

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
PPGCS- Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

Deonilce Retka Artuso

**ESTRATIFICAÇÃO DOS TEORES DE POTÁSSIO NO SOLO DE
LAVOURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Santa Maria, RS
2021

Deonilce Retka Artuso

**ESTRATIFICAÇÃO DOS TEORES DE POTÁSSIO NO SOLO DE LAVOURAS SOB
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Danilo Rheinheimer dos Santos

Santa Maria, RS
2021

Retka, Deonilce Artuso
ESTRATIFICAÇÃO DOS TEORES DE POTÁSSIO NO SOLO DE
LAVOURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO / Deonilce Artuso
Retka.- 2021.
82 p.; 30 cm

Orientador: Danilo Rheinheimer dos Santos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2021

1. Potássio Disponível. Potássio moderadamente
dessorvível. Nível Crítico. Migração de K. Sistema Plantio
direto. I. Rheinheimer dos Santos, Danilo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Deonilce Retka Artuso. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: deonilce.retka@gmail.com

Deonilce Retka Artuso

**ESTRATIFICAÇÃO DOS TEORES DE POTÁSSIO NO SOLO DE LAVOURAS SOB
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 24 de Agosto de 2021:



Danilo Rheinheimer dos Santos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Edson Campanhola Bortoluzzi, Dr. (UPF)



Diovane Freire Moterle, Dr. (IFRS)



Fábio Joel Kochem Mallmann, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

*Dedico a todos aqueles que a vida não lhe
proporcionou a oportunidade de conhecer as letras,
em especial a meu pai Antonio Retka.*

AGRADECIMENTOS

Ao Governo Federal por propiciar o ensino público, gratuito e de qualidade contribuindo enormemente na redução da desigualdade social e, contribuindo assim, para o desenvolvimento do País.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico- pela concessão de bolsa.

Ao professor Danilo Rheinheimer dos Santos pelo aprendizado e pelo esforço dedicado na realização do projeto.

Ao professor Edson Campanhola Bortoluzzi pelas sugestões e colaboração na elaboração desse trabalho.

Ao professor Leandro Souza da Silva por toda paciência e dedicação às aulas.

Aos produtores rurais que não mediram esforços para colaborar na laboriosa coleta de solo, em especial a família Ceolin, Comiram, Henz e Utzg por toda prestatividade e pelas saborosas refeições.

Aos colegas que trabalharam arduamente nas coletas, em especial ao André Somavilla e Pedro Bolsan Parisi.

Ao Matheus Ceolin por toda ajuda voluntária nas atividades de laboratório, principalmente aos sábados.

Aos demais bolsistas que colaboram enormemente nas atividades de laboratório.

Aos nossos guias de campo Ademir Comiram, Douglas Luis Utzg, Gabriel Hintz e Gilberto Welzel que nos acompanharam em longos dias de sol com uma boa prosa e companhia.

A Gracieli Fernandes por toda prestatividade nas mais diversas atividades e demandas do laboratório.

A Andressa dos Santos, Douglas Luis Utzg, Jaqueline Spricigo e Viviane Sobucki pela força e amizade.

Ao Douglas Sheid pela paciência e ajuda sempre que necessária no laboratório.

A todos que, de uma ou outra forma, colaboram para a realização desse trabalho agradeço de coração!

Muitíssimo obrigada!

Epígrafe

*"Não te conduzas como se fosses durar milhares de anos.
Sobre ti paira o inevitável. Enquanto vives e podes,
esforça-te para tornar-te homem de bem."*

Marco Aurélio

Pois...

*"O menor passo que damos dentro de nós em direção ao
Bem, de alguma forma o dá a humanidade toda."*

Jorge Angel Livraga

RESUMO

ESTRATIFICAÇÃO DOS TEORES DE POTÁSSIO NO SOLO DE LAVOURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

AUTOR: Deonilce Retka Artuso
ORIENTADOR: Danilo Rheinheimer dos Santos

O potássio (K) é um macronutriente essencial e sua aplicação em solos agrícolas é obrigatória devido à alta taxa de exportação pelas culturas. Dentro desse contexto, os sistemas agrícolas buscam maior rendimento operacional da fertilização, assim a aplicação de fertilizantes em superfície é adotada amplamente o que promove a concentração dos elementos nas camadas mais superficiais. No entanto, são poucos os estudos que demonstram como se dá o comportamento padrão do K em profundidades maiores. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar como se dá o padrão de distribuição dos teores de potássio no perfil em solos sob SPD confrontando com solos sob baixa pressão antrópica. O estudo foi realizado a campo por meio da coleta de amostras de solo em 24 municípios do Estado do RS abrangendo as seguintes regiões fisiográficas do Rio Grande do Sul: regiões das Missões, Planalto médio, Depressão Central e Serra Gaúcha. Nessas regiões foi coletado solo em 50 unidades amostrais (U.A.), sendo quatro em solo sob baixa pressão antrópica e 46 em solo sob SPD. Para cada U.A. foi feita a coleta de 19 amostras estratificadas no perfil nas seguintes camadas: 0-1; 1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-9; 9-10; 10-12,5; 12,5-15; 15-17,5; 17,5-20; 20-22,5; 22,5-25; 25-30; 30-35; 35-40 cm, totalizando 950 amostras. Estas foram submetidas às seguintes determinações químicas: acidez ativa (pH em água - relação 1:1) e acidez potencial (pH TSM); teores de P e K disponíveis, teores de K moderadamente dessorvível, K estrutural e K total; e Ca, Mg e Al trocáveis. Os resultados indicam que o padrão de distribuição dos teores de potássio no perfil do solo em SPD segue o padrão de distribuição dos solos sob baixa pressão antrópica, apresentando maiores teores de K lábil nas camadas superficiais, em média na camada 0 a 7cm, seguida de uma diminuição drástica nos teores com o aumento da profundidade. Os resultados demonstram que a variabilidade de K extraído por Mehlich-I nos solos nas camadas acima do NC é muito maior do que nos solos nas camadas abaixo do NC indicando uma alta heterogeneidade na concentração de K ao longo dos perfis de solo, em especial nos solos sob SPD que apresentam uma magnitude nos teores quando confrontado com os solos sob baixa pressão antrópica. Dessa forma, as características do elemento K associadas à composição mineralógica e condições ambientais do meio definem seu comportamento no perfil do solo e sua distribuição em distintas formas, sendo o seu entendimento fundamental para um manejo da adubação potássica.

Palavras-chaves: Potássio. Potássio Disponível. Potássio moderadamente dessorvível. Nível Crítico. Equilíbrio. Migração de K. Adubação a lanço. Sistema Plantio direto.

ABSTRACT

STRATIFICATION OF POTASSIUM CONTENT IN CROP SOIL UNDER DIRECT PLANTING SYSTEM

AUTHORA: Deonilce Retka Artuso
ADVISOR: Danilo Rheinheimer dos Santos

Potassium (K) is an essential macronutrient and its application in agricultural soils is required due to the high export rate by crops. Within this context, agricultural systems seek greater operational yield from fertilization, so the application of surface fertilizers is widely adopted, which promotes the concentration of elements in the more superficial layers. However, there are few studies that demonstrate how the standard behavior of K occurs at greater depths. Thus, the present study aims to evaluate the distribution pattern of potassium contents in the profile in soils under SPD compared to soils under low anthropogenic pressure. The study was carried out in the field through the collection of soil samples in 24 municipalities in the State of RS, covering the following physiographic regions of Rio Grande do Sul: regions of Missões, PlanaltoMédio, Central Depression and Serra Gaúcha. In these regions, soil was collected in 50 sampling units (A.U.), four in soil under low anthropogenic pressure and 46 in soil under SPD. For each U.A. 19 samples were collected stratified in the profile in the following layers: 0-1; 1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-9; 9-10; 10-12.5; 12.5-15; 15-17.5; 17.5-20; 20-22.5; 22.5-25; 25-30; 30-35; 35-40 cm, totaling 950 samples. These were subjected to the following chemical determinations: active acidity (pH in water - ratio 1:1) and potential acidity (pH TSM); available P and K contents, moderately desorbable K contents, structural K and total K; and exchangeable Ca, Mg and Al. The results indicate that the distribution pattern of potassium contents in the soil profile in SPD follows the distribution pattern of soils under low anthropogenic pressure, with higher labile K contents in the superficial layers, on average in the 0 to 7 cm layer, followed by of a drastic decrease in grades with increasing depth. The results demonstrate that the variability of K extracted by Mehlich-I in soils in the layers above the NC is much greater than in soils in the layers below the NC, indicating a high heterogeneity in the K concentration along the soil profiles, especially in the soils under SPD that present a magnitude in the contents when confronted with soils under low anthropogenic pressure. Thus, the characteristics of element K associated with the mineralogical composition and environmental conditions of the environment define its behavior in the soil profile and its distribution in different ways, and its understanding is fundamental for a management of potassium fertilization.

Keywords: Potassium. Potassium Available. Moderately desorbable potassium. Critical Level. Balance. K migration. Broadcast fertilization. No-tillage system.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Distribuição eletrônica do elemento K.....19
- Figura 2 - Estrutura do mineral feldspato (ortoclásio) e os tipos de ligações presentes. Assetas indicam a dessorção de cátions K^+ de suas posições originais na superfície externa da estrutura do tectossilicato, indicado por círculos com linhas pontilhadas.....24
- Figura 3 -Complexo de esfera interna com o K^+ numa vermiculita trioctaédrica em visão lateral e planas da cavidade siloxana ditrigonal.....26
- Figura 4 -Diagrama representando a estrutura de uma mica dioctraetral.....29
- Figura 5 - Posições de adsorção K^+ para mica: borda desgastada e uma camada externa onde a mica se transformou em vermiculita. Superfície plana (posição *p*), intercamada (posição *i*), borda (posição *e*) e posições de cunha.....30
- Figura 6 -Grupos funcionais aluminol e silanol na borda de um filossilicato: configuração do tipo A o oxigênio está coordenado individualmente; tipo B o oxigênio está coordenado triplamente e o tipo C o oxigênio está coordenado duplamente.....32
- Figura 7 - Estrutura 1:1 da Caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$32
- Figura 8 -Representação esquemática do estabelecimento das classes de fertilidade do solo em função da relação entre o teor do nutriente no solo e o rendimento relativo das culturas.....34
- Figura 9- Mapa com as mesorregiões do estado do RS indicando os pontos de coleta.....36
- Figura 10 - Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC >15,1 (d), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) para a região das Missões.....40
- Figura 11- Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD) e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC >15,1 (d) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região das Missões.....42
- Figura 12 - Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO_3) e teores lábil (facilmente dessovel - Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região das Missões.....43
- Figura 13 -Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC >15,1 (d), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) para a região da região da Depressão Central.....44
- Figura 14 - Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD) e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC >15,1 (d) tendo como referencia o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região da Depressão Central.....45
- Figura 15- Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO_3) e teores lábil (facilmente dessovel - Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região da Depressão Central.....46
- Figura 16 -Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a);

- CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC >15,1 (d), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) para a região do Planalto Médio.....47
- Figura 17 - Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD) e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC >15,1 (d) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região do Planalto Médio.....49
- Figura 18 - Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO₃) e teores lábil (facilmente dessorvível - Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região do Planalto Médio.....50
- Figura 19 - Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC >15,1 (a), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) e balanço relativo de potássio lábil em solos sob SPD e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC >15,1 (b) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região da Serra Gaúcha.....51
- Figura 20 - Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO₃) e teores lábil (facilmente dessorvível - Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região da Serra Gaúcha52
- Figura 21 - Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO₃), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO₃), e potássio lábil (facilmente dessorvível - Mehlich I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob sistema plantio direto (b, c) para a região das Missões.....55
- Figura 22 - Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO₃), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO₃), e potássio lábil (facilmente dessorvível - Mehlich I) em solos sob baixa pressão (a) e sob sistema plantio direto (b, c) para a região da Depressão central.....56
- Figura 23 - Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO₃), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO₃), e potássio lábil (facilmente dessorvível - Mehlich I) em solos sobbaixa pressão (a) e cultivados sob sistema plantio direto (b, c) para a região do Planalto médio.....57
- Figura 24 - Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO₃), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO₃), e potássio lábil (facilmente dessorvível - Mehlich I) em solos sobbaixa pressão (a) e cultivados sob sistema plantio direto (b, c) para a região da Serra Gaúcha.....58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva para os teores de potássio acima do Nível Crítico. Intervalo de confiança (I.C.): 95%.....	53
Tabela 2 - Estatística descritiva para os teores de potássio abaixo do Nível Crítico. Intervalo de confiança (I.C.): 95%.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ASE	Área superficial específica
Ca	Cálcio
C	Carbono
CS	Cavidade siloxana
CCE	Complexo de esfera externa
CEI	Complexo de esfera interna
CTC _{pH 7,0}	Capacidade de troca de cátions potencial
GF	Grupo funcional
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
Ke	Potássio estrutural
Kt	Potássio trocável
Mg	Magnésio
MOS	Matéria orgânica do solo
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NC	Nível crítico
O	Oxigênio
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
PI	Potencial iônico
SBCS	Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
SPD	Sistema de plantio direto
Si	Silício
SI	Substituição isomórfica
UA	Unidade amostral

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Valores médios de CTC $pH 7,0$ para quatro regiões do Estado- RS de acordo com a profundidade no solo do perfil.....	70
Apêndice B - Classe textural dos solos na camada 0 a 10 cm para os perfis sob SPD e sob baixa pressão antrópica (T) estimados pelo método da pipeta.....	71
Apêndice C - Caracterização do manejo nos solos sob SPD no Estado do RS.....	72
Apêndice D - Teores de potássio lábil para a região das Missões em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob sistema de plantio direto (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.....	73
Apêndice E - Teores de potássio lábil para a região da Depressão Central em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob sistema de plantio direto (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.....	74
Apêndice F - Teores de potássio lábil para a região da Planalto em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob sistema de plantio direto (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.....	75
Apêndice G - Teores de potássio lábil para a região da Serra Gaúcha em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob sistema de plantio direto (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.....	76
Apêndice H- Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região das Missões...	77
Apêndice I - Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região da Depressão Central.....	78
Apêndice J - Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região do Planalto Médio.....	79
Apêndice K - Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região da Serra Gaúcha.....	80

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 HIPÓTESES	18
3 OBJETIVO PRINCIPAL	18
3.1 Objetivos específicos	18
4 REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1 Caracterização química do elemento potássio	19
4.2 Principais formas do potássio no solo.....	20
4.3 Principais reações do potássio no solo.....	21
4.3.1 Potássio na solução do solo	21
4.3.2 Potássio na estrutura dos minerais primários.....	23
4.3.3 Potássio presente nos minerais 2:1	24
4.3.4 Potássio presente nos minerais 1:1, MO e óxidos	31
4.4 Potássio nos solos do sul do Brasil	33
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
5.1 Descrição dos locais de coleta	35
5.2 Caracterização da coleta no perfil do solo	36
5.3 Preparo das amostras, análises químicas e físicas do solo.....	37
5.4 Análise estatística	38
6 RESULTADOS	38
6.1 Região das Missões.....	39
6.2 Região da Depressão central.....	43
6.3 Região do Planalto Médio.....	46
6.4 Serra Gaúcha.....	50
6.5 Estatística descritiva	53
6.6 Teores totais de potássio no solo	54
7 DISCUSSÃO	59
7.1 Teores de K lábil.....	59
7.2 Teores de K moderadamente lábil	62
7.3 Teores de K total e estrutural	64
8 CONCLUSÃO.....	65
9 REFERÊNCIAS	66
10 APÊNDICES	70

1 INTRODUÇÃO

O potássio (K) é um macronutriente essencial para as plantas sendo o segundo em maior quantidade presente no tecido vegetal, no entanto, seu comportamento é pouco estudado comparado ao Fósforo (P) e ao nitrogênio (N) (Raij, 2011). Nesse contexto, Mello, Castilhos e Pinto (2009) destacam que a maior fonte de K mineral em ambientes tropicais está nas micras, devido à estabilidade do mineral que é liberado para o solo somente através do intemperismo químico. Apesar do K estar presente nos solos seus teores na fração lábil são baixos, portanto demandam de adubação potássica para suprir nutricionalmente as plantas (Kaminski et al., 2007). Devido a sua importância agrícola, o K está envolvido num contexto mercadológico e de acordo com o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2018) é o terceiro nutriente mais consumido no Brasil.

Raij (2011) destaca que o potássio é absorvido pelas plantas na forma iônica K^+ , sendo o teor lábil o nutriente disponível que se encontra em equilíbrio na solução do solo. O autor também destaca que sais de potássio, geralmente, apresentam alta solubilidade e que seu deslocamento se dá, principalmente, por difusão e, em menor proporção, por fluxo de massa. Lopes e Guilherme (2000) ressaltam que fertilizantes onde a absorção de nutrientes se dá, principalmente pelo mecanismo de difusão a localização no espaço em que ocorre esse processo é essencial para sua absorção pelas plantas e que esses, devido à maior solubilidade, devem ser aplicados de forma mais localizada, próximo às raízes.

A semeadura direta, onde não ocorre o revolvimento do solo, vem sendo fertilizada em grande parte por aplicação em superfície (Balastreire e Coelho, 2000). Ciotta et al. (2002) destaca que essa forma de aplicação favorece o acúmulo de K nas camadas superficiais do solo (0-2 cm). Ainda, Balastreire e Coelho (2000) destacam que a aplicação em superfície é a tendência no Brasil para médias e grandes propriedades, pois utilizam a agricultura de precisão como sistema de manejo devido à maior facilidade de aplicação de insumos, rendimento operacional, dentre outros fatores.

Na literatura é possível encontrar vários estudos que evidenciam teores de potássio extraído pelo método Mehlich-I muito acima do recomendado. Entretanto são raros os estudos que demonstram o comportamento do potássio de forma estratificada, ou seja, sua distribuição no solo em camadas na profundidade de 0 a 40 cm, conforme demonstrado na metodologia. Vale ressaltar que essa pesquisa está focada em descrever como se dá padrão de distribuição de K no perfil do solo na camada 0 a 40 cm, tendo em vista que, conforme Raij (2011), a

camada arável (20 cm) é pouco representativa do perfil do solo, pois as raízes extrapolam essa profundidade, podendo o nutriente ser absorvido em maior profundidade pelas raízes.

Resumidamente, estima-se que o acúmulo superficial de K promovido pela aplicação em superfície, evidenciado na literatura, é resultado de uma falha no manejo da adubação potássica, o que limita sua disponibilidade as plantas promovendo maior custo com insumos ao produtor. Também, podem ocorrer perdas de K por escoamento superficial, mesmo que geralmente pequena, quando a entrada de K é maior que a sua capacidade de retenção e de absorção pelas plantas (Bell et al., 2021). As perdas de K podem ocorrer também com o K^+ associado a partículas do solo, principalmente em minerais 2:1, via transporte em sedimento diante chuvas intensas, promovendo a transferência desses nutrientes para os cursos d'água (Bortoluzzi et al., 2013).

Do ponto de vista agrônômico, Raij (2011) destaca que aplicações elevadas de K podem promover danos às plantas devido ao efeito salino do KCl. Para Meurer (2000) o aumento do íon K^+ em solução pode deslocar outros íons como Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} pelo princípio da ação de massas. Também, em condições em que há excedente de K ocorre reposição do íon na entrecamada dos minerais e da fração lábil o que promove um consumo de luxo pelas plantas (Moterle et al., 2016). Sparks (1987) salienta que a adubação faz com que os solos agrícolas fiquem num estado de desequilíbrio em relação à dinâmica do K^+ , proporcionando, segundo Curi et al. (2005) um aumento de K na solução e na fração lábil devido a adubação potássica o que favorece a migração de K para os espaços das entrecamadas dos minerais 2:1.

Nesse contexto, ao ficar retido nos espaços entrecamadas o K pode atuar como um tampão. Através desse mecanismo de retenção é possível ocorrer a liberação de formas de K, fortemente retidas adsorvidas no espaço das entrecamadas e formas lábeis, fracamente retidas nos grupos funcionais (Kaminski et al., 2007) o que implica em baixas respostas a aplicação de fertilizantes potássicos (Brunetto et al., 2005) e alterações na mineralogia do solo que contém K (Bortoluzzi et al., 2005). Ainda, Carey et al. (2003) salientam que a cinética de liberação do K apresenta mais de um mecanismo de liberação, ou seja, o K está associado a fase sólida com distintas energias o que implica que a liberação de K para a solução se dá de forma gradual conforme as condições do meio.

De acordo com Sparks (1987) é preciso compreender a dinâmica entre o K e a fase sólida para prever o seu destino e, assim, obter bons resultados na aplicação da adubação potássica. Nesse aspecto, Chorover e Sposito (1994) salientam que a carga superficial das partículas afeta a adsorção, dissolução e reações coloidais influenciando no transporte e

destino de solutos, nas taxas de intemperismo químico e erodibilidade dos solos. Ainda, Alleoni, Mello e Rocha (2009) destacam que as propriedades eletroquímicas, que são influenciadas pela fase sólida do solo, são fundamentais para explicar o comportamento dos elementos na solução do solo e sua biodisponibilidade. Assim, devido à dinâmica existente entre o K e o sistema solo, a disponibilidade do elemento às plantas pode ficar limitada, pois o mesmo é dependente de vários atributos que podem indisponibilizar o íon, temporariamente ou em longo prazo.

Visando adequar essas questões e otimizar as doses de aplicação potássica foi estabelecido, a partir de valores de CTC a pH 7,0 do solo, e das exigências das culturas um valor de nível crítico (NC) de K. ONC foi definido com base em valores de calibração a campo, ou seja, da relação existente entre o teor disponível de nutriente no solo e o rendimento das culturas (Gatiboni, Silva e Anghinoni, 2016). Ainda, conforme os autores através do NC é possível obter rendimento próximo a máxima eficiência econômica (90%), sendo que acima desse valor a resposta das culturas a adição de fertilizantes pode ser baixa ou nula, podendo restringir a produtividade de algumas culturas.

Nesse contexto, Rajj (2011) destaca que o K é o nutriente mais reciclado pelas plantas, podendo ser absorvido em maior profundidade pelas raízes e liberado através da decomposição em superfície. Devido a isso, tanto em solos cultivados como em solos em que há pouca interferência antrópica pode ocorrer o acúmulo de K nas camadas superficiais decorrente da aplicação de fertilizante ou da reciclagem de nutrientes pela vegetação (Bell et al., 2021). Por outro lado, na medida em que se aprofunda no solo no perfil a tendência é reduzir o teor de K devido à menor quantidade de matéria orgânica, menor acesso dos fertilizantes minerais e menor disponibilidade do elemento pela fase mineral. Isso nos mostra que o manejo da adubação potássica em solos cultivados apresentam alguns vieses contraditórios, pois o acúmulo superficial de K está em desacordo com o padrão de distribuição do sistema radicular das culturas o que demonstra a demanda por estudos mais detalhados que esclareçam como se dá a dinâmica do K no perfil do solo.

É diante desse cenário que buscaremos explicar a dinâmica do K no sistema solo em solos que estão sob sistema de plantio direto (SPD). Assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar como se dá o padrão de distribuição dos teores de K no perfil do solo em solos SPD e em solos com baixa pressão antrópica. Além de resultados científicos, essa pesquisa visa à integração entre a universidade e o campo através do contato direto com os produtores rurais e a explanação de atividades realizadas no meio científico com vistas à melhoria social, econômica e ambiental do setor agrícola, bem como divulgar o trabalho realizado pela

universidade para a sociedade. Dessa forma, os resultados obtidos permitirão, do ponto de vista da ciência e tecnologia, revisitar as práticas de adubação potássica em SPD demonstrando um padrão de distribuição do K no perfil do solo em solos sob baixa pressão antrópica e em solos sob SPD de modo a fornecer subsídios para um manejo adequado da adubação potássica.

2 HIPÓTESES

As hipóteses são que:

- (a) o padrão de distribuição dos teores de potássio no perfil em solos sob SPD segue o padrão de distribuição dos solos sob baixa pressão antrópica, mas com magnitudes quanto aos teores nas camadas superficiais;
- (b) o padrão de distribuição dos teores de potássio no perfil em solos sob SPD e nos solos com baixa pressão antrópica apresentam um aumento no teor de potássio no solo na camada 0-10 cm e uma diminuição nos teores no solo das camadas mais profundas;
- (c) nos solos sob SPD está havendo um acúmulo de K no solo em formas não extraídas pelo método oficial usado pelo NRS/SBCS;
- (d) a fertilização potássica nos solos sob SPD está resultando em teores de K lábil muito acima do nível crítico (NC) recomendado pelo Manual de adubação e calagem do Rio Grande do Sul (2016).

3 OBJETIVO PRINCIPAL

O presente estudo tem como objetivo avaliar como se dá o padrão de distribuição de potássio nos solos sob SPD confrontando-o com o que ocorre nos solos sob baixa pressão antrópica.

3.1 Objetivos específicos

- Avaliar se nos solos sob SPD ocorre um aumento no teor de potássio no solo na camada 0 a 10 cm e uma diminuição nos teores em camadas inferiores comparativamente aos solos sob baixa pressão antrópica;
- Avaliar se nos solos sob SPD está havendo um acúmulo de K no solo em formas não extraídas pelo método oficial usado pelo NRS/SBCS;

- Diagnosticar se a fertilização potássica nos solos sob SPD está de acordo com o nível crítico preconizado pelo Manual de calagem e adubação do RS e SC (2016).

