

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

ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS EM SOLOS SOB USOS E MANEJOS
DISTINTOS

ESTÉFANE CHAVES
(Tese)

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

ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS EM SOLOS SOB USOS E MANEJOS
DISTINTOS

ESTÉFANE CHAVES
Engenheira Agrônoma (UFSM)
Mestre em Ciência do Solo (UFSM)

Tese apresentada como
Um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutora em Ciência do Solo.

Porto Alegre (RS) Brasil

Outubro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Chaves, Estéfane
Alterações mineralógicas em solos sob usos e
manejos distintos / Estéfane Chaves. -- 2019.
84 f.
Orientador: Alberto Vasconcelos Inda Junior.

Coorientador: Danilo Rheinheimer dos Santos.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2019.

1. Solos. 2. Mineralogia. 3. Ações Antrópicas. I.
Vasconcelos Inda Junior, Alberto, orient. II.
Rheinheimer dos Santos, Danilo, coorient. III. Título.

Pagina de aprovação

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e amigos que foram meus mais fiéis incentivadores.

ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS EM SOLOS SOB USOS E MANEJOS DISTINTOS¹

Autor: Estéfane Chaves

Orientador: Alberto Vasconcelos Inda Junior

RESUMO

O solo é parte fundamental do grande desafio nacional e mundial atual que é a sustentabilidade ambiental. A expressiva expansão dos setores agrícola e florestal no Brasil tem dado evidência a estudos que direcionam suas ações de investigação para a preservação e utilização racional dos recursos naturais. A conversão de áreas de campo do bioma Pampa em áreas para uso agrícola e florestal tem levado a uma rápida perda da biodiversidade. A pesquisa tem demonstrado que mudanças no uso do solo, como as descritas para os campos sulinos, alteram as suas condições pedoambientais. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo principal investigar duas situações de ações antrópicas de longa duração sobre áreas do bioma Pampa no Rio Grande do Sul: (I) Substituição do uso do solo sob campo para o uso do solo com florestamento comercial de *Eucalyptus* spp. Amostras de um Argissolo Vermelho Distrófico foram coletadas em horto florestal (16 anos de cultivo), em triplicata e em quatro profundidades e também foi coletado um solo de controle, vegetado com campo natural. (II) Conversão do uso do solo sob campo para o uso com lavoura (25 anos de cultivo) manejada com altas doses de calcário. As amostras de solo (Argissolo Acinzentado Distrófico) foram coletadas na lavoura, nas doses de 0,0 e 17,0 t ha⁻¹, sem e com incorporação de calcário. O solo florestado com *Eucalyptus* spp. diminuiu os teores de Ca²⁺, a soma de bases e a saturação por bases. O solo também se torna mais ácido e aumentam os teores de Al³⁺ trocável e de H⁺+Al³⁺. Ocorre a redução da concentração de óxidos de ferro pedogênicos. No solo rizosférico ocorre o processo de rubeificação (avermelhamento), constatado através do aumento da razão Hm/(Hm+Gt). O fracionamento físico da argila desferrificada associado à difratometria de raios X, indica que a caulinita é dissolvida, possivelmente por reações protônicas. Nos solos cultivados com lavoura observou-se aumento na disponibilidade de Ca²⁺ e Mg²⁺, pH e saturação por bases, diminuição na disponibilidade de P quando aplicado superficialmente bem como a diminuição do Al³⁺ trocável e saturação por alumínio. As adições de 17 toneladas de calcário distribuído superficialmente diminuem o teor de argila grossa. O cultivo do solo com lavoura e aplicação de 17 toneladas de calcário distribuído superficialmente diminuem a intensidade da mica, caulinita e minerais 2:1. Quando houve revolvimento do solo sem calagem há diminuição da intensidade dos reflexos da caulinita, mica e minerais 2:1, principalmente nas camadas superficiais. Os resultados alcançados mostraram que as duas situações de ações antrópicas de longa duração sobre áreas do bioma Pampa no Rio Grande do Sul causaram alterações importantes no âmbito físico, químico e mineralógico do solo.

Palavras chave: Mineralogia, Alterações antrópicas

¹Tese de Doutorado em Ciência do Solo – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (72 p.) – Dezembro, 2020.

MINERALOGICAL CHANGES IN SOILS UNDER DIFFERENT USES AND MANAGEMENT¹

Author: Estéfane Chaves

Adviser: Alberto Vasconcelos Inda Junior

ABSTRACT

The soil is a key part of the great current national and global challenge of environmental sustainability. The significant expansion of the agricultural and forestry sectors in Brazil has given evidence to studies that direct their research actions towards the preservation and rational use of natural resources. The conversion of field areas in the Pampa biome into areas for agricultural and forestry use has led to a rapid loss of biodiversity. Research has shown that changes in land use, such as those described for southern fields, alter their pedoenvironmental conditions. Therefore, the present study aimed to investigate two situations of long-lasting anthropic actions on areas of the Pampa biome in Rio Grande do Sul: (I) Substitution of land use under fields for land use with commercial forestry of *Eucalyptus spp.* Samples of an Alfisol were collected in a forest garden (16 years of cultivation), in triplicate and at four depths, and a control soil, vegetated with a natural field, was also collected. (II) Conversion of land use under field to use with crops (25 years of cultivation) managed with high doses of limestone. The soil samples (Alfisol) were collected in the fields, at doses of 0.0 and 17.0 t ha⁻¹, with and without limestone incorporation. The soil forested with eucalyptus decreased the levels of Ca²⁺, the sum of bases and base saturation. The soil also becomes more acid and increase the contents of exchangeable Al³⁺ and H⁺ + Al³⁺. There is a reduction in the concentration of pedogenic iron oxides. In the rhizospheric soil there is the process of redness, verified by increasing the Hm / (Hm + Gt) ratio. The physical fractionation of the unferrified clay associated with X-ray diffraction, indicates that the kaolinite is dissolved, possibly by protonic reactions. In soils cultivated with crops, there was an increase in the availability of Ca²⁺ and Mg²⁺, pH and base saturation, a decrease in the availability of P when applied superficially as well as a decrease in the exchangeable Al³⁺ and saturation by aluminium. The addition of 17 tons of superficially distributed limestone decreases the coarse clay content. The cultivation of the soil with tillage and application of 17 tons of lime distributed superficially reduces the intensity of mica, kaolinite and minerals 2:1. When the soil is untouched, there is a decrease in the intensity of the reflexes of kaolinite, mica and minerals 2:1, mainly in the superficial layers. The results achieved showed that the two situations of long-lasting anthropic actions on areas of the Pampa biome in Rio Grande do Sul caused important changes in the physical, chemical and mineralogical scope of the soil.

Key-words: Mineralogy, anthropic actions

¹Doctoral Thesis in Soil Science – Soil Science Graduate Program, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (72p.) – December, 2020.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO II – ALTERAÇÕES FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS EM ARGISSOLO VERMELHO SOB FLORESTAMENTO DE <i>EUCALYPTUS</i>SPP.	5
1. INTRODUÇÃO	5
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1 <i>Localização, coleta e preparo das amostras</i>	9
2.2 <i>Análises químicas</i>	12
2.3 <i>Análises físicas e mineralógicas</i>	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
3.1 <i>Análises químicas</i>	16
3.2 <i>Análises físicas</i>	20
3.3 <i>Análises mineralógicas</i>	24
4. CONCLUSÕES	32
CAPÍTULO III: ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS EM SOLO CULTIVADO COM LAVOURA E ADIÇÕES DE ALTAS DOSES DE CALCÁRIO	33
1. INTRODUÇÃO.....	33
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
2.1 <i>Localização, coleta e preparo das amostras</i>	39
2.2 <i>Análises químicas</i>	41
2.3 <i>Análises físicas e mineralógicas</i>	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
3.1 <i>Análises químicas</i>	44
3.2 <i>Análises físicas</i>	50
3.3 <i>Análises mineralógicas</i>	54
4. CONCLUSÕES	61
CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

Relação de Tabelas

- Tabela 1.** – Interações dos atributos químicos do solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE)..... 18
- Tabela 2.** Desdobramento da interação dos efeitos do uso do solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) e da profundidade para características químicas do solo..... 18
- Tabela 3.** Efeito do uso do solo em propriedades químicas da profundidade de 0,0 a 0,8 m..... 19
- Tabela 4.** Efeito da profundidade nas propriedades químicas de solos sob uso de campo (CA) ou Florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE)..... 19
- Tabela 5.** Distribuição granulométrica, área superficial específica do solo e parâmetros de cor ao longo das camadas de solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE), e no solo rizosférico da vegetação de campo e de plantas de *Eucalyptus* spp..21
- Tabela 6.** Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 9,93 \text{ \AA}$ da mica e $d= 7,13$ e $3,57 \text{ \AA}$ da caulinita nos difratogramas de raios x da fração argila desferrificada do solo ($< 2 \mu\text{m}$) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.27
- Tabela 7.** Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 9,93 \text{ \AA}$ da mica e $d= 7,13$ e $3,57 \text{ \AA}$ da caulinita nos difratogramas de raios x da sub fração argila 0,1-2 μm desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.29
- Tabela 8.** Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 9,93 \text{ \AA}$ da mica e $d= 7,13$ e $3,57 \text{ \AA}$ da caulinita nos difratogramas de raios x da sub fração argila 0,05-0,10 μm desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.30
- Tabela 9.** Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 7,13$ e $3,57$ da caulinita nos difratogramas de raios x da sub fração argila $< 0,05 \mu\text{m}$ desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.31

Tabela 10. Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos d= 9,93 Å da mica e d= 7,13 e 3,57 Å da caulinita nos difratogramas de raios x da fração argila < 2 µm desferrificada do solo rizosférico sob uso de campo (CA) e florestamento de <i>Eucalyptus</i> spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.	31
Tabela 11a e 11b. Atributos químicos e estatísticos avaliados em diferentes profundidades do solo sem e com adição de calcário, sem e com incorporação do calcário.....	47
Tabela 12. Efeito da dose de calcário sobre as propriedades químicas do solo na camada de 0,0 a 0,80 m sob sistemas de aplicação do calcário (superficial ou incorporado).....	47
Tabela 13. Efeito da profundidade das camadas sobre as características químicas de solo que recebeu 0 ou 17 t ha ⁻¹ de calcário em sistemas de aplicação do calcário (superficial ou incorporado).	50
Tabela 14. Teor de argila e área superficial específica da fração argila do solo amostrado para os quatro tratamentos, em quatro profundidades.	52

Relação de figuras

- Figura 1.** Delimitação do Bioma Pampa na América do Sul, Brasil e Rio Grande do Sul.....3
- Figura 2.** Localização espacial das áreas plantadas com *Eucalyptus* spp. no estado do Rio Grande do Sul (Ageflor, 2017).7
- Figura 3.** A -Mapa da América do Sul; B - estado do Rio Grande do Sul; e C – localização do o Horto florestal Terra Dura, no município de Arroio dos ratos. 10
- Figura 4.** Localização das trincheiras em solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) (Fonte: Google Earth Pro- junho/2018)..... 11
- Figura 5.** Perfis de solos descritos e coletados sob campo (CA) (acima) e sob florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) (abaixo). 12
- Figura 6.** Balanço de massa entre as sub frações da fração argila.....23
- Figura 7.** Difratomogramas de raios x da fração argila desferrificada do solo (< 2 µm) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca²⁺ e CaEG - amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol26
- Figura 8.** Difratomogramas de raios x da fração argila desferrificada do solo (< 2 µm) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaEG- amostra saturadas com Ca²⁺ e CaEG - amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol. 27
- Figura 9.** Difratomogramas de raios x da sub fração argila 0,1-2 µm desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca²⁺. CaEG- amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol; K - amostra saturada com K⁺ em temperatura ambiente; e K150 - amostra saturada com K⁺ e aquecida a 150 °C.....28
- Figura 10.** Difratomogramas de raios x da sub fração argila 0,05-0,10 µm desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD - amostra saturadas com Ca²⁺; CaEG - amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol.....29
- Figura 11.** Difratomogramas de raios x da sub fração argila < 0,05 µm desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e

florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD - amostra saturadas com Ca²⁺; CaEG - amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol.....30

Figura 12. Difratoogramas de raios x da fração argila < 2 µm desferrificada do solo rizosférico sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD - amostra saturadas com Ca²⁺; CaEG - amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol.....31

Figura 13. Mapa global do pH dos solos. Fonte: Cohen Julie (2016), University of California.....34

Figura 14. Mapa com a cobertura vegetal natural campestre, florestal, de transição e também superfícies de água e usos antrópicos do Bioma Pampa. Fonte: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. PROBIO – Cobertura vegetal do Bioma Pampa, 2007.35

Figura 15. Mapa da América do Sul (esquerda); mapa do estado do Rio Grande do Sul (centro); e mapa da região central do estado (direita), onde está localizada a Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria.....39

Figura 16. Área do experimento, localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, RS. S: Superficial, I: Incorporado, t: toneladas por hectare aplicado em cada subparcela. Faixa em amarelo: onde foram coletadas as amostras para este estudo. Fonte: Google Earth Pro-jun/2018.40

Figura 17. Perfil representativo do Argissolo Acinzentado Distrófico ocorrente na área experimental.41

Figura 18. Desdobramento da interação dos efeitos do sistema de aplicação do calcário (superficial ou incorporado), da dose de calcário aplicada e da profundidade avaliada nos teores de P disponível.....49

Figura 19. Desdobramento da interação dos efeitos da dose de calcário aplicada e da profundidade avaliada nos teores de S, Zn e valores de pH. Letras maiúsculas comparam distintas doses em cada profundidade; letras minúsculas compara diferentes profundidades para cada dose.51

Figura 20 - Fracionamento da amostra de argila nas condições de 0 toneladas de calcário e 17 toneladas, aplicados superficialmente54

Figura 21 - Fracionamento da amostra de argila nas condições de 0 toneladas de calcário e 17 toneladas, aplicados com incorporação.....54

- Figura 22** - Difratomogramas de raios x da fração terra fina seca ao ar da camada 0,00-0,10 m dos tratamentos 0 e 17 t ha⁻¹ de calcário aplicados em superfície.55
- Figura 23** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,00-0,10 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição superficial de calcário. [Å]= Angstroms.57
- Figura 24** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,10-0,20 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição superficial de calcário. [Å]= Angstroms.57
- Figura 25** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,20-0,40 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição superficial de calcário. [Å]= Angstroms.58
- Figura 26** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,40-0,60 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição superficial de calcário. [Å]= Angstroms.58
- Figura 27** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,00-0,10 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.59
- Figura 28** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,10-0,20 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.59
- Figura 29** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,20-0,40 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.60
- Figura 30** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,40-0,60 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.60
- Figura 31** - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 µm) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,40-0,60 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms. 57

Relação de Apêndices

Tabela 15. Tabela Atributos químicos ao longo das camadas do solo sob campo (CA) e florestamento de Eucalyptus spp. (FE).....70

Tabela 16. Atributos químicos e estatísticos avaliados em diferentes profundidades do solo sem e com adição de calcário, sem e com incorporação do calcário.....71

CAPÍTULO I – Introdução Geral

Atualmente, o grande desafio nacional e mundial é a sustentabilidade ambiental, onde se prioriza a segurança alimentar, da água, da energia, a estabilidade do clima e da biodiversidade. Ao se avaliar cada um destes desafios, é possível perceber que o solo é parte fundamental em cada um deles e não apenas no que se refere à segurança alimentar (McBratney et al., 2014). Considerando que o Brasil é um país agrícola, em grande parte dependente do solo para produção de alimentos, manutenção da economia e bem estar social, ressaltamos a importância de estudos direcionados à sua preservação e uso consciente. A expressiva expansão dos setores agrícola e florestal no Brasil tem dado evidência a estudos que direcionam suas ações de investigação para a preservação e utilização racional dos recursos naturais, sem que ocorram perdas econômicas e ambientais importantes. Neste contexto, a Ciência do Solo se destacou na elucidação de várias questões relacionadas ao comportamento químico, físico e biológico do sistema solo frente às ações antrópicas a ele submetidas. Ainda dentro dessa temática, no final dos anos 1990, a Área de Pedologia e Uso do Solo do Programa de Pós-Graduação de Universidade Federal do Rio Grande do Sul deu início a uma linha de pesquisa sobre alterações químicas e mineralógicas em solos tropicais e subtropicais causadas por ações antrópicas.

Foram avaliados e caracterizados solos construídos após a mineração de carvão a céu aberto no Rio Grande do Sul (Kämpf et al., 1997; Pinto,

1997; Kämpf et al., 2000; Quiñones et al., 2008; Inda et al., 2010a). Em experimentos de longa duração foram investigados os efeitos de vários usos e manejos do solo sobre o sistema mineralógico. Azevedo et al. (1997) avaliou a adição de altas doses de calcário no solo sobre argilominerais 2:1 com intercalação por polímeros de hidróxi-Al nas entrecamadas. Alterações nesse grupo mineral também foram objeto de estudos em solos sob lavoura e com adição de dejetos animais (Inda et al., 2010b; Fink et al., 2014), e em solo submetido a um sistema de integração lavoura-pecuária (Bertolazi et al., 2017). Alterações químicas e de minerais do grupo dos óxidos de ferro foram investigados em solos onde o sistema de manejo convencional de preparo do solo foi substituído pelo plantio direto (Silva et al., 2008; Inda et al., 2014). O manejo de pastagens com a prática de queimada do campo ou pela inserção de novas espécies, e o plantio de *Pinus* spp. em áreas de campo foram avaliados sobre a química, mineralogia dos óxidos de ferro e a área superficial específica do solo (Tomazi et al., 2012). Esses estudos têm contribuído não só para o entendimento das alterações mineralógicas no ambiente pedogênico, via processos de dissolução/neoformação e transformações no estado sólido de minerais, como também para o avanço do conhecimento sobre o comportamento físico e químico do solo.

No Brasil, o ecossistema denominado bioma Pampa ocorre na metade sul do estado do Rio Grande do Sul (RS) e se estende ao Uruguai e ao nordeste da Argentina (Figura 1). Abrange uma área de aproximadamente 700.000 km², sendo formado por campos, florestas, dunas e áreas úmidas (MMA, 2010). No RS, compreende diversas classes de solos, desenvolvidos de diferentes litologias em ambientes oxidados e hidromórficos, com variáveis características morfológicas, químicas e físicas (Streck et al., 2008). Entre fauna e flora, sua diversidade inclui mais de dois mil táxons, 502 gêneros e 89 famílias, sendo que 900 dos táxons são exclusivos do bioma Pampa (Boldrini et al., 2012).

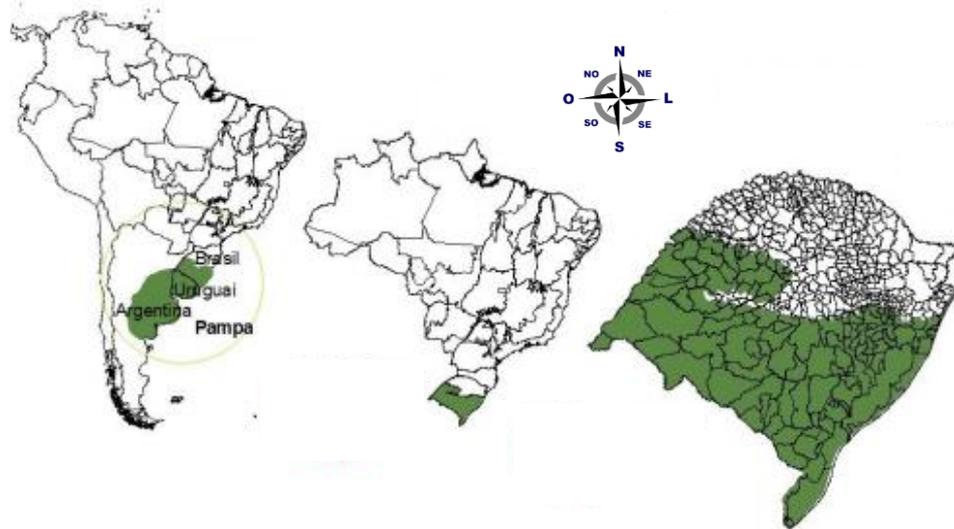


Figura 1. Delimitação do Bioma Pampa na América do Sul, Brasil e Rio Grande do Sul.

