.274667	17.034333		
Total corrigido	14	14167.413333			
CV (%) =	3.48				
Média geral:	118.5666667	Número de observações:		15	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 39A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio disponível extraídos pelo extrator resina de troca iônica mista, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	3966.537333	1983.268667	35.518	0.0001*
DOSE	4	842.622667	210.655667	3.773	0.0521*
erro	8	446.709333	55.838667		
Total corrigido	14	5255.869333			
CV (%) =	11.33				
Média geral:	65.9266667	Número de observações:		15	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 40A- Esquema de análise de variância para os teores de potássio extraídos pela planta, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	13262.116000	6631.058000	17.581	0.0012**
DOSE	4	12442.830667	3110.707667	8.247	0.0061**
erro	8	3017.377333	377.172167		
Total corrigido	14	28722.324000			
CV (%) =	10.20				
Média geral:	190.3200000	Número de observações:		15	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 41A- Esquema de análise de variância para os valores de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	53.724000	26.862000	10.357	0.0060**
DOSE	4	15.050667	3.762667	1.451	0.3026
erro	8	20.749333	2.593667		
Total corrigido	14	89.524000			
CV (%) =	9.81				
Média geral:	16.4200000	Número de observações:		15	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 42A- Esquema de análise de variância para os teores foliares de potássio na parte aérea de plantas de milho, no solo VX, em função de doses de K aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	222.937333	111.468667	9.814	0.0070**
DOSE	4	230.977333	57.744333	5.084	0.0246*
erro	8	90.862667	11.357833		
Total corrigido	14	544.777333			
CV (%) =	9.54				
Média geral:	35.3133333	Número de observações:		15	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)