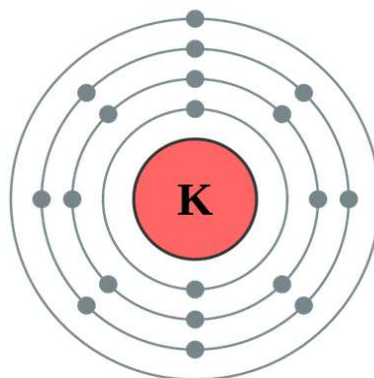
4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Caracterização química do elemento potássio

De acordo com Sparks e Huang (1985) o potássio apresenta um papel admirável no solo devido às relações existentes entre a fase sólida e sua absorção pelos vegetais, apresentando natureza prontamente solúvel, rapidez em tornar-se insolúvel e inalterabilidade na fase sólida do solo.

Sposito (2008) destaca que uma característica importante no comportamento biogeoquímico dos metais é a classe a qual o elemento pertence, sendo que o K pertence à classe 1A, na qual os elétrons são retirados da camada de valência com maior facilidade e tendem a formar complexos com o oxigênio. Segundo Essington (2003), todos os metais alcalinos da classe 1A ocorrem como cátions monovalentes, ou seja, existem apenas no estado de oxidação 1^+ . Ainda, conforme o autor a massa atômica do K é de 39,098, o número atômico é 19 sendo sua distribuição eletrônica demonstrada na figura 1.

Figura 1 - Distribuição eletrônica do elemento K



Fonte: Wikipedia (2021).

Nesse contexto, Raij (2011) destaca que o potássio é um elemento abundante em rochas, principalmente, na estrutura cristalina dos minerais. Dentre os elementos necessários as plantas é o que apresenta maior raio não hidratado (raio 0,133 nm); raio hidratado 0,331 nm; polarizabilidade igual a 0,088 nm³ e o número de íons de oxigênios coordenados ao K nas

estruturas minerais é alto (8 ou 12) (Sparks e Huang, 1985). Ainda, Sparks (1987) destaca que íons com maior polarizabilidade apresentam preferência nos sítios de troca.

Segundo Sparks e Huang (1985) o alto número de coordenação contribui para que a força de cada ligação K-O seja relativamente fraca. Isso se deve ao Princípio da Valência eletrostática (segunda regra de Pauling) onde a valência do cátion deve ser dividida igualmente entre todos os ânions coordenados ao cátion (Essington, 2003). Ainda, o autor destaca que a ligação K-O apresenta caráter predominante iônico (84%) decorrente da diferença de eletronegatividade entre os elementos envolvidos.

4.2 Principais formas do potássio no solo

O potássio pode ser encontrado na solução do solo e nas formas estrutural, moderadamente lábil e lábil no solo, sendo as formas lábeis e em solução geralmente pequenas (Sparks e Huang, 1985). Conforme Curi, Kampf e Marques (2005) as formas de K no solo são dependentes da rocha matriz, das condições ambientais do solo e do estágio de intemperismo, sendo essas variáveis conforme o tipo de solo e a profundidade no perfil do solo.

Melo, Castilhos e Pinto (2009) destacam que o K estrutural corresponde a maior fração de K no solo presente no interior da estrutura de minerais como a biotita e a muscovita, ou seja, contido nas entrecamadas de minerais com forte ligação, não permitindo a entrada de água e outras moléculas polares, logo, a liberação de K é muito lenta e dependente de reações de dissolução e da atuação do intemperismo químico.

O K moderadamente lábil representa as formas não prontamente disponíveis às plantas apresentando um processo reversível lento, pois está retido por forças coulombicas nos poros ditrigonais, entre as lâminas tetraédricas adjacentes nos minerais 2:1, como a vermiculita e minerais de argila interestratificados (Melo, Castilhos e Pinto, 2009). Ainda, segundo os autores, esta fração pode ser encontrada em zonas de cunha com média seletividade, fendas com média a alta seletividade, sendo esse, disponível somente através do intemperismo químico. Para Moterlle et al. (2016) mesmo solos muito intemperizados podem apresentar minerais 2:1 recalcitrantes que, por sua vez, representam uma fonte importante de K moderadamente lábil potencialmente disponível para as culturas.

O K lábil é considerado a fonte de nutriente disponível para as plantas, sendo esse extraído pela solução Mehlich-I (Meurer e Rosso, 1997). Essa fração corresponde aos íons K^+ associados aos grupos funcionais de carga variável, como o grupo silanol e aluminol, que

apresentam coordenação incompleta por estarem associados a um átomo de Si e a um de Al (Melo, Castilhos e Pinto, 2009).

A fração solúvel é muito pequena para atender a demanda de uma cultura carecendo de reposição pela fase mineral e orgânica, que por sua vez também não são suficientes para suprir a demanda das culturas (Sparks e Huang, 1985). Dessa forma, na medida em que ocorre a absorção pelas raízes forma-se um gradiente de concentração, favorecendo a liberação de K lábil e moderadamente lábil para a solução do solo (Curi, Kampf e Marques, 2005).

Melo, Castilhos e Pinto (2009) destacam que alguns solos do RS apresentam valores médios de K em solução de 0,07%; 0,9% de K lábil; 2,1% de K moderadamente lábil e 96,3% de K estrutural sendo os dois últimos considerados como reserva de longo prazo.

4.3 Principais reações do potássio no solo

Sposito (2008) destaca que dentre os elementos mais abundantes no solo estão o O, Si, Al, Fe, C e o K em ordem decrescente de quantidade. Por conseguinte, é a partir desses elementos que se formam as unidades básicas dos minerais, os tetraedros e octaedros, e a configuração dessas unidades, associada às condições do meio, são fatores fundamentais para definir a reatividade e a mobilidade dos nutrientes no solo. Nesse sentido nos itens a seguir será abordado os possíveis locais em que o K pode ser encontrado no solo, bem como os aspectos principais de suas reações nesse sistema buscando descrever seu comportamento no perfil do solo.

4.3.1 Potássio na solução do solo

A solução do solo é constituída de água e solutos e está em contato íntimo com a superfície dos colóides onde ocorre a interação entre ambos em função das forças de atração que atuam na interface sólido-líquido (Alleoni et al., 2009). Na solução do solo o K é transportado para as raízes através da difusão e do fluxo de massa, sendo essa fração muito pequena, portanto insuficiente para atender a demanda de uma cultura (Sparks e Huang, 1985).

Ao adicionar um íon carregado na solução do solo a estruturada água sofre uma perturbação e suas moléculas são ordenadas em esferas de hidratação que atuam dissipando e protegendo a carga do íon de outros íons da solução o que diminui a interação eletrostática entre ambos (Essington, 2003). Para o autor, esse comportamento é um meio de aquisição de

ordem no sistema e ocorre através da formação das esferas de hidratação decorrente da hidratação dos íons em solução.

O potássio apresenta alta solubilidade (Raij, 2011), permanecendo como cátion hidratado na forma $[K(H_2O)_4]^+$ não sendo hidrolizado na faixa normal de pH do solo (Essington, 2003). Nesse caso, o K se encontra como um íon livre em solução, com o metal formando um complexo de solvatação onde a água atua como ligante. Buscando uma condição de equilíbrio na interface sólido-solução pode ocorrer a formação de um CEE onde a adsorção ocorre sem a perda das moléculas de água da esfera de coordenação do íon ou um CEI onde tem-se a perda de uma ou mais moléculas de água da esfera de coordenação do íon.

Assim, quando a substituição isomórfica ocorrer nos tetraédros (Si^{+4} por Al^{+3}), o excesso de carga negativa é gerada mais próxima a superfície da cavidade siloxana (CS), portanto possui uma forte atração por cátions e moléculas polares apresentando um caráter ligeiramente hidrofóbico (Sposito, 2008). Ainda, Schroeder (1984) destaca que íons pequenos são fortemente hidratados, enquanto íons maiores são fracamente hidratados o que resulta numa maior afinidade de adsorção dos últimos aos colóides do solo, sendo retidos mais fortemente, pois suas cargas serão menos atenuadas pelas águas de hidratação.

Para Sposito (2008) cátions metálicos que apresentam raio iônico maior possuem um campo elétrico menor e assim, estão menos propensos a permanecer solvatados durante a complexação pelos grupos funcionais; além disso, um raio iônico maior propicia uma configuração de elétrons mais lábil o que aumenta a tendência de um cátion metálico polarizar e formar ligação covalente em resposta ao campo elétrico de um grupo funcional reativo. Ainda, estudos com simulações de dinâmica molecular de solvatação e mobilidade de íons em solução aquosa levam a crer que cátions grandes, como o K^+ , interagem com as moléculas de água como os hidrocarbonetos, apresentando uma tendência hidrofóbica que seria a base para o K se ligar diretamente ao mineral argila (Sposito, 1999).

Nesse sentido, a série de afinidade de adsorção relativa para o Grupo IA, definida a partir do raio iônico é dado por: $Cs^+ > Rb^+ > K^+ > Na^+ > Li^+$ (Sposito, 2008). Bell et al. (2021) destaca que cátions monovalentes têm energias de hidratação mais fracas que cátions divalentes, sendo assim, liberam com mais facilidade as moléculas de água nas entrecamadas dos minerais.

Dessa forma, a reação do íon K^+ com grupos funcionais dificulta sua permanência como cátion hidratado na solução do solo, pois características periódicas do elemento, dentre elas o raio iônico e o estado de oxidação favorecem sua desidratação e associação com os GF reativos da fase sólida do solo.

4.3.2 Potássio na estrutura dos minerais primários

A fonte primária de K nos solos tem origem em minerais primários como os feldspatos e micas sendo esses herdados de materiais originais (Oborn et al., 2005). Os minerais primários resultam da desintegração física da rocha matriz podendo ser encontrado, principalmente nas frações silte e areia, sendo que o intemperismo destes minerais, dentre eles a dissolução dos feldspatos, contribuem na fertilidade do solo (Sposito, 2008). Ainda, a susceptibilidade dos minerais silicatados primários ao intemperismo é dependente do ambiente, do tamanho das partículas e da estrutura química cristalina dos minerais (Essington, 2003).

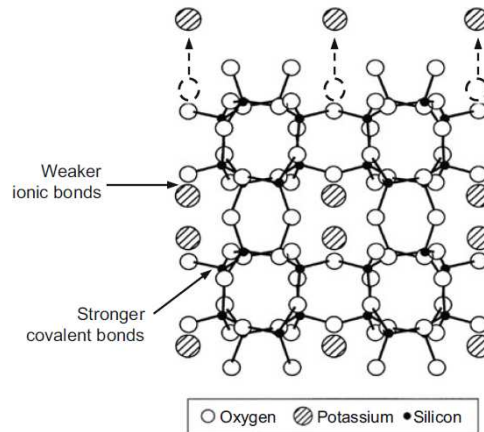
As principais reações nos minerais primários são a hidrólise e a protonação, onde reações químicas com a água e prótons promovem a dissolução dos minerais primários, formando produtos na fase sólida e espécies dissolvidas na solução do solo, sendo as últimas passíveis de serem lixiviadas (Sposito, 2008).

O feldspato é um mineral primário de maior estabilidade devido ao seu processo de formação se dar em temperatura de magma mais baixa, cristalizando-se mais tardiamente, assim, o feldspato é formado numa temperatura semelhante ao seu ambiente de intemperismo o que o torna mais estável (Essington, 2003). Segundo o autor, fatores como número de ligação tetraédrica, presença de cátion como o Si e o Al e outros fatores estruturais são determinantes na estabilidade dos minerais.

A estrutura dos feldspatos é formada por anéis de tetraedros com quatro unidades básicas, sendo esses ligados entre si para formar um tipo de arranjo em favo de mel (figura 2) (Huang e Sparks, 1985). Ainda, conforme os autores um em cada quatro átomos de Si na estrutura do feldspato é substituído pelo Al conferindo uma carga negativa à estrutura, que é neutralizada pela associação com outros íons carregados positivamente, como o K^+ .

Nesse sentido, o K ocorre em toda a estrutura mineral nos feldspatos, conforme observado na figura 2 (Bell et al., 2021), sendo o grau de estabilidade do mineral determinado pela ligação mais fraca da estrutura, geralmente de caráter iônico, sendo essas ligações as primeiras a serem quebradas em um ambiente aberto (Essington, 2003). Assim, o K contido na superfície das partículas dos feldspatos é liberado mais prontamente (Castilhos e Meurer, 2001).

Figura 2 - Estrutura do mineral feldspato (ortoclásio) e os tipos de ligações presentes. As setas indicam a dessorção de cátions K^+ de suas posições originais na superfície externa da estrutura do tectossilicato, indicado por círculos com linhas pontilhadas.



Fonte: Bell et al. (2021). Adaptado de Fenter et al. (2000).

Segundo Britzke (2012) a fração do K estrutural está contida nos minerais primários, predominantes nas frações mais grosseiras. Ainda, várias evidências demonstram que os feldspatos podem contribuir significativamente com K disponível para plantas a partir da fração areia, portanto a composição mineralógica deveria ser considerada futuramente nas recomendações, bem como a contribuição dos feldspatos (Bell et al., 2021).

Os minerais micáceos também podem contribuir com K^+ para a solução do solo. Segundo Mello et al. (2009) a liberação de K desses minerais se dá pela transformação em minerais 2:1 expansivos decorrente da troca por cátions hidratados que ocorre através do intemperismo de borda ou camada; também, a liberação de K pode se dar pela dissolução das micas podendo liberar outros elementos, como o Fe e o Mg.

Dessa forma, de acordo com Huang e Sparks (1985) para que ocorra um crescimento satisfatório das plantas é preciso que haja a liberação de K das reservas minerais, como as micas e os feldspatos. Ainda, os autores destacam que as reservas de K, tanto dos minerais como da matéria orgânica, devem ser continuamente repostas, pois a humanidade depende fortemente delas para a nutrição potássica de seus cultivos.

4.3.3 Potássio presente nos minerais 2:1

Os principais minerais secundários que contêm potássio são os minerais 2:1, como a illita e vermiculita, bem como minerais interestratificados (Raij, 2011). Os minerais 2:1

apresentam grande área superficial específica (ASE) devido à capacidade de expansão de alguns minerais na presença da água, onde através da exposição da superfície internamente, tem-se a geração de carga permanente, principalmente através substituições isomórficas (SI) (Alleoni et al., 2009). Ainda, segundo os autores, a superfície de exposição das cargas elétricas das partículas dos colóides do solo depende do tipo e do teor dos constituintes minerais e orgânicos.

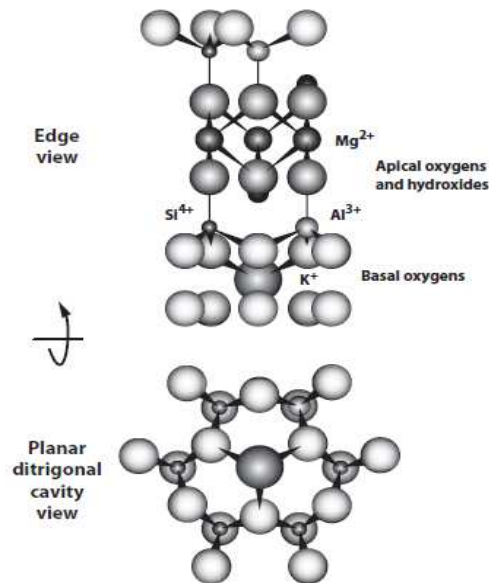
Nesse contexto, o sistema solo apresenta grande complexidade e segue algumas leis que foram sumarizadas por Barrow (1999): o solo apresenta superfícies carregadas devido ao residual de carga originada a partir da formação dos grupos funcionais reativos, sendo assim, apresenta grande heterogeneidade e está em um processo de constante transformação, movido por reações contínuas com grupos funcionais, numa busca incessante pelo equilíbrio. A partir desse sistema dinâmico que são gerados mecanismos para aquisição de maior estabilidade, dentre eles se destacam os complexos.

De acordo com Sparks (2003) através da interação entre um GF de superfície e um íon ou molécula da solução do solo forma-se uma estrutura molecular estável chamada de complexo de superfície. Segundo Essington (2003), os complexos são um meio de aquisição de ordem no sistema e ocorrem através da formação das esferas de hidratação, decorrente da hidratação dos íons em solução.

Nesse sentido Sparks (2003) destaca que os complexos podem ser de dois tipos principais, complexo de esfera externa (CEE) e complexo de esfera interna (CEI). O CEI é formado quando o ligante desloca uma água de hidratação da esfera de coordenação (esfera de hidratação primária) do cátion metálico, enquanto um CEE é formado quando não ocorre o deslocamento de uma água primária de hidratação, no entanto a associação química do CEE é dependente da atração eletrostática para manter a estabilidade (Essington, 2003).

Sposito (2008) salienta que a afinidade de um metal livre por um adsorvente do solo aumenta com a tendência do cátion em formar CEI, sendo que a associação entre o K^+ e a cavidade siloxana (CS) com SI nos tetraedros apresenta estabilidade e a combinação entre a carga gerada nessa cavidade e o raio do íon K^+ são a base para o termo fixação de K nas vermiculitas (figura 3).

Figura 3 - Complexo de esfera interna com o K^+ numa vermiculita trioctaédrica em visão lateral e plana na cavidade siloxana ditrigonal.



Fonte: Essington (2003)

De acordo com Kampf (2012) a formação da CS relaciona-se com o arranjo da lâmina tetraedral e octaedral formando camadas, onde os tetraedros são ligados entre si por três oxigênios basais que dá origem a uma estrutura hexagonal ou ditrigonal, sendo esta unida por oxigênios basais compartilhados formando uma lâmina que constitui a CS. Essa lâmina é caracterizada por uma distorção entre os O na simetria hexagonal do mineral (Sposito, 2008) e conforme Zhang e Zhao (1997) a CS gera uma carga elétrica permanente, através da SI do átomo de Si pelo Al nos tetraedros e/ou o Al por Mg ou Fe nos octaedros, dando origem a um residual de carga negativo.

Nesse aspecto, o elemento K apresenta algumas características que favorecem sua adsorção à fase sólida. Essington (2003) salienta que o K^+ possui potencial para formar CEI baseado em alguns fatores: a) a substituição isomórfica nos tetraedros que promove o deslocamento das águas de hidratação do íon K^+ por influência dos oxigênios reativos; b) íon K^+ possui um valor de entalpia menos negativo que outros cátions monovalentes, como o Na^+ , por isso a água de hidratação do K^+ é mais fracamente retida; c) e o diâmetro do íon K^+ ser 0,27 nm, semelhante ao da CS (0,26 nm).

Além disso, Sposito (2008) destaca que o comportamento biogeoquímico dos metais depende de alguns fatores importantes como o potencial iônico (PI) e a classe a qual o elemento pertence. O potencial iônico refere-se à valência do cátion dividido pelo seu raio iônico, onde cátions metálicos com PI menor que 30, como o potássio ($1/0,138 = 7,2 \text{ nm}^{-1}$)

tendem a estar em soluções como cátions livres, ou seja, solvatados (Sposito, 2008). Segundo o autor isso decorre da repulsão columbiana entre o cátion metálico e a molécula de água sendo que para PI baixos (raio iônico maior) o campo coulumbiano positivo estará repelindo os prótons da molécula d'água, sendo que na medida em que o raio iônico diminui o campo coulumbiano se torna mais forte podendo repelir um ou dois hidrogênios promovendo a hidrólise da molécula de água. Outra característica importante no comportamento biogeoquímico dos metais é a classe a qual o mesmo pertence, sendo que o K pertence à classe A, a qual os elétrons são retirados do núcleo com maior facilidade e tendem a formar complexos com o oxigênio (Sposito, 2008).

Nesse sentido, através da SI tem-se um excesso de carga negativa permanente, em especial nos minerais 2:1, as quais podem ser neutralizadas por cátions não trocáveis, como o íon K^+ no espaço entrecamadas de minerais como a illita e minerais interestratificados (Schroeder, 1984). Quando a SI ocorre nos octaedros a distribuição do déficit de carga ocorre em aproximadamente 10 O basais da superfície siloxana (Azevedo e Torrado, 2009). Por outro lado, quando ocorre a SI nos tetraedros, por exemplo, na mica, o residual de carga é distribuído entre três O basais sendo uma distribuição localizada, ou seja, ocorre uma ligação mais forte com cátions ou moléculas dipolares o que permite a complexação do K^+ , pois seu diâmetro iônico é similar ao da CS (Kampf, 2012).

Melo, Castilhos e Pinto (2009) destacam que a força de ligação nos minerais 2:1, que apresentam alta densidade de carga negativa estrutural, excede a força de hidratação do íon resultando na desidratação do K^+ e, conseqüentemente, ocorre um ajuste do cátion nos retículos ditrigonais da lâmina tetraédrica colapsando o mineral através da diminuição da distância basal do espaço entrecamadas, impedindo o acesso momentâneo da solução do solo entre as estruturas 2:1 do mineral.

Segundo Azevedo e Torrado (2009), minerais 2:1 como as vermiculitas e esmectitas possuem capacidade de se expandir expondo o espaço entrecamada o que aumenta a sua reatividade, no entanto quando a carga na camada é muito alta o mineral tende a reter com mais força o íon K perdendo sua expansibilidade. Ainda, Bell et al. (2021) destacam que nos filossilicatos a contração dos minerais favorece a desidratação do íon K^+ favorecendo sua fixação, enquanto a expansão do mineral permite sua rehidratação tornando-o dessorvível e disponível as plantas.

Outro mecanismo bastante estudado na retenção de elementos pela fase sólida é a histerese, onde se tem a perda de elementos para a fase sólida devido à distinção entre os fenômenos de adsorção e dessorção. Isso se dá, conforme Essington (2003), pois a adsorção

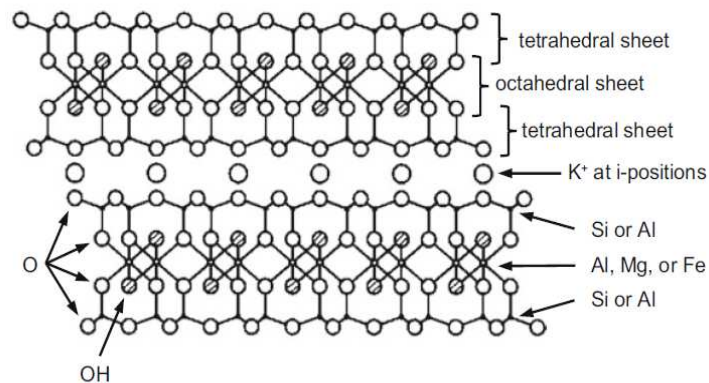
apresenta uma fase inicial rápida em que ocorre a retenção de elementos seguida de uma fase mais lenta e irreversível, onde pode ocorrer a formação de complexo de esfera interna de caráter covalente.

Curi, Kampf e Marques (2005) destacam que o comportamento das formas de K no solo se distingue na mobilidade da solução para a forma lábil e vice versa, enquanto a entrada é rápida, a saída do K das entrecamadas dos minerais é lenta e depende da concentração da solução. Para Spark (2003) a troca de ions K^+ se dá de forma mais lenta que Ca^{+2} e Mg^{+2} devido ao seu menor raio hidratado que permite o encaixe dos íons nos espaços intercamadas favorecendo o colapso do mineral, dependendo da difusão entre as partículas para que ocorra o mecanismo de troca. Ainda, Castilhos e Meurer (2001) salientam que o K liberado mais prontamente é proveniente de sítios de adsorção menos específicos, contido nas bordas no espaço entrecamadas de minerais 2:1, enquanto o K contido no centro dos minerais 2:1 depende da difusão do centro para as bordas do mineral.

Por outro lado, o mecanismo de retenção pode atuar como um tampão de potássio no solo, liberando formas de K moderadamente lábil, fortemente retidas, e lábeis, fracamente retidas nos grupos funcionais (Kaminski et al., 2007). Devido a isso, muitas vezes, tem-se baixas respostas a aplicação de fertilizantes potássicos (Brunetto et al. 2005) e, também, podem ocorrer alterações na mineralogia do solo que contém potássio (Bortoluzzi et al., 2005). De acordo com Moterle et al. (2019) a presença de minerais 2:1 podem atuar tanto como fonte como sumidouro de K no solo de acordo com o a fertilização utilizada pelo produtor e mesmo solos intemperizados, com baixos teores de minerais 2:1, interferem na dinâmica do K, pois podem conter argilominerais reativos na sua fase sólida.

Nesse sentido, Bell et al. (2021) destacam que nos minerais filossilicatados, como as micas, suas camadas são unidas pelo íon K^+ não hidratado e ocupam as cavidades ditrigonais nas folhas tetraédricas. Nesses a ligação mais fraca envolve um cátion, geralmente K^+ , que liga os átomos basais de oxigênio de uma lâmina tetraédrica aos oxigênios de outra lâmina tetraédrica adjacente, conforme observado na figura 4 (Essington, 2003).

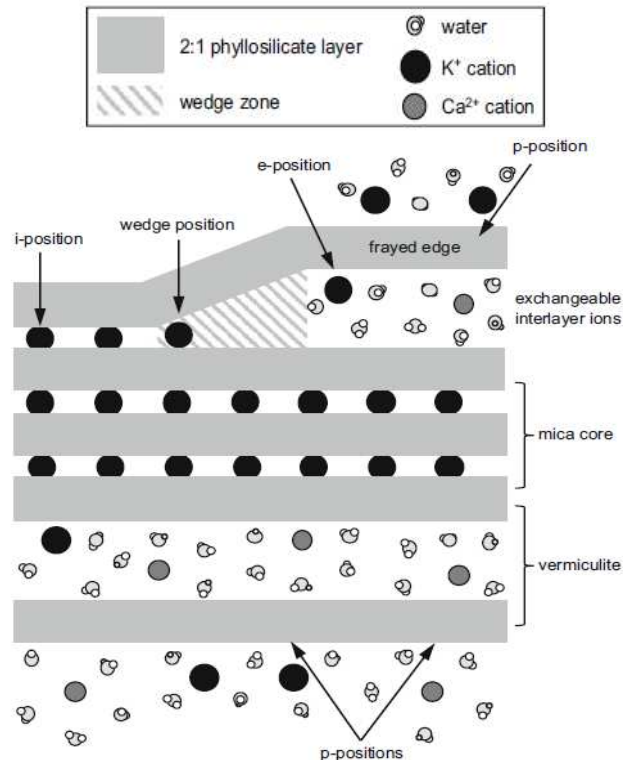
Figura 4 - Diagrama representando a estrutura de uma mica dioctraetral.