Os campos naturais do bioma Pampa formam o ecossistema mais extenso do RS e constituem a base alimentar para a produção pecuária (Nabinger & Carvalho, 2009). Além disso, as pastagens naturais do sul do Brasil prestam valiosos serviços ecossistêmicos, como por exemplo o sequestro de carbono, a preservação/cobertura do solo contra processos erosivos (Sala & Paruelo, 1997) e constituem valores únicos de biodiversidade com mais de três mil espécies vegetais (Boldrini, 2009). Porém, a conversão de áreas de campo do bioma Pampa em áreas para uso agrícola e florestal tem levado a uma rápida perda de habitat natural, bem como, da biodiversidade. A pesquisa (Inda et al., 2010b; Fink et al., 2014; Bertolazi et al., 2017) tem demonstrado que mudanças no uso do solo, como as descritas para os campos sulinos, alteram as condições pedoambientais, através da influência na composição botânica, nos teores e qualidade da matéria orgânica do solo, no regime hídrico do solo (conteúdo e tempo de residência da água), na composição do complexo sortivo e da solução do solo. É possível que essas mudanças afetem o equilíbrio do solo acima do seu potencial de amortização e um novo equilíbrio seja estabelecido diante do qual alterações mineralógicas graduais possam ocorrer (Karathanasis & Wells, 1989).

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo principal investigar duas situações de ações antrópicas de longa duração sobre áreas do bioma Pampa no Rio Grande do Sul. A primeira situação de intervenção foi a conversão

do uso do solo sob campo para o uso com lavoura manejada com adições de altas doses de calcário sob sistema de semeadura direta com dois manejos distintos (calcário incorporado e calcário distribuído superficialmente). A segunda intervenção foi a substituição do uso do solo sob campo para o uso do solo com florestamento comercial de *Eucalyptus* spp. Nos estudos, foram analisadas características morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas dos solos em condições de solo sob campo nativo e de solo sob intervenção antrópica (Lavoura e Florestamento).

CAPÍTULO II – Alterações físicas, químicas e mineralógicas em Argissolo Vermelho sob florestamento de *Eucalyptus* spp.

1. Introdução

A Ciência do Solo tem investigado os impactos da atividade antrópica sobre a dinâmica química, física e mineralógica do sistema solo (Bortoluzzi et al., 2012; Santos et al., 2013; Silva et al., 2014; Amaral et al., 2015; Korchagin et al., 2019). Essa linha de pesquisa pressupõe que o solo na sua condição natural se encontra em equilíbrio dinâmico, estabelecendo trocas de energia e matéria com os sistemas vizinhos. Quando o sistema solo é afetado por ações externas e não consegue amortiza-las, um novo estado de equilíbrio se estabelece, onde alterações podem ocorrer (Azevedo; Kampf; Bohnen, 1996; Vezzani, 2011). Tais alterações têm sido observadas em solos sob efeitos de diferentes ações antrópicas, como por exemplo aqueles solos construídos após atividades de mineração de carvão, onde os processos de acidificação e construção resultam na degradação física e química dos solos (Dick et al., 2006; Quinões et al., 2008; Inda et al., 2010b). Uma série de práticas agrícolas determinam mudanças pedoambientais e, conseqüentemente, em alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica, na composição química da solução e do complexo sortivo do solo, bem como na mineralogia dos mesmos. A adoção do sistema de plantio direto em substituição ao sistema convencional de preparo do solo aumentou os teores de matéria orgânica, alterou a dinâmica dos óxidos de ferro pedogênicos e a área superficial específica na camada superficial de solos tropicais e subtropicais (Silva Neto et al., 2008; Inda et al., 2010b; Inda et al., 2014). Em solo subtropical de altitude, a queima do campo para renovação da pastagem e

o florestamento com *Pinus* também diminuiu os teores de matéria orgânica, reduzindo ainda a área superficial específica do solo (Tomasi; In da Junior; Dick., 2012; Tomasi et al., 2012).

No uso do solo com pecuária, a adição concentrada de urina de gado em solo sob pastejo intensivo foi considerada efetiva para a transformação de vermiculitas 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (VHE) em vermiculitas expansivas (V) (Officer et al., 2006). Investigando também a adição de dejetos animais ao solo, Fink et al. (2014) observaram que a deposição de urina de gado e de dejetos de aves ao solo, reduziu os teores de Fe relativos aos óxidos de ferro pedogênicos e a intensidade das reflexões de argilominerais 2:1 em difratogramas de raios X, sugerindo a dissolução desses minerais na camada superficial do solo. Alterações também foram verificadas na mineralogia de um solo sob sistema integrado de lavoura-pecuária, onde o uso do solo com lavoura, seguido de intensidades moderada e intensiva de pastejo, favoreceu a aluminização de argilominerais 2:1 (Bertolazzi et al., 2017).

O *Eucalyptus* spp. é uma espécie exótica natural da Austrália, cujas primeiras plantas foram introduzidas no território brasileiro no final do século XIX e tiveram rápida expansão, principalmente pela sua fácil adaptação ao ambiente, rapidez de produção e alto rendimento. Seu cultivo vem crescendo continuamente e sendo aperfeiçoado com pesquisas de melhoramento genético e de manejo (De Vecchi & Júnior, 2018). Associado ao cultivo de *Eucalyptus* spp. são observados impactos no setor econômico, político, social e ambiental (Lima, 2016).

No início dos anos 2000, devido a um incentivo estadual, empresas do ramo florestal foram atraídas para o estado do Rio Grande do Sul (RS). A intenção era expandir a produção e promover o desenvolvimento econômico da metade Sul do Estado (Morelli, 2011). Em 2005 foram efetuados os primeiros plantios em novas áreas já priorizando a produção de celulose (Araújo, 2011), alcançando ao final de 2006 uma área de 184.000 ha florestados com *Eucalyptus* spp.

A evolução do plantio de *Eucalyptus* spp. no RS tem sido expressiva, tendo abrangido uma área de 427.000 ha em 2016 (Ageflor, 2017). Após a conclusão da duplicação da empresa CMPC – Celulose Riograndense, por meio

da construção da fábrica Guaíba 2, a produção de celulose passou de 450 mil toneladas por ano em 2014 para 1,8 milhões de toneladas por ano atualmente, quase quadruplicando a capacidade de produção. As áreas plantadas com *Eucalyptus* spp. seguem em crescente expansão para atender as demandas de celulose, principalmente na metade sul do RS (Figura 2).

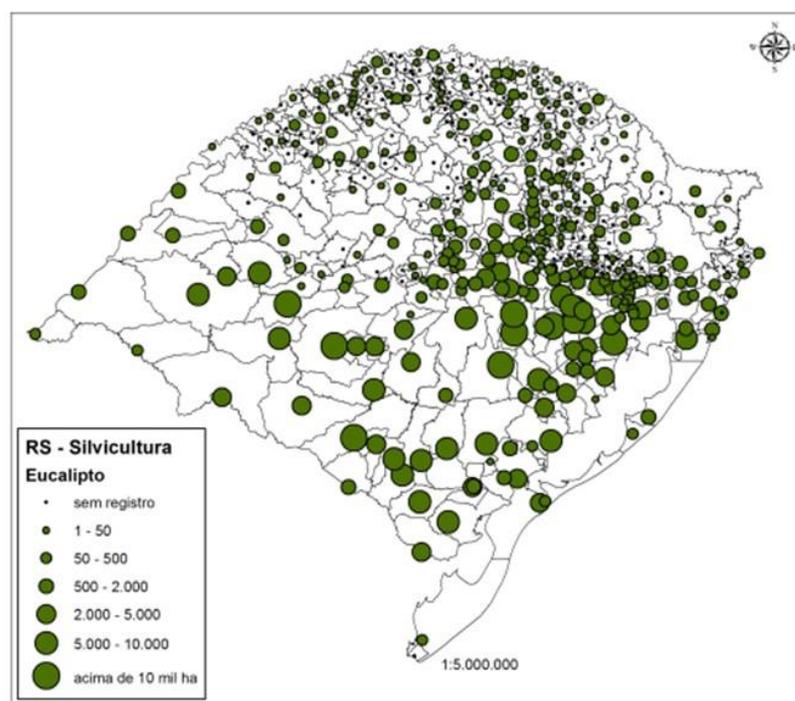


Figura 2. Localização espacial das áreas plantadas com *Eucalyptus* spp. no estado do Rio Grande do Sul (Ageflor, 2017).

Considerando a contínua expansão do setor florestal no RS, alguns estudos têm direcionado suas ações no sentido de preservação e utilização racional dos recursos, como do solo e da água. Em um Neossolo originalmente cultivado com pastagem natural observou-se que após 21 anos de cultivo com *Eucalyptus* spp. houve alteração na qualidade da matéria orgânica até 0,90 m de profundidade, sendo que mais de 90% do C presente na matéria orgânica do solo foi proveniente da floresta (Severo, 2015). O cultivo de *Eucalyptus* spp. promoveu também alterações nas características químicas do solo, aumentando a acidez

potencial e reduzindo os teores de matéria orgânica e a concentração de nutrientes (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) quando comparados ao mesmo solo com pastagem e floresta nativos (Leite, 2002). Após 10 anos de área de cerrado florestada com *Eucalyptus* spp. foi verificado um aumento na densidade do solo, o que diminuiu a dinâmica hídrica e atmosférica do solo em relação a mata nativa (Cavenage et al., 1999). Também após 10 anos de cultivo com *Eucalyptus* spp. foi observada uma diminuição nos índices microbiológicos em relação a floresta nativa no mesmo solo, além de apresentar uma menor relação C/N quando em comparação com a vegetação natural (Rodrigues; Rodrigues, 2008).

Além dos resultados descritos anteriormente, estudos recentes, como de Bortoluzzi et al. (2015), apontam que o solo aderido as raízes de plantas de *Eucalyptus* spp., denominado solo rizosférico, sofre alterações importantes no que diz respeito às suas propriedades químicas. Após 50 anos de cultivo com *Eucalyptus* spp. em um Latossolo no sul do Brasil, ocorreram alterações significativas nos seguintes atributos da rizosfera: pH, Al^{3+} , cátions trocáveis, teor de argila e proporção de minerais 2:1 com hidróxi-Al na entrecamada (Korchagin, 2019). Isso se deve, principalmente, à reação de acidificação na rizosfera, devido aos elevados teores de hidrogênio (H^+) e alumínio (Al^{3+}). Mudanças no pH do solo são capazes de provocar reações que se propagam por todo sistema, modificando o comportamento eletroquímico dos minerais, a atividade microbiana, o crescimento vegetal, os quais podem promover um novo ciclo de alterações.

O pH na rizosfera também é modificado pela excreção de ácidos orgânicos pela atividade da raiz e de microorganismos. A presença de ácidos orgânicos no solo é capaz de acelerar o intemperismo de minerais primários e de minerais pedogênicos em períodos de tempo relativamente curtos (Castilhos & Meurer, 2001; Chaves, 2014; Korchagin, 2019). Isso se deve principalmente a reação de acidificação da rizosfera, devido ao elevado teor de H^+ e Al^{3+} . Segundo Marschner (1995), os ácidos orgânicos presentes na rizosfera funcionam como agentes complexantes de metais ligados à fração sólida do solo. Estes ácidos orgânicos ocorrem naturalmente na rizosfera, porém a capacidade de sua exsudação varia de acordo com a espécie. Alguns estudos têm mostrado que a

concentração de ácidos orgânicos é dois terços menor em áreas cultivadas com lavouras de milho quando comparadas a áreas de florestas, como no caso da *Tithonia diversifolia* (espécie exótica que constitui algumas florestas no Kenya) que promove maior eficiência na absorção de P nas áreas de florestas (George et al., 2002; Guppy et al., 2005).

A mineralogia dominante na fração argila de solos tropicais e subtropicais é formada predominantemente por diferentes proporções de argilominerais 1:1 (caulinita), óxidos de ferro (hematita, goethita, maghemita, ferrihidrita) e alumínio (gibsit) e argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (2:1 HE) (Kämpf & Curi, 2003). Como descrito anteriormente, ações antrópicas recentes sobre o sistema solo alteram as condições pedoambientais, principalmente na camada superficial dos solos, afetando reações químicas de oxidação-redução, complexação e protonação (Schwertmann, 1991). Essas reações podem influenciar alterações (transformações ou dissoluções/neofomações) de minerais pedogênicos, com destaque para o grupo dos óxidos de ferro e dos argilominerais 2:1 HE (Kämpf & Curi, 2000; Kämpf e Curi, 2003). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da substituição de áreas de campo nativo por florestamentos de *Eucalyptus* spp. sobre as características químicas, físicas e mineralógicas de um Argissolo Vermelho no sul do Brasil.

2. Material e métodos

2.1 Localização, coleta e preparo das amostras

A área selecionada para a realização do estudo está localizada no município de Arroio dos Ratos no estado do Rio Grande do Sul (RS) (30°11'20.71"S e 51°35'54.40" O). As descrições e coletas foram realizadas em março de 2016, na divisa de duas propriedades rurais. Em uma das propriedades o solo estava sob uso de campo (CA) e na outra sob Florestamento de *Eucalyptus*

spp. (FE) há 17 anos, em local denominado Horto Florestal Terra Dura (Figura 3), pertencente a empresa CMPC – Celulose Rio-grandense.

O clima na região é classificado como subtropical úmido com períodos de seca no verão (ST UM v), com média de temperatura anual de 19,5 °C e pluviosidade média de 1300 mm por ano (Maluf, 2000). O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Santos et al., 2018a), formado a partir de Sienogranito da Suíte Intrusiva Dom Feliciano (CPRM, 2006). O relevo é formado por coxilhas com feições de anfiteatros em altitudes médias de 150 m.

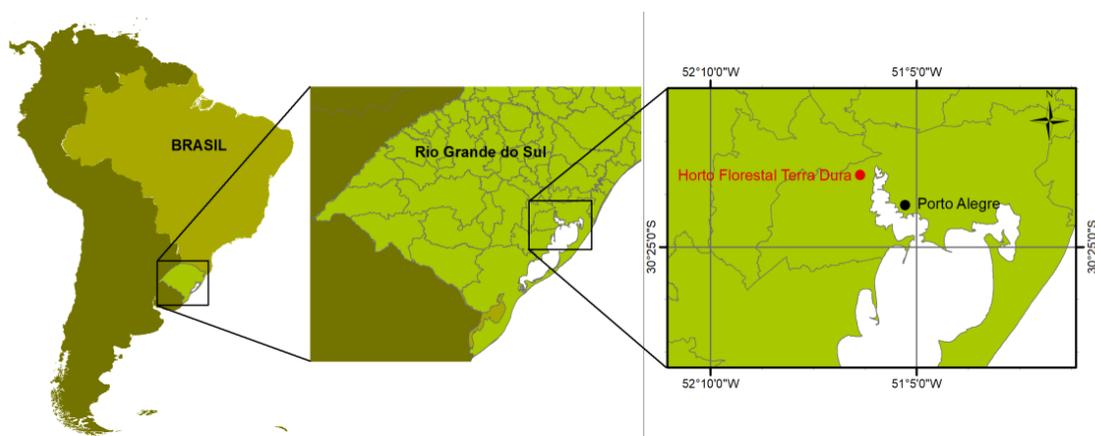


Figura 3. A -Mapa da América do Sul; B - estado do Rio Grande do Sul; e C – localização do o Horto florestal Terra Dura, no município de Arroio dos ratos.

Para limitar a acidificação e manter a produção, a floresta de *Eucalyptus* spp. recebeu dois ciclos de adubação e calagem com aplicação de calcário dolomítico, fosfato natural, superfosfato e NPK. Primeiro Ciclo de adubação: 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico a lanço (antes do plantio), 400 kg ha⁻¹ de fosfato natural reativo (30% P₂O₅ total - 10% solúvel ácido cítrico) na subsolagem (antes do plantio), 120 kg ha⁻¹ de NPK 06:30:06 na cova, 150 kg ha⁻¹ de NPK 15:00:30 em cobertura aos 3 meses. Segundo Ciclo: 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, 200 kg ha⁻¹ de Superfosfato simples, 120 kg ha⁻¹ de NPK 06:30:06 na cova, 150 kg ha⁻¹ de NPK 12:00:20 em cobertura aos 3 meses, 200 kg ha⁻¹ de NPK 12:00:20 aos 12 meses em cobertura.

Em cada área (CA e FE) foram abertas três trincheiras com um metro de profundidade (Figura 4) e expostos os perfis de solos (Figura 5). Na área de solo sob uso FE, um lado de cada trincheira teve expostas as raízes de uma planta de *Eucalyptus* spp. Nas trincheiras foram coletadas amostras de solo deformadas nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 m de profundidade. Nas trincheiras do solo sob FE foram coletadas ainda amostras do solo aderido às raízes do *Eucalyptus* spp. na camada de 0,00-0,20 m de profundidade, denominadas de amostras do solo rizosférico. As raízes utilizadas para coleta do solo rizosférico possuíam de um a dois milímetros de espessura. As raízes foram levadas ao laboratório, onde foram secas ao ar e após, com o auxílio de peneiras e pincéis, tiveram o solo separado e coletado. As amostras deformadas foram secadas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA).



Figura 4. Localização das trincheiras em solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) (Fonte: Google Earth Pro- junho/2018).

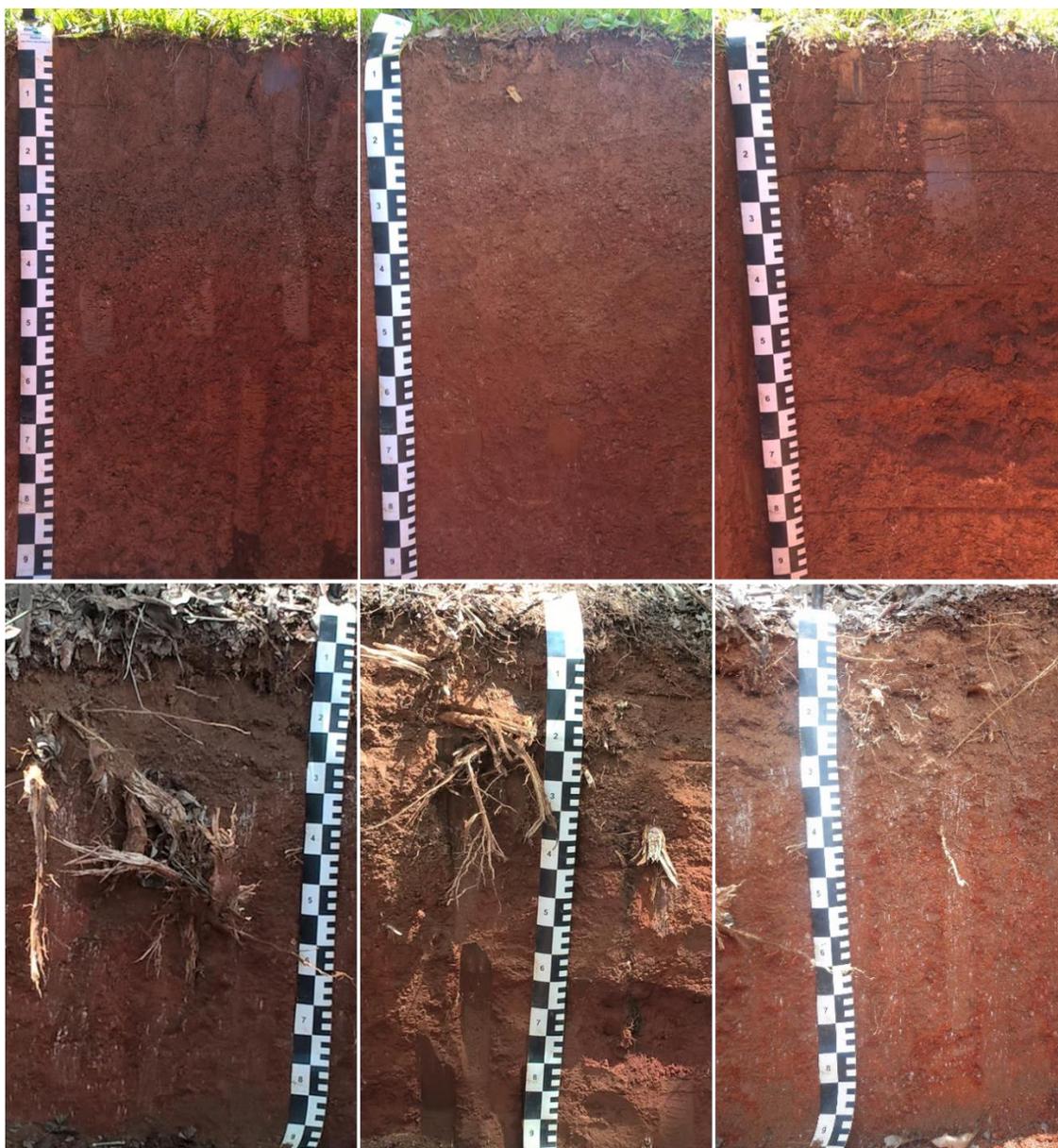


Figura 5. Perfis de solos descritos e coletados sob campo (CA) (acima) e sob florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) (abaixo).