Fonte: Bell et al. (2021), adaptado de Schulze (1989).

Dentro desse contexto, Bell et al. (2021) resumem possíveis locais onde o potássio pode ser encontrado num mineral em processo de intemperização (figura 5): nas posições *p*, superfícies planas de minerais filossilicatos onde o K⁺ pode ser adsorvido hidratado, sendo fracamente retido e em equilíbrio rápido e dinâmico com a solução do solo; as posições *e* e *i*, mostram maior afinidade para K⁺ e uma interação mais lenta, sendo que em *e* o K⁺ é preferencialmente adsorvido no espaço entrecamadas hidratado, podendo difundir rapidamente em curtas distâncias para fora da rede cristalina e para a solução do solo, enquanto na posição *i* o K⁺ difunde-se lentamente, pois seu raio iônico e a baixa energia de hidratação permitem o encaixe no espaço entre as lâminas tetraédricas. Ainda, as zonas de cunha, *wedge position*, que ocorrem no espaço entrecamadas, onde inicia a separação das camadas devido às forças de solvatação podendo ocorrer a adsorção do K⁺ desidratado.

Figura 5 - Posições de adsorção K^+ para mica: borda desgastada e uma camada externa onde a mica se transformou em vermiculita. Superfície plana (posição p), intercamada (posição i), borda (posição e) e posições de cunha.



Fonte: Bell et al., 2021 (adaptado de Mengel, 1985; Mei et al., 2015; Rich, 1968).

Ainda, Bell et al. (2021) destacam que as posições p apresentam menor seletividade; a posição e obteve seletividade intermediária, enquanto a posição i apresenta maior seletividade para K^+ quando comparado com o Ca^{2+} .

Nesse sentido, Moterle et al. (2019) destacam que a ocorrência de argilominerais 2:1 em solos intemperizados, mesmo em pequenas quantidades, pode desempenhar um papel importante como tampões de potássio do solo, garantindo sua adsorção ou liberação de posições de adsorção de K moderadamente lábil. Ainda, como existe um equilíbrio entre os teores de K da solução, da fração lábil e moderadamente lábil, a diminuição dos teores da solução e da fração lábil promove a transformação do K moderadamente lábil em forma lábil, sendo assim, um bom método para avaliar K disponível deveria considerar a fração K moderadamente lábil (Wang et al., 2010).

Deste modo, a afinidade do K^+ por GF reativos do solo, bem como características do íon K^+ podem favorecer sua retenção a fase sólida através da formação de complexos, o que limita sua permanência na solução do solo e, conseqüentemente, sua percolação no perfil do solo influenciando sobre o comportamento do potássio no sistema solo. Também, o K é

encontrado em várias posições nos GF, dentre eles associado no espaço entrecamadas dos minerais que podem representar uma importante fonte potencial de K disponível para as plantas podendo ser considerada futuramente nas análises laboratoriais.

4.3.4 Potássio presente nos minerais 1:1, MO e óxidos

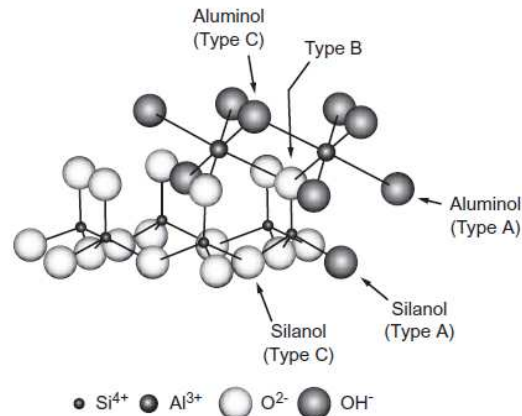
O potássio pode ser adsorvido a superfície de minerais associados a sítios carregados negativamente, como a MO, superfícies planas dos filossilicatos e superfícies dos óxidos de Fe e Al, sendo estes liberados em resposta a baixa concentração do íon na solução (Bell et al., 2021). Segundo Alleoni et al. (2009) em solos altamente intemperizados, o conteúdo de matéria orgânica é fundamental na definição da ASE e, conseqüentemente, na definição da densidade de cargas, pois estes solos contêm grande teor de componentes com alto grau de cristalinidade e de baixa ASE, como a caulinita e os óxidos de Fe e Al.

De acordo com Bell et al. (2021) em solos bem drenados pode ocorrer a oxidação do Fe^{2+} a Fe^{3+} diminuindo o residual de carga negativa líquida próximo aos GF. Segundo os autores esse desequilíbrio promovido pela oxidação do Fe pode resultar em sua liberação, o que favorece o enfraquecimento da estrutura do mineral e, conseqüentemente, a dessorção de K para a solução.

Segundo Azevedo e Torrado (2009) nas bordas dos minerais, tanto nos filossilicatos 2:1 como nos 1:1, há sítios ativos originados de O periféricos que não possuem sua valência completamente satisfeita e que podem se associar com H da solução do solo formando grupos OH. Segundo os autores, esses sítios ativos apresentam carga variável constituindo parcialmente a reatividade total dos minerais 2:1, apresentando maior importância em solos intemperizados onde há predomínio de caulinita e óxidos.

Nesse contexto, em solos altamente intemperizados os minerais silicatados do grupo 1:1, como a caulinita, predominante na fração argila, podem apresentar arestas quebradas com a exposição dos grupos silanol (Si – OH) e aluminol (Al – OH), apresentando carga variável, dependendo do valor do pH que dão origem a cargas elétricas (Alleoni et al., 2009) nos quais podem ocorrer a adsorção de cátions (figura 6).

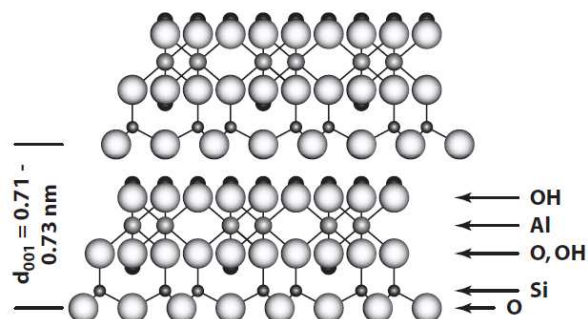
Figura 6 - Grupos funcionais aluminol e silanol na borda de um filossilicato: configuração do tipo A o oxigênio está coordenado individualmente; tipo B o oxigênio está coordenado triplamente e o tipo C o oxigênio está coordenado duplamente.



Fonte Essington (2003).

Segundo Essington (2003) os minerais 1:1, como a Caulinita (figura 7) apresentam pouca substituição isomórfica e as camadas são unidas por pontes de hidrogênio que conferem estabilidade ao mineral o que limita a separação das camadas, sendo assim, seu espaçamento entrecamadas não varia com as condições ambientais. Devido a essas características do mineral sua reatividade fica limitada as bordas e faces quebradas no mineral, onde de acordo com Essington (2003) o mineral suporta reações de protonação e deprotonação apresentando carga variável.

Figura7 - Estrutura 1:1 da Caulinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄].



Fonte Essington (2003).

Nesse contexto, o K⁺ pode ser encontrado no solo associado aos grupos funcionais de carga variável, ou seja, o grupo silanol e aluminol que apresentam coordenação incompleta

por estarem ligados a um átomo de Si e a um de Al e que correspondem ao K lábil (Melo, Castilhos e Pinto, 2009).

A MO do solo também apresenta papel fundamental na reatividade do solo, principalmente, a partir da dissociação do H dos grupos COOH, gerando um residual de carga negativa, onde ocorre a adsorção dos cátions sendo o grupo carboxílico determinante nas reações de sorção de cátions pela MO (Dick et al., 2009). Também de acordo com Castilhos e Meurer (2001) o ácido oxálico pode induzir a dessorção de potássio das frações areia, silte e argila numa fração próxima a 2,1% do K total, podendo ocorrer à liberação de K das frações moderadamente lábil e estrutural.

Dessa forma, o K pode ser adsorvido a qualquer GF reativo da fase sólida, ou seja, aos GF da MO ou da fase mineral, sendo que algumas propriedades particulares do elemento, dentre elas o raio iônico favorecem sua adsorção a fase sólida diminuindo seus teores em solução.

4.4 Potássio nos solos do sul do Brasil

Segundo Gatiboni et al. (2016) o nível crítico (NC) de potássio usado para a recomendação de adubação em solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina com CTC a pH 7,0 é de 60 mg kg⁻¹ para solos com CTC menor que 7,5 cmol_c dm⁻³; 90 mg kg⁻¹ para solos com CTC entre 7,6 e 15 cmol_c dm⁻³; 120 mg kg⁻¹ entre 15,1 a 30 cmol_c dm⁻³ e 135 para CTC maior que 30 cmol_c dm⁻³ para as culturas de grãos. A partir desses valores os resultados de análise de solo foram divididos em classes de disponibilidade, três delas abaixo do NC, “muito baixo”, “baixo” e “médio”, sendo o limite superior do nível médio considerado o NC, onde se obtêm 90% do rendimento máximo das culturas. Acima desse limite tem-se a faixa “alto” e a faixa “muito alto”, onde o solo pode apresentar valores excessivos de potássio (Gatiboni et al., 2016) (figura 8).

Figura 8 - Representação esquemática do estabelecimento das classes de fertilidade do solo em função da relação entre o teor do nutriente no solo e o rendimento relativo das culturas.



Fonte: Gatiboni et al. (2016).

Em experimento realizado por Brunetto et al. (2005) na área experimental do Departamento de Solos da UFSM- RS, localizada na região da Depressão Central sobre um Argissolo Vermelho distrófico arênico, foi possível obter alto rendimento de grãos e matéria seca com baixa dose de fertilizante potássico (50 kg ha^{-1} de K_2O), devido a presença da fração argila contendo minerais ilíticos e potássio em formas não trocáveis. Segundo os autores o nível crítico de K de 60 mg dm^{-3} de solo, estabelecido pela CFS-RS/SC, foi considerado adequado permitindo uma produtividade igual ou superior a 95% do rendimento máximo das culturas. Brunetto et al. (2005) ressaltam que as doses de reposição do K podem ser diminuídas quando os teores de K no solo estiverem acima do NC e quando o solo estiver na classe de disponibilidade muito alta não há necessidade de aplicação de fertilizantes potássicos.

Tiecher et al. (2017) em estudo realizado num Latossolo Vermelho muito argiloso no sul do Brasil concluíram que em solos sob SPD contínuo há 23 anos resultaram em maior fertilidade no solo em superfície (0–10 cm) em comparação com o plantio convencional. Conforme os autores, solos sob SPD acumulam forte gradiente de disponibilidade de nutrientes, principalmente nas camadas superficiais do solo, diminuindo abruptamente com a profundidade do solo quando comparado ao sistema de plantio convencional.

Em outro experimento de longo prazo conduzido a campo no sul do Brasil, durante um período de 15 anos com aplicação de diferentes doses de potássio, Moterle et al. (2016) concluíram que, tanto o desenvolvimento das culturas, como a fertilização potássica e as práticas de fertilização afetam a dinâmica do K e a mineralogia da fração argila, sendo que a depleção de potássio, decorrente da absorção do íon pela planta, diminuem os teores de K não

trocável e K disponível, no entanto não afetaram o K estrutural. Por outro lado, quando houve aplicação de altas doses de fertilizantes todos os compartimentos de K (K contido nas plantas, K lábil, K moderadamente lábil e K estrutural) foram restaurados (Moterle et al., 2016).

Nesse sentido, Bortoluzzi et al. (2005) em um experimento realizado em Santa Maria-RS, sobre um Argissolo Vermelho de textura francoarenosa/argilosa verificaram que os teores de K total, K moderadamente lábil e K lábil aumentaram com a adição de fertilizantes potássicos afetando a fase mineral, principalmente de minerais como a illita e minerais interestratificados, quando comparado com solos onde não houve a aplicação de fertilizantes potássicos. Em contrapartida, Moterle et al. (2019) em um experimento de longa duração realizado no Paraná, destacam que o cultivo agrícola sem o uso de fertilização potássica resultaram em rendimento limitado das colheitas, esgotando as reservas de K lábil e moderadamente lábil no solo.

Quanto a mobilidade do K no solo Rosolem et al. (2006) em um experimento realizado em casa de vegetação em vasos num Latossolo Vermelho Distroférrico de textura média e palha de milho em superfície verificou que com chuva de 50 mm a lixiviação do K^+ não ultrapassa 8 cm de profundidade no perfil do solo.

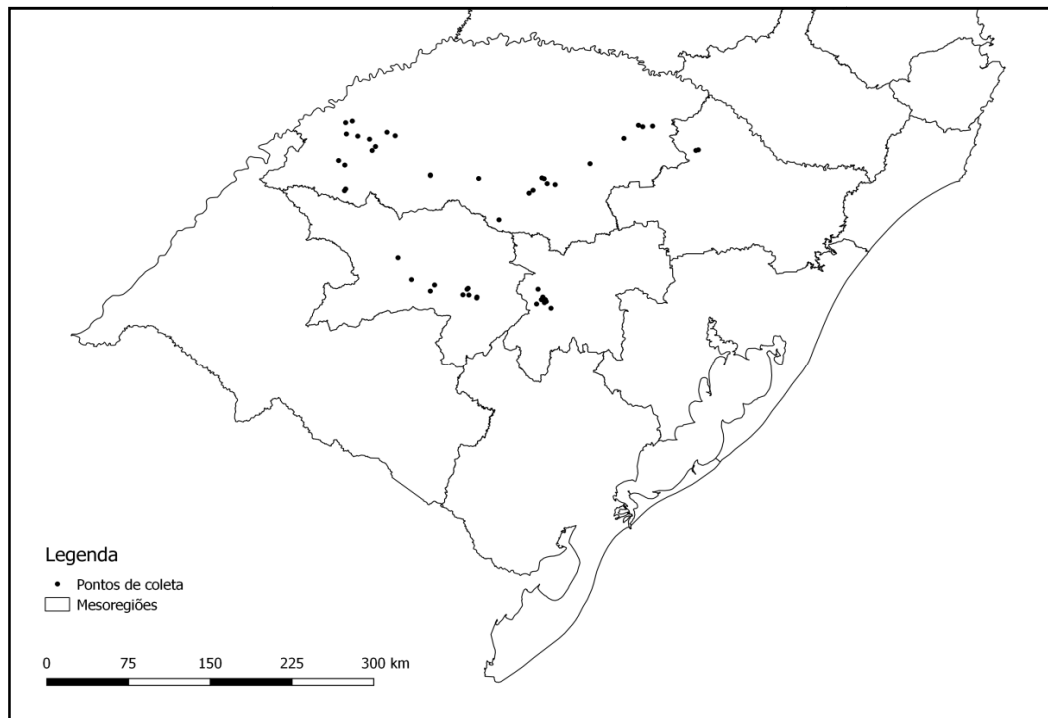
Dessa forma, Moterle et al. (2016) salienta que para que haja uma fertilização adequada, visando alta produção e baixa perda de K nos solos cultivados, é preciso levar em consideração a mineralogia do solo, bem como o histórico de adubação, evitando assim, o esgotamento das reservas de K do solo. Também, é preciso considerar o manejo da adubação para que o nutriente fique numa posição no solo de maior disponibilidade para a absorção pelas raízes.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Descrição dos locais de coleta

O estudo foi realizado por meio da coleta de amostras de solo em 24 municípios do Estado do RS: São Pedro do Sul, São Vicente do Sul, Bossoroca, São Luíz Gonzaga, Cerro Largo, Mato Queimado, Caibaté, Rolador, Campina das Missões, São Pedro das Missões, São Pedro do Butiá, Guarani das Missões, Novo Cabrais, Cachoeira do Sul, Santa Maria, Tupanciretã, Quinze de Novembro, Ibirubá, Selbach, Tapera, Ernestina, Tapejara, Ibiçá e Lagoa Vermelha. Esses municípios abrangem as regiões fisiográficas das Missões, Planalto Médio, Depressão Central e Serra Gaúcha (figura 9).

Figura 9 - Mapa com as mesorregiões do Estado do RS indicando os pontos de coleta de solo.



Fonte: Autor, 2021.

A escolha dos locais de coleta se deu pela representatividade regional na produção de soja sob sistema de plantio direto no RS, destacando-se os municípios com maior área cultivada com soja. Nesses municípios foram coletadas 50 unidades amostrais (U.A.) sendo quatro em área natural, ou seja, uma para cada região fisiográfica e 46 U.A. em áreas de lavouras sob SPD. Para cada U.A. foi feita a coleta de 19 amostras estratificadas no solo no perfil, totalizando 950 amostras.

5.2 Caracterização da coleta no perfil do solo

As amostras de solo foram coletadas no período de novembro de 2019 a abril de 2021 no solo no espaço entrelinha. Em cada uma das 50 U.A. foi aberta uma trincheira de 40 cm (largura) x 60 cm (profundidade) para a coleta de solo que foi realizada com colher de pedreiro adaptada em uma das faces da trincheira. Nos perfis de solo a coleta se deu nas seguintes camadas: 0-1; 1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-9; 9-10; 10-12,5; 12,5-15; 15-17,5; 17,5-20; 20-22,5; 22,5-25; 25-30; 30-35; 35-40 cm, totalizando 19 amostras em cada U.A.

5.3 Preparo das amostras, análises químicas e físicas do solo

O solo foi seco em estufa de circulação forçada a 55°C até obtenção de massa constante, destorroado e moído em moinho mecânico. Posteriormente, o solo foi passado em peneira com malha de 2 mm e acondicionado em frasco hermeticamente fechado para análise. As amostras de solo foram submetidas às seguintes determinações químicas: acidez ativa (pH em água - relação 1:1) e acidez potencial (pH TSM); teores de P e K disponíveis, teores de K moderadamente dessorvível, K estrutural e K total; Ca, Mg e Al trocáveis. Os teores de P e K disponíveis foram extraídos com solução Mehlich-I. O P foi determinado por colorimetria conforme Murphy e Rilley (1962) em espectrofotômetro de UV-Vis e o K determinado em fotômetro de chama, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Para as extrações de K por HNO₃ e HF foram submetidos a determinações químicas 12 solos, três de cada região sendo um solo sob baixa pressão antrópica e dois solos sob SPD. Para estes solos foi realizada determinação da classe textural a partir do método da pipeta, conforme Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Embrapa, 2007).

Os teores de K moderadamente dessorvíveis foram extraídos com HNO₃, conforme Helmke e Sparks (1996) sendo que a quantificação do potássio da entrecamada se dá pela diferença entre o K extraído por Mehlich-I do K extraído com HNO₃. Para a extração foi realizado o seguinte procedimento: um grama de solo foi pesado e transferido para erlenmeyer e adicionado 10 mL de HNO₃ 1 mol L⁻¹ sendo fervido durante 12 min. Em seguida a solução foi filtrada em papel filtro JP-41® em balão volumétrico de 50 mL e completado o volume com a solução HNO₃ 0,1 mol L⁻¹.

O K total foi extraído através de digestão ácida com HNO₃ e HF em microondas de digestão Microwave Accelerated Reaction System Model MARS de acordo com o método US-EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) 3052. Os teores de K estrutural foram obtidos a partir da diferença entre a extração por HF da extração por HNO₃.

Os teores de Ca⁺², Mg⁺² e Al⁺³ foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectroscopia de absorção atômica (Ca e Mg) e por titulometria (Al), conforme o método descrito por Tedesco et al. (1995). Assim, o índice SMP foi utilizado para estimar a acidez potencial [H+Al], e os teores de Ca e Mg, juntamente com os teores de H+Al, foram utilizados para calcular a CTC potencial que consta nos apêndices.

5.4 Análise estatística

Foi realizada a estatística descritiva indicando os valores médios, erro padrão e intervalo de confiança (95%) para os teores de K extraídos por Mehlich-I nas quatro regiões do RS. Esses valores foram avaliados levando em consideração o NC de cada perfil, ou seja, foram agrupados os solos a partir das camadas que se encontram com teores de K lábil acima do NC e os solos com valores abaixo do NC e feita à média dos mesmos. Através dos resultados foi possível avaliar em qual classe de disponibilidade cada região se encontra comparando-as entre si, bem como descrever a variabilidade dos teores médios de K lábil de cada região em relação ao NC. Também, com um intervalo de confiança de 95% foi possível inferir os valores médios de K lábil para cada região.

6 RESULTADOS

Os resultados foram agrupados primeiramente por regiões e em seguida pela CTC a pH 7,0 nos seguintes grupos: CTC < 7,5; CTC entre 7,6 a 15 e CTC >15,1. Numa primeira etapa são apresentados os resultados relativos a extração de K por Mehlich-I para todos os solos sob SPD tendo como ponto de referência o ponto zero, tido como o solo sob baixa pressão antrópica. Assim, os valores foram obtidos a partir da subtração dos teores de K lábil nos solos sob SPD dos teores de K lábil no solo sob baixa pressão antrópica para cada região e para cada camada de acordo com a profundidade no solo, ou seja, na camada 0 a 40 cm.

Neste modelo também são apresentados os teores de K lábil subtraídos do NC, ou seja, o NC de cada camada de solo é tido como ponto de referência nos gráficos. Dessa forma, para cada camada de solo de cada U.A. foi estabelecido o NC a partir da CTC a pH 7,0 de acordo com o Manual de calagem e adubação (CQFS-RS, 2016) e feita a subtração do valor do NC do solo da camada dos teores de K lábil dos solos sob SPD e dos solos sob baixa pressão antrópica no intervalo 0 a 40 cm. O objetivo é identificar para cada solo em qual camada o mesmo encontra-se no nível adequado de K lábil, bem como definir em quais camadas no perfil os solos encontram-se acima e abaixo dos níveis adequados de K lábil, identificando a distribuição de K ao longo do perfil.

Na sequência são demonstrados os teores de K moderadamente lábil para 12 solos, sendo três de cada região, dois solos sob SPD e um solo sob baixa pressão antrópica, agrupados pelos teores de K lábil no intervalo entre 300 e 400 mg kg⁻¹.

Na etapa subsequente, foi apresentada a estatística descritiva (média, erro padrão, e intervalo de confiança a 95%) para os teores de K extraído por Mehlich-I que se encontram acima e abaixo da camada de solo em que este atinge o nível crítico para cada perfil. Nesse caso, foi realizada a separação dos teores de K lábil que estão acima e abaixo do ponto de referência (NC) em cada solo e, a partir desses valores foram calculados os teores médios de K lábil para cada região, buscando descrever a variabilidade desses teores entre as regiões e entre os solos.

Na sequência são demonstrados os resultados comparativos entre os teores de K lábil, moderadamente lábil, K estrutural e K total para oito solos sob SPD comparativamente ao solo sob baixa pressão antrópica de cada região. Ainda, nos apêndices constam os valores médios de CTC para cada região, a classe textural, a caracterização dos sistemas de manejo adotado pelos produtores rurais, os teores de K lábil, a classe de disponibilidade considerada adequada para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS e os teores de P disponíveis.

6.1 Região das Missões

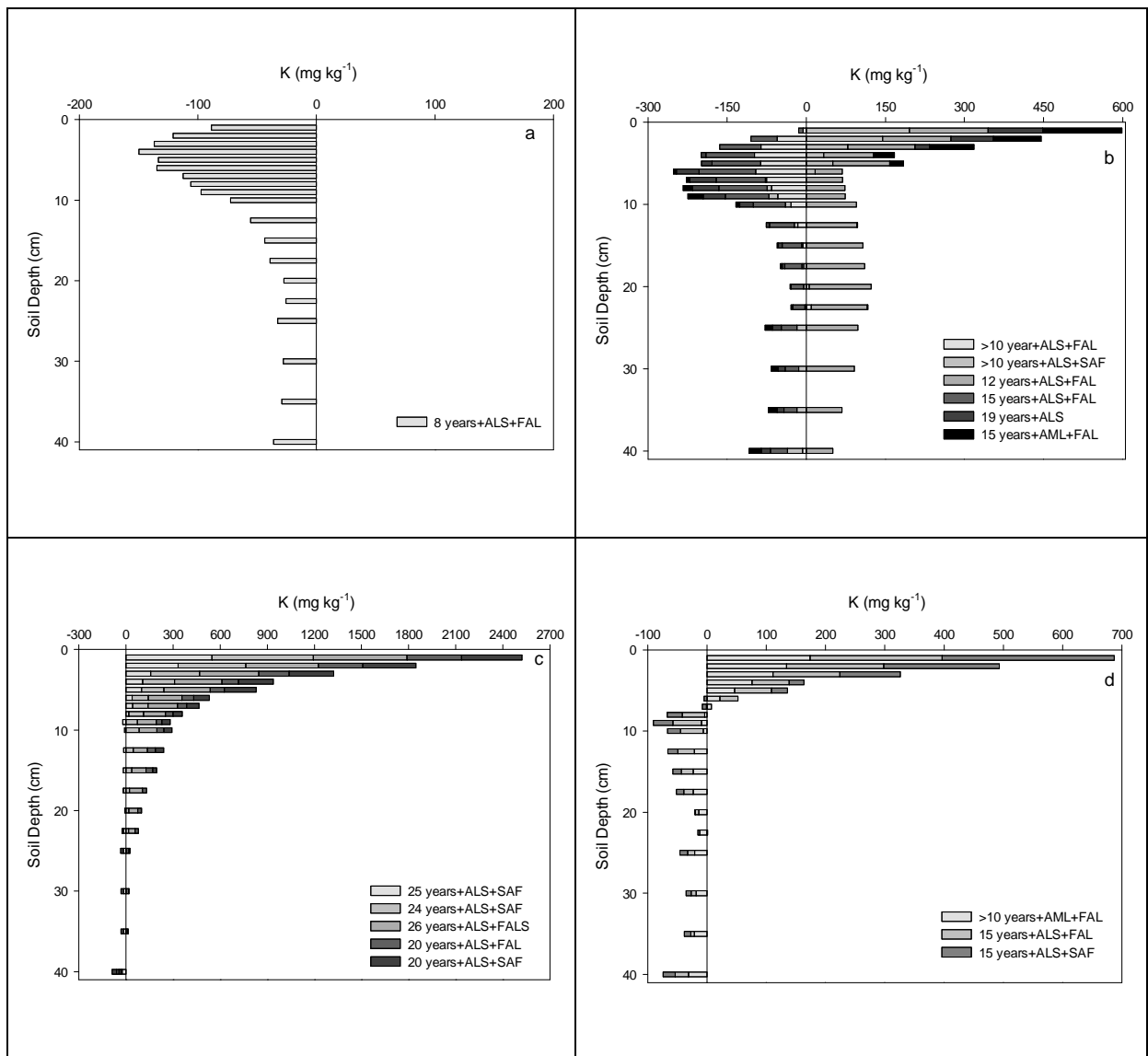
Na região das Missões foram avaliados 16 solos, 15 solos sob SPD e um em área sob baixa pressão antrópica (figura 10). Os solos apresentaram ampla variação nos teores de K extraído por Mehlich-I com valores variando de 113,7 a 847,6 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm e de 6,2 a 42,3 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. De maneira geral, todos os solos apresentam um enriquecimento com K lábil, especialmente no solo das camadas superficiais em média de 0 a 10 cm, quando comparado com o restante do perfil (figura 10). Ainda, os solos da região apresentam CTC a pH 7,0, predominantemente entre 7,6 e 15 cmol_c dm⁻³.