2.2 Análises químicas

As análises químicas do complexo sortivo foram realizadas na fração TFSA, segundo métodos constantes em Teixeira et al. (2017), para os seguintes componentes: pH em H₂O, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, P, Al³⁺, H⁺+ Al³⁺ e micronutrientes. A partir destes dados foram calculados: capacidade de troca de cátions (CTC

pH7), soma de bases (S), saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V). A determinação do C orgânico total (COT) do solo foi realizada na TFSA por combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU TOC-V.

O teor de Fe relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) foi extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB-Na) a 80 °C (Mehra & Jackson, 2013) na fração argila. Os teores de Fe, Al e Si solubilizados nas extrações seletivas foram determinados por espectrofotometria de emissão ótica (ICP-OES). A fração argila desferrificada após tratamento com DCB-Na foi fracionada em três tamanhos, conforme metodologia detalhada no item 2.3.

2.3 Análises físicas e mineralógicas

Para a dispersão químico/mecânica e coleta da fração argila foram pesadas 10 g de TFSA, nas quais foi oxidada a matéria orgânica à quente (40°C) com água oxigenada 5%. Após, em cada amostra foram adicionados 100 mL de água destilada pelo modo osmótico e 15 g de NaCl. As amostras foram submetidas a oito horas de agitação mecânica, sendo ultrassonadas por um minuto duas vezes durante este período. Na sequência, as amostras foram tamisadas ainda úmidas, a 50 µm. A fração maior que 50 µm, correspondente à fração areia, foi seca em estufa e pesada. A fração menor que 50 µm foi dispersa por agitação em 100 mL de NaCl 1 mol L⁻¹ durante 6 horas, sendo ultrassonadas uma vez por um minuto durante este período. A operação anterior foi repetida quatro vezes. O excesso de NaCl foi eliminado após decantação e a suspensão saturada com Na⁺ foi lavada através de diálise em água destilada pelo modo osmótico. Esta fração foi transferida para provetas de 1000 mL e mantida em uma sala com temperatura constante de 20 °C. Após, as argilas foram extraídas das provetas por sifonamento de 20 cm da solução após sedimentação de 16 horas a 20 °C. Foram realizadas em torno de 12 extrações por amostras. O que restou na proveta após os dias de coleta corresponde à fração silte, o qual foi pesado após secagem em estufa. A fração argila também foi seca em estufa à 60 °C, pesada e moída. A fração argila foi tratada com DCB-Na (item 2.2) para eliminar

a fração óxidos de ferro. A fração argila coletada após a extração com DCB-Na, foi submetida à lavagem através de diálise em água destilada pelo modo osmótico, foi seca e pesada. Uma parte da argila foi fracionada em três sub frações infra micrométricas com uso de centrífuga (Laird et al., 1991; Hubert et al., 2009, 2012). Amostras de 1,5 g da fração argila foram pesadas e postas em suspensão com NaCl 1 mol L⁻¹. Esse tratamento foi repetido três vezes, sendo que após a terceira saturação deu-se início ao processo de separação das sub frações. A primeira sub fração a ser obtida foi a fração fina (<0,05 µm), restante no sobrenadante após seis ciclos de 15 minutos de centrifugação a 14 mil RPM (RCF 25100 g, biofuge stratos). A fração média (0,05 a 0,10 µm) foi obtida após seis ciclos de centrifugação de 10 minutos de centrifugação a 8.5 mil RPM (RCF 9250 g). A sub fração grossa (0,10 a 2 µm) foi a que restou após as duas extrações anteriores (fina e média). Uma vez separadas, as sub frações foram floculadas com CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹, concentradas e saturadas com CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹. O processo de saturação foi realizado colocando as amostras em contato com solução de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ durante agitação seguidas de centrifugação. Este processo foi repetido quatro vezes para cada amostra. Em seguida, foram submetidas à lavagem através de diálise em água destilada por osmose, secadas e pesadas. Após este processo, iniciou-se a saturação das amostras com KCl 1 mol L⁻¹, da mesma forma que o processo de saturação com CaCl₂. As lâminas orientadas foram confeccionadas com as frações saturadas com Ca²⁺ e K⁺ com 20 mg de argila cada, para análise de difração de raios X.

A área superficial específica (ASE) das frações TFSA e argila foi estimada pelo método de adsorção de água (Quirk, 1955). Amostras de 1,0 g de TFSA foram colocadas em vidros pesa filtro previamente pesados. As amostras foram submetidas a uma atmosfera de 0% de umidade (UR = 0%) pelo período de 12 dias em dessecadores contendo pentóxido de fósforo, sendo posteriormente pesadas. Após, pelo mesmo período, as amostras foram submetidas a uma atmosfera de 20% de umidade (UR = 20%) em dessecadores contendo uma pasta de acetato potássico, sendo posteriormente novamente

pesadas. Considerando que 1 molécula de água recobre $0,108 \text{ nm}^2$, a ASE foi calculada conforme a seguinte equação:

$$ASE \text{ m}^2 \text{ g}^{-1} = n^\circ \text{ Avogadro } (6,02214 \times 10^{23}) \times 0,108 \text{ nm}^2 \times (g \text{ água adsorvida/g amostra})$$

A estimativa da concentração de óxidos de ferro magnéticos (magnetita/maghemita) presentes na fração TFSA ($[\text{óx. Fe}_{\text{mag}}] = (\chi_{FD/0,12}) / (800 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$), foi determinada, em magnetômetro Bartington com sensor de frequência dual (Sistema MS2). A susceptibilidade magnética de frequência dependente ($\chi_{FD} = \chi_{LF} - \chi_{HF}$) foi definida através da diferença entre a susceptibilidade magnética específica em baixa (χ_{LF}) e alta (χ_{HF}) frequência segundo Torrent et al. (2007). A estimativa da concentração de maghemita presente na fração argila foi realizada através da susceptibilidade magnética específica em baixa frequência (χ_{LF}) conforme Poggere et al. (2018).

A proporção entre os óxidos de ferro hematita e goethita ($\text{Hm}/(\text{Hm} + \text{Gt})$) foi estimada por espectroscopia de refletância difusa (Barrón et al., 2000) em amostras finamente trituradas da fração TFSA. Os espectros foram registrados no intervalo de comprimento de onda de 380 a 800 nm em um espectrofotômetro Cary 5000 UV-Vis-IR, com uma esfera integradora acoplada de 73 mm de diâmetro. O branco (padrão) usado como valor de referência foi o BaSO_4 padrão Merck, cuja refletância foi ajustada a 100%; e o mínimo de refletância (0%) foi obtido com a colocação de uma tarja preta na entrada do feixe de luz. Para obtenção dos resultados, foi utilizada a metodologia CR (contínuo removível) onde o brilho é normalizado e enfatiza as características de absorção (Clark, 1984). Assim, foi possível isolar determinadas faixas nos espectros. As faixas utilizadas foram 415-450 nm para a Gt e 535-590 nm para a Hm, de acordo com Scheinost et al. (1998).

A identificação dos minerais constituintes das diferentes frações foi realizada por difratometria de raios X (DRX) em aparelho Bruker D8 Advance e Bruker D2 Phaser usando radiação Cu $K\alpha$ com 2θ variando de $2,5$ à 35° com

passo de 0.012° e tempo de cada passo de 96 s. Para tanto, foram analisadas lâminas confeccionadas com material não orientado (em pó) da fração terra fina seca ao ar (TFSA) e lâminas confeccionadas com material orientado da fração argila (total desferrificada e sub frações desferrificadas). Os dados obtidos foram tratados com o programa X'pert, onde os difratogramas são ajustados para permitir melhor visualização das reflexões minerais, bem como a comparação entre diferentes amostras para se observar o efeito das técnicas laboratoriais empregadas.

Como análise estatística foi realizada ANOVA (análise de variância) para verificar as interações entre tratamentos.

3. Resultados e discussão

3.1 Análises químicas

Ao longo do texto, a exposição dos resultados e a discussão destes utilizou os dados obtidos no solo sob campo (CA) como referência aos dados obtidos no solo sob florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). De acordo com o Manual de Adubação e Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2014), a análise da situação química do complexo sortivo do solo sob CA mostrou que os valores de pH, da saturação por bases (V%) e os teores de P do solo foram muito baixos em todas as profundidades. Da mesma forma, foram baixos os teores de carbono orgânico total (COT) e médios os valores da capacidade de troca de cátions (CTC). O teor de K⁺ foi alto em superfície, médio na camada de 0,10 – 0,20 m e baixo nas demais camadas. Os elementos Ca²⁺ e Mg²⁺ apresentaram teores considerados médios na camada mais superficial e baixos nas camadas subsequentes.

O teor de Ca²⁺, a soma de bases (SB), as saturações por bases (V%) e por alumínio (m%) apresentaram interação entre uso e profundidade do solo (Tabelas 1 e 2). No solo sob CA, o Ca²⁺, a SB e a V% diminuíram em profundidade

até a camada 0,20-0,40 m, e permaneceram constantes até a camada 0,60-0,80 m (Tabela 2). Comportamento inverso foi verificado para a m%, a qual aumentou expressivamente em profundidade. No solo sob FE, os referidos atributos não diferiram ao longo das camadas analisadas. Por outro lado, comparativamente ao solo sob CA, o uso com FE reduziu o teor de Ca^{2+} , a SB e a V% nas camadas superficiais, e aumentou a m%.

O efeito isolado do uso do solo foi constatado em cinco atributos químicos do complexo sortivo (Tabela 3). Comparativamente ao solo sob CA, o uso FE diminuiu o pH do solo e aumentou os teores de Al^{3+} e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ trocáveis, conforme observado por Korchargin (2019), embora tenha aumentado os teores de Mg^{2+} e K^+ , provavelmente devido ao histórico de adubação e calagem. A calagem não foi suficiente para conter a acidificação do solo pelo FE, considerando que se trata de uma floresta voltada à produção de celulose e grande parte dos nutrientes provenientes da adubação são exportados em forma de biomassa.

O efeito da profundidade do solo considerando os dois usos do solo (CA e FE) foi significativo para cinco atributos químicos (Tabela 4). Os teores de C orgânico total (COT) e K^+ trocável diminuíram significativamente ao longo das camadas entre 0,00 e 0,80 m de profundidade, enquanto o P extraível foi superior somente na camada 0,00-0,10 m. De maneira inversa, os teores de Al^{3+} trocável aumentaram com a profundidade do solo.

Exceto na camada 0,00-0,10 m, os teores de Fe^{3+} e Al^{3+} relativos aos óxidos de ferro pedogênicos (Fed e Ald) diminuíram com a mudança do uso CA pelo FE (Anexo 1). A substituição isomórfica do Fe^{3+} pelo Al^{3+} na estrutura dos óxidos foi similar em todas as camadas, indicando uma homogeneidade do ambiente de formação dos mesmos (Inda Junior e Kämpf, 2005). É possível que a redução da concentração de óxidos de ferro seja decorrente da acidificação do solo sob FE e também devido à dissolução preferencial da hematita na presença de maior teor de C orgânico (Schwertmann, 1991; Inda Junior e Kämpf, 2005; Gattullo et al., 2018).

Tabela 1 – Interações dos atributos químicos do solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE).

	pH	COT	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	H ⁺ +Al ³⁺	CTC	V	m	P	K ⁺
		g kg ⁻¹	-----cmolc kg ⁻¹ -----						-----%-----		-----mg kg ⁻¹ ----	
	Valores de p											
Uso	0,0001	0,2264	0,0001	0,0001	0,0163	0,0085	0,0200	0,1036	0,0003	0,0001	0,2972	0,0001
Prof.	0,1626	0,0005	0,0001	0,0001	0,1223	0,0006	0,2659	0,6270	0,0001	0,0001	0,0001	0,0188
Interação	0,6803	0,5410	0,2029	0,0001	0,9007	0,0060	0,9334	0,9421	0,0028	0,0002	0,5513	0,1517

COT: carbono orgânico total; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Tabela 1. Desdobramento da interação dos efeitos do uso do solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) e da profundidade para características químicas do solo.

Prof. m	Ca ²⁺ -----cmol _c kg ⁻¹ -----	SB	V	m
			-----%-----	
CA				
0,0-0,1	2,1 Aa*	3,0 Aa	38,7 Aa	22,6 Aa
0,1-0,2	1,5 Ab	2,0 Aab	33,0 Aa	37,3 Aa
0,2-0,4	0,7 Ac	1,1 Abc	15,3 b	64,4 a
0,4-0,6	0,5 - c	1,0 Abc	12,3 b	77,4 b
0,6-0,8	0,4 - c	0,9 Ac	12,0 b	76,4 b
FE				
0,0-0,1	0,3 B	1,3 B	15,3 B	61,9 B
0,1-0,2	0,2 B	1,2 B	16,0 B	64,2 B
0,2-0,4	0,2 B	1,0 B	12,7	72,0
0,4-0,6	0,2	1,1 B	11,7	75,0
0,6-0,8	0,2	1,1 B	12,3	76,1

SB: soma de bases; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio *Letras minúsculas comparam profundidades dentro de um mesmo uso do solo; letras maiúsculas comparam diferentes usos do solo dentro da mesma profundidade; ausência de letras significa diferença estatística não significativa.

Tabela 2. Efeito do uso do solo em propriedades químicas da profundidade de 0,0 a 0,8 m.

Uso do solo	pH	K ⁺ mg kg ⁻¹	Al ³⁺ -----cmol _c kg ⁻¹ -----	Mg ²⁺ -	H ⁺ +Al ³⁺
CA	4,7 A	38,9 B	2,0 B	0,5 B	5,7 B
FE	4,5 B	93,9 A	2,7 A	0,7 A	7,5 A

Letras maiúsculas comparam diferentes usos do solo.

Tabela 3. Efeito da profundidade nas propriedades químicas de solos sob uso de campo (CA) ou Florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE).

Prof. m	Al ³⁺ cmol _c kg ⁻¹	COT g kg ⁻¹	P	K ⁺ -----mg kg ⁻¹ -----	Mn ²⁺
0,0-0,1	1,5 c	1,7 a	3,6 a	78,5 a	6,0 a
0,1-0,2	1,6 bc	1,2 ab	2,1 b	73,5 ab	2,5 b
0,2-0,4	2,6 b	1,0 bc	1,2 b	65,3 ab	1,5 b

0,4-0,6	3,4 a	0,9 bc	1,5 b	61,5 ab	1,8 b
0,6-0,8	3,1 a	0,5 c	1,2 b	52,7 b	2,0 b

3.2 Análises físicas

Conforme esperado, alterações texturais não são comuns em curto e médio prazo por mudanças no uso do solo. Nas amostras de solo representativas da totalidade de cada camada não foram constatadas alterações na distribuição granulométrica entre os solos no CA e FE (Tabela 5).

Sob ambos os usos, os teores de argila aumentaram em profundidade, com as classes texturais variando de franco-argilo-arenosa nas três primeiras camadas a argila e franco-argilosa nas camadas mais profundas, em consonância com o processo de lessivagem e com a classificação do solo da área como Argissolo. Por outro lado, o solo rizosférico no FE apresentou uma granulometria mais arenosa (classe textural franca) em relação ao solo rizosférico no CA (classe textural franco-arenosa), com redução dos teores de silte e argila (Tabela 5). Esse resultado sugere um ambiente intempérico mais agressivo próximo a rizosfera das plantas de *Eucalyptus* spp. conforme indicado pelo menor valor de pH no solo sob FE (Tabela 1).

No solo sob CA, a ASE do solo aumentou em profundidade até a camada 0,40-0,60 m (Tabela 5), devido a translocação preferencial de partículas de argila fina pelo processo de lessivagem, conforme será visto posteriormente no item fracionamento da fração argila ao longo das camadas. No solo sob FE, exceto pela diminuição da ASE na camada 0,00-0,10 m, a qual pode estar relacionada ao menor teor de C orgânico nessa camada ou a processos de dissolução de minerais das frações argila e silte notados na rizosfera das plantas de *Eucalyptus* spp. os valores de ASE foram semelhantes aos verificados sob CA.

Tabela 4. Distribuição granulométrica, área superficial específica do solo e parâmetros de cor ao longo das camadas de solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE), e no solo rizosférico da vegetação de campo e de plantas de *Eucalyptus* spp.

Profundidade (m)	Granulometria (g kg ⁻¹)			ASE m ² g ⁻¹	Cor do solo*			Hm/ (Hm+Gt) *100
	Areia	Silte	Argila		Matiz	Valor	Croma	
CA								
0,00-0,10	546	202	252	47,3	7,99 YR	6,53	4,03	39
0,10-0,20	530	204	266	48,3	7,69 YR	6,56	4,35	47
0,20-0,40	463	220	317	52,3	7,13 YR	6,59	4,83	52
0,40-0,60	230	240	530	55,5	5,78 YR	6,73	5,80	63
0,60-0,80	242	406	350	52,3	5,78 YR	6,73	5,80	61
FE								
0,00-0,10	578	191	213	33,1	7,67 YR	6,69	4,30	52
0,10-0,20	561	206	229	55,5	7,57 YR	6,50	4,41	62
0,20-0,40	463	195	340	52,1	6,65 YR	6,48	5,09	69
0,40-0,60	348	263	447	53,7	4,52 YR	6,32	6,23	77
0,60-0,80	290	298	411	51,8	4,63 YR	6,35	6,23	77
Rizosferas								
0-0,20 CA	357	461	230	Nd	8,04 YR	6,40	3,82	26
0-0,20 FE	563	206	187	Nd	7,83 YR	5,88	3,55	46

CA: Campo; FE: Floresta de *Eucalyptus* spp. * Cor do solo obtida em laboratório por espectroscopia de refletância difusa

Os parâmetros da cor do solo sob CA mostraram uma redução da matiz com a profundidade, valores expressando tonalidades constantes e cromas crescentes (Tabela 5). Esses parâmetros indicaram cores mais amareladas em superfície (bruno-claro de 0,00-0,40 m) que variam para cores mais avermelhadas com a profundidade (amarelo-avermelhado de 0,40-0,80 m), confirmando os resultados da razão $Hm/(Hm+Gt)$ que indicaram maiores proporções de goethita nas camadas mais superficiais e de hematita nas camadas mais profundas, onde há também, menor teor de MO (Tabela 5). No solo sob FE, os parâmetros de cor mostraram comportamento semelhante ao verificado sob CA, porém com tendências a um maior avermelhamento do solo, conforme indicado pela razão $Hm/(Hm+Gt)$ ao longo do perfil. Considerando o modelo de formação dos óxidos de ferro pedogênicos, o aumento da proporção de goethita nas camadas mais superficiais é decorrente dos maiores teores de umidade e C orgânico, os quais favorecem a formação de goethita em detrimento da hematita ou favorecem a dissolução preferencial da hematita (Bigham et al., 2002; Inda Junior e Kämpf, 2005).