Os valores médios de K lábil para a região foram 433,9 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm e 26,2 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. Dentre os 16 solos avaliados o menor teor obtido extraído por Mehlich-I no solo na camada 0 a 1 cm foi 113,7 mg kg⁻¹ e 6,2 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. O maior teor de K lábil no solo na camada 0 a 1 cm foi 847,6 mg kg⁻¹ e 93 mg kg⁻¹ no solo da camada 35 a 40 cm. Dessa forma, os resultados mostram uma grande amplitude entre os solos quanto aos teores de K lábil, principalmente em superfície, onde os valores encontram-se muito acima do preconizado pelas normas técnicas do Estado, conforme observado nos gráficos abaixo.

Apenas um solo sob SPD apresentou ao longo de todo o seu perfil teores de K lábil inferior ao solo sob baixa pressão antrópica (figura 10a). Na camada de 0 a 10 cm três solos sob SPD se destacam com valores de K lábil inferiores ao teor obtido no solo sob baixa

pressão antrópica (figura 10b), predominando nos demais solos sob SPD teores de K lábil superiores aos solos sob baixa pressão antrópica, em especial nas primeiras camadas (0 a 10 cm).

Figura 10 – Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich-I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC > 15,1 (d), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) para a região das Missões.

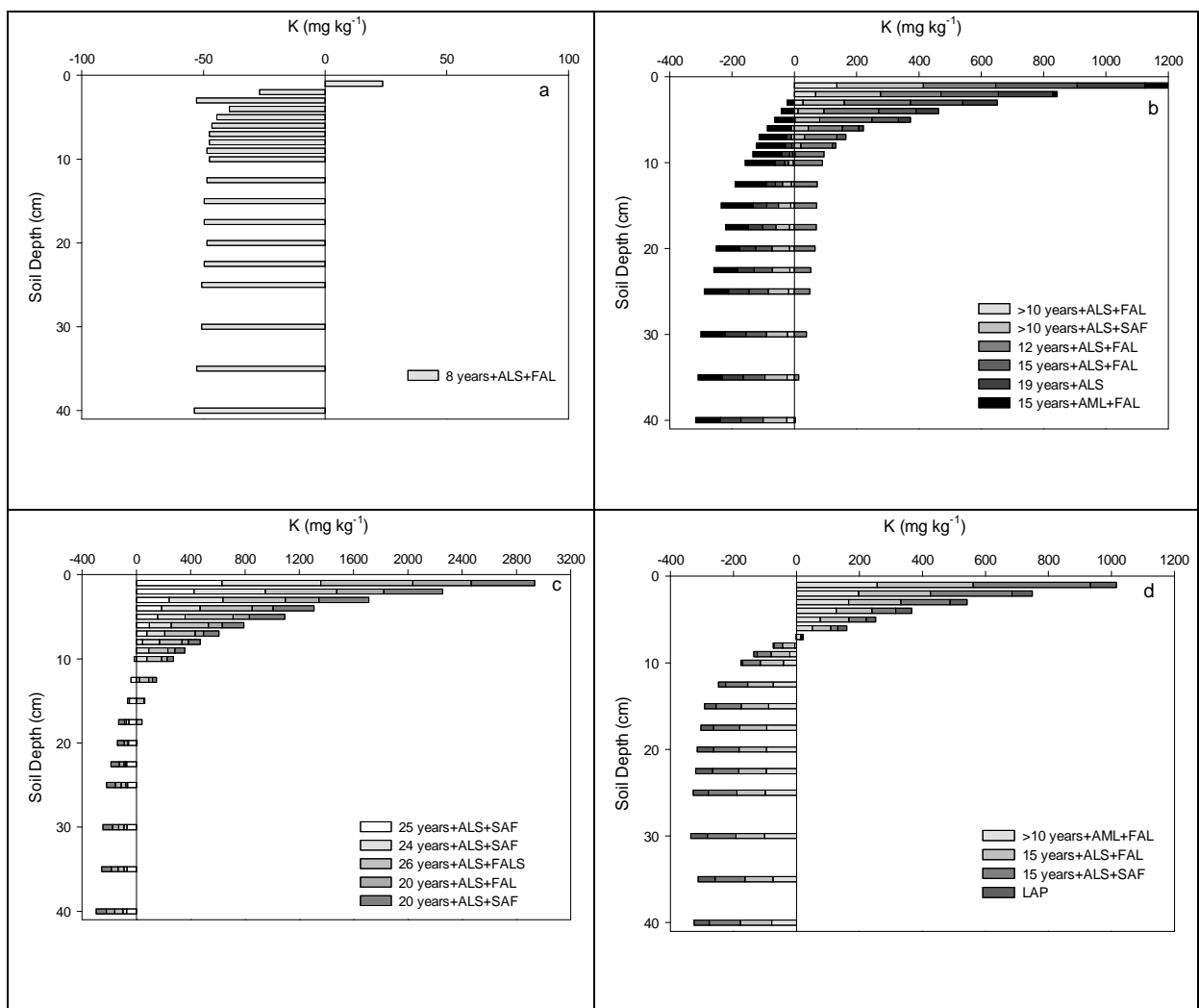


AML: application of mixed limestone; ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line; SAF: surface application fertilizer; FALS: fertilizer application on the line and on the surface.

Dessa forma, os resultados indicam que a maioria dos solos sob SPD coletados na região das Missões apresentam teores de K lábil superiores aos solos sob baixa pressão antrópica, em média na camada 0 a 10 cm, evidenciando um enriquecimento de K lábil nos

solos sob SPD nas primeiras camadas de solo quando comparado ao solo sob baixa pressão antrópica. Por outro lado, em média abaixo de 10 cm, esses teores diminuem drasticamente, ou seja, os teores de K lábil nos solos sob baixa pressão antrópica são superiores aos solos sob SPD (figura 10).

Figura 11: Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD) e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC > 15,1 (d) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região das Missões.



AML: application of mixed limestone; ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line; SAF: surface application fertilizer; FALS: fertilizer application on the line and on the surface.

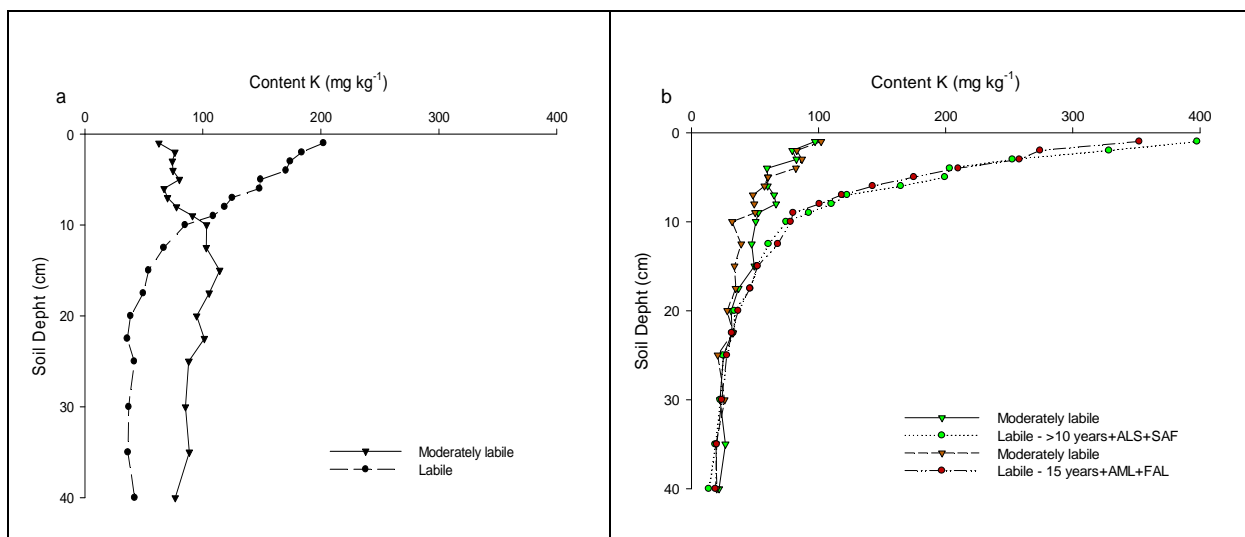
Ao avaliar as camadas de solos que se encontram acima e abaixo do NC (figura 11), observa-se que nos solos sob SPD predominam teores de K lábil acima do NC, em média na

camada 0 a 6 cm. Abaixo dessa camada os solos encontram-se, predominantemente abaixo do NC demonstrando que ocorre uma deficiência de K lábil no solo em profundidade (figura 11).

Ainda, quanto à classe de disponibilidade, apenas um solo apresenta teores de K lábil considerado adequado para o desenvolvimento das culturas de grãos, enquadrado no nível “alto” para a camada 0 a 1 cm (apêndice E(a)). Assim, 94% dos solos apresentam teores de Klábil acima da classe de disponibilidade “alto” no solo nas camadas superficiais (em média de 0 a 6 cm) podendo, portanto apresentar K lábil em excesso no solo nesse intervalo de profundidade. De maneira geral, os perfis da região apresentaram nível adequado de K lábil no solo para as culturas de grãos no intervalo entre 5,5 e 10,7 cm.

Ao comparar a distribuição dos teores de K moderadamente dessorvível ao longo do perfil os solos sob SPD apresentaram um aumento nos teores de K moderadamente dessorvível que acompanha os teores de K lábil no solo no perfil (figura 12b). Já no solo sob baixa pressão antrópica ocorre uma diminuição nos teores de K moderadamente dessorvível na medida em que se aproxima da superfície (figura 12a).

Figura 12– Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO_3) e teores lábil (facilmente dessorvível – Mehlich - I) em solo sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região das Missões.



Os solos sob SPD apresentaram média de 65 e 68 mg kg⁻¹ na camada a 0 a 10 cm, enquanto o solo sob baixa pressão antrópica apresentou 78 mg kg⁻¹ para esta camada. Os solos sob SPD apresentaram teores de K lábil semelhantes ao K moderadamente dessorvível no solo abaixo da camada 0 a 15 cm, enquanto no solo sob baixa pressão antrópica os teores de K moderadamente dessorvível são superiores ao K lábil abaixo da camada de solo de 0 a 10 cm.

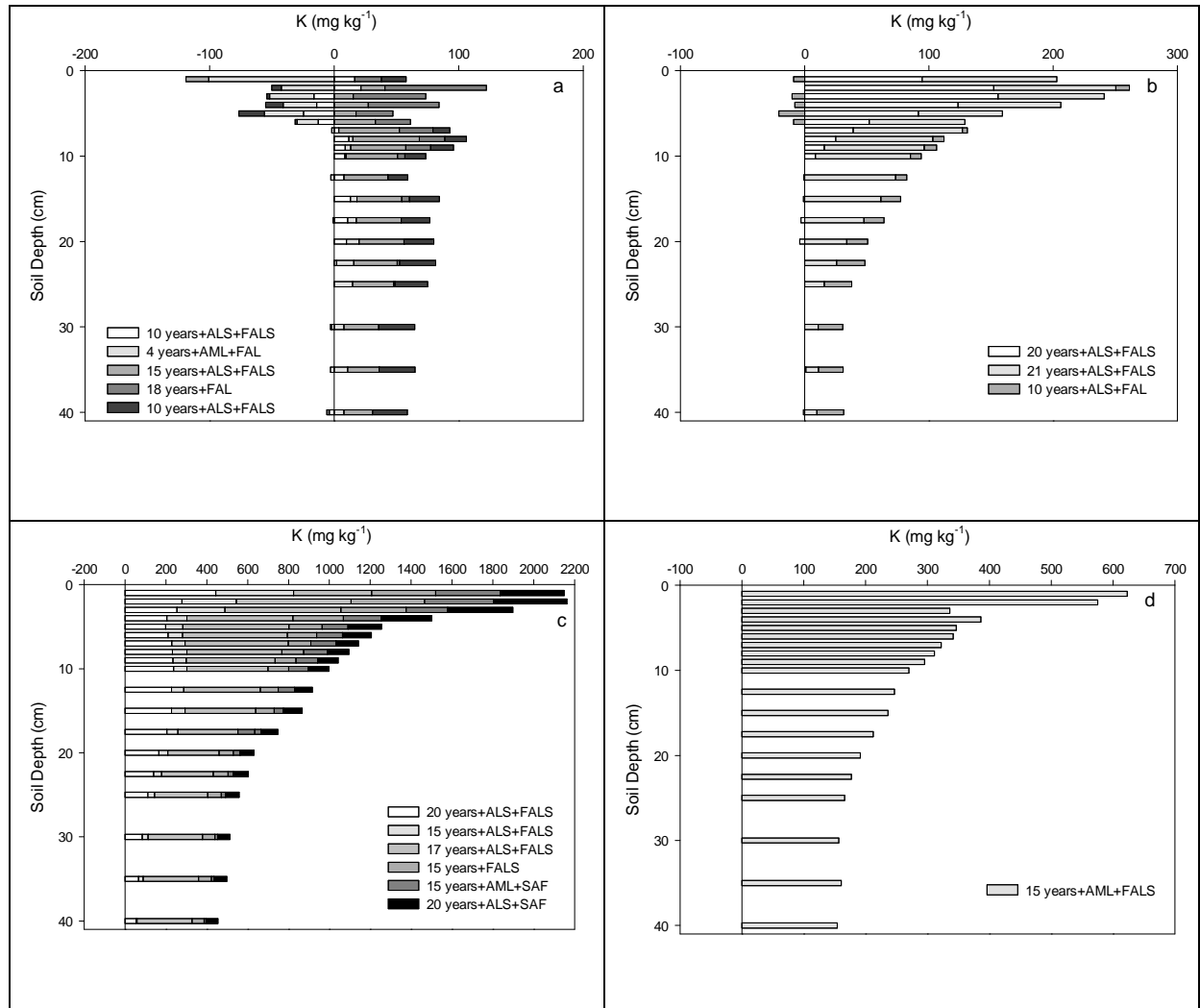
Supõe-se que estes menores teores de K moderadamente dessorvível em maior profundidade nos solos sob SPD se devem a retirada do K contido nos espaços entrecamadas dos minerais 2:1 para manter o equilíbrio da solução do solo, decorrente da drástica diminuição dos teores de K lábil na medida em que se aprofunda no solo no perfil.

6.2 Região da Depressão central

Na região da depressão central foram avaliados 16 solos, 15 solos sob SPD e um solo sob baixa pressão antrópica. Os solos apresentaram teores médios de K lábil de 359,8 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm e 46,9 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. Os maiores teores de k lábil obtidos foram 802,3 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm e 277 mg kg⁻¹ no solo na camada de 35 a 40 cm sob SPD. Os menores valores superficiais foram de 78,7 mg kg⁻¹ e 3 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm sob SPD (figura 13).

Ao comparar o padrão de distribuição dos teores de K lábil ao longo dos perfis, observa-se que os solos apresentaram um aumento nos teores de K lábil nas primeiras camadas de solo, diminuindo esses teores na medida em que aumenta em profundidade no perfil do solo (figura 13). Predominantemente, os solos sob SPD apresentam teores de K lábil com magnitude muito superior ao solo sob baixa pressão antrópica, em especial na camada 0 a 5 cm evidenciando uma concentração do elemento nessa camada (figura 13). Em camadas mais profundas os solos sob SPD também apresentam teores de K lábil superiores aos solos sob baixa pressão antrópica só que com menor magnitude (figura 13).

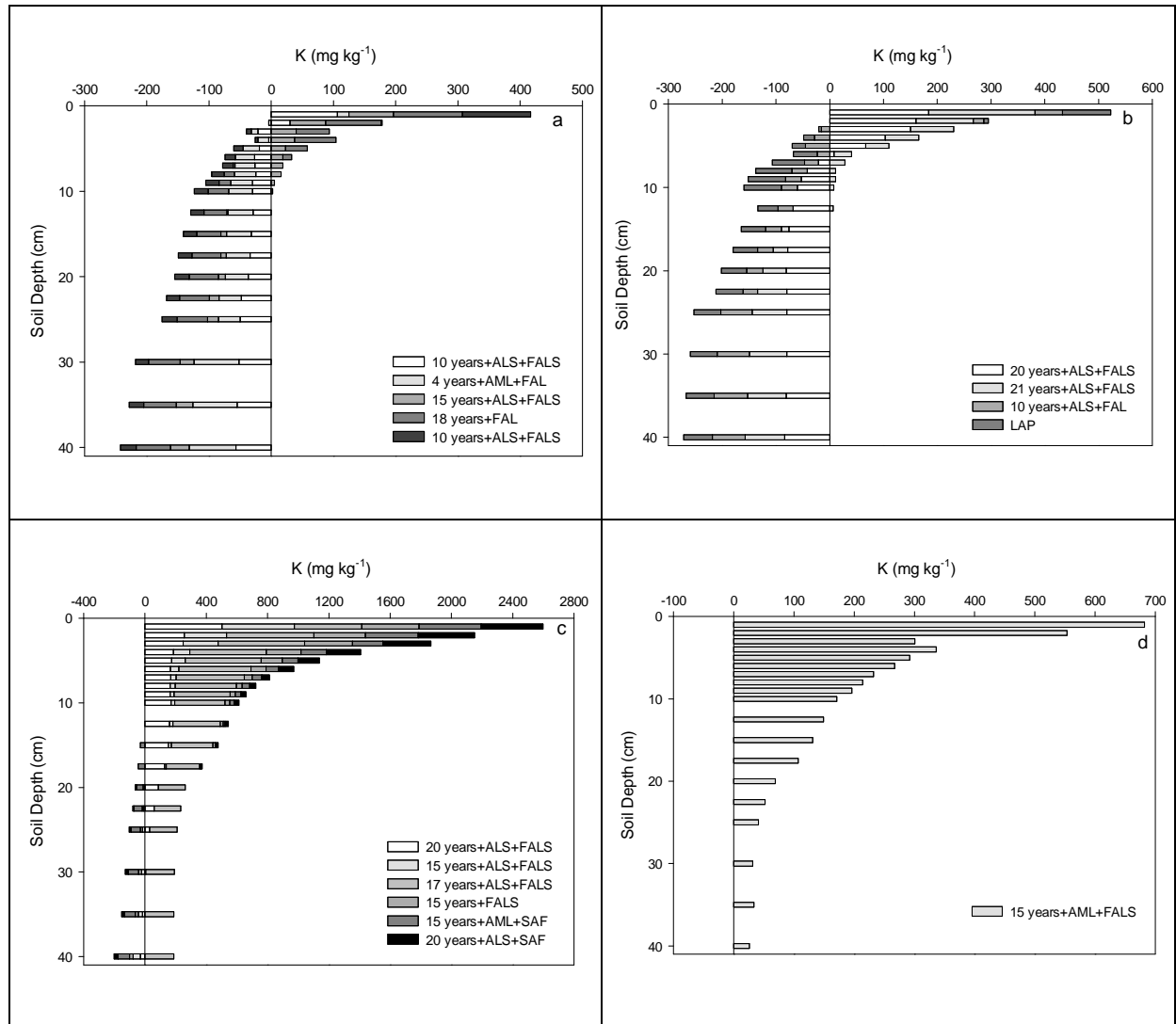
Figura 13 – Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC > 15,1 (d), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) para a região da região da Depressão Central.



AML: application of mixed limestone; ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line; SAF: surface application fertilizer; FALS: fertilizer application on the line and on the surface.

Em relação ao NC estabelecido para cada camada de solo os resultados demonstram que os solos sob SPD apresentam teores que K lábil acima do NC, predominantemente na camada de solo de 0 a 5 cm, sendo que, em média abaixo de 12 cm, os solos encontram-se abaixo do NC, ou seja, com teores de K lábil insuficiente para atender a demanda das culturas (figura 14).

Figura 14: Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD) e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC > 15,1 (d) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região da Depressão Central.



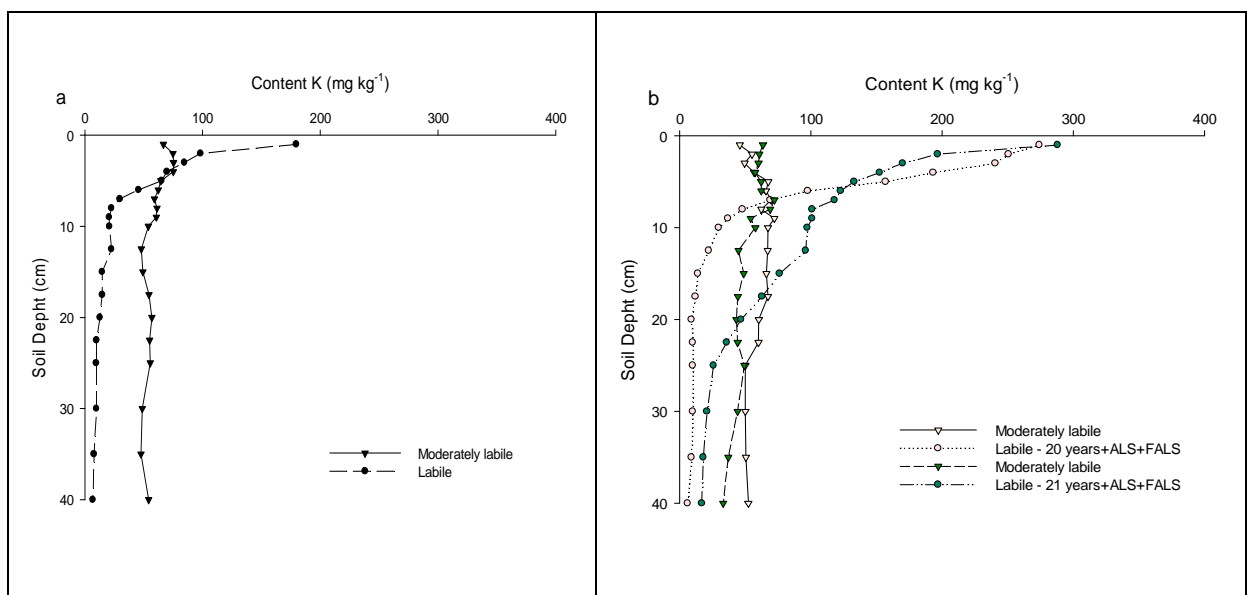
AML: application of mixed limestone; ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line; SAF: surface application fertilizer; FALS: fertilizer application on the line and on the surface.

Nesse contexto, a maioria dos solos apresentam teores de K lábil no nível muito alto e apenas três solos, dois em áreas de lavoura e um em bioma natural, apresentaram teores de K lábil que se enquadra no nível adequado para as culturas de grãos nas primeiras camadas de solo (apêndice F(a)). Assim, 75% dos solos apresentam em superfície (em média de 0 a 5 cm) teores de K lábil no nível considerado “muito alto” podendo apresentar K lábil em excesso (apêndice F(a)). De forma geral, o intervalo médio em que os solos se encontram no nível de

K lábil adequado está entre 5,4 e 12,1 cm para a região da Depressão Central evidenciando uma deficiência nos teores de K lábil abaixo de 12 cm de profundidade no solo.

Em relação ao K moderadamente dessorvível os solos sob SPD apresentaram média de 61 e 62 mg kg^{-1} na camada a 0 a 10 cm, enquanto o solo sob baixa pressão antrópica apresentou 65 mg kg^{-1} para esta camada. Os teores médios K moderadamente dessorvível foram semelhantes para ambos os usos do solo, sendo estes valores superiores ao K lábil, em média no solo abaixo dos 15 cm para os solos sob SPD e 5 cm para o solo sob baixa pressão antrópica. Apenas um solo sob SPD apresentou aumento nos teores de K moderadamente dessorvível em superfície (figura 15b).

Figura 15– Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO_3) e teores lábil (facilmente dessorvível – Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região da Depressão Central.