No solo rizosférico, embora os parâmetros de cor sejam semelhantes, com uma sutil tendência ao avermelhamento do solo rizosférico FE, a razão $Hm/(Hm+Gt)$ evidenciou um intenso processo de rubeificação (avermelhamento) no solo próximo a rizosfera das plantas de *Eucalyptus* spp. assim como na matriz do solo da FE. Esse processo pode estar em parte relacionado à alteração do regime hídrico, a diminuição da umidade do solo com o florestamento favorece a desidratação e rearranjo interno da ferrihidrita e a conseqüente precipitação de hematita em detrimento da goethita (Bigham et al., 2002).

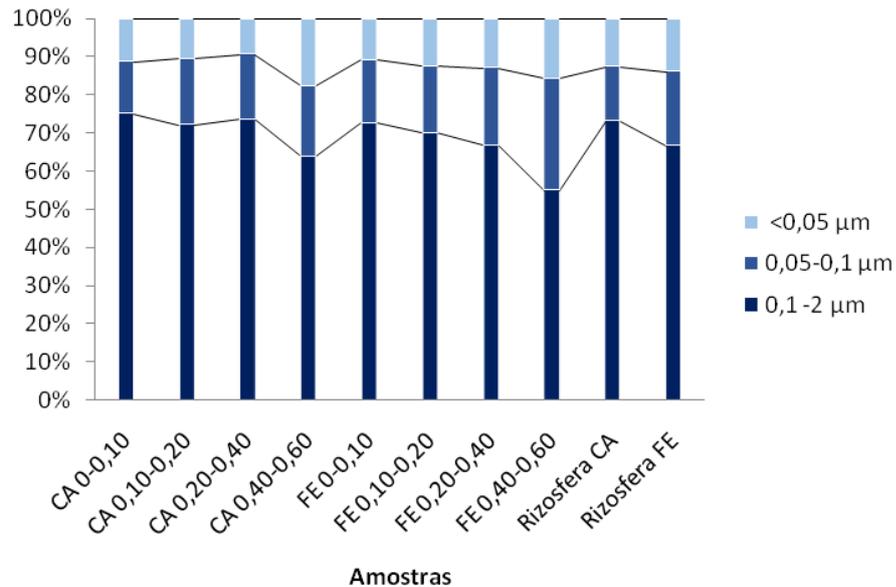


Figura 6. Balanço de massa entre as sub frações da fração argila.

O fracionamento granulométrico da argila no solo sob CA indicou uma predominância da sub fração argila grossa (0,10-2,00 µm), com percentagem variando entre 64 e 75% das partículas menores que 2 µm (Figura 6). A sub fração argila média (0,05-0,10 µm) variou entre 14 e 29%, enquanto a argila fina (<0,05 µm) variou entre 9 e 18%. As amplitudes das sub frações de argila no solo sob FE foram semelhantes (55 a 73% para argila grossa; 17 a 29% para argila média e 10 a 16% para argila fina). Sob ambos os usos, se observou uma tendência de aumento em profundidade das sub frações menores da argila, mais pronunciado na camada 0,40-0,60 m, caracterizando o processo pedogenético de lessivagem, onde há o transporte de material mais fino para as camadas mais profundas do solo. O incremento mais pronunciado dessas sub frações menores no solo FE em relação ao CA se deve, possivelmente, ao uso de escarificação, o qual associado a oxidação da matéria orgânica favorecem a dispersão e o transporte da argila em profundidade (Araújo et al, 2004). No solo rizosférico do CA, a sub fração argila grossa constituiu 73% da argila total, com as sub frações média e fina tendo somado 27%. Já no solo rizosférico do FE, se verificou uma redução da sub fração argila grossa para 66% e um incremento das sub frações menores para 34%. Esse resultado colabora com a ocorrência sugerida de um ambiente mais intempérico na rizosfera do FE em relação ao CA, conforme verificado anteriormente para as frações areia, silte e argila. Comparando-se as

mesmas profundidades, com exceção do solo rizosférico, não foi possível observar efeito da FE sobre as sub frações da argila em relação ao solo do CA.

3.3 Análises mineralógicas

As análises por difratometria de raios x (DRX) para verificação de alterações mineralógicas decorrentes da mudança de uso do solo com campo (CA) para florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE) foram realizadas em todas as profundidades coletadas, porém aqui serão apresentadas apenas as profundidades mais representativas. Na fração argila desferrificada do solo ($< 2 \mu\text{m}$), sob ambos os usos (CA e FE), a caulinita ($d= 7,13$ e $3,57 \text{ \AA}$) foi o argilomineral dominante, associada a menores proporções de mica ($d= 9,93$ e $4,97 \text{ \AA}$) e quartzo ($d= 3,33 \text{ \AA}$) (Figuras 7 e 8). Essa composição foi consistente com estudos prévios realizados na mesma região (Neumann et al., 2012; Fink et al., 2014). Comparando visualmente os difratogramas da fração argila não fracionada ($< 2 \mu\text{m}$) do solo sob CA e FE, obtidos de amostras de mesmo peso e tratadas para saturação com Ca^{2+} (CaAD) e solvatação com etilenoglicol (CaEG), se verificou que as intensidades das reflexões hkl 001 e 002 da caulinita foram menores no solo sob FE (Figuras 7 e 8). A redução das intensidades das reflexões da caulinita no solo sob FE em comparação ao CA também foi observada numericamente através da área das reflexões (Tabela 6). Também é possível observar na figura 9, que o reflexo referente à mica, esta mais assimétrico para o CA. O reflexo tende a ficar mais largo em direção aos comprimentos de onda correspondentes aos minerais 2:1, indicando que quando tratada com Ca e etilenoglicol a argila tende a expandir-se em parte.

Na sub fração argila de maior tamanho, com partículas entre $0,1$ e $2 \mu\text{m}$, os minerais identificados foram os mesmos verificados na fração argila total do solo sob ambos os usos (CA e FE). Nesta sub fração, as reflexões relativas à caulinita também foram menos intensas e apresentaram menores áreas no FE em relação ao CA, quando as amostras foram tratadas para expansão dos argilominerais 2:1 (CaAD e CaEG) (Figura 8; Tabela 7). Quando as amostras foram saturadas com K^+ e aquecidas para a contração dos argilominerais 2:1 (K e K150), as reflexões da caulinita foram semelhantes em intensidade e área para o solo sob ambos os usos. De forma inversa, a reflexão da mica foi semelhante

em intensidade e área para o CA e FE nos tratamentos para expansão, porém novamente apresentou menor intensidade e área no FE em relação ao CA quando as amostras foram tratadas para contração.

Na sub fração argila de tamanho intermediário, com partículas entre 0,05 e 0,1 μm , a dominância da caulinita aumentou, enquanto as reflexões da mica e do quartzo apresentaram intensidades muito baixas no solo sob ambos os usos (CA e FE) (Figura 10). Verificando as intensidades e áreas das reflexões relativas a caulinita nessa sub fração, foi novamente evidente a redução desses parâmetros no FE em relação ao CA (Figura 8; Tabela 8).

Na sub fração argila de menor tamanho, com partículas inferiores a 0,05 μm , as reflexões da caulinita ocorreram associadas a uma reflexão muito pouco intensa do quartzo no solo sob ambos os usos (CA e FE) (Figura 10). Ao contrário das demais sub frações de maior tamanho de partículas, nessa fração as intensidades e áreas da caulinita foram semelhantes no solo sob ambos os usos (CA e FE) (Figura 11; Tabela 9). Entretanto, se verificou que os cristais de caulinita nessa fração foram menos cristalinos, evidenciados pela maior largura a meia altura das reflexões desse argilomineral.

Na fração argila desferrificada (< 2 μm) do solo rizosférico, sob ambos os usos (CA e FE), a composição mineralógica foi semelhante àquela observada na fração argila desferrificada do solo, com a caulinita como argilomineral dominante, associada a menores proporções de mica e quartzo (Figura 12). Tanto para a caulinita, como para a mica, foram expressivas as reduções nas intensidades e áreas das reflexões no solo rizosférico do FE comparativamente ao do CA (Figura 12; Tabela 10).

Os resultados obtidos através da DRX indicam que após 17 anos da substituição do uso do solo com campo por florestamento com *Eucalyptus* spp. ocorreram alterações mineralógicas no solo. A alteração mais evidente e expressiva foi a dissolução do argilomineral 1:1 caulinita no solo sob FE. Essa alteração ocorreu, possivelmente, através de reações protônicas e complexativas causadas pela acidificação do solo total e rizosférico, e pelo aumento de C orgânico no solo sob FE, também constatadas em estudo com solos rizosférico de *Eucalyptus* spp. (Korchagin et al., 2018). Reforçam quimicamente essa constatação os incrementos dos teores de Al^{3+} e $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ no complexo sortivo do solo sob FE, bem como o aumento da saturação por Al^{3+} ,

conforme verificado em estudo sobre a dissolução ácida de caulinitas (Khawmee et al., 2013). Além disso, deve ser ressaltada como uma consequência dessa dissolução de caulinitas a redução dos teores de silte e argila verificada nas amostras do solo rizosférico sob FE.

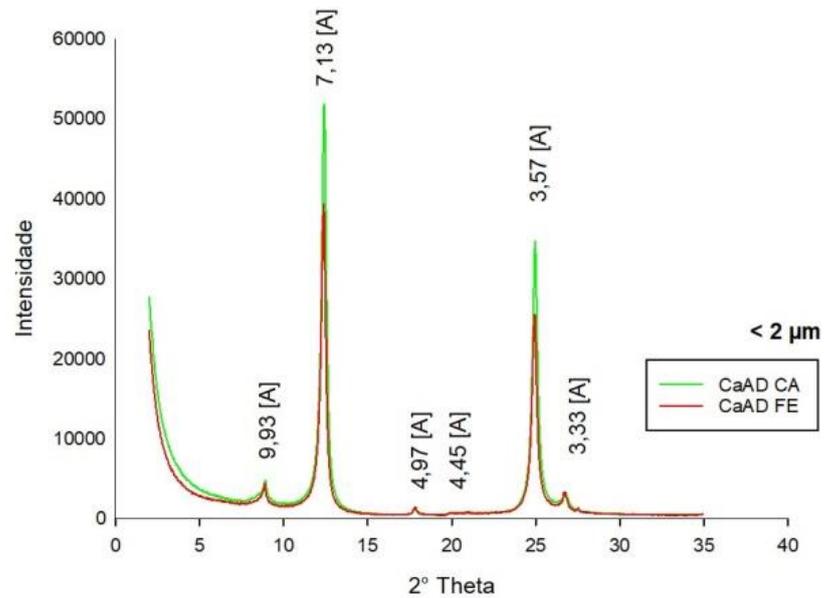


Figura 7. Difratoogramas de raios x da fração argila desferrificada do solo (<math>< 2 \mu\text{m}</math>) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca^{2+} e CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e solvatada com etilenoglicol

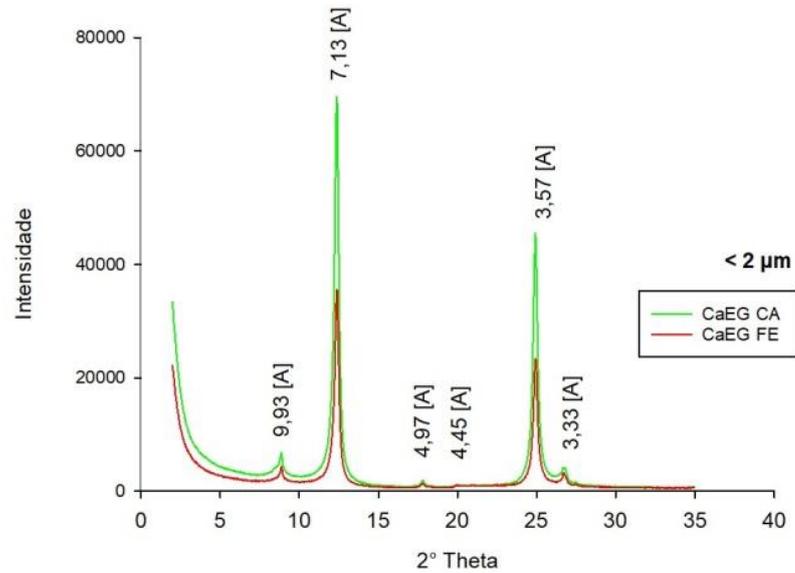


Figura 8. Difratoformas de raios x da fração argila desferrificada do solo (< 2 μm) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaEG- amostra saturadas com Ca²⁺ e CaEG- amostra saturadas com Ca²⁺ e solvatada com etilenoglicol.

Tabela 5. Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos d= 9,93 Å da mica e d= 7,13 e 3,57 Å da caulinita nos difratogramas de raios x da fração argila desferrificada do solo (< 2 μm) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.

Uso	Tratamento	Áreas		
		d= 9,93 Å	Ct (001)	Ct (002)
CA	CaAD	1,39	63,19	46,48
	CaEG	2,52	84,63	55,30
FE	CaAD	1,69 (0,82)	42,85 (1,47)	27,93 (1,66)
	CaEG	1,33 (1,89)	38,68 (2,19)	25,22 (2,19)

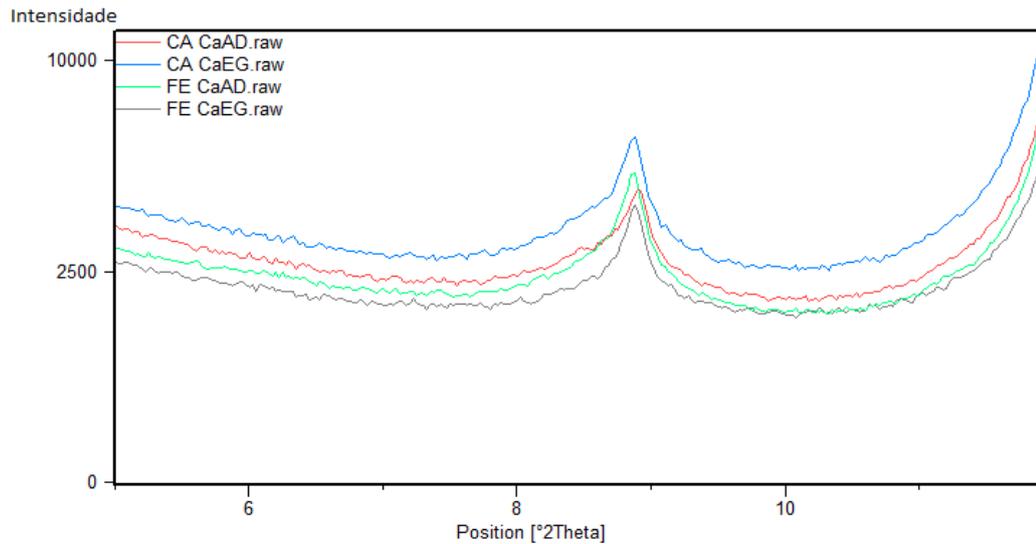


Figura 9 - Difratoformas de raios x da fração argila desferrificada do solo (< 2 μm) da camada 0,10-0,20 m sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e solvatada com etilenoglicol. Detalhe do reflexo 9,93 Å.

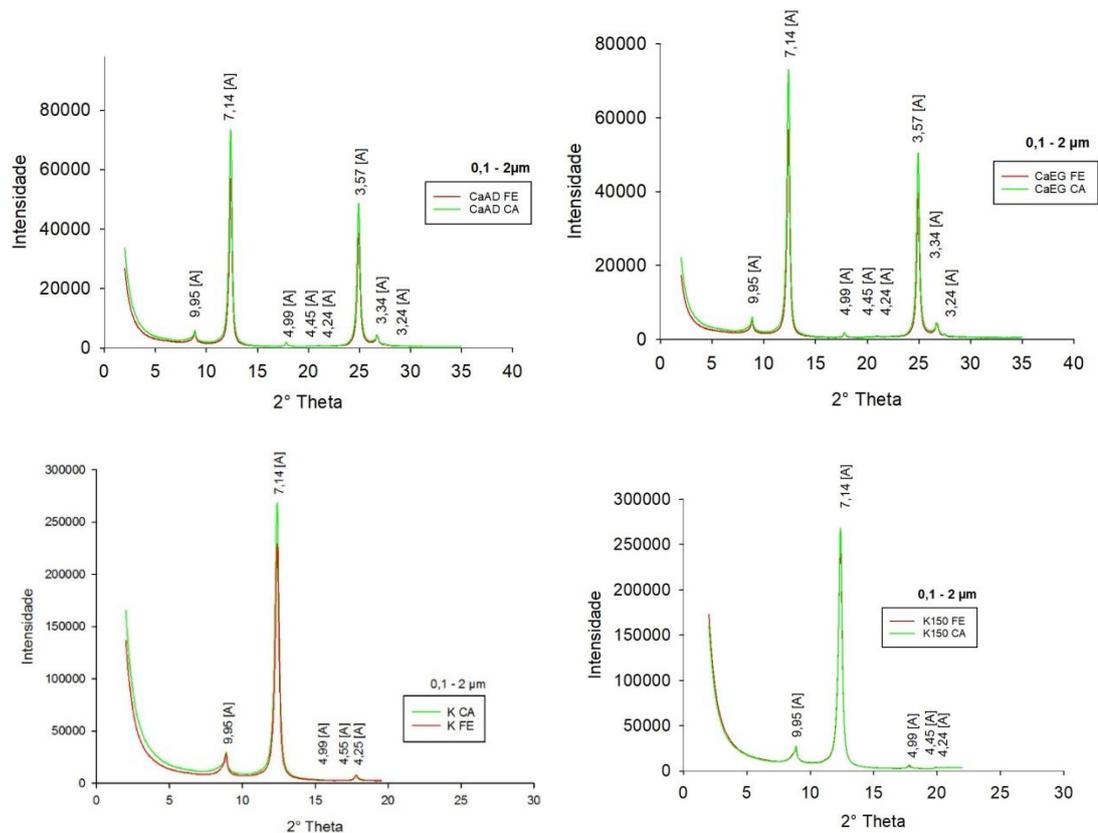


Figura 10. Difratoformas de raios x da sub fração argila 0,1-2 μm desferrificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca^{2+} ; CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e solvatada com etilenoglicol; K - amostra saturada com K^+ em temperatura ambiente; e K150- amostra saturada com K^+ e aquecida a 150 $^{\circ}\text{C}$.

Tabela 6. Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 9,93 \text{ \AA}$ da mica e $d= 7,13$ e $3,57 \text{ \AA}$ da caulinita nos difratogramas de raios x da sub fração argila $0,1-2 \mu\text{m}$ desferrificada da camada $0,10-0,20 \text{ m}$ do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.