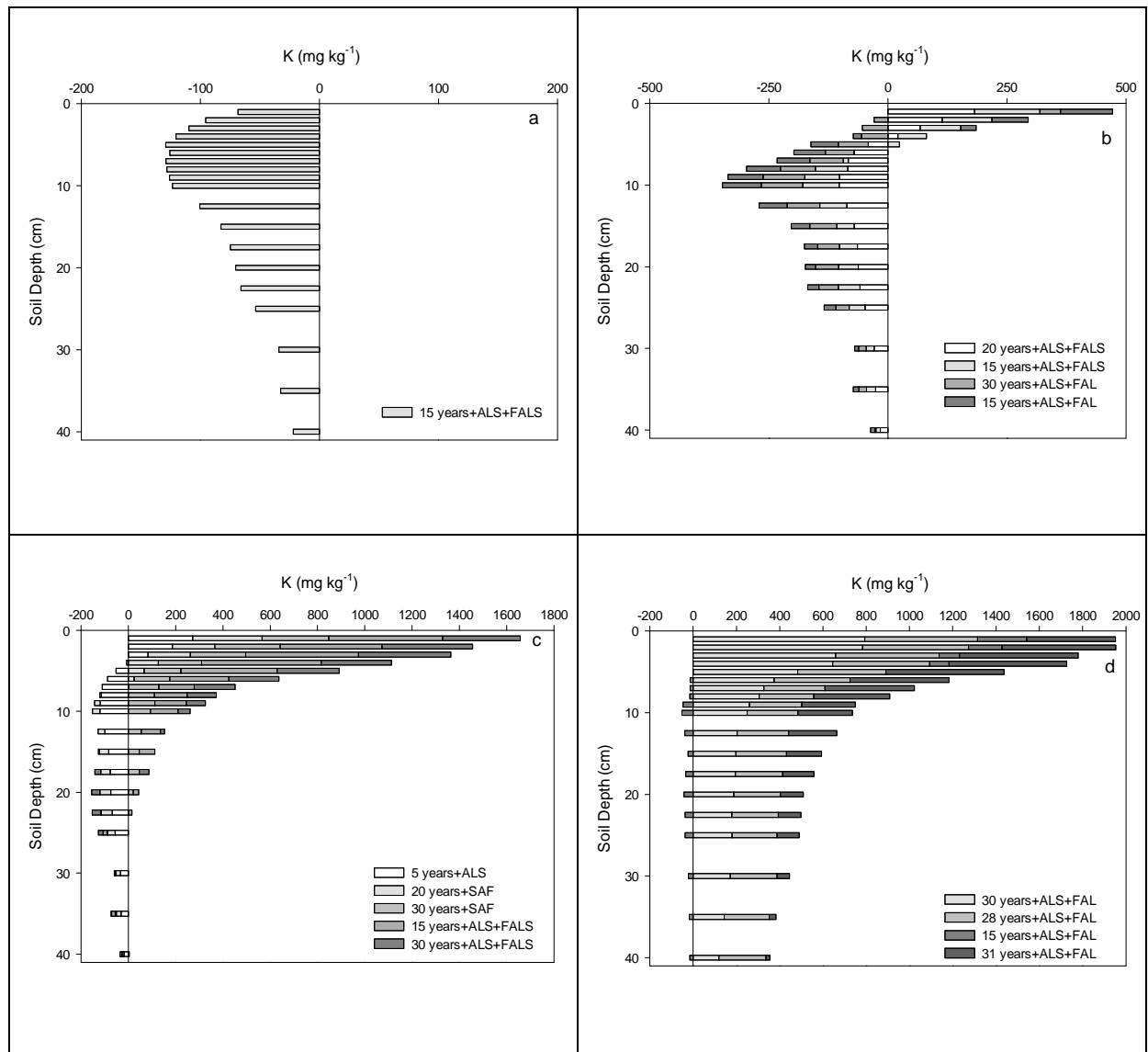


6.3 Região do Planalto Médio

Na região do Planalto foram avaliados 15 solos, 14 em solos sob SPD e um em solo sob baixa pressão antrópica (figura 16). O menor teor de K lábil no solo na camada 0 a 1 cm foi 109,3 mg kg^{-1} e 13 mg kg^{-1} no solo na camada 35 a 40 cm de profundidade. O maior teor no solo na camada 0 a 1 cm foi 970 mg kg^{-1} e 252,2 mg kg^{-1} no solo na camada 35 a 40 cm. Os valores médios de K lábil para a região foram 445,1 mg kg^{-1} no solo na camada 0 a 1 cm e

41,6 mg kg⁻¹ no solo na profundidade de 35 a 40 cm, demonstrando uma ampla variabilidade existente no solo no perfil e entre os solos quanto aos teores de K lábil.

Figura 16 – Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC > 15,1 (d), tendo como referência o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) para a região do Planalto Médio.



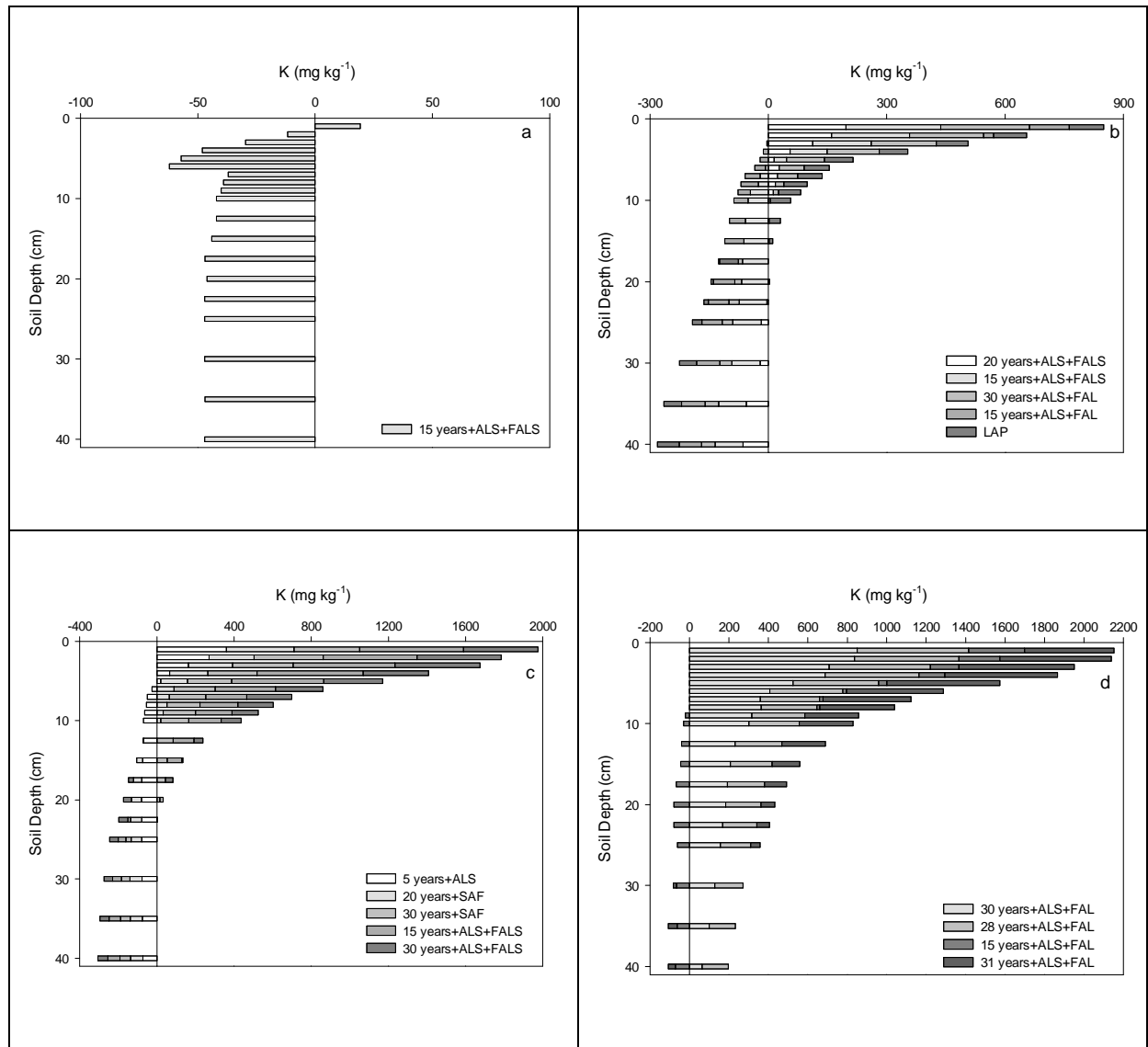
AML: application of mixed limestone; ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line; SAF: surface application fertilizer; FALS: fertilizer application on the line and on the surface.

Os resultados demonstram que os solos apresentaram um enriquecimento superficial nos teores de K lábil, principalmente nas camadas 0 a 10 cm, diminuindo essa magnitude na medida em que se aprofunda no solo no perfil demonstrando que está ocorrendo um acúmulo de K lábil no solo nessa camada (figura 16).

Quanto aos diferentes usos do solo, predominantemente os teores de K lábil nos solos sob SPD são superiores ao solo sob baixa pressão antrópica, principalmente na camada 0 a 10 cm, por outro lado, abaixo desta camada os solos sob SPD apresentam teores de K lábil inferiores aos teores dos solos sob baixa pressão antrópica (figura 16). Esta diminuição nos teores de K lábil no solo em maior profundidade deve-se, possivelmente, a absorção pelas raízes das plantas transferindo o nutriente para a superfície podendo ou não ser exportado da lavoura.

Os solos sob SPD apresentaram-se, predominantemente acima do NC em média na camada 0 a 9 cm e abaixo de 13 cm os teores de K lábil são inferiores ao NC evidenciando que apenas uma camada de 4 cm encontra-se no nível de K lábil adequado e que os solos da região apresentam uma carência de K lábil nos solos em maior profundidade (figura 17). Ainda, todos os solos da região alcançaram o NC, porém apenas dois solos se enquadram nos teores de K lábil adequado em superfície (apêndice G(a)). Os demais solos se enquadram como adequados no intervalo médio de 9 a 13 cm, apresentando em superfície teores de K lábil muito acima do preconizado pelas normas técnicas do Estado.

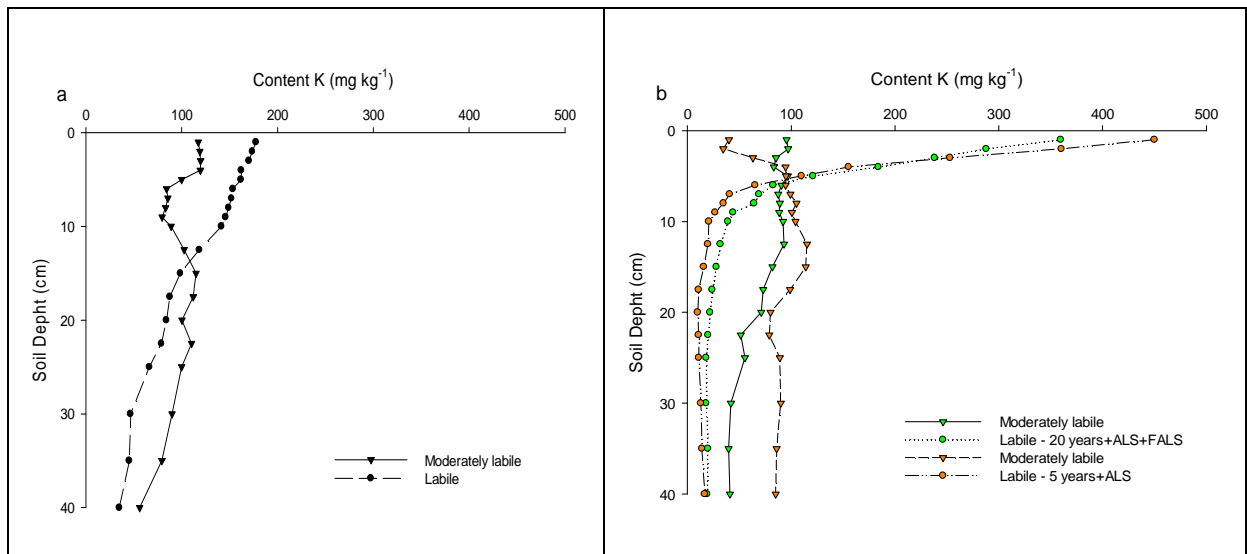
Figura 17: Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD) e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC < 7,5 (a); CTC de 7,6 a 15 (b e c) e CTC > 15,1 (d) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região do Planalto Médio.



AML: application of mixed limestone; ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line; SAF: surface application fertilizer; FALS: fertilizer application on the line and on the surface.

Em relação ao K moderadamente dessorvível os solos sob SPD apresentaram média de 83 e 91 mg kg⁻¹ na camada a 0 a 10 cm, enquanto o solo sob baixa pressão antrópica apresentou 100 mg kg⁻¹ para esta camada. Em ambos os usos do solo os teores de K moderadamente dessorvível são superiores aos teores de K lábil, para os solo sob baixa pressão antrópica abaixo dos 15 cm e para os solos sob SPD abaixo de 5 cm (figura 18).

Figura 18 – Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO_3) e teores lábil (facilmente dessovelável – Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região do Planalto Médio.

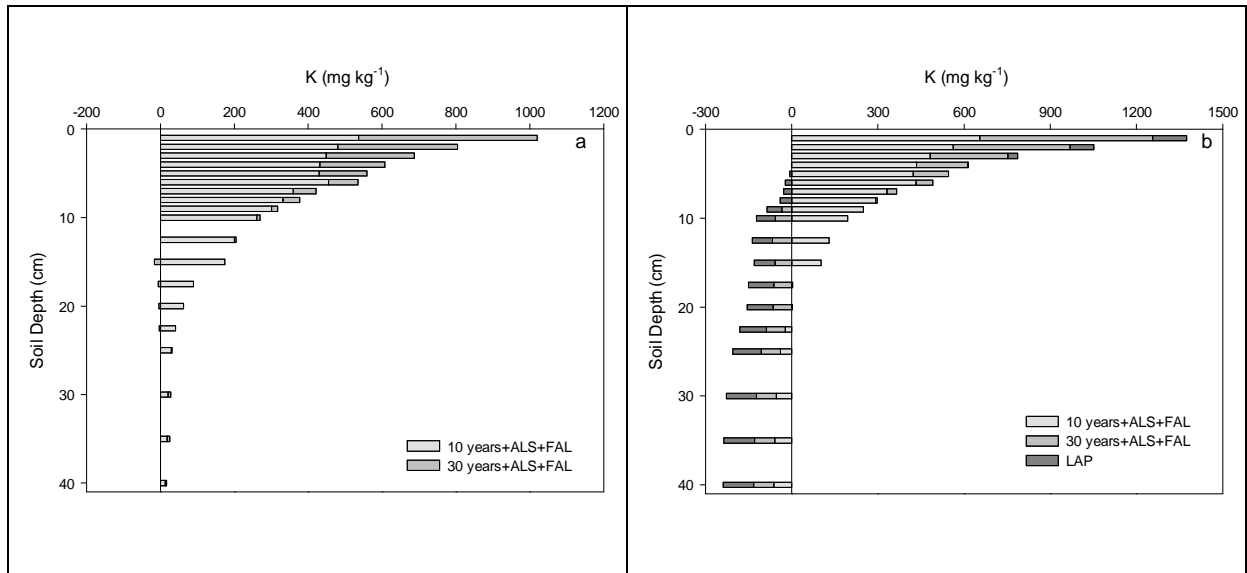


6.4 Serra Gaúcha

Na região da Serra Gaúcha foram avaliados três solos, dois em solo sob SPD e um em solo sob baixa pressão antrópica (figura 19). Os teores médios de K lábil obtidos para a região foram 578,1 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm e 20,6 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. O maior teor de K lábil na camada 0 a 1 cm foi 775 mg kg⁻¹ e 27,9 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm.

Ao se comparar os teores de K lábil a partir do solo sob baixa pressão antrópica (figura 19a) observa-se que os solos sob SPD apresentaram teores predominantemente superiores ao solo sob baixa pressão antrópica ao longo de todo o perfil, com destaque para as camadas 0 a 10 cm, evidenciando uma carência do nutriente em camadas mais profundas. Isso é evidenciado quando se retira o NC (19b) onde abaixo da camada 0 a 15 cm os solos não atingiram o NC demonstrando uma deficiência de K lábil abaixo dessa camada.

Figura 19 - Balanço relativo de potássio lábil (dessorvível por Mehlich I) em solos sob sistema de plantio direto (SPD), agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC >15,1 (a), tendo o ponto zero (solos sob baixa pressão antrópica) como referência e balanço relativo de potássio lábil em solos sob SPD e solos sob baixa pressão antrópica (LAP) agrupados de acordo com a CTC a pH 7,0: CTC >15,1 (b) tendo como referência o ponto zero (subtraído o valor do Nível Crítico de cada camada de solo de acordo com a CTC e a profundidade no perfil) para a região da Serra Gaúcha.

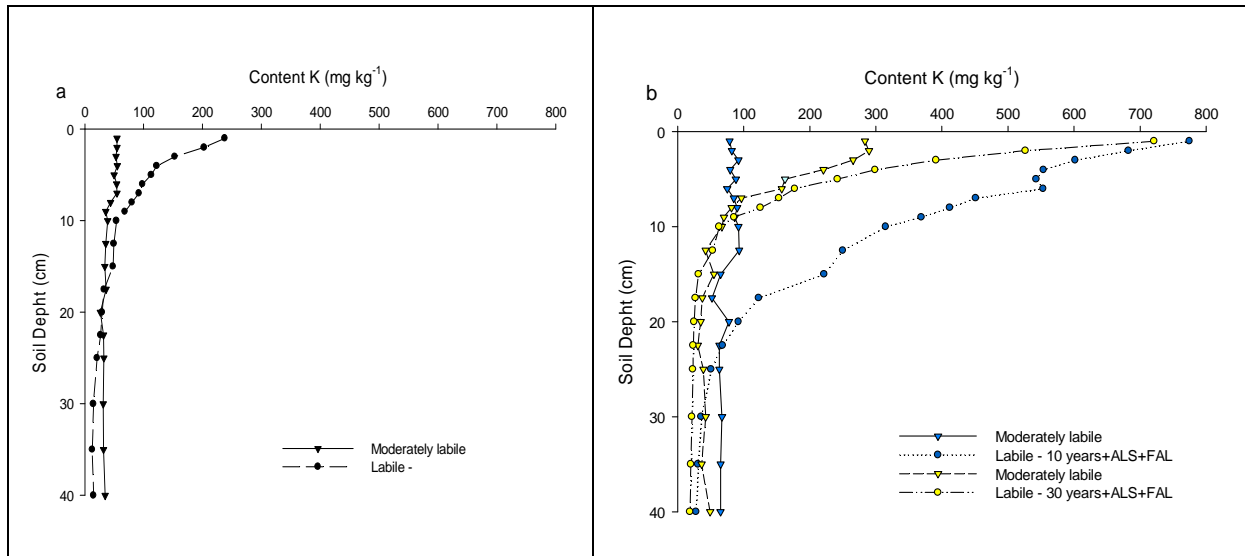


ALS: application of limestone on the surface; FAL: fertilizer application on the line.

Nesse contexto, nos solos sob SPD os teores de K lábil encontram-se muito acima do NC e no nível “muito alto” possivelmente com K em excesso (apêndice H(a)). Por outro lado, esses solos encontram-se no nível adequado para as culturas de grãos no intervalo médio entre 11,7 e 15 cm, enquanto o solo sob baixa pressão antrópica encontra-se no nível adequado em superfície.

Em relação ao K moderadamente dessorvível os solos sob SPD apresentaram média de 85 e 170 mg kg⁻¹ na camada a 0 a 10 cm, enquanto o solo sob baixa pressão antrópica apresentou 49 mg kg⁻¹ para esta camada. Tanto nos solos sob SPD como nos solos sob baixa pressão antrópica o teor de K moderadamente dessorvível foi superior ao K lábil em média abaixo dos 15 cm.

Figura 20 – Teores de potássio moderadamente lábil (dessorvível - HNO_3) e teores lábil (facilmente dessovel - Mehlich - I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob SPD (b) para a região da Serra Gaúcha.



De maneira geral dos 12 solos avaliados para as quatro regiões, três tiveram uma diminuição no teor de K moderadamente dessovelável em superfície quando comparado com o restante do solo no perfil, dois em solo sob SPD (figura 15b e figura 18b) e um solo sob baixa pressão antrópica (figura 12a). Em maior profundidade no solo no perfil predominam, em ambos os usos do solo, valores de K moderadamente dessovelável superior ao teor de K lábil.

Dos 50 solos avaliados 84% estão acima da classe de disponibilidade “alto” em superfície, em média na camada 0 a 7 cm, podendo apresentar K extraído por Mehlich-I em excesso nessa camada. Apenas 14% dos solos encontram-se no nível adequado de K lábil em superfície (apêndices E (a), F (a), G (a) e H (a)), sendo que o intervalo médio em que estes solos se encontram no nível adequado de K lábil para as culturas de grãos entre 7 e 12 cm de profundidade.

Em relação aos solos sob baixa pressão antrópica todos os solos obtiveram teores de K lábil acima do NC e, somente 15% dos solos sob SPD apresentaram teores de K lábil inferiores aos teores dos solos sob baixa pressão antrópica em superfície (apêndices E (a), F (a) e G (a)), em média na camada 0 a 10 cm. Abaixo dessa camada, os solos sob SPD apresentam, predominantemente teores de K lábil inferiores aos solos sob baixa pressão antrópica.

6.5 Estatística descritiva

A partir desses dados foi realizada a estatística descritiva dos valores de K lábil para os solos nas camadas que se encontram acima e abaixo do NC (tabela 1 e 2), definido a partir dos valores médios de CTC a pH 7,0, portanto esses valores variam de acordo com o perfil avaliado. Em média os solos das quatro regiões atingiram os seus respectivos NC na profundidade de 6 a 7 cm.

Os valores médios de K lábil obtidos para os solos acima do NC foram (tabela 1): 238,4 mg kg⁻¹; 248,3 mg kg⁻¹; 303,5 mg kg⁻¹ e 331,3 mg kg⁻¹ para a região da Depressão central, Missões, Planalto médio e Serra Gaúcha, respectivamente. O erro padrão foi semelhante para as regiões das Missões e Depressão central, enquanto a Serra Gaúcha obteve valores muito superiores as demais regiões, demonstrando maior variabilidade dos dados em relação média para a região.

Tabela 1 - Estatística descritiva para os teores de potássio extraídos por Mehlich-1 acima do Nível Crítico. Intervalo de confiança (I.C.): 95%.

	Missões	Depressão central	Planalto médio	Serra Gaúcha
Média (mg kg ⁻¹)	248,3	238,4	303,5	331,3
Erro padrão	13	12,9	15,2	39,1
I.C.(mg kg ⁻¹)	222,8-273,7	213,2-273,7	273,7-333,3	254,8-467,9

Com intervalo de confiança de 95% é esperado para a região da Depressão central teores médios de K lábil variando entre 213,2 a 273 mg kg⁻¹; na região das Missões de 222,8 a 273,7 mg kg⁻¹; no Planalto Médio de 273,7 a 333,3 mg kg⁻¹ e na Serra de 254,8 a 467,9 mg kg⁻¹ para os solos nas camadas acima do NC (tabela 1).

Nesse sentido, os valores médios de CTC pH 7,0 obtidos foram 20,1 cmol_c dm⁻³ para a Serra Gaúcha; 13,6 cmol_c dm⁻³ para as regiões do Planalto e Missões e 10,1 cmol_c dm⁻³ para a Depressão Central. Considerando os valores médios de CTC e as médias de K lábil obtida acima do NC (tabela 1), todas as regiões avaliadas enquadram-se na classe de disponibilidade de K “muito alto” em superfície.

Em relação aos teores de K lábil abaixo do NC (tabela 2) os solos que apresentaram maior média foram na região do Planalto com 42,4 mg kg⁻¹, seguido da região das Missões com 40,5 mg kg⁻¹. Serra Gaúcha e Depressão Central tiveram valores semelhantes, 35,5 mg kg⁻¹ e 35,4 mg kg⁻¹, respectivamente. O erro padrão foi semelhante para a região das Missões

e da depressão central indicando menor variabilidade nos dados que a região do Planalto e da Serra em maior profundidade.

Assim, considerando um intervalo de confiança de 95% é esperado para os solos da região da Serra médias de K lábil entre 28 a 43 mg kg⁻¹; na Depressão central entre 32,1 a 38,6 mg kg⁻¹; Planalto de 36,2 a 48,6 mg kg⁻¹ e para a região das missões entre 36,9 a 44,1 mg kg⁻¹ para os solos nas camadas abaixo do NC (tabela 2).

Tabela 2 - Estatística descritiva para os teores de potássio abaixo do Nível Crítico. Intervalo de confiança (I.C.): 95%.

	Missões	Planalto médio	Depressão central	Serra Gaúcha
Média (mg kg ⁻¹)	40,5	42,4	35,4	35,5
Erro padrão	1,8	3,1	1,6	3,7
I.C.(mg kg ⁻¹)	44,1-36,9	48,6-36,2	38,6-32,1	42,8-28,2

A partir dos valores médios de CTC dos solos e dos valores médios de K lábil no solo nas profundidades abaixo do NC, a região da Serra enquadra-se na classe de disponibilidade de K “muito baixo” e as regiões das Missões, Planalto e Depressão central como “baixo”.

Dessa forma, o erro padrão dos teores médios de K extraído por Mehlich-I nos solos acima do NC são muito superiores aos teores obtidos nos solos abaixo do NC indicando que os teores médios de K lábil apresentam maior variabilidade, em relação à média, nos solos nas camadas acima do NC. Já os teores médios de K lábil no solo abaixo do NC apresentam-se mais concentrados em torno da média.

6.6 Teores totais de potássio no solo

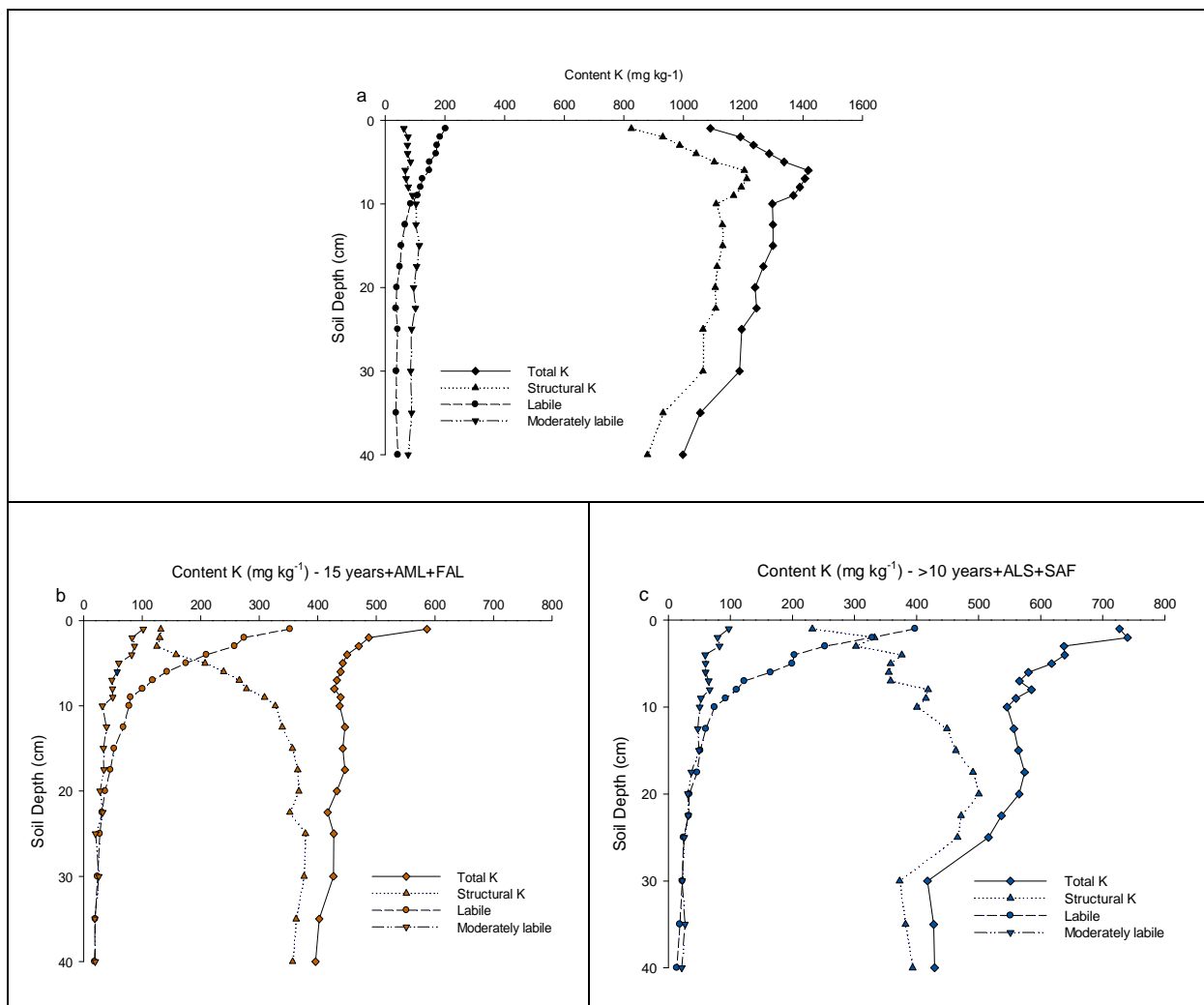
As diferentes formas de K encontradas no solo podem ser estimadas a partir de distintos extratores contribuindo para o entendimento da dinâmica do K no perfil do solo, tanto em solos cultivados como em sistemas naturais.

Na região das Missões os teores médios de K total nos solos sob SPD variaram de 657 mg kg⁻¹ na camada 0 a 1 cm a 412 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. No solo sob baixa pressão antrópica os teores de K total variaram de 1.090 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm a 790 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40cm, sendo esses teores superiores aos solos sob SPD. Assim, nos solos sob SPD houve um enriquecimento nos teores de K total no solo em superfície, principalmente nos primeiros 10 cm (figura 21 b e 21c), enquanto no solo sob

baixa pressão antrópica observa-se uma drástica diminuição no K total no solo na camada 0 a 8 cm (figura 21a).

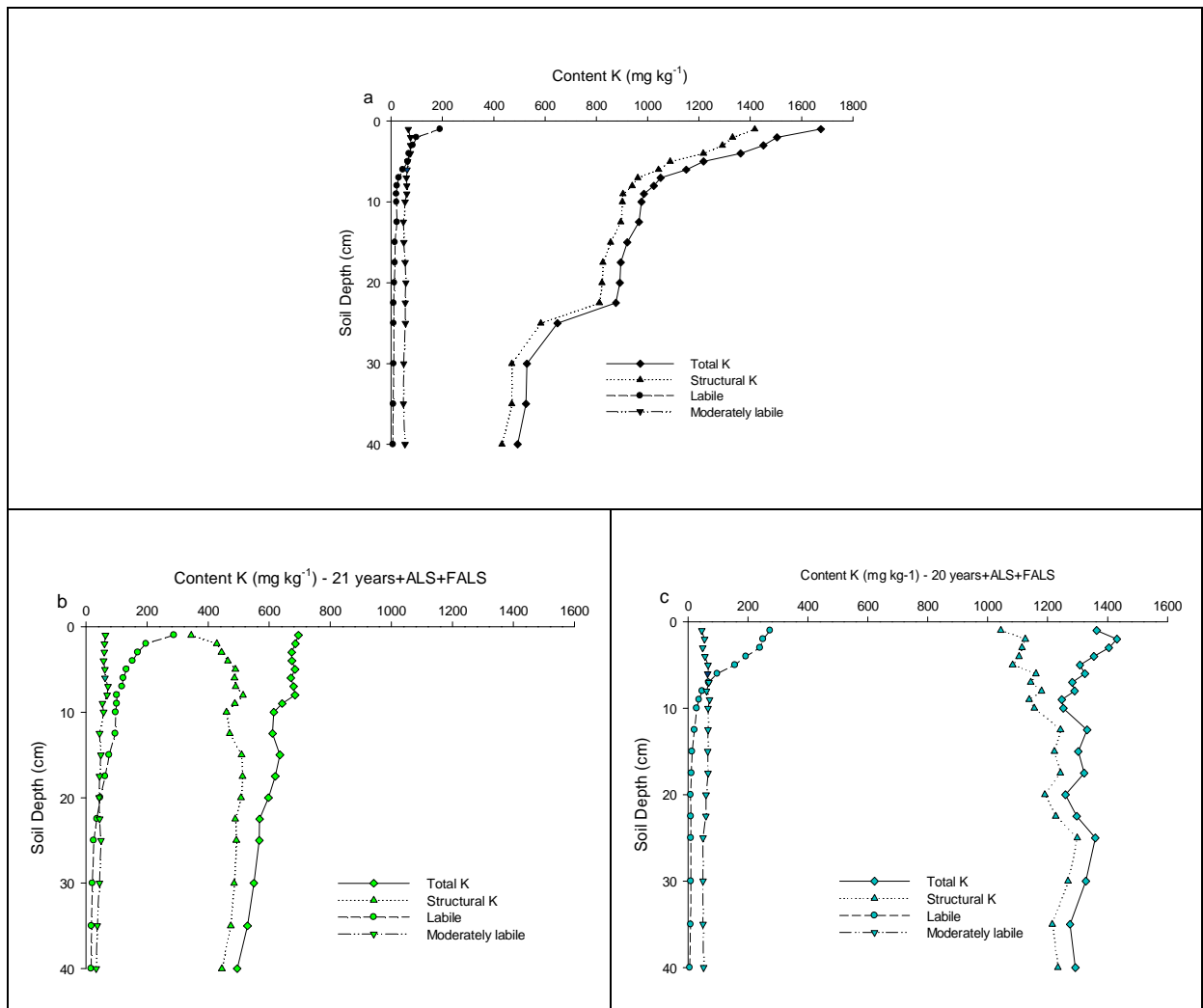
Quanto aos teores de K contido na estrutura de minerais primários, obtido pela diferença entre a extração por HF de HNO_3 , os solos sob SPD variarem de $232,1 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo na camada 0 a 1 cm a $393,8 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo na camada 35 a 40 cm e de $131,9 \text{ mg kg}^{-1}$ em superfície a $357,2 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 21b e 21c). O solo sob baixa pressão antrópica variou de 825 mg kg^{-1} no solo na camada 0 a 1 cm a $879,2 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo na camada 0 a 40 cm. Assim, todos os solos da região das Missões apresentaram uma diminuição no teor de K estrutural em superfície, sendo essa menos expressiva no solo sob baixa pressão antrópica.

Figura 21 – Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO_3), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO_3), e potássio lábil (facilmente dessorvível – Mehlich I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e solos sob sistema plantio direto (b, c) para a região das Missões.



Em relação aos solos cultivados da região da Depressão Central os teores médios de K total nos solos sob SPD variaram de 1.030 mg kg⁻¹ no solo em superfície a 893 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm e no solo sob baixa pressão antrópica 1.675 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm a 425mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 22). Assim, os solos apresentaram uma diminuição nos teores de K total na medida em que se aprofunda no solo no perfil, característica essa, também observada na região Missões.

Figura 22 – Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO₃), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO₃), e potássio lábil (facilmente dessorvível – Mehlich I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e cultivados sob sistema plantio direto (b, c) para a região da Depressão central.

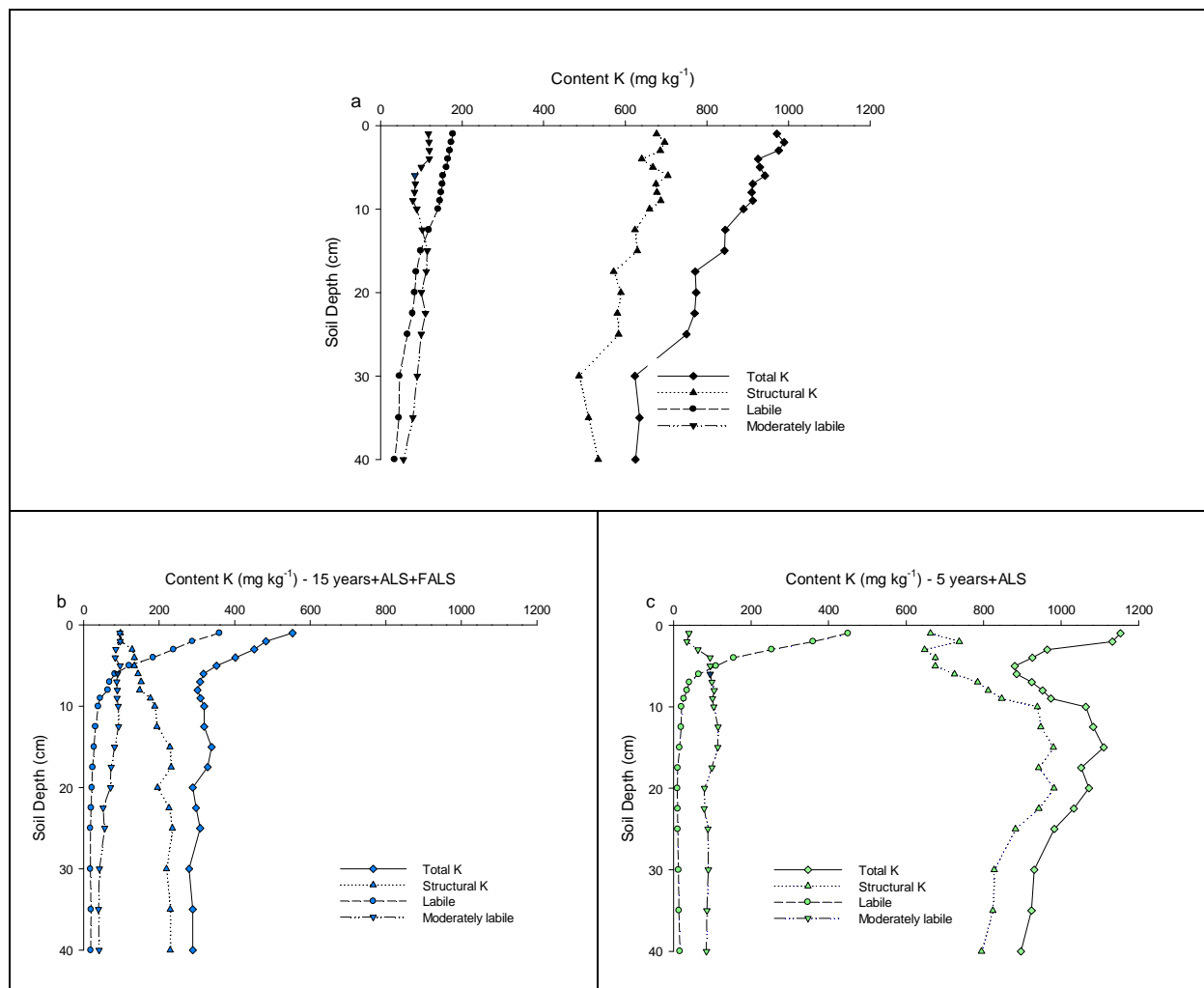


Quanto ao K estrutural os valores médios obtidos nos solos sob SPD foram 694 mg kg⁻¹ na camada 0 a 1 cm e 840 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. O solo sob baixa pressão antrópica variou de 1.418 mg kg⁻¹ no solo em superfície a 357mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a

40 cm. Em ambos os solos cultivados ocorreu uma redução no K estrutural em superfície, destacando-se os primeiros 5 cm. Por outro lado, o solo sob baixa pressão antrópica apresentou um aumento significativo no K estrutural nas primeiras camadas de solo.

Nos solos avaliados na região do Planalto Médio nos solos sob SPD os teores de K total variaram de 1.153 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm a 896 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 23c) e de 553,3 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm a 289,4 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 23b). O solo sob baixa pressão antrópica variou de 972 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1 cm a 468 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 23a).

Figura 23 – Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO₃), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO₃), e potássio lábil (facilmente dessorvível – Mehlich I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e cultivados sob sistema plantio direto (b, c) para a região do Planalto médio.

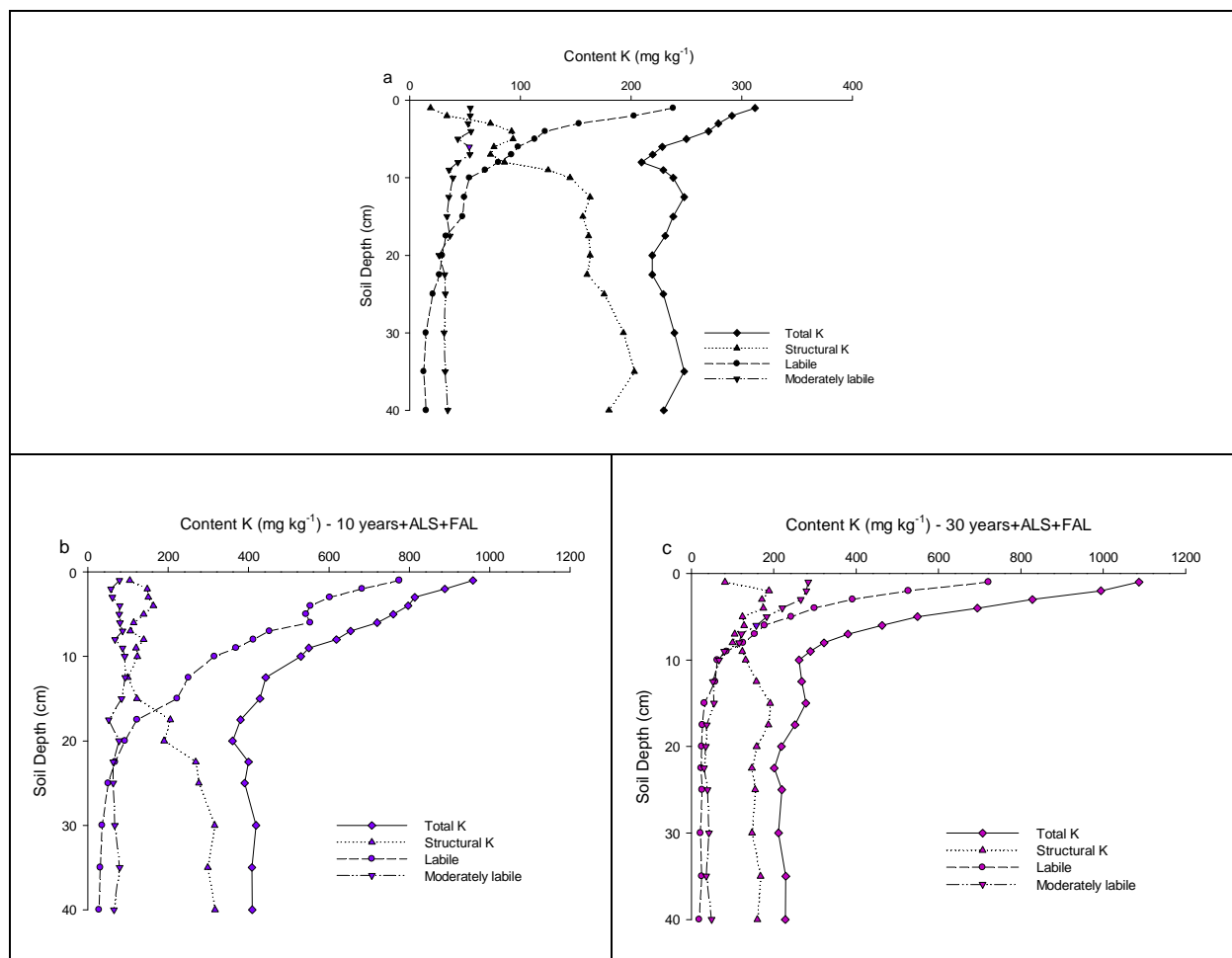


Quanto ao K estrutural os solos sob SPD variaram de 663,1 na camada 0 a 1 cm a 794,5 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 23 c) e de 97,9 mg kg⁻¹ na camada 0 a 1

cm a $229,4 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada 35 a 40 cm (figura 23 b). O solo sob baixa pressão antrópica obteve $676,9 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada 0 a 1 cm e 434 mg kg^{-1} no solo na camada 35 a 40 cm (figura 23 a). Os resultados indicam uma diminuição drástica nos teores de K estrutural nos solos sob SPD nas camadas superficiais, enquanto o solo de bioma natural tem-se um aumento nos teores de K estrutural em superfície.

Em relação aos solos coletados na região da Serra gaúcha os teores de K total nos solos sob SPD variaram de $958,1 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada 0 a 1 cm a $409,18 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 24b) e de $1.086,5 \text{ mg kg}^{-1}$ em superfície a 228 mg kg^{-1} no solo na camada 35 a 40 cm (figura 24c). No solo sob baixa pressão antrópica os teores de K total variaram de $311,9 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada 0 a 1 cm a 210 mg kg^{-1} no solo na camada 35 a 40 cm (figura 24a).

Figura 24 – Teores de potássio total (HF), potássio na estrutura de minerais primários (HF - HNO_3), potássio moderadamente lábil (Mehlich I - HNO_3), e potássio lábil (facilmente dessorvível – Mehlich I) em solos sob baixa pressão antrópica (a) e cultivados sob sistema plantio direto (b, c) para a região da Serra Gaúcha.



Os teores de K estrutural nos perfis de solos sob SPD e de solos sob baixa pressão antrópica apresentaram uma diminuição nos teores em média no solo na camada 0 a 15 cm. Nos solos sob SPD os teores de K estrutural variaram de 104,5 em superfície a 316,4 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm (figura 24b) e de 81,6 mg kg⁻¹ no solo em superfície a 160,2 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm. O solo sob baixa pressão antrópica obteve 18,9 mg kg⁻¹ no solo na camada 0 a 1cm e 160 mg kg⁻¹ no solo na camada 35 a 40 cm.

Assim, os solos sob SPD avaliados para as quatro regiões apresentaram um diminuição nos teores de K estrutural em superfície, possivelmente devido a ação do intemperismo que atua mais fortemente nessas camadas. Já em relação aos solos sob baixa pressão antrópica o solo da região das Missões e da Serra tiveram uma redução nos teores de K estrutural em superfície, enquanto nas regiões do Planalto e da Depressão central esses teores aumentaram no solo nas primeiras camadas.

7 DISCUSSÃO

7.1 Teores de K lábil

Ao se avaliar os teores extraídos por um ácido fraco, Mehlich-I, constatou-se que, tanto nos solos sob SPD como em áreas sob baixa pressão antrópica, tem-se um aumento nos teores de K lábil no solo nas camadas superficiais, seguida de uma redução em maior profundidade, confirmando a hipótese de que o padrão de distribuição dos teores de potássio no perfil do solo em SPD segue o padrão de distribuição dos solos sob baixa pressão antrópica, no entanto com magnitudes entre os distintos usos do solo.

O aumento do teor de K extraído por Mehlich-I em superfície nas áreas naturais se deve, conforme Raij (2011) a maior capacidade do K⁺ de ser reciclado pelas plantas, podendo ser absorvido pelas raízes em maior profundidade no solo e ser liberado em superfície através da decomposição dos resíduos vegetais. Essa característica é responsável pela diminuição nos teores de K lábil na medida em que se aprofunda no solo no perfil e pelo enriquecimento nos teores no solo em superfície. Já nos solos sob SPD essa concentração de K lábil nas primeiras camadas de solo, possivelmente é influenciada pela aplicação de fertilizantes, em especial em superfície. Isso, conseqüentemente reflete sobre a classe de disponibilidade de K lábil, pois ao se comparar os distintos usos dos solos (solos sob SPD e sob baixa pressão antrópica), ambos apresentaram um enriquecimento nos teores de K lábil no solo nas camadas superficiais.

Nesse contexto, 84% dos solos avaliados dos 50 solos avaliados encontram-se na classe de disponibilidade “muito alto” no solo em superfície, em média na camada 0 a 7 cm com teores de fertilização potássica muito acima do NC e apenas 14% dos solos enquadraram-se no nível adequado de K lábil em superfície para as culturas de grãos, sendo três deles em solos sob baixa pressão antrópica. Devido ao enriquecimento com K nas camadas superficiais o nível adequado de K lábil para os solos das quatro regiões se deu no intervalo médio de 7 a 12 cm de profundidade.

Ainda, considerando que para cada região o nível adequado de K lábil encontra-se nas seguintes profundidades: 5,4 a 12 cm; 5,5 a 10,7 cm; 9 a 13 cm e 11,7 a 15 cm, esses resultados sugerem que as regiões devem economizar na aplicação de K superficialmente nas seguintes camadas: 0 a 5 cm para as regiões da Depressão central e Missões; 0 a 9 cm para o Planalto Médio e 0 a 12 cm para a Serra gaúcha, pois os teores de K lábil encontram-se acima do preconizado pelas normas técnicas nessas camadas, devendo rever a posição em que o nutriente está sendo aplicado no solo.

Sparks (1987) salienta que a adubação promove uma condição de desequilíbrio em relação à dinâmica do K nos solos agrícolas, conforme observado nos resultados, onde se observa teores de K extraídos por Mehlich-I muito acima dos valores ideais para as culturas de grãos e com magnitudes extremamente contrastantes dos solos sob baixa pressão antrópica. Segundo Gatiboni, Silva e Anghinoni (2016) valores de K lábil acima do preconizado pela literatura podem restringir o desenvolvimento das culturas. Essas condições podem promover danos as plantas devido ao efeito salino do KCl (Raij et al., 2011), favorecer perdas por erosão (Bortoluzzi et al., 2013) e a reposição de íons nas entrecamadas dos minerais e da fração disponível, promovendo um consumo de luxo pelas plantas (Moterle et al., 2016), além de elevar os custos com fertilizantes para o produtor.

Ainda, a magnitude nos teores de K lábil é grande entre os solos sob SPD, tanto dentro da mesma região, como entre as regiões com valores variando de 79 a 970 mg kg⁻¹ na camada 0 a 1 cm. Nesse aspecto, os resultados indicam para cada região que a variabilidade de K extraído por Mehlich-I nos solos é muito maior para os teores médios de K lábil que se encontram no solo nas camadas acima do NC em detrimento dos valores abaixo do NC.

Assim, os valores médios regionais de K lábil, que se encontram acima do NC, apresentaram maior variabilidade em relação à média regional, ou seja, os teores de K lábil estão mais dispersos em relação ao NC e enquadraram-se na classe de disponibilidade de K “muito alto” nas quatro regiões, em média na camada 0 a 7 cm. Já para os valores de K lábil que se encontram no solo nas camadas abaixo do NC, os teores médios de K lábil apresentam-

se mais concentrados em torno da média, ou seja, estão menos dispersos em relação ao NC, em média abaixo de 12 cm de profundidade no perfil, sendo que a região da Serra Gaúcha encontra-se na classe de disponibilidade “muito baixo” e as regiões das Missões, Planalto e Depressão central, como “baixo”.