Uso	tratamento	Áreas		
		$d= 9,93 \text{ \AA}$	Ct (001)	Ct (002)
CA	CaAD	2,32	98,59	65,99
	CaEG	2,40	89,33	62,61
	K 25	2,47	65,62	*
	K 150	1,78	65,54	*
FE	CaAD	2,27 (1,02)	70,00 (1,41)	47,34 (1,39)
	CaEG	2,32 (1,03)	69,26 (1,29)	43,56 (1,44)
	K 25	1,90 (1,30)	60,47 (1,09)	*
	K 150	1,48 (1,20)	62,71 (1,05)	*

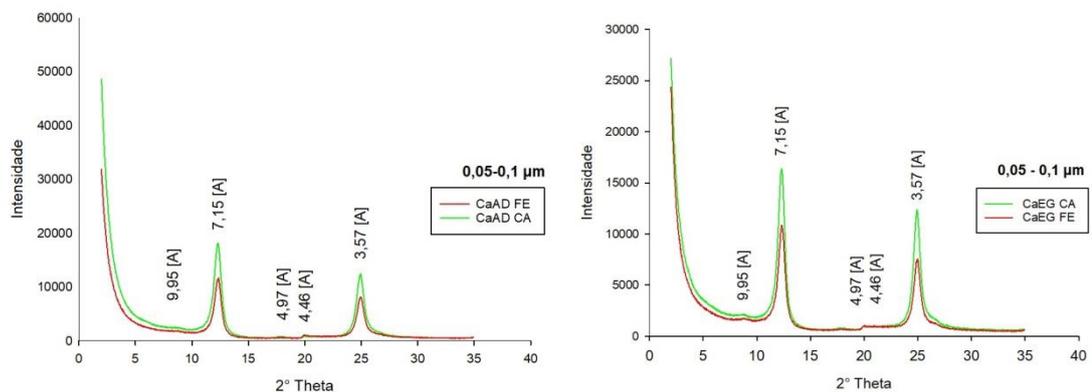


Figura 11. Difratogramas de raios x da sub fração argila $0,05-0,10 \mu\text{m}$ desferrificada da camada $0,10-0,20 \text{ m}$ do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca^{2+} ; CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e solvatada com etilenoglicol.

Tabela 7. Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 9,93 \text{ \AA}$ da mica e $d= 7,13$ e $3,57 \text{ \AA}$ da caulinita nos difratogramas de raios x da sub fração argila $0,05-0,10 \text{ \mu m}$ desferrificada da camada $0,10-0,20 \text{ m}$ do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.

Uso	tratamento	Áreas	
		Ct (001)	Ct (002)
CA	CaAD	38,71	14,89
	CaEG	43,75	23,87
	K 25	31,87	*
FE	CaAD	25,94 (1,49)	13,28 (1,12)
	CaEG	17,98 (2,43)	6,37 (3,75)
	K 25	22,02 (1,45)	*

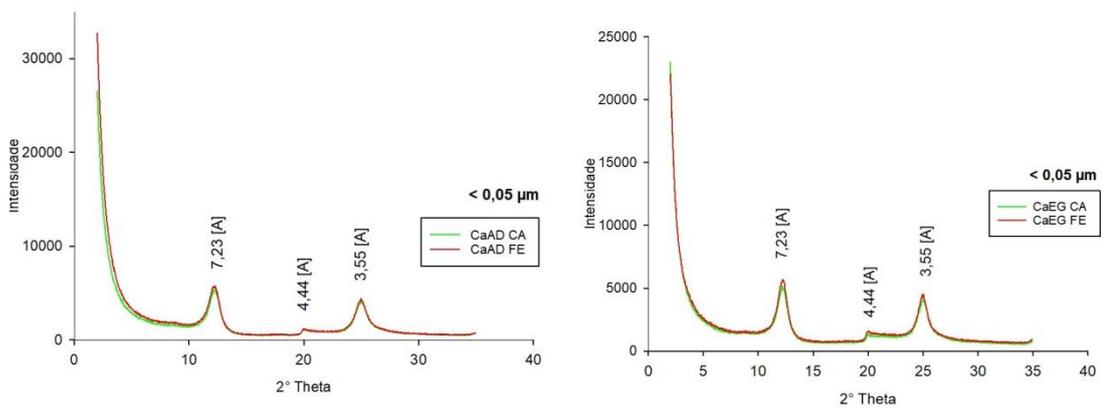


Figura 12. Difratogramas de raios x da sub fração argila $< 0,05 \text{ \mu m}$ desferrificada da camada $0,10-0,20 \text{ m}$ do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca^{2+} ; CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e solvatada com etilenoglicol.

Tabela 8. Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 7,13$ e $3,57$ Å da caulinita nos difratogramas de raios x da sub fração argila $< 0,05$ µm desferificada da camada 0,10-0,20 m do solo sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.

Uso	Tratamento	Áreas	
		Ct (001)	Ct (002)
CA	CaAD	15,45	7,65
	CaEG	12,72	6,98
FE	CaAD	14,90 (1,04)	8,19 (0,93)
	CaEG	10,96 (1,16)	9,87 (0,71)

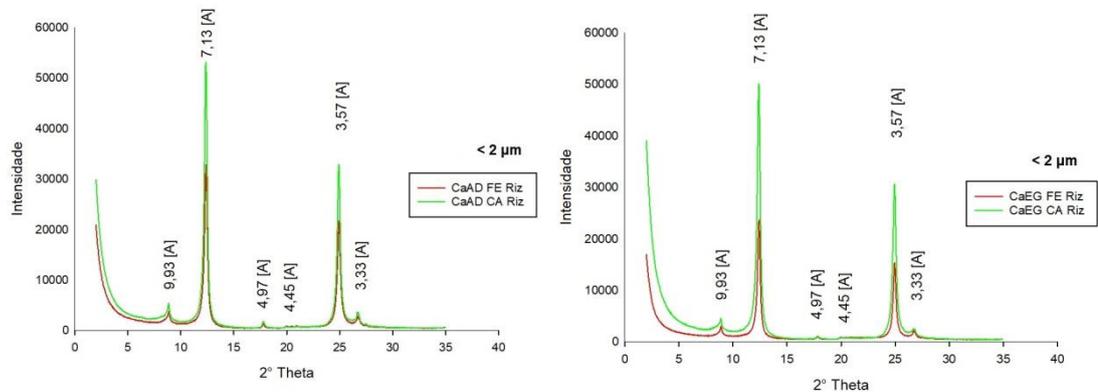


Figura 13. Difratogramas de raios x da fração argila < 2 µm desferificada do solo rizosférico sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). CaAD- amostra saturadas com Ca^{2+} ; CaEG- amostra saturadas com Ca^{2+} e solvatada com etilenoglicol.

Tabela 9. Áreas das reflexões (cps X 2°T) dos espaçamentos $d= 9,93$ Å da mica e $d= 7,13$ e $3,57$ Å da caulinita nos difratogramas de raios x da fração argila < 2 µm desferificada do solo rizosférico sob uso de campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp. (FE). Entre parênteses constam os valores relativos a razão CA/FE.

Uso	tratamento	Áreas		
		$d= 9,93$ Å	Ct (001)	Ct (002)
CA	CaAD	1,55	57,02	41,96
	CaEG	1,48	59,86	39,04
FE	CaAD	1,20 (1,29)	35,59 (1,60)	23,69 (1,77)
	CaEG	1,18 (1,25)	22,71 (2,64)	14,59 (2,67)

4. Conclusões

Após 17 anos de florestamento com *Eucalyptus* spp. em substituição ao uso do solo com campo nativo, ocorrem mudanças nas propriedades do Argissolo Vermelho subtropical:

Com relação ao complexo sortivo do solo, diminuem os teores de Ca^{2+} , a soma de bases e a saturação por bases. A reação do solo se torna mais ácida e aumentam os teores de Al^{3+} trocável e de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$.

Com relação à granulometria, não ocorre mudança na proporção das frações areia, silte e argila quando considerado o solo total. No solo rizosférico, diminuem os teores das frações silte e argila.

Com relação a mineralogia, ocorre a redução da concentração de óxidos de ferro pedogênicos, constatada pela extração de Fe^{3+} e Al^{3+} por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. No solo rizosférico ocorre o processo de rubeificação (avermelhamento), constatado através do aumento da razão $\text{Hm}/(\text{Hm} + \text{Gt})$. O fracionamento físico da argila desferrificada associado à difratometria de raios X, indica que a caulinita é dissolvida, possivelmente por reações protônicas. No solo do CA é possível observar que o reflexo referente a mica (9,93 Å) está mais assimétrico quando a amostra é solvatada com etilenoglicol, mostrando-se parcialmente expansível, ao contrário da amostra da FE.

CAPÍTULO III: Alterações mineralógicas em solo cultivado com lavoura e adições de altas doses de calcário

1. Introdução

Solos localizados em regiões tropicais e subtropicais são, em sua maioria, altamente intemperizados e ácidos (Figura 14), propriedade que constitui um importante obstáculo para a produção de alimentos (Drescher et al., 1995). Essa propriedade deriva da gênese desses solos sob condições ambientais caracterizadas por altas temperaturas e precipitações pluviométricas, condicionantes de um intenso intemperismo químico. O Brasil possui em sua vasta extensão territorial uma expressiva diversidade de solos, os quais são em maioria altamente intemperizados. Vários estudos realizados em diferentes regiões do país descrevem solos com características de intensa acidez (pH variando de 3,8 a 5,0) (Nascimento, 2000; Quaggio; Raj; Malavolta, 1985; Corrêa et al., 1985; Maeda et al., 1997; Pereira et al., 1998). No Rio Grande do Sul, estado mais meridional do Brasil, análises de 60.000 amostras de solos indicaram que em 70% deles o pH em água foi inferior a 5,5 (Drescher et al., 1995). Esses resultados enquadram a reação da maioria dos solos como fortemente a extremamente ácida segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018a

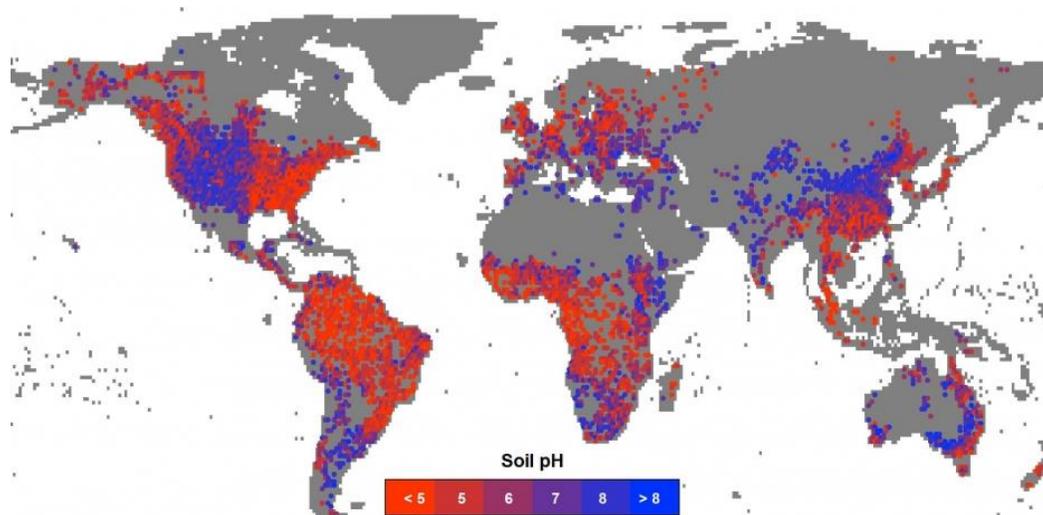


Figura 14. Mapa global do pH dos solos. Fonte: Cohen Julie (2016), University of California

A demanda crescente por alimentos, principalmente grãos e carne, tem determinado a expansão das áreas agricultáveis. Embora em comparação as últimas décadas o avanço dessas áreas destinadas à produção agropecuária tenha diminuído nos biomas Amazônia e Cerrado, no bioma Pampa a expansão continua em ascensão (Kuplich et al., 2018). Ocupando cerca de 176.000 km², o Bioma Pampa (Figura 14) é formado por campos, florestas, dunas e áreas úmidas (PROBIO, 2010). A diversidade geomorfológica e climática no Bioma Pampa resultou em uma variabilidade pedológica, com a ocorrência de solos pouco intemperizados (Neossolos, Chernossolos e Vertissolos) nas regiões da Campanha e Fronteira Oeste, solos em avançado estágio de intemperização (Neossolos, Cambissolos e Argissolos) no Escudo Sul Riograndense, bem como solos hidromórficos (Planossolos e Gleissolos) em posições de má drenagem. Sua diversidade florística inclui mais de dois mil táxons; 502 gêneros e 89 famílias, sendo que 900 dos táxons são exclusivos do bioma Pampa (Boldrini et al., 2012). O Pampa é o segundo bioma mais devastado do Brasil, restando apenas 36% de sua área original (PROBIO, 2010).

A incorporação de áreas de campo do Pampa ao sistema produtivo agrícola se deve ao desenvolvimento de novas tecnologias de cultivo, como por exemplo, a adoção do sistema plantio direto e a sistemas de integração lavoura-pecuária (Cassol et al., 2007; Kaminski et al., 2007; Veiga et al., 2011; Anghinoni et al., 2013). Por outro lado, estudos mostram que a substituição de áreas de campo pelo uso do solo com lavouras diminui a biodiversidade, os teores de matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes, bem como aumenta a compactação do solo, alterando os teores de umidade e a dinâmica da água no solo (Pillar et al., 2009; Nabinger et al., 2009; Carvalho et al., 2016; Kuplich et al., 2018).

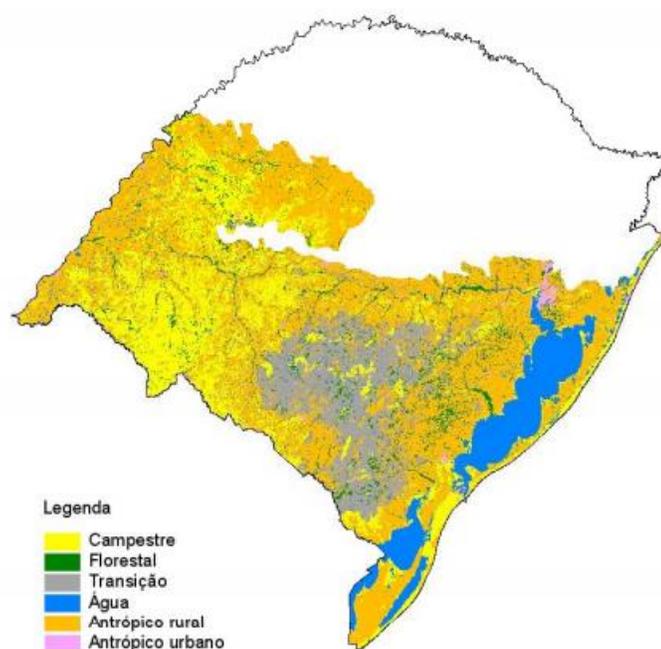
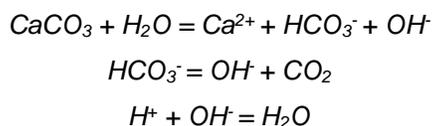


Figura 15. Mapa com a cobertura vegetal natural campestre, florestal, de transição e também superfícies de água e usos antrópicos do Bioma Pampa. Fonte: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. PROBIO – Cobertura vegetal do Bioma Pampa, 2007.

A mudança de áreas de solos sob campo, naturalmente ácidos, para uso com lavouras envolve a correção dessa acidez, normalmente com a adição

de calcário, que é o insumo mais utilizado para essa finalidade. Com a aplicação de calcário, ocorre a formação de uma frente alcalinizante que avança verticalmente em profundidade no perfil do solo (Amaral et al., 2004). A sua velocidade de progressão depende da forma de aplicação do calcário, do sistema de cultivo, das características do solo e de clima, e da adição de fertilizantes acidificantes.

Os efeitos da calagem podem ser observados em curto prazo de tempo nos primeiros centímetros de solo (Rheinheimer et al., 2000). A correção das camadas mais profundas do solo ocorre de forma mais lenta, principalmente em solos onde predominam cargas variáveis na capacidade de troca de cátions (CTC) (Ernani; Ribeiro; Bayer, 2004). As oxidrilas e os bicarbonatos formados após a calagem são capazes de neutralizar os íons H^+ através do fenômeno de troca catiônica. Além da neutralização da acidez, o calcário ainda é fonte dos nutrientes Ca^{2+} e Mg^{2+} . Abaixo estão exemplificadas as reações básicas do $CaCO_3$ quando adicionado ao solo, o mesmo acontece quando adicionado $MgCO_3$:



O solo é um sistema aberto e complexo, em constante troca de energia e matéria com os sistemas vizinhos (Smeck et al., 1985). Mudanças nas condições originais do solo podem alterar o seu equilíbrio dinâmico, podendo ou não levar o solo a outro estado de equilíbrio diferente do original. Por outro lado, os solos possuem capacidades distintas de absorver/amortizar estas mudanças ou impactos, as quais variam dependendo das características de cada solo, bem como da intensidade das mudanças (Azevedo, 1996).

Como referido anteriormente, a adição de calcário ao solo determina mudanças relativamente rápidas na composição da solução e do complexo sortivo do solo. À medida que o calcário dissolve no solo, íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} são adsorvidos nas cargas negativas, aumentando suas concentrações na fase sólida e na solução. Elementos como B, Zn^{2+} , Cu^{2+} e Mn^{2+} formam complexos de esfera

interna com os óxidos de ferro e alumínio, diminuindo suas concentrações na solução. Por outro lado, P, Mo e S podem ser deslocados das ligações de complexo de esfera interna, aumentando assim a sua disponibilidade na solução (Meurer, 2010). Além do aumento do pH, a calagem proporciona aumento da CTC e diminuição da atividade do Al^{3+} . Sendo assim, as principais perturbações provocadas pela calagem sobre as propriedades químicas do solo são a modificação da atividade protônica, da atividade do Al^{3+} e a alteração na proporção dos íons, devido às adições de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Lindsay, 1979; Azevedo; Kampf; Bohnen, 1996).

Embora os efeitos da calagem sobre as características químicas de solos sejam relativamente bem conhecidos, o entendimento dessa ação antrópica sobre o sistema mineralógico do solo ainda carece de investigações. Considerando que a calagem pode determinar um novo equilíbrio dinâmico do sistema solo, é possível que alterações mineralógicas graduais sejam inevitáveis (Karathanasis e Wells, 1989). Tais alterações mineralógicas vêm sendo constatadas em solos subtropicais cultivados com videiras em substituição a floresta atlântica (Bortoluzzi et al., 2012), em solos sob lavouras em plantio direto em substituição a campo nativo ou solos sob longos períodos com lavoura em plantio convencional (Silva Neto et al., 2008; Inda Junior et al., 2010b; Inda Junior et al., 2014), em solos sob sistemas integrados de lavoura-pecuária em substituição ao campo nativo (Bertolazzi et al., 2017), e em solos sob lavoura com adição de dejetos animais (Bortoluzzi et al., 2005; Officer et al., 2006; Fink et al., 2014).

Nos solos mais intemperizados do sul do Brasil, a mineralogia dominante é formada por minerais do tipo 1:1 (caulinita), óxidos de silício (quartzo) e óxidos de ferro (goethita, hematita, maghemita e ferrihidrita) (Kämpf e Curi, 2003; Schaefer; Fabris; Ker, 2008). Em adição, uma especificidade desses solos é a ocorrência de argilominerais 2:1 com hidróxi- Al^{3+} entrecamadas (vermiculita-VHE e esmectita-EHE) (Kämpf; Azevedo; Costa Junior, 1995; Azevedo et al., 2012; Caner et al., 2014), cuja formação e estabilidade são induzidas pela presença de Al^{3+} trocável. Esses minerais são considerados estáveis em

pedoambientes moderadamente ácidos e com baixos conteúdos de matéria orgânica (Kämpf & Curi, 2003). Por outro lado, sistemas de manejo do solo que preconizam a neutralização da acidez do solo e a acumulação de matéria orgânica podem desestabilizar argilominerais 2:1 HE pela remoção parcial ou total dos polímeros de hidróxi- Al^{3+} das entrecamadas (Karathanasis & Wells, 1989; Kämpf & Curi, 2003).