Isto se deve a uma condição de maior estabilidade nos teores de K lábil abaixo do NC devido à menor interferência da adubação potássica, obtendo assim, menor variabilidade nos teores. Enquanto que em superfície se destaca essa maior amplitude, com teores de K lábil muito acima dos preconizados pela literatura, possivelmente influenciados pelo manejo, principalmente pela aplicação superficial de K, que favorece sua concentração no solo nas primeiras camadas.

Nesse aspecto, os resultados mostram uma variabilidade muito maior nos teores de K lábil no solo primeiras camadas de solo com teores K muito acima do preconizado pela literatura, bem como uma limitação nos teores no solo em maior profundidade, também observado por Tiecher et al. (2017), o que demonstra claramente estar ocorrendo falhas no manejo da adubação potássica. Segundo Gatiboni, Silva e Anghinoni(2016) o ideal é o teor de K lábil permanecer na faixa “alto” que é considerada adequada, pois o teor do nutriente supre tanto a exportação quanto possíveis perdas no sistema.

Em relação ao comportamento do K lábil no solo sob diferentes usos do solo (SPD e sob baixa pressão antrópica) ao longo de todo o perfil, verificou-se que nos solos sob SPD os teores de K lábil são predominantemente superiores aos teores das áreas sob baixa pressão antrópica nas camadas superficiais. Já em maior profundidade no solo no perfil os teores de K lábil nos solos sob SPD são inferiores aos solos sob baixa pressão antrópica. Isso, possivelmente, deve-se a absorção de K lábil pelas raízes em maior profundidade depositando-o em superfície através da decomposição da MO (Raij, 2011), esgotando as reservas de curto prazo no solo em camadas mais profundas.

Assim, mesmo os solos apresentando teores de K lábil muito acima do preconizado pelas normas técnicas no solo nas camadas superficiais, conforme observado nos resultados, não ocorreu uma distribuição nos teores de K lábil no solo ao longo dos perfis, demonstrando que, mesmo com altas doses de K em superfície sua migração no solo não é significativa sob o ponto de vista agrícola, pois em média no solo abaixo de 12 cm predominam teores de K lábil abaixo do NC.

Nesse contexto, muitas variáveis podem atuar como interferentes nas formas de K presentes no solo, dentre elas Curi, Kampf e Marques (2005) destacam a rocha matriz, as condições ambientais do solo, o estágio de intemperismo, o tipo de solo e a profundidade no

perfil. Porém, o manejo da fertilidade, principalmente através do SPD, é responsável pela maior concentração de K acumulado em superfície (Ciotta et al., 2002), devido a isso os solos sob SPD apresentarem magnitudes nos teores de K lábil muito superior aos solos sob baixa pressão antrópica em superfície.

Dessa forma, ambas as regiões apresentam o mesmo padrão de distribuição nos teores de K lábil com um enriquecimento nos teores de K lábil nas camadas superficiais seguida de uma diminuição nos teores conforme se aprofunda no solo no perfil, variando em magnitude em superfície, bem como uma ampla variabilidade nos teores nas camadas de solo que se encontram acima do NC.

7.2 Teores de K moderadamente lábil

Os resultados demonstram que houve um aumento nos teores de K moderadamente dessorvível em superfície para a maioria dos solos, tanto nos solos sob SPD como nos solos sob baixa pressão antrópica, a partir dos quais se infere estar ocorrendo à adsorção de íons K^+ no espaço entrecamadas de minerais 2:1 em ambos os usos do solo. Esse aumento de K moderadamente dessorvível coincide com os maiores teores de K extraídos por Mehlich-I também em superfície, tanto nos solos sob SPD onde a maioria se encontra acima do nível “alto”, como nos solos sob baixa pressão antrópica que se enquadram acima do NC em superfície, mas que apresentam magnitude muito menor nos teores de K lábil.

Somente três solos apresentaram uma diminuição nos teores de K moderadamente dessorvível em superfície, dois em área de lavoura (figura 17b e figura 19a) e um em solo de bioma natural (figura 15a). Possivelmente, essa diminuição superficial nos teores de K moderadamente dessorvível se deu pela ação do intemperismo e, conseqüentemente, pode ter ocorrido o transporte de K via sedimentos sob condições de elevados fluxos de água (Bortoluzzi et al., 2013). Por outro lado, esses dois solos sob SPD apresentaram teores de K lábil no nível “muito alto” e, mesmo assim, não houve a reposição de K moderadamente dessorvível no solo nessas camadas demonstrando que essa reposição no espaço entrecamadas não ocorre de forma imediata, mesmo com alta concentração de K lábil.

Nesse aspecto, apesar dos solos sob SPD apresentarem teores de K lábil muito superior aos solos sob baixa pressão antrópica, essa alta concentração não causou grande impacto sobre os teores de K moderadamente dessorvível, pois ambos apresentaram um acréscimo nos teores no solo nas primeiras camadas. Isso demonstra que o potássio pode ficar retido na fração moderadamente dessorvível, mas que a aplicação de K em excesso, não

necessariamente, ficará retida como reserva de longo prazo.

Ao se avaliar os solos em maior profundidade, observa-se a prevalência de teores de K moderadamente dessorvível superiores aos teores extraídos por Mehlich-I, tanto em solos sob SPD como em solos sob baixa pressão antrópica, com exceção dos solos cultivados da região das Missões que apresentaram valores de K moderadamente dessorvível semelhantes ao K lábil no solo abaixo da camada 0 a 15 cm. Dessa forma, mesmo os solos apresentando teores de K lábil inferiores ao NC, predominam teores de K moderadamente dessorvível superiores ao K lábil no solo em maior profundidade, corroborando a literatura que prediz que a entrada de K é mais rápida que a saída do K do espaço entrecamadas dos minerais.

Isto se deve ao potássio apresentar mais de um mecanismo de liberação, ou seja, o elemento pode estar associado a GF da fase sólida com distintas energias, o que implica em distintas velocidades de liberação de K para a solução (Carey et al., 2003) o que justifica a não liberação de K moderadamente dessorvível para suprir o esgotamento de K lábil da solução, inferindo-se que houve a “fixação” de K a longo prazo. Ainda, Barrow (1999) ressalta que as reações de adsorção e dessorção ocorrem em tempo e velocidade distinta, influenciadas pela heterogeneidade das partículas e pela presença dos grupos funcionais reativos.

Esse mecanismo onde se tem a perda de elementos para a fase sólida é descrito por Essington (2003) como histerese, onde a adsorção apresenta uma fase inicial rápida seguida de uma fase mais lenta e irreversível, podendo ocorrer a formação de CEI. A formação de CEI e, conseqüentemente, a sua complexação no espaço entrecamada é, favorecida devido ao diâmetro iônico do K ser similar ao da cavidade siloxana (Kampf, 2012). Além disso, Schroeder (1984) destaca que íons maiores apresentam maior afinidade de adsorção aos colóides do solo, pois possuem uma menor atuação das águas de hidratação sobre as cargas do íon. Dessa forma, a combinação entre a carga gerada na CS e o raio do íon K^+ são a base para o termo fixação de potássio nas vermiculitas (Sposito, 2008).

Dessa forma, predominantemente os solos avaliados apresentaram um padrão de distribuição nos teores de K moderadamente dessorvível com um enriquecimento nos teores em superfície seguido de uma diminuição nos teores na medida em que se aprofunda no solo perfil. Isto possivelmente se deve ao esgotamento das reservas de K lábil em maior profundidade que favorece a dessorção de K do espaço entrecamadas dos minerais.

7.3 Teores de K total e estrutural

Quanto aos teores de K estrutural os resultados indicam que todos os solos apresentaram uma redução no K estrutural no solo em superfície, exceto os solos naturais das regiões do Planalto e Depressão Central que tiveram um aumento nos teores no solo em superfície. Possivelmente, essa diminuição nos teores de K estrutural no solo nas camadas superficiais é influenciado pela maior intensidade do intemperismo que atua liberando o nutriente para a solução do solo através de reações como a hidrólise e a protonação que de acordo com Sposito (2008) promovem a dissolução dos minerais primários, formando produtos na fase sólida e espécies dissolvidas na solução do solo, sendo as últimas passíveis de serem lixiviadas.

Com exceção do solo sob baixa pressão antrópica da região das Missões (figura 21a) e do solo sob SPD da região da Depressão central (figura 22c), todos os demais solos tiveram um incremento nos teores de K total em superfície. Esse incremento é influenciado, principalmente pelo enriquecimento nos teores de K lábil em superfície decorrente da aplicação de fertilizantes que, conforme Bortolluzi et al. (2005) contribuem com os teores de K total, K moderadamente dessorvível e K lábil afetando a fase mineral.

Nesse contexto, o padrão de distribuição dos teores de K no perfil do solo sob SPD seguem o padrão de distribuição dos solos sob baixa pressão antrópica quanto aos teores de K lábil, K moderadamente lábil, K estrutural e K total para a maioria dos solos, no entanto, apresentam magnitudes extremamente diferentes entre os distintos usos, principalmente, em relação K lábil onde os solos sob SPD apresentaram valores muito superiores nas camadas primeiras camadas do solo.

Dessa forma, características do elemento potássio e as reações do íon com os grupos funcionais reativos limitam sua permanência como cátion hidratado na solução do solo, pois os mesmos podem ter um efeito catalisador sobre a molécula de água. Essas características associada à afinidade do potássio pelas cargas geradas na fase sólida promovem sua adsorção aos colóides do solo afetando a constituição dos minerais e diminuindo sua concentração em solução o que, conseqüentemente, limita a migração do K^+ do local de aplicação do fertilizante para o volume do seu entorno, promovendo a concentração de K lábil na superfície do solo.

8 CONCLUSÃO

- a. O padrão de distribuição dos teores de potássio no solo sob SPD segue o padrão dos solos sob baixa pressão antrópica, apresentando maiores teores de K extraído por Mehlich-I no solo das camadas superficiais que diminuem drasticamente com o aumento da profundidade do solo.
- b. 84% dos solos apresentaram teores de K lábil na classe de disponibilidade “muito alto” no solo nas camadas superficiais, em média na camada 0 a 7 cm, enquanto apenas 14% dos solos enquadram-se no nível adequado de K lábil primeiras camadas de solo para as culturas de grãos.
- c. A variabilidade de K extraído por Mehlich-I nos solos acima do NC é muito maior do que nos solos abaixo do NC.
- d. Os resultados indicam uma alta heterogeneidade na concentração de K ao longo dos perfis de solo, com teores de K muito acima dos recomendados em superfície, favorecido pelo SPD e uma deficiência nos teores em maiores profundidade, em média abaixo de 12 cm, demonstrando uma falha no manejo da adubação potássica nos solos sob SPD.
- e. Os maiores teores de K moderadamente lábil em superfície para a maioria dos solos coincide com os maiores teores de K extraídos por Mehlich-I, indicativo de que o potássio está acumulando-se nos espaços entrecamadas dos minerais.
- f. Características do elemento K limitam a permanência do íon como cátion hidratado, diminuindo o seu teor em solução. Consequentemente há restrição à percolação do K no solo de maneira significativa, favorecendo sua concentração no local em que foi aplicado o fertilizante.

9 REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L.R.F. et al. Química nos solos altamente intemperizados. In: MELO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, SBCS, 2009. p. 382-429.
- ALLEONI, L.R.F.; MELO, J.W.V; ROCHA, W.S.D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, SBCS, 2009. p. 70-122.
- AZEVEDO, A.C; TORRADO,P.V. Esmectita, Vermiculita, minerais com hidroxí entrecamadas e clorita. In: MELO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, SBCS, 2009. p. 382-418.
- BALASTREIRE , L.A.; COELHO, J.L.D. **Aplicação mecanizada de fertilizantes e corretivos**. 2º ed. - SP: ANDA- Associação Nacional para a Difusão de Adubos, 2000. 53 p. (Boletim técnico nº 07).
- BARROW, N.J. **The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998**.Australia: CSIRO Australia,1999. v.37, p. 787-829.
- BELL, M.J et al. Considering Soil Potassium Pools with Dissimilar Plant Availability. In: MURRELL T.S. et al.(eds). **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**. Switzerland.Springer, 2021.
- BORTOLUZZI, E.C. et al. **Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica**. R. Bras. Ci. Solo, 2005, 29:327-335.
- BORTOLUZZI, E.C. et al. **Mineralogy and nutrient desorption of spended sediments during a storm event**. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Câmara temática de insumos agropecuários- CTIA. **Fertilizantes**. Brasília, 2018. 7 pag. (94ª reunião).
- BRITZKE, D. et al. **A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical**. Brazilian lowlands. J Soil Sediment. 2012.12:185–197.
- BRUNETTO, G. et al. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas: nível crítico e respostas das culturas ao potássio em um argissolo sob sistema de plantio direto**. R. Bras. Ci. Solo, 2005, 29: 565-571.
- CAREY, P.L.; METHERELL, A.K. **Rates of release of non-exchangeable potassium in New Zealandsoils measured by a modified sodium tetraphenyl-boron method**. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2003, Vol. 46: 185–197.
- CASTILHOS, R. M. V.; MEURER E. J. **Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul**. Ciência Rural, Santa Maria, v.31, n.6, p.979-983, 2001.
- CHOROVER, J.; SPOSITO, G. **Surface charge characteristics of kaolinitic tropical soils**. Geochimica et cosmochimica Acta, 1995, vol. 59, n.5. pg. 875-884.

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

CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T. ROBERTS, T.L. **Potássio na agricultura brasileira**. Editora: KP Potafos, 2005. 841 p.

DICK, D.P.; et al. Química da material orgânica do solo. In: MELO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, SBCS, 2009. p. 2 a 55.

EMBRAPA- Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 1997. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 212p.

ESSINGTON, M.E. **Soil and water chemistry: an integrative approach**. Boca Raton, Flórida: CRC PRESS LLC, 2003.

GATIBONI, L.C.; SILVA, L.S., ANGHINONI, I. Diagnóstico da fertilidade do solo e recomendação de adubação. In: **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. Comissão de Química e Fertilidade do solo- RS/SC, 2016. 376 p.

GOOGLE IMAGE. https://no.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Electron_shell_019_Potassium.svg.> Acesso em 5 de jul de 2021.

KAMINSKI, J. et al. **Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos**. R. Bras. Ci. Solo, 2007, 31:1003-1010.

KAMPF, N.; MARQUES, J.J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J.C. et al (eds). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG, SBCS, 2012. 343 p.

LOPES, A.S.; GUILHERME, R.L.G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos**. 3º ed. SP: ANDA- Associação Nacional para a Difusão de Adubos, 2000. 72 p. (Boletim técnico nº 04).

MELO, V.F.; CASTILHOS, R.M.V; PINTO, L.F.S.(Eds.). Reserva mineral do solo. In: MELO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, SBCS, 2009. p. 251-332.

MELO, V.F. et al. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. In: MELO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações**. R. Bras. De ciência do Solo, 24:269-284, 2000.

MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, Genesis, 2000.

MEURER, E.J.; ROSSO, J.I. **Cinética de liberação de potássio em solos do Rio Grande do Sul**. Rev. Bras. Ciência do Solo. Viçosa, 21:553-558, 1997.

MOTERLE, D.F. et al. **Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil**. Springer, 2016.

MOTERLE, D.F. et al. **Does Ferralsol clay mineralogy maintain potassium long-term supply to plants?** Rev Bras Cienc Solo. 2019; 43: e0180166.

MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v 27, p. 31-36, 1962.

OBORN, I. et al. **Critical aspects of potassium management in agricultural systems**. Soil Use and Management. 21. 102 - 112. 2005.

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

ROSOLEM, C.A. et al. **Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.41, n.6, p.1033-1040, jun. 2006

SCHROEDER, D. (autor). **Fatos e conceitos**. Tradução do alemão para o inglês por P.A. Gething (1984) e do inglês para o português por Alfredo Sheid Lopes (2017). São Paulo, ANDA, 2017. Original: D. Schroeder (autor) na edição de língua alemã “Bodenkunde in Stichworten”, publicado por Ferdinand Hirt AG CH-6314 Unterägeri/Suíça 1969, 4ª edição 1984.

SONG, S.K., HUANG, P.M. **Dynamics of potassium release from potassium – bearing mineral as influenced by oxalic and citric acids**. Soil Sci. Soc. Am.J., 1988. Vol.52, 383: 390 p.

SPARKS, D.L & HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R.D., ed. **Potassium in agriculture**. Madison, Soil Science Society of America, 1985. p.201-276.

SPARKS, D.L. **Potassium dynamics in soils**. New York, Springer-Verlag, 1987. 63p. (Advances in Soil Science, 6).

SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. 2 ed. EUA: Academic Press, 2003, 352 p.

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

SPOSITO, G. et al. **Surface Geochemistry of the Clay Minerals**. Source: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 96, No. 7 (Mar. 30, 1999), p. 3358-3364.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TIECHER, T. **A química antes da química do solo** (recurso eletrônico). FredericoWestphalen, RS: URI, 2015. 91p.

TIECHER, T. et al. **Soil fertility and nutrient budget after- 23 years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol.** Geoderma. p. 78-85. 2017.

TOLEDO, J. A.; KAMINSKI, J.; SANTANNA, M. A.; SANTOS, D. R. **Tampão Santa Maria (TSM) como alternativa ao tampão SMP para medição da acidez potencial de solos ácidos.** Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 36, p. 427-435, 2012.

ZHANG , N. X.; ZHAO, A. Z. Surface charge. In: YU, T.R. (ed). **Chemistry of variable charge soil** (Topics in sustainable agronomy).New Work: Oxford University Press, 1997, p.18-59.

U.S.E.P.A. Agência de Proteção Ambiental dos EUA. **Method 3052.** Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils.Revisado em 1996. Disponível em: <<https://www.epa.gov/esam/us-epa-method-3051a-microwave-assisted-acid-digestion-sediments-sludges-and-oils>>. Acessoem: 20 abr 2021.

WANG, H.Y. et al. **Evaluating plant-available potassium in different soils using a modified Sodium Tetraphenylboron Method.** China: Soil Sci. 2010;175: 544Y551.

10 APÊNDICES

Apêndice A - Valores médios de CTC_{pH 7,0} para quatro regiões do Estado- RS de acordo com a profundidade no solo do perfil.

Profundidade (cm)	Depressão			
	Missões	Central	Planalto Médio	Serra Gaúcha
.....cmol _c dm ⁻³				
1	17,8	12,7	19,1	29,4
2	16,0	11,7	18,4	27,1
3	15,2	11,2	17,8	25,3
4	14,6	10,5	16,7	25,5
5	15,3	9,9	15,8	24,9
6	14,6	9,3	14,9	22,9
7	14,3	9,1	14,3	21,2
8	14,1	8,8	13,5	20,3
9	13,8	8,7	13,5	19,5
10	13,3	8,7	12,9	19,1
12,5	12,9	8,6	12,5	18,7
15	12,6	8,4	12,0	18,0
17,5	12,3	8,7	11,5	17,3
20	12,3	9,4	11,3	17,2
22,5	12,1	10,0	11,4	16,1
25	12,1	10,6	11,1	16,0
30	12,3	11,5	11,0	15,1
35	11,9	11,6	10,8	13,8
40	11,4	11,8	10,5	14,0
Média	13,6	10,1	13,6	20,1

Apêndice B – Classe textural dos solos na camada 0 a 10 cm para os perfis sob SPD e sob baixa pressão antrópica (T) estimados pelo método da pipeta.

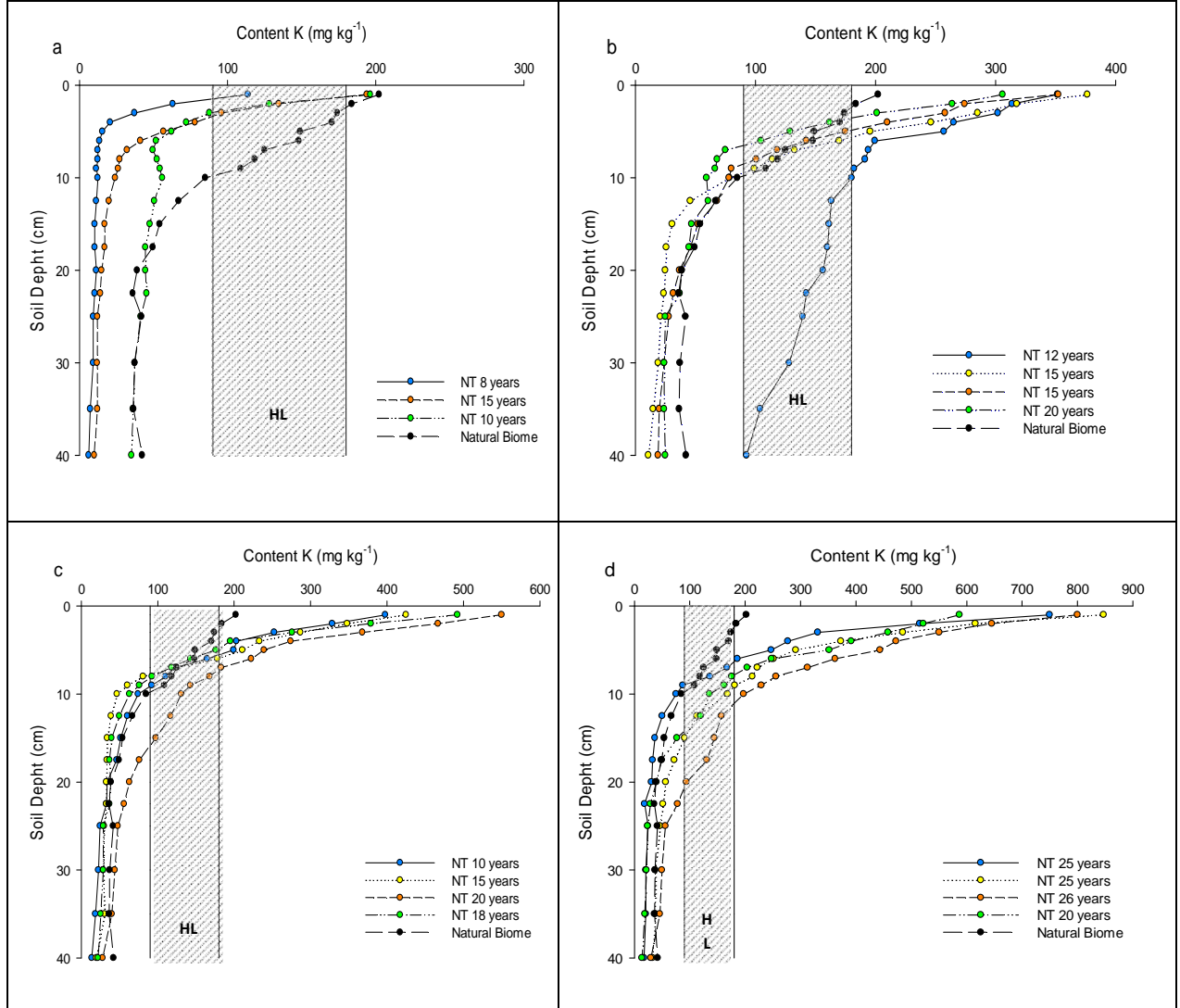
AMOSTRA	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS (%)				CLASSE TEXTURAL
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
	(2-0,2mm)	(0,2-0,05mm)	(0,05-0,002mm)	(< 0,002mm)	
T2	8,07	13,76	26,18	51,99	Argila
T3	9,44	8,59	46,87	35,09	Franco argilosiltoso
5	3,10	6,09	34,38	56,43	Argila
8	1,81	9,54	27,45	61,21	Muito argiloso
18	15,46	37,48	21,94	25,12	Franco argilo arenoso
19	13,71	35,41	35,16	15,71	Franco
24	29,79	25,23	22,34	22,65	Franco argilo arenoso
31	14,24	22,30	30,56	32,90	Franco argiloso
45	1,48	1,97	49,38	47,18	Argila siltosa
46	4,79	6,31	42,78	46,12	Argila siltosa
T1	18,14	39,09	29,00	13,77	Franco Arenoso
T4	1,63	4,19	52,47	41,71	Argila Siltosa

Apêndice C - Caracterização do manejo nos solos sob SPD no Estado do RS.

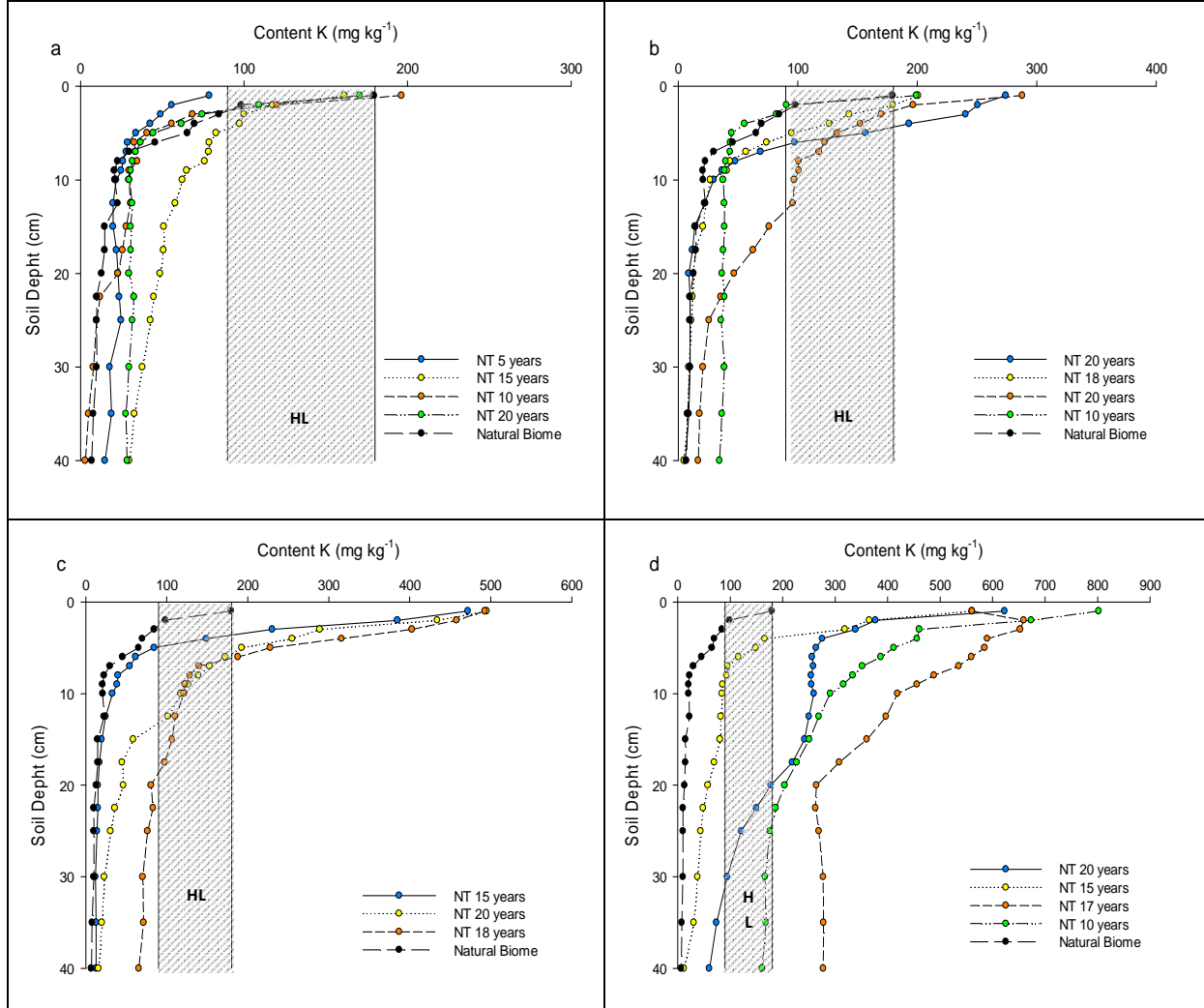
Amostra	SPD (anos)	Sucessão de culturas	Calcário (kg/ha)	Período	Aplicação	Fertilizante(kg/ha)	Aplicação2	Formulação	OBS
1	>10	V: S/I:AV - AZ	0,1	2018	SUP	150 KCl	L	MAP 11:52	KCl sup.
2	8	V: S/I:AZ	2	2019	SUP	-	L	03:27:14	-
3	25	V:M -G/I:AV-T-C	4	2014	SUP	-	SUP	03:24:30	AE/irrigação
4	24	V:M -G/I:AV-T-C	4	2016	SUP	-	SUP	03:24:30	AE/irrigação
5	>10	V:S-M/I:C-T	3	2015	SUP	140 KCl + 240 SPS	SUP	-	AE + calsite anualmente
6	12	V:M-S/I:NB-T	3,5	2016	SUP	450	L	12:31:18	-
7	>10	V: S/I:AV	5	-	INC	250 SPS + 300 de P + KCl	L	03:20:20	KCl sup.
8	15	V:S-M/I:T	1,5	2017	INC	350 + 300	L	11:30:20/2:20:20	-
9	19	V:M-S/I:AV	1	2017	SUP	350	-	5:30:15/12:20:30	-
10	26	V: S/I: AV	6	2014	SUP	380 +250 KCl	SUP	03:28/17 de Ca/7 de S	KCl 8 d antes da sementeira- sup
11	15	V: S/I:AV	2	2018	SUP	500	L	10:30:20	-
12	20	V:M-S/I:T	2,5	-	SUP	320	L	02:18:18	Aplicação de dejeito suíno em sup.
13	20	V:S-M/I:AV-T	3	-	SUP	-	SUP	-	KCl + calsite
14	15	V: S/I:T	1,5	2017	SUP	250+300 ABSOLUTO	SUP	11:30:20	-
15	15	V:S-M/I:AV-T	3	2015	SUP	375	L	02:23:23	-
16	15	V:M-S/I:AZ-T	2,5	2019	SUP	310	L	5:24:12/9 de S/5 de Ca	15 t de cama de bovinos em sup.
17	15	V:M-S/I:AZ-T	2,5	2019	SUP	310	L	5:24:12/9 de S/5 de Ca	sup
18	5	V: S/I:AV	-	-	SUP	-	-	-	-
19	20	V:S-M/I:AZ-PEC	2,2	2019	SUP	220 + 200 KCl	L	-	AE a 6 anos atrás/ KCl em sup
20	10	V:S-M/I:T	3	2019	SUP	250 MAP+250 KCl	L	-	AE/ KCl em sup
21	20	V: S/I:AV-T	2	2016	SUP	150	SUP	-	MAP+KCl
22	15	V: S/I:AV-T	0,3	-	SUP	250+150 KCl	L	04:30:10	KCl em sup
23	17	V: S/I:AV-NB	3	2017	SUP	250+250 KCl	L	-	Cama de aviário e KCl em sup
24	21	-	3	2018	SUP	50 SULFURGRAN+160 KCL	L	-	KCl em sup
25	15	V: S/I:T	-	-	-	MAP+170 KCl	L	11:52	KCl em sup
26	20	V: S/I:T	3	2019	INC	170 de P+140 de K	SUP	SPT 46%	-
27	15	V: S/I:POUSIO	3	2017	INC	200+140 KCl	L	00:07:30	KCl em sup
28	4	V: S/I:AZ	2	2018	INC	300	L	02:23:23	-
29	15	V: S/I:AV	2	2019	SUP	125 KCl	L	04:24:12	AE/ KCl em sup
30	18	V: S/I:AV	2	2018	-	100 KCl	L	03:23:12	KCl em sup
31	20	V: S/I:AV-T	2	2018	SUP	220+120KCl	L	07:37:06	KCl em sup
32	15	V: S/I:T	2	2018	SUP	220+120KCl	L	07:37:06	KCl em sup
33	20	V: S/I:AV	2,5	2018	-	200 MAP+180 KCl	SUP	-	Calcário calcítico
34	30	V:S-M/I:AV-NB	2	-	-	200 MAP+180 KCl	SUP	-	Calcário calcítico
35	20	-	3	2019	SUP	350+150 KCl	SUP	07:34:11	-
36	10	V: S/I:AZ	3	-	SUP	350	L	05:25:25	KCl somente na linha
37	10	V: S/I:AZ	3	2019	SUP	300	L	02:23:23	-
38	30	V: S/I:AV-CEV	3	2019	SUP	300	L	04:23:18	-
39	15	V: S/I:P	2,5	2020	SUP	330+100 KCl	L	05:20:20	Dejeito suíno e KCl em sup.
40	30	-	2,5	2017	SUP	100 KCl	L	04:23:20	KCl em sup
41	30	V: S/I:AZ	3	2019	SUP	300	L	02:23:23	-
42	28	V: S/I:T-CEV-AV	3	2019	SUP	300	L	04:23:18	-
43	15	V: S/I:P	3	2020	SUP	330	L	-	-
44	31	-	2,5	2017	SUP	-	L	-	-
45	10	V: S/I:AZ	3	2019	SUP	300	L	02:23:23	-
46	30	V: S/I:T-CEV-AV	3	2019	SUP	300	L	04:23:18	-

AE: área escarificada; AV: aveia; AZ: azevém; C: canola; CEV: cevada; G: girassol; I: inverno; INC: incorporado; L: linha; M: milho; NB: nabo; PEC: pecuária; S:soja; SUP: superficial; T: trigo; V: verão.

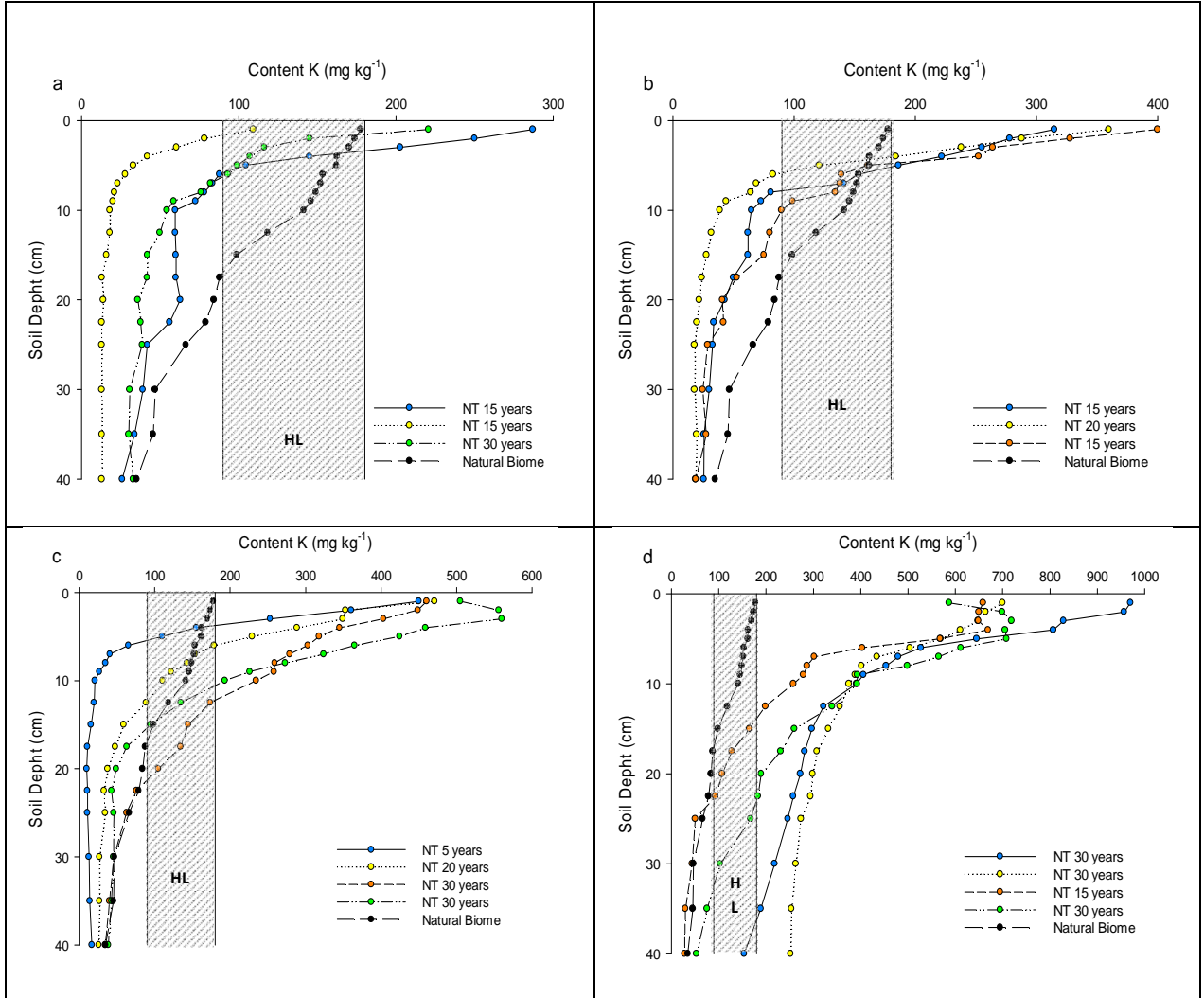
Apêndice D: Teores de potássio lábil para a região das Missões em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob SPD (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) estabelecida a partir de valores médios de CTC para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.



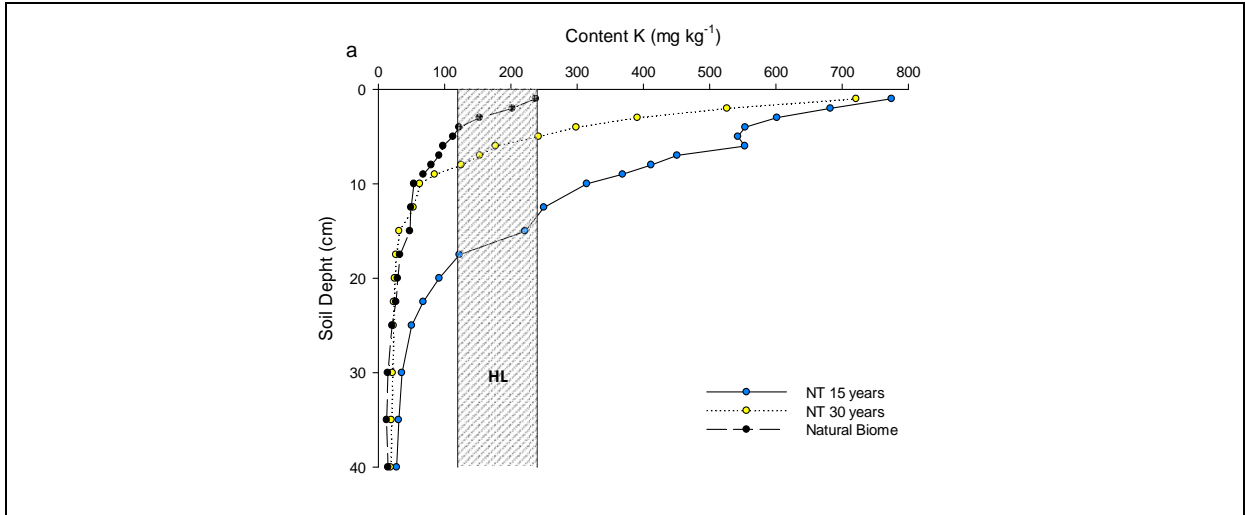
Apêndice E: Teores de potássio lábil para a região da Depressão Central em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob SPD (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) estabelecida a partir de valores médios de CTC para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.



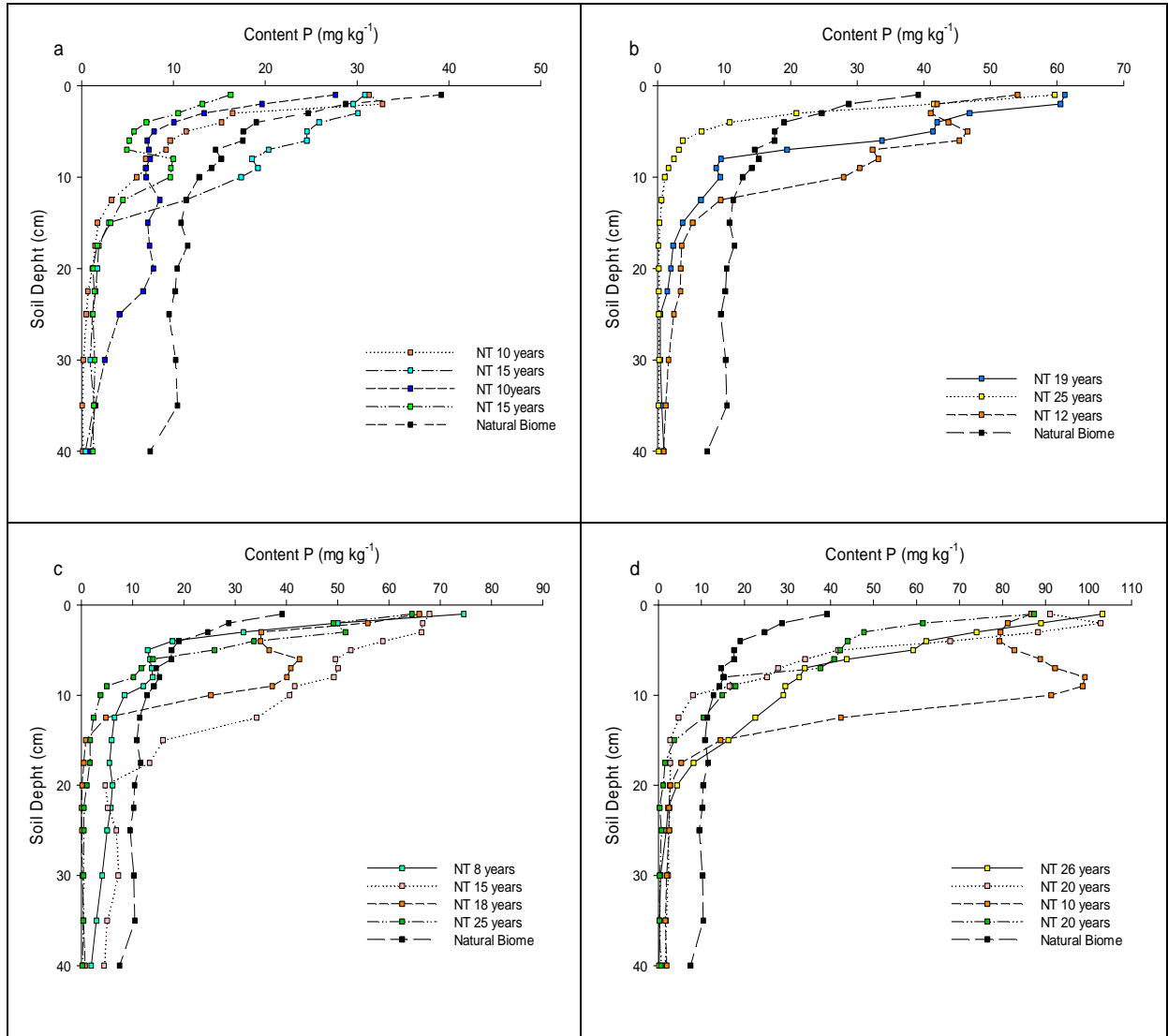
Apêndice F: Teores de potássio lábil para a região da Planalto em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob SPD (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) estabelecida a partir de valores médios de CTC para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.



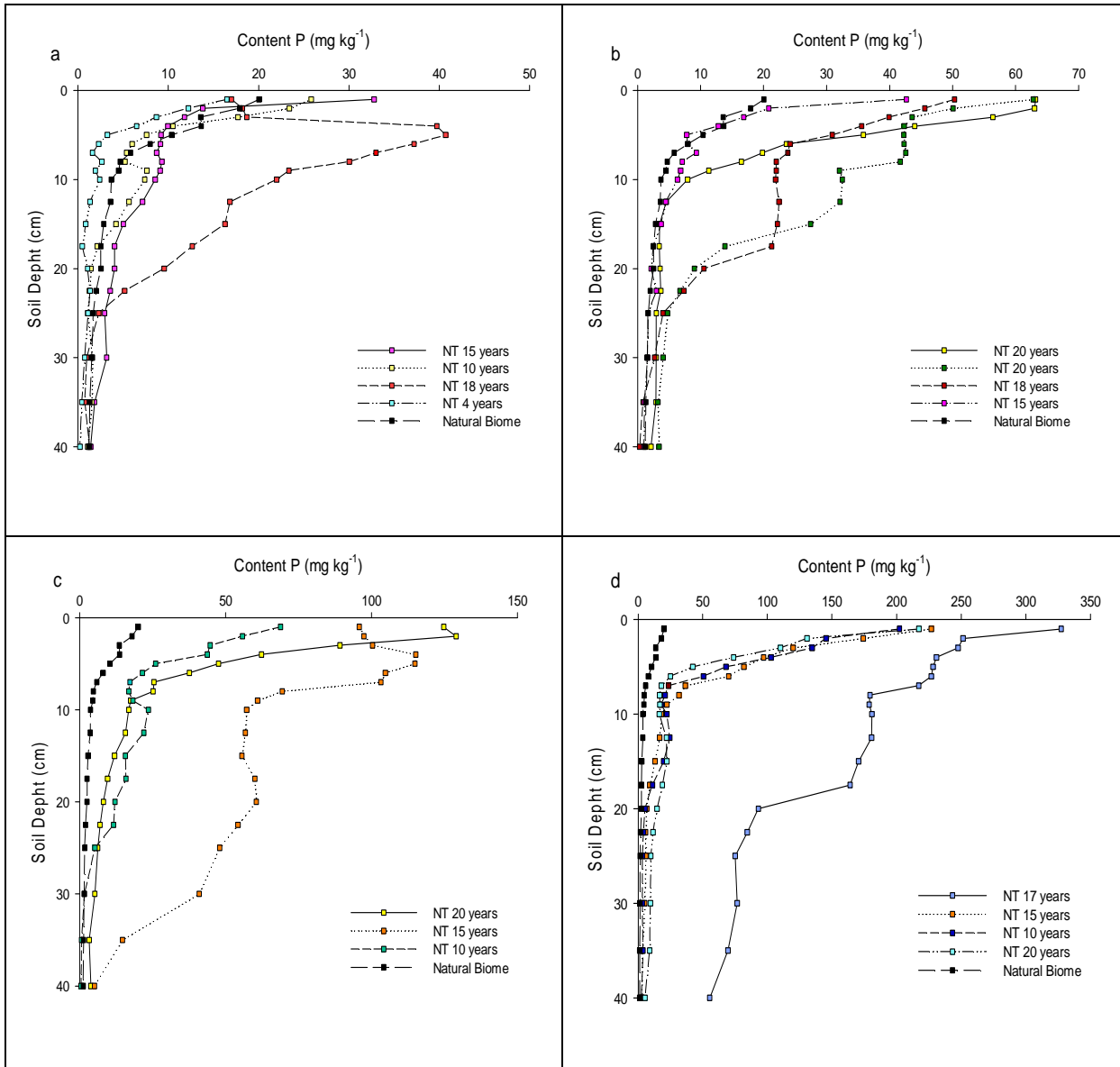
Apêndice G: Teores de potássio lábil para a região da Serra Gaúcha em solos sob baixa pressão antrópica (natural biome) e solos sob SPD (NT) e a classe de disponibilidade adequada (HL) estabelecida a partir de valores médios de CTC para as culturas do grupo 2, conforme a CQFS-RS.



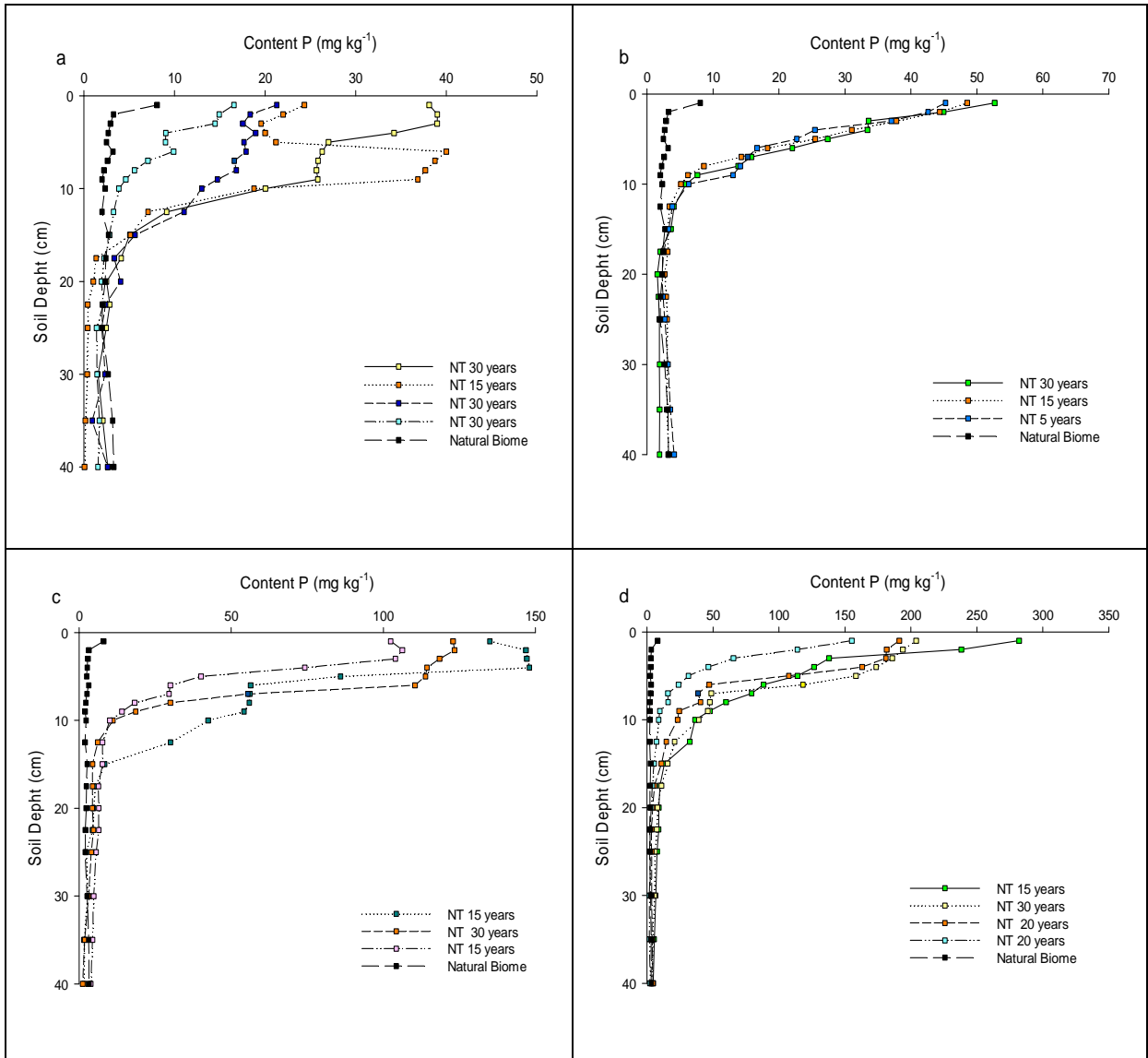
Apêndice H– Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região das Missões.



Apêndice I – Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região da Depressão Central.



Apêndice J – Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região do Planalto Médio.



Apêndice K – Conteúdo de P disponível extraído por Mehlich- I para a região da Serra Gaúcha.