Esse processo foi demonstrado em laboratório através da adição de calcário em solos ácidos até valores de pH superiores a 7,2 (Niederbudde e Rühlicke, 1981). Utilizando análises de DRX, os autores observaram uma relativa liberação de polímeros de hidróxi- Al^{3+} das entrecamadas de vermiculitas, evidenciada pelo deslocamento da reflexão em 1,4 nm para ângulos menores como resultado da expansão parcial das entrecamadas. Porém, em condições de campo, a despolimerização das entrecamadas de argilominerais 2:1 HE não foi constatada após 23 anos da aplicação de 40 Mg ha^{-1} de calcário em um Latossolo Bruno (Azevedo; Kampf; Bohnen, 1996), nem após 26 anos da adoção do plantio direto em substituição ao plantio convencional (Inda Junior et al., 2010b). Entretanto, nos dois estudos, a redução da atividade do Al^{3+} na solução do solo e os diagramas de estabilidade termodinâmica indicaram uma desaceleração da intercalação de Al-OH nas entrecamadas dos argilominerais 2:1.

Somada ao efeito da adição de calcário ao solo, a despolimerização das entrecamadas de argilominerais 2:1 HE pode ser afetada pela decorrente acumulação de matéria orgânica na camada superficial de solos sob plantio direto bem estabelecido, devido a complexação potencial do Al^{3+} em solução pelos ligantes orgânicos (Schwertmann, 1991; Ciotta et al., 2002). Essa interpretação tem sido utilizada para explicar a maior expansividade de argilominerais 2:1 HE em solos sob pastejo com deposição concentrada de dejetos bovinos (Officer et al., 2006), bem como em solos sob integração lavoura-pecuária (Bertolazi et al., 2017).

Considerando a importância da correção da acidez do solo na produção agrícola de solos ácidos subtropicais brasileiros, o presente estudo objetivou investigar alterações mineralógicas promovidas pela adição de calcário em um

Argissolo Acinzentado cultivado por 25 anos com lavoura em sistema de semeadura direta em substituição ao uso do solo com pastagem nativa.

2. Material e Métodos

2.1 Localização, coleta e preparo das amostras

O experimento de longa duração (25 anos) onde foram realizadas as coletas de amostras de solo para a realização do estudo está localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul (RS), nas coordenadas geográficas $29^{\circ}43'04.15''\text{S}$ e $53^{\circ}42'26.72''\text{O}$ (Figura 16). O solo da área é classificado como Argissolo Acinzentado Distrófico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Santos et al., 2018a), desenvolvido a partir de sedimentos aluviais da Formação Sanga do Cabral (CPRM, 2006). O relevo é suave ondulado, em altitude de 138 metros. O clima é classificado como subtropical úmido, com média de temperatura anual de $19,2^{\circ}\text{C}$ e média de pluviosidade anual de 1700 mm (Maluf, 2000).

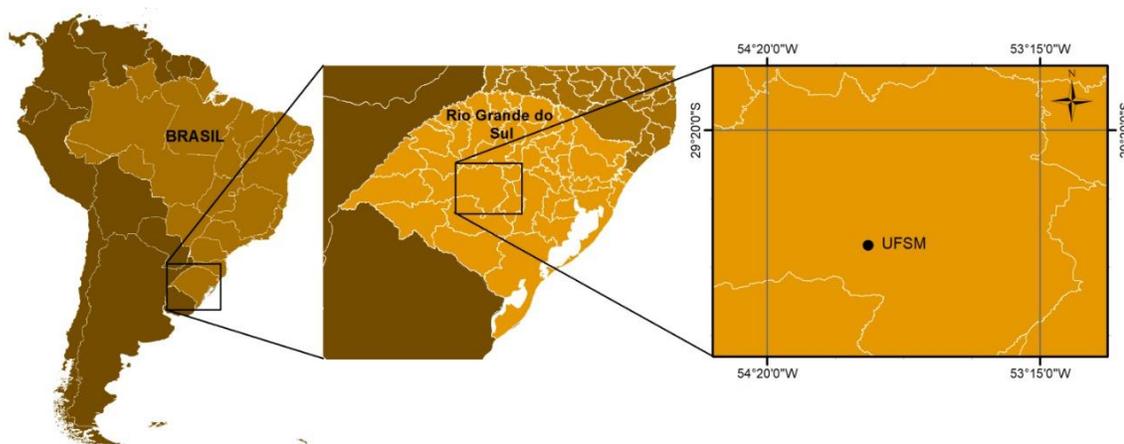


Figura 16. Mapa da América do Sul (esquerda); mapa do estado do Rio Grande do Sul (centro); e mapa da região central do estado (direita), onde está localizada a Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria.

Anteriormente a instalação do experimento (1994), o solo da área foi utilizado com pastagem natural. Em outubro de 1994, foram coletadas amostras

de solo da área na camada de 0,00-0,20 m, cujos resultados químicos foram: pH em água = 4,4, M.O. = 37 g dm⁻³, Al³⁺ trocável = 3,3 cmol dm⁻³, Ca²⁺,Mg²⁺ trocáveis = 3,7 cmol dm⁻³; P disponível = 2,3 mg dm⁻³ e K⁺ disponível = 54 mg dm⁻³. A pastagem natural foi dessecada com glyphosate. Os tratamentos consistiram da aplicação de calcário em superfície e da aplicação de calcário seguida de sua incorporação com uma aração e duas gradagens (parcelas principais). As doses de calcário utilizadas foram de 0,0; 2,0; 8,5 e 17,0 t ha⁻¹ (subparcela). A mobilização do solo para a incorporação do calcário somente ocorreu na instalação do experimento, o qual após isso foi conduzido em sistema de plantio direto. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com três repetições. A parcela principal media 12 x 12 m e a subparcela 6 x 12 m. A área total do experimento é de 1728 m² (Figura 17).



Figura 17. Área do experimento, localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, RS. S: Superficial, I: Incorporado, t: toneladas por hectare aplicado em cada subparcela. Faixa em amarelo: onde foram coletadas as amostras para este estudo. Fonte: Google Earth Pro-jun/2018.

Para o presente estudo, foram coletadas amostras em triplicata somente em uma das quatro sub parcelas, nas doses de 0,0 e 17,0 t ha⁻¹, sem e com incorporação de calcário, totalizando 12 pontos de coleta. Em cada ponto de coleta foram abertas trincheiras, onde amostras de solo foram coletadas nas seguintes camadas: 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, totalizando 60 amostras de solo. As amostras foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm para a obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA).



Figura 18. Perfil representativo do Argissolo Acinzentado Distrófico ocorrente na área experimental.

2.2 Análises químicas

As análises químicas do complexo sortivo foram realizadas na fração TFSA, segundo métodos constantes em Teixeira et al. (2017), para os seguintes

componentes: pH em H₂O, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, P, Al³⁺, H⁺+Al³⁺ e micronutrientes. A partir destes dados foram calculados: capacidade de troca de cátions (CTC pH7), soma de bases (S), saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V). A determinação do C orgânico total (COT) do solo foi realizada na TFSA por combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU TOC-V.

O teor de Fe relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) foi extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB-Na) a 80 °C (Mehra e Jackson, 2013) na fração argila. Os teores de Fe, Al e Si solubilizados nas extrações seletivas foram determinados por espectrofotometria de emissão óptica (ICP-OES). A fração argila desferrificada após tratamento com DCB-Na foi fracionada em três tamanhos, conforme metodologia detalhada no item 2.3.

2.3 Análises físicas e mineralógicas

Para a dispersão químico/mecânica e coleta da fração argila foram pesadas 10 g de TFSA, nas quais foi oxidada a matéria orgânica à quente (40 °C) com água oxigenada 5%. Após, em cada amostra foram adicionados 100 mL de água destilada pelo modo osmótico e 15 g de NaCl. As amostras foram submetidas a oito horas de agitação mecânica, sendo ultrassonadas por um minuto duas vezes durante este período. Na sequência, as amostras foram tamisadas ainda úmidas, a 50 µm. A fração maior que 50 µm, correspondente à fração areia, foi seca em estufa e pesada. A fração menor que 50 µm foi dispersa por agitação em 100 mL de NaCl 1 mol L⁻¹ durante 6 horas, sendo ultrassonadas uma vez por um minuto durante este período. A operação anterior foi repetida quatro vezes. O excesso de NaCl foi eliminado após decantação e a suspensão saturada com Na⁺ foi lavada através de diálise em água destilada pelo modo osmótico. Esta fração foi transferida para provetas de 1000 mL e mantida em uma sala com temperatura constante de 20 °C. Após, as argilas foram extraídas das provetas por sifonamento de 20 cm da solução após sedimentação de 16 horas a 20 °C. Foram realizadas em torno de 12 extrações por amostras. O que restou na proveta após os dias de coleta corresponde à fração silte, o qual foi pesado após secagem em estufa. A fração argila também foi seca em estufa à 60 °C,

pesada e moída. A fração argila foi tratada com DCB-Na (item 2.2) para eliminar a fração óxidos de ferro. A fração argila coletada após a extração com DCB-Na, foi submetida à lavagem através de diálise em água destilada pelo modo osmótico, foi seca e pesada. Uma parte da argila foi fracionada em três sub frações infra micrométricas com uso de centrífuga (Laird et al., 1991; Hubert et al., 2009, 2012). Amostras de 1,5 g da fração argila foram pesadas e postas em suspensão com NaCl 1 mol L⁻¹. Esse tratamento foi repetido três vezes, sendo que após a terceira saturação deu-se início ao processo de separação das sub frações. A primeira sub fração a ser obtida foi a fração fina (<0,05 µm), restante no sobrenadante após seis ciclos de 15 minutos de centrifugação a 14 mil RPM (RCF 25100 g, biofuge stratos). A fração média (0,05 a 0,10 µm) foi obtida após seis ciclos de centrifugação de 10 minutos de centrifugação a 8.5 mil RPM (RCF 9250 g). A sub fração grossa (0,10 a 2 µm) foi a que restou após as duas extrações anteriores (fina e média). Uma vez separadas, as sub frações foram floculadas com CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹, concentradas e saturadas com CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹. O processo de saturação foi realizado colocando as amostras em contato com solução de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ durante agitação seguidas de centrifugação. Este processo foi repetido quatro vezes para cada amostra. Em seguida, foram submetidas à lavagem através de diálise em água destilada por osmose, secadas e pesadas. Após este processo, iniciou-se a saturação das amostras com KCl 1 mol L⁻¹, da mesma forma que o processo de saturação com CaCl₂. As lâminas orientadas foram confeccionadas com as frações saturadas com Ca²⁺ e K⁺ com 20 mg de argila cada, para análise de difração de raios X.

A área superficial específica (ASE) das frações TFSA e argila foi estimada pelo método de adsorção de água (Quirk, 1955). Amostras de 1,0 g de TFSA foram colocadas em vidros pesa filtro previamente pesados. As amostras foram submetidas a uma atmosfera de 0% de umidade (UR = 0%) pelo período de 12 dias em dessecadores contendo pentóxido de fósforo, sendo posteriormente pesadas. Após, pelo mesmo período, as amostras foram submetidas a uma atmosfera de 20% de umidade (UR = 20%) em dessecadores contendo uma pasta de acetato potássico, sendo posteriormente novamente

pesadas. Considerando que 1 molécula de água recobre $0,108 \text{ nm}^2$, a ASE foi calculada conforme a seguinte equação:

$$ASE \text{ m}^2 \text{ g}^{-1} = \text{no Avogadro } (6,02214 \times 10^{23}) \times 0,108 \text{ nm}^2 \times (\text{g água adsorvida/g amostra})$$

A identificação dos minerais constituintes das diferentes frações foi realizada por difratometria de raios X (DRX) em aparelho Bruker D8 Advance e Bruker D2 Phaser usando radiação Cu K α com 2θ variando de $2,5$ à 35° com passo de $0,012^\circ$ e tempo de cada passo de 96 s. Para tanto, foram analisadas lâminas confeccionadas com material não orientado (em pó) da fração terra fina seca ao ar (TFSA) e lâminas confeccionadas com material orientado da fração argila (total desferrificada e sub frações desferrificadas). Os dados obtidos foram tratados com o programa X'pert, onde os difratogramas são ajustados para permitir melhor visualização das reflexões minerais, bem como a comparação entre diferentes amostras para se observar o efeito das técnicas laboratoriais empregadas.

Como análise estatística foi realizada ANOVA (análise de variância) para verificar as interações entre tratamentos.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análises químicas

O P foi o único elemento que mostrou interação entre os três tratamentos (Tabela 11). O desdobramento da interação dos efeitos do manejo, dose e profundidade é mostrado na figura 6. No sistema de manejo com adição de calcário em superfície sem incorporação, a dose de 17 t ha^{-1} reduziu o teor de P disponível na camada $0,00\text{-}0,10 \text{ m}$ em relação a dose 0 t ha^{-1} . Para a dose de 17 t ha^{-1} não houve diferença significativa entre as camadas, enquanto que no

solo sem adição de calcário (dose 0 t ha⁻¹) o P disponível foi significativamente maior na camada mais superficial. Embora controverso, pois alguns estudos verificaram aumentos da disponibilidade do P com a calagem (Castro & Crusciol, 2013; Costa et al., 2016), esse resultado pode estar relacionado ao acúmulo de matéria orgânica na camada superficial do solo sob plantio direto sem a incorporação das 17 t ha⁻¹ de calcário adicionado. Nesta condição, a maior atividade microbiana mineraliza mais rapidamente os nutrientes, como por exemplo o P (Corbeels et al., 2016), aumentando a sua disponibilidade para uma rápida absorção pelas plantas (Renheimer et al., 2019). Essa suposição se sustenta em estudos solos onde a calagem elevou a atividade microbiana (Ekenler & Tabatabai, 2003; Mijangos et al., 2010) e promoveu decomposição acelerada da MOS (Yao et al., 2009).

No sistema de manejo com incorporação do calcário, embora o P disponível não tenha diferido entre as doses (0 e 17 t ha⁻¹) em cada profundidade, houve aumentos significativo em superfície quando da adição de 17 t ha⁻¹. Comparando os dois sistemas de manejo em cada camada para as diferentes doses, houve diferença significativa somente para a dose 0 t ha⁻¹ na camada 0,00-0,10 m, onde o P disponível foi maior quando o solo não foi revolvido (Figura 18). A adição de calcário melhora as características físicas e químicas do solo o que gera um ambiente propício ao desenvolvimento vegetal. O melhor desempenho da lavoura implica também em maior exportação de nutrientes, que pode ser verificado no solo onde o calcário foi aplicado superficialmente e onde há menor teor de P disponível.

Os atributos químicos pH, teores de S e Zn apresentaram interação entre a dose de calcário e a profundidade do solo (Tabela 11). Independente do sistema de aplicação, no solo sem adição de calcário (0 t ha⁻¹) os valores de pH aumentaram em profundidade. Conforme esperado, a adição de calcário (17 t ha⁻¹) aumentou significativamente o pH do solo na camada 0,00-0,40 m, o que resultou na ausência de diferenças ao longo das camadas do solo (Figura 19). Os teores de S foram significativamente menores na camada de 0,00-0,40 m no solo com adição de calcário, onde a neutralização da acidez do solo diminui a

capacidade de adsorção de sulfato e favorece a lixiviação do SO_4^{2-} para as camadas mais profundas (Rheinheimer et al., 2005; Osório Filho, 2006). Para o Zn, a calagem diminuiu os teores somente na camada mais superficial, a partir da qual os teores no solo com e sem adição de calcário não diferiram e permaneceram constantes em profundidade (Figura 19). Resultado semelhante, também na camada mais superficial de um Latossolo Vermelho, foi obtido por Moreira et al. (2017) e, possivelmente, está relacionado a transformação de formas mais solúveis de Zn^{2+} para formas de menor solubilidade ($\text{Zn}(\text{OH})_2$ e ZnCO_3) com o aumento do pH (Alleoni; Cambri; Caires, 2005).

Os atributos que apresentaram efeito da dose de calcário em todas as camadas amostradas e nos dois tipos de distribuição de calcário estão representados na tabela 12. Conforme esperado, os efeitos benéficos na química do solo pela aplicação de calcário foram expressos pelo incremento nos teores dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} , e da saturação por bases, bem como através da redução dos teores de Al^{3+} trocável e da saturação por Al^{3+} (m). O menor teor de C orgânico (COT) no solo que recebeu 17 t ha^{-1} de calcário se deve, provavelmente, a maior atividade microbiana e taxa de decomposição da matéria orgânica, resultando ainda na diminuição da capacidade de troca de cátions.

Tabela 10a. Interações entre atributos químicos e estatísticos avaliados em diferentes profundidades do solo sem e com adição de calcário, sem e com incorporação do calcário.

	pH	COT	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	H+Al	CTC
	-----Valores de P-----							

Manejo	1,00	0,46	0,51	0,97	0,98	0,98	0,39	0,35
Dose	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,21	<0,01	<0,01
Profundidade	0,12	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
M vs D	0,53	0,33	0,74	0,30	0,18	0,99	0,79	0,87
M vs P	0,53	0,06	0,92	0,85	0,80	0,83	0,98	0,99
D vs P	0,02	0,12	0,47	0,70	0,75	0,50	0,30	0,25
D vs P vs M	0,91	0,97	0,77	0,73	0,61	0,42	0,89	0,77

Tabela 11b. Continuação da tabela 11a.

	V	M	P	K ⁺	S	Zn ²⁺	Cu ²⁺	B	Mn ²⁺
	-----Valores de P-----								

Manejo	0,63	0,81	0,31	0,93	0,04	0,06	0,72	1,00	0,89
Dose	<0,01	<0,01	0,17	0,17	<0,01	0,08	0,23	0,15	0,07
Profundidade	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
M vs D	0,87	0,35	0,11	0,90	0,16	0,06	0,36	0,63	0,07
M vs P	0,87	0,93	0,54	0,82	0,88	0,48	0,95	0,96	0,84
D vs P	0,27	0,17	0,11	0,50	<0,01	0,03	0,38	0,25	0,07
D vs P vs M	0,90	0,96	0,03	0,40	0,26	0,10	0,86	0,98	0,16

COT: carbono orgânico total; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio

Tabela 11. Efeito da dose de calcário sobre as propriedades químicas do solo na camada de 0,0 a 0,80 m sob sistemas de aplicação do calcário (superficial ou incorporado).

Dose	COT	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	CTC	V	M
t ha ⁻¹	g kg ⁻¹		-----cmol _c kg ⁻¹ -----				-----%-----	
0	1,7 a	11,3 a	3,4 b	2,1 b	35,5 a	41,3 a	14,7 b	65,3 a
17	1,5 b	7,6b	5,4 a	3,7 a	26,4 b	35,7 b	29,5 a	41,9 b

Letras minúsculas comparam diferentes doses de calcário.

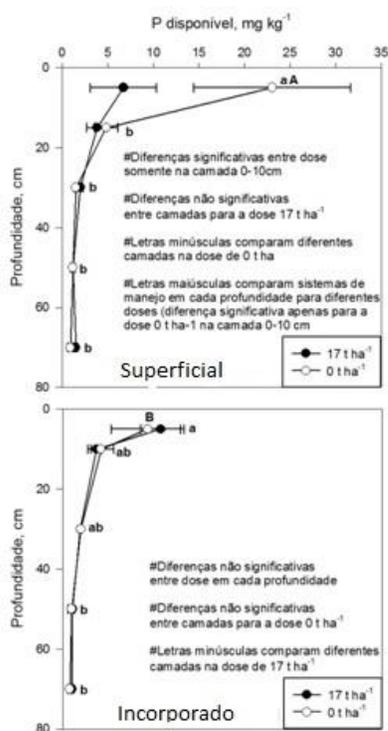


Figura 19. Desdobramento da interação dos efeitos do sistema de aplicação do calcário (superficial ou incorporado), da dose de calcário aplicada e da profundidade avaliada nos teores de P disponível.

Na tabela 13 estão representadas as variáveis que sofreram efeito da profundidade independente da dose e sistema de aplicação de calcário. Conforme esperado, os teores de COT diminuem significativamente em profundidade. Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ não apresentaram uma tendência clara ao longo das camadas, ao contrário do verificado com os teores de Al^{3+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e CTC que aumentaram com a profundidade do solo. Conseqüentemente, a saturação por bases (V) diminuiu em profundidade e a saturação por alumínio (M) aumentou, resultados da adição de calcário e da biociclagem. De maneira geral, os teores dos micronutrientes cobre, boro e manganês diminuíram em profundidade.

Tabela 12. Efeito da profundidade das camadas sobre as características químicas de solo que recebeu 0 ou 17 t ha⁻¹ de calcário em sistemas de aplicação do calcário (superficial ou incorporado).

Prof.	CO	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	CTC	V	m	K ⁺	Cu ²⁺	B	Mn
m	g kg ⁻¹	-----cmol _c kg ⁻¹ -----					-----%-----		-----mg kg ⁻¹ -----			

0,0-0,1	2,6 a	2,9 c	5,2 ab	2,8 b	17,1 c	25,4 d	35,4 a	28,1 b	110 a	0,71 a	0,31 a	11,7 a
0,1-0,2	2,1 b	5,7 c	3,7 bc	2,1 b	25,1 bc	31,0 cd	23,4 ab	50,6 a	68 b	0,65 ab	0,28 ab	3,8 b
0,2-0,4	1,5 c	9,9 b	2,8 c	1,8 b	33,8 ab	38,5 bc	13,8 ab	65,8 a	66 b	0,48 bc	0,23 bc	2,6 b
0,4-0,6	1,0 d	14,0 ab	3,9 bc	2,8 b	39,4 a	46,3 ab	14,9 b	67,1 a	96 ab	0,41 c	0,21 c	2,8 b
0,6-0,8	0,9 d	14,7 a	6,3 a	4,9 a	39,5 a	51,0 a	23,0 ab	56,4 a	125 a	0,52 abc	0,19 c	4,3 b

Letras minúsculas comparam diferentes profundidades

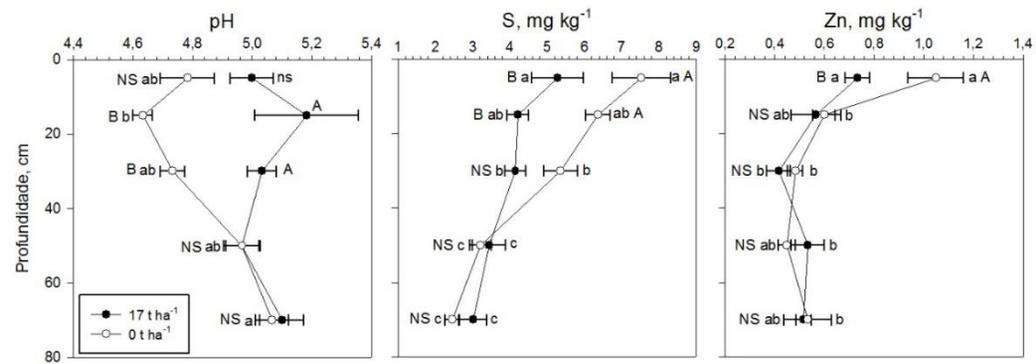


Figura 20. Desdobramento da interação dos efeitos da dose de calcário aplicada e da profundidade avaliada nos teores de S, Zn e valores de pH. Letras maiúsculas comparam distintas doses em cada profundidade; letras minúsculas comparam diferentes profundidades para cada dose.

3.2 Análises físicas

Tabela 13. Teor de argila e área superficial específica da fração argila do solo amostrado para os quatro tratamentos, em quatro profundidades.

Profundidade (m)	Granulometria		ASE		Granulometria		ASE		
	Argila (g kg ⁻¹)	argila	tfsa (m ² g ⁻¹)	tfsa	Argila (g kg ⁻¹)	argila	tfsa (m ² g ⁻¹)	tfsa	
Superficial				Incorporado					
0 toneladas									
0,00 - 0,10	286	107,5	43,4	43,4	289	111,4	52,9	52,9	
0,10 - 0,20	464	107,1	45,0	45,0	383	102,5	48,9	48,9	
0,20 - 0,40	580	106,0	72,6	72,6	510	111,6	64,3	64,3	
0,40 - 0,60	403	106,5	80,1	80,1	523	101,4	73,4	73,4	
17 toneladas									
0,00 - 0,10	213	115,3	40,3	40,3	297	108,9	41,4	41,4	
0,10 - 0,20	304	117,6	47,8	47,8	329	113,2	44,2	44,2	
0,20 - 0,40	439	115,1	49,7	49,7	410	104,6	43,8	43,8	
0,40 - 0,60	528	113,1	83,7	83,7	472	106,1	80,5	80,5	

ASE – Área Superficial Específica; tfsa – terra fina seca ao ar.

Confirmando que mudanças na granulometria do solo são incomuns em curtos espaços de tempo, os teores médios da fração argila do solo foram semelhantes entre os quatro tratamentos. Em geral, os teores de argila aumentaram em profundidade (Tabela 14), configurando a presença de horizonte diagnóstico subsuperficial B textural característico dos Argissolos. Resultado semelhante foi constatado para os valores da área superficial específica (ASE) da fração argila, os quais variaram, na média das camadas dos três perfis de cada tratamento, entre 107 e 115 m² g⁻¹ (Tabela 14). Ao contrário da ASE da argila, a ASE da fração TFSA apresentou variações expressivas, principalmente na camada 0,20-0,40 m, tendo mostrado relação positiva com os teores de argila [$ASE_{tfsa}=14,348+(0,106*argila)$; $R=0,717$; $P=0,002$] e negativa com os teores de COT [$ASE_{tfsa}=89,757-(18,520*COT)$; $R=0,783$; $P<0,001$].

Nos tratamentos com e sem adição de calcário (doses) em superfície ou incorporado (manejo), o fracionamento da argila em três sub frações de tamanho mostrou um predomínio no solo das partículas de menor tamanho ($<0,05 \mu$), seguidas da sub fração mais grosseira ($0,1-2,0 \mu$) e em menor proporção da sub fração intermediária ($0,05-0,1 \mu$) (Figuras 21 e 22). Essa fração intermediária apresentou somente pequenas variações ao longo das camadas do solo, independente da dose e manejo de aplicação do calcário. Entretanto, quando as 17 t ha^{-1} de calcário foram adicionadas ao solo superficialmente, se verificou que na camada $0,0-0,10 \text{ m}$ a proporção de partículas maiores da argila ($0,1-2,0 \mu$) foi menor (37%) comparativamente a proporção verificada na mesma camada do solo sem adição de calcário (46%) (Figura 8). Por outro lado, ainda nessa camada, a soma das proporções das sub frações intermediária e menor ($0,05-0,1$ e $<0,05$, respectivamente), foram maiores (63%) com a adição de calcário em superfície em comparação ao solo sem adição de calcário (54%). Essa diminuição da proporção de partículas maiores de argila e aumento da proporção de partículas de argila de menor tamanho na camada mais superficial onde o calcário foi disposto podem estar configurando uma ação intempérica mais intensa e também demonstra o processo natural de lessivagem, comum em Argissolos.

Quando as 17 t ha^{-1} de calcário foram adicionadas ao solo e incorporadas, se verificou uma tendência menos intensa mas similar ao ocorrido quando o calcário não foi incorporado, ou seja, a proporção de partículas maiores da argila ($0,1-2,0 \mu$) foi menor comparativamente a proporção verificada no solo sem adição de calcário (Figura 22). Entretanto, esse resultado não se restringiu somente a camada mais superficial, tendo ocorrido nas três primeiras camadas ($0,00-0,10$, $0,10-0,20$ e $0,20-0,40 \text{ m}$). Nessas três camadas, a soma média da proporção de partículas maiores da argila ($0,1-2,0 \mu$) foi menor (35%) comparativamente a média da proporção verificada nas mesmas camadas do solo sem adição de calcário (39%). Por outro lado, ainda nessas camadas, a soma das médias das proporções das sub frações intermediária e menor ($0,05-0,1$ e $<0,05$, respectivamente), foram maiores (53%) com a adição de calcário em superfície em comparação ao solo sem adição de calcário (49%).

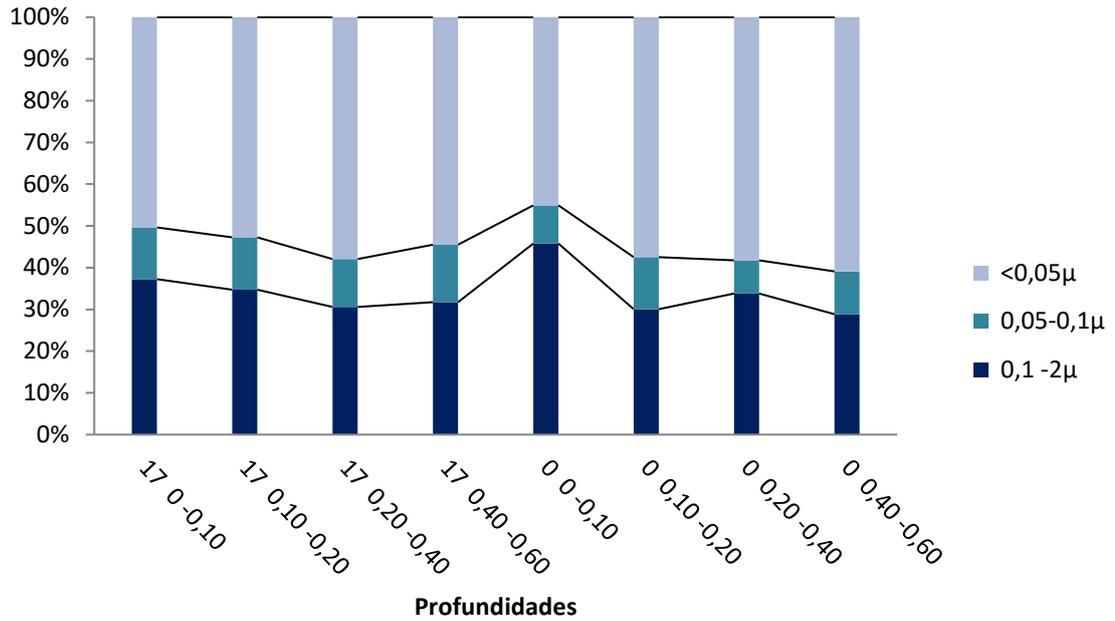


Figura 21 - Fracionamento da amostra de argila nas condições de 0 toneladas de calcário e 17 toneladas, aplicados superficialmente

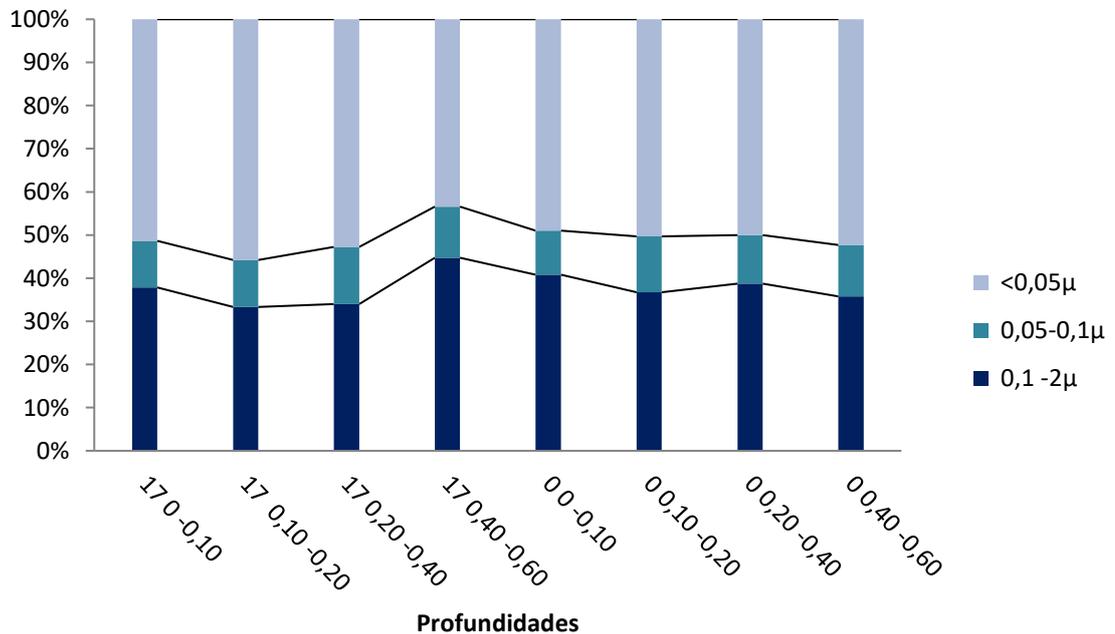


Figura 22 - Fracionamento da amostra de argila nas condições de 0 toneladas de calcário e 17 toneladas, aplicados com incorporação.

3.3 Análises mineralógicas

As análises por difratometria de raios x (DRX) para verificação de alterações mineralógicas decorrentes da adição de calcário ao solo em experimento de longa duração foram realizadas em amostras da fração terra fina seca ao ar (TFSA < 2 mm) da camada 0,00-0,10 m de profundidade, e da sub fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca^{2+} das camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Para a interpretação semiquantitativa dos resultados se deve considerar que a quantidade de amostra utilizada nas análises foi sempre a mesma. Os difratogramas de amostras da TFSA do solo sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição de calcário em superfície mostraram uma composição mineralógica muito similar, onde predominaram reflexões intensas do quartzo, associadas a reflexões de muito baixa intensidade de mica e caulinita (Figura 22).

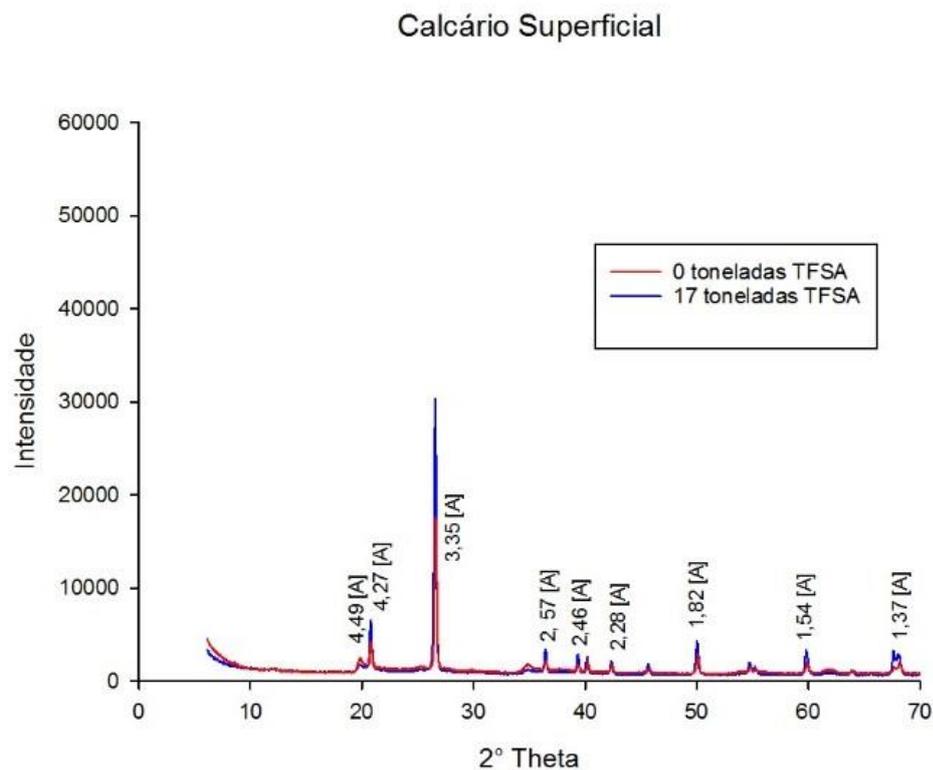


Figura 23 - Difratogramas de raios x da fração terra fina seca ao ar da camada 0,00-0,10 m dos tratamentos 0, e 17 t ha^{-1} de calcário aplicados em superfície.

As análises da sub fração argila grossa de todas as camadas do solo mostraram uma composição mineralógica composta pelos minerais primários quartzo e mica, pelos argilominerais caulinita e 2:1 (vemiculita/esmectita) e por

interestratificados mica/argilominerais 2:1. No tratamento com adição do calcário em superfície, embora os difratogramas da sub fração argila grossa tenham sido semelhantes na camada 0,0-0,10 m, foi constatada uma redução acentuada da reflexão relativa ao espaçamento $d=9,95 \text{ \AA}$ da mica na amostra com adição de 17 t ha^{-1} de calcário (Figura 23). Esse resultado pode estar relacionado a remoção do K^+ das entrecamadas das micas e sua consequente expansão para ângulos menores (espaçamentos $d=12,33$ e $14,12 \text{ \AA}$). Ainda nesse tratamento, nas camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, os difratogramas das amostras com 0 t ha^{-1} e 17 t ha^{-1} apresentaram as mesmas reflexões ao longo do espectro, porém com redução das intensidades relativas aos argilominerais caulinita ($d=7,15$ e $3,57 \text{ \AA}$) e argilominerais 2:1 ($d \sim 12,00$ e $14,00 \text{ \AA}$) (Figuras 24 e 25). O maior intemperismo desses minerais pode estar relacionado a um maior desempenho da lavoura, quando aplicado o calcário. Na camada mais profunda analisada (0,40-0,60 m), a adição de calcário não mostrou efeito sobre a mineralogia do solo, conforme verificado pela expressiva semelhança entre os difratogramas (Figura 14).

Nas camadas 0,0-0,10 e 0,20-0,40 m do solo com adição e incorporação do calcário, o comportamento foi contrário ao verificado no solo com adição do calcário na superfície (Figuras 27 e 28). Nessas camadas, a redução da intensidade da reflexão da mica ($d=9,96 \text{ \AA}$) e aumento da intensidade das reflexões relativas aos argilominerais 2:1 ($d=12,11$ e $14,47 \text{ \AA}$) foi constatada no solo sem adição de calcário (0 t ha^{-1}). Em adição, observou-se reduções nas intensidades das reflexões relativas a caulinita ($d=7,14$ e $3,57 \text{ \AA}$). Ainda na figura 28, podemos observar um efeito de ilitização nos solos onde houve aplicação de calcário (Bortoluzzi et al., 2005). O CaCO_3 promove a despolimerização dos minerais 2:1 HE (extração do Alumínio da entrecamada) e há posterior ocupação da entrecamada com K, provocando o pico em $d=9,96 \text{ \AA}$. Conforme verificado no tratamento com calcário em superfície, a adição de calcário incorporado não mostrou efeito sobre a mineralogia do solo na camada mais profunda analisada (0,40-0,60 m), conforme verificado pela expressiva semelhança entre os difratogramas (Figura 30).

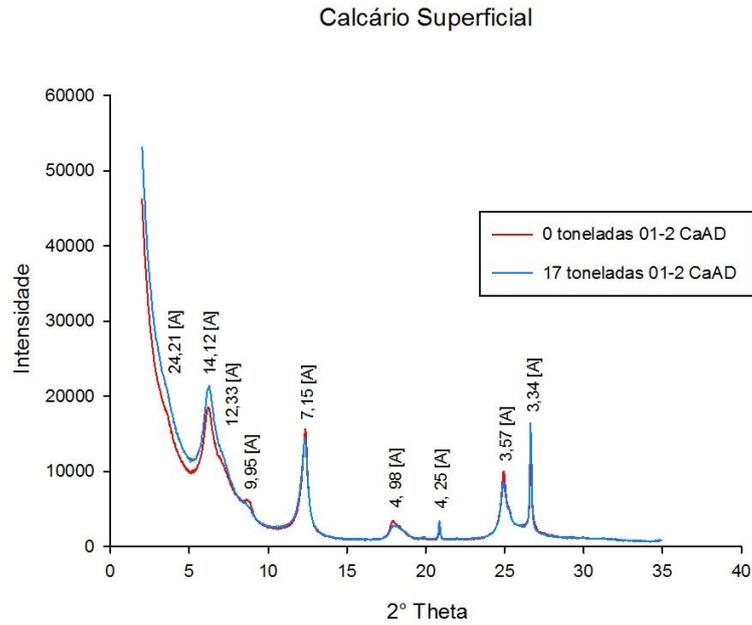


Figura 24 - Difratogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca^{2+} (CaAD) da camada 0,00-0,10 m do solo manejado sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição superficial de calcário. [\AA]= Angstroms.

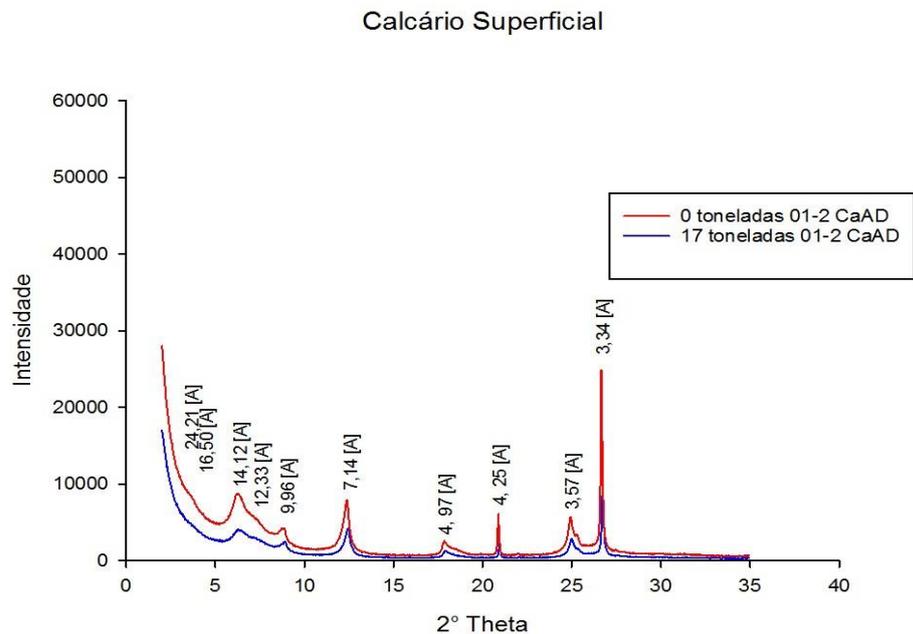


Figura 25 - Difratogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca^{2+} (CaAD) da camada 0,10-0,20 m do solo manejado sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição superficial de calcário. [\AA]= Angstroms.

Calcário Superficial

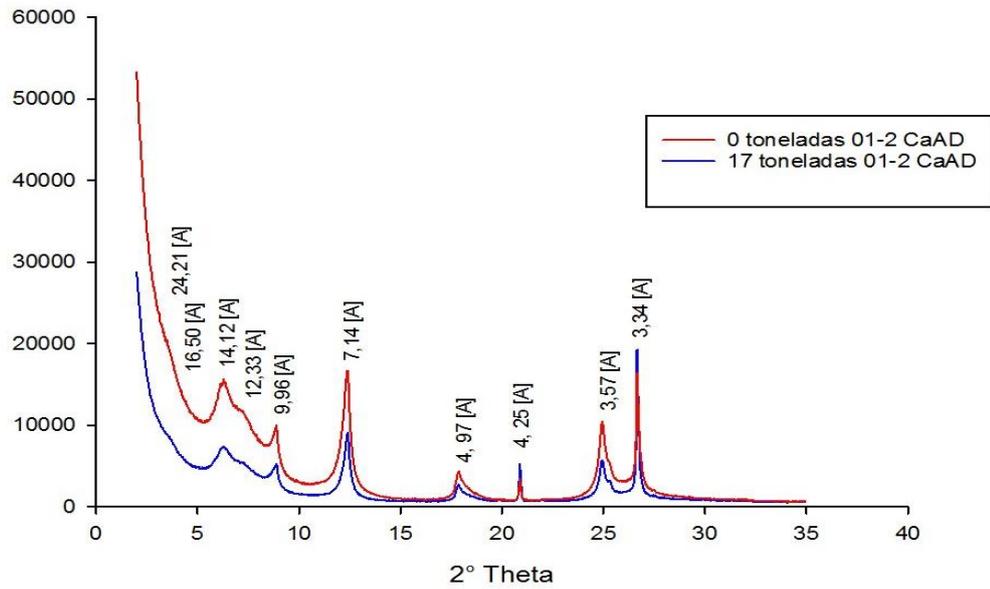


Figura 26 - Difractogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,20-0,40 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição superficial de calcário. [Å]= Angstroms.

Calcário Superficial

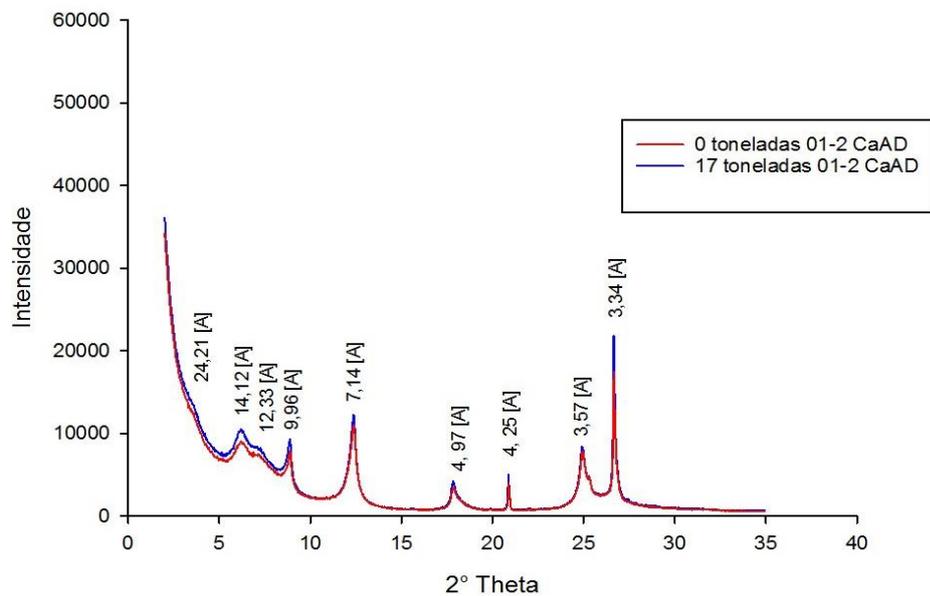


Figura 27 - Difractogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca²⁺ (CaAD) da camada 0,40-0,60 m do solo manejado sem (0 t ha⁻¹) e com (17 t ha⁻¹) adição superficial de calcário. [Å]= Angstroms.

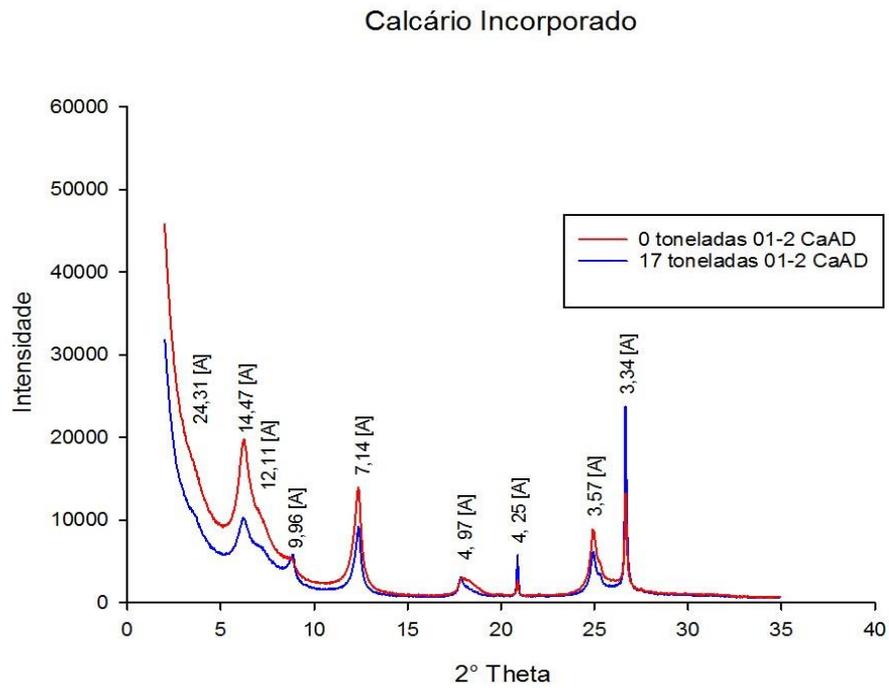


Figura 28 - Difratogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca^{2+} (CaAD) da camada 0,00-0,10 m do solo manejado sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.

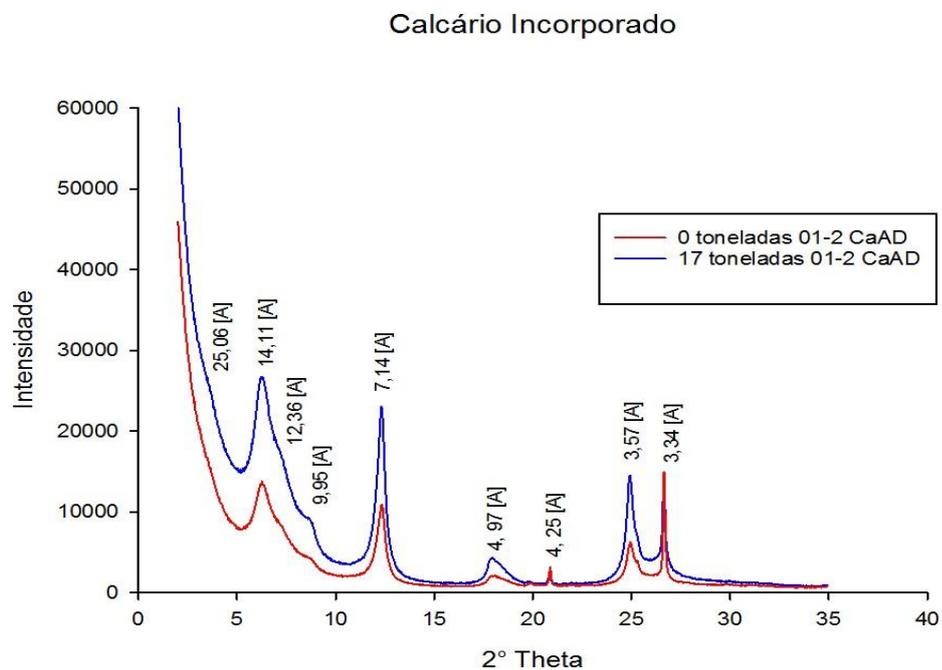


Figura 29 - Difratogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca^{2+} (CaAD) da camada 0,10-0,20 m do solo manejado sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.

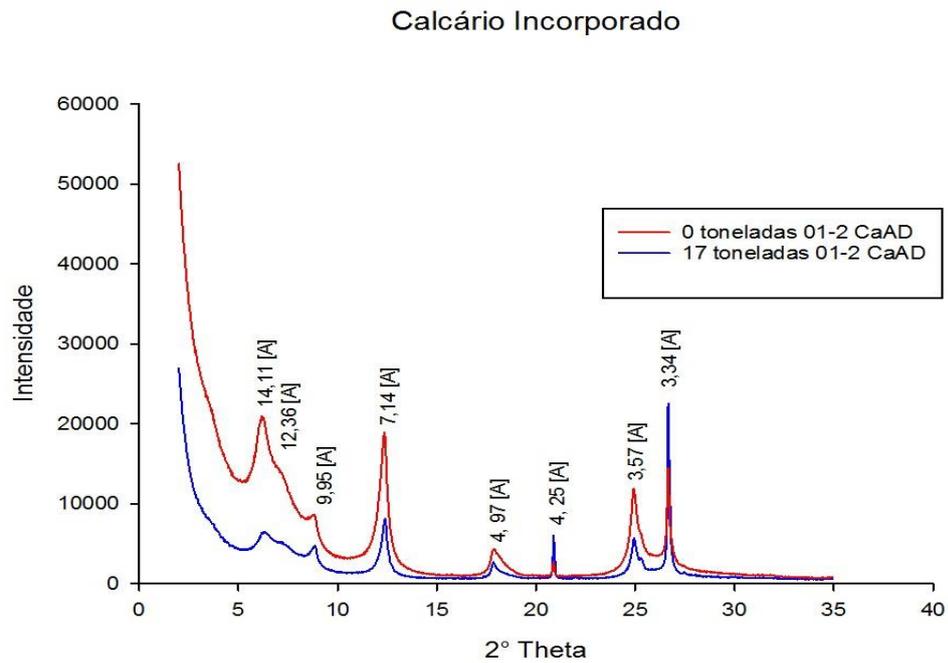


Figura 30 - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μ) saturada com Ca^{2+} (CaAD) da camada 0,20-0,40 m do solo manejado sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.

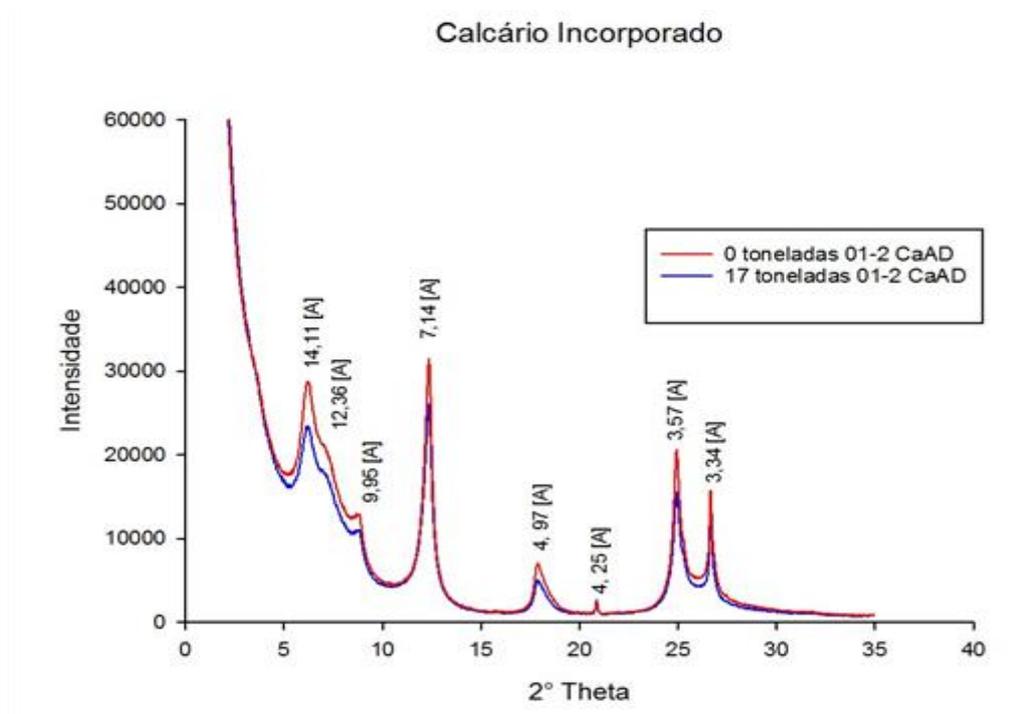


Figura 31 - Difratomogramas de raios x da fração argila grossa (0,1-2,0 μm) saturada com Ca^{2+} (CaAD) da camada 0,40-0,60 m do solo manejado sem (0 t ha^{-1}) e com (17 t ha^{-1}) adição incorporada de calcário. [Å]= Angstroms.

4. Conclusões

Após 25 anos de cultivo com lavoura com adição de calcário em substituição ao uso do solo com campo nativo, ocorrem mudanças nas propriedades do Argissolo Acinzentado distrófico:

Com relação ao complexo sortivo do solo, a calagem promove aumento na disponibilidade de Ca^+ e Mg^{2+} , pH e saturação por bases, diminuição na disponibilidade de P quando aplicado superficialmente, diminuição do S em profundidade e diminuição da disponibilidade do Zn^{2+} nas camadas superficiais bem como a diminuição do Al^{3+} trocável e saturação por alumínio.

Com relação à granulometria, as adições de 17 toneladas de calcário distribuídos superficialmente diminuem o teor de argila grossa.

Com relação à mineralogia, o cultivo do solo com lavoura e aplicação de 17 toneladas de calcário distribuído superficialmente diminuem a intensidade da mica, caulinita e minerais 2:1. Quando houve revolvimento do solo sem

calagem há diminuição da intensidade dos reflexos da caulinita, mica e minerais 2:1, principalmente nas camadas superficiais. A adição de calcário favoreceu a ocupação da entrecamada dos minerais 2:1 com K^+ , favorecendo o processo de illitização.

CAPÍTULO IV – Conclusões e Considerações Finais

Os resultados alcançados com este estudo mostraram que as duas situações de ações antrópicas de longa duração sobre áreas do bioma Pampa no Rio Grande do Sul causaram alterações importantes no âmbito físico, químico e mineralógico do solo. O solo florestado com *Eucalyptus* spp. apresentou características distintas ao do solo originalmente sob campo nativo. Diminuem os teores de Ca^{2+} , a soma de bases e a saturação por bases. O solo se torna mais ácido e conseqüentemente aumentam os teores de Al^{3+} trocável e de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$. Em relação à cor do solo, há um processo de ruibificação, que foi provavelmente iniciado em função da alteração do regime hídrico na floresta. Ainda, podemos observar através dos difratogramas de raios x, que o solo florestado com *Eucalyptus* spp. esta em um ambiente mais intempérico. Os resquícios de minerais 2:1 presentes na fração argila do campo não são encontrados na fração argila da floresta. No solo cultivado com lavoura sob sistema de plantio direto, observamos um aumento na disponibilidade de Ca^+ e Mg^{2+} , pH e saturação por bases bem como a diminuição do Al^{3+} trocável e saturação por alumínio. A adição de calcário no solo foi capaz de promover a diminuição dos teores de argila grossa em superfície. A aplicação de 17 toneladas de calcário distribuído superficialmente diminui a intensidade da mica, caulinita e minerais 2:1. Ainda na mineralogia, foi possível observar que nos solos onde houve aplicação de calcário, houve despolimerização dos minerais 2:1 HE e posterior ocupação da entrecamada com K, processo conhecido como ilitização.

Referências Bibliográficas

AGEFLOR – ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **A indústria de base florestal no Rio Grande do Sul**: 2017. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://www.ageflor.com.br/noticias/wp-content/uploads/2017/08/A-INDUSTRIA-DE-BASE-FLORESTAL-NO-RS-2017.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2018.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 923-934, 2005.

AMARAL, F. H. C. *et al.* Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 979-991, dez. 2015.

AMARAL, A. S. *et al.* Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 359-367, 2004.

ARAÚJO, M. A. *et al.* Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 495-504, 2004.

ARAÚJO, E. F. **Mineralogia, reserva de nutrientes e potencial produtivo de solos cultivados com *Eucalyptus* spp. no Rio Grande do Sul**. 2011. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

AZEVEDO, A. C.; KAMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p. 191-198, 1996.

AZEVEDO, A. C. *et al.* Filossilicatos 2:1 com hidróxi entre camadas em solos: estado atual do conhecimento e das perspectivas de pesquisa. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 55, n. 3, p. 236-243, jul./set. 2012.

BARRÓN, V.; HERRUZO, M.; TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 3, p. 647– 651, 1988.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.139-162.

BERTOLAZI, V. T. Impact of an integrated no-till soybean–beef cattle production system on Oxisol mineralogy in southern Brazil. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 149, p. 67–74, 2017.

BOLDRINI, I. I.; LONGHI-WAGNER, H. Poaceae no Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 42, p. 71–92, 2012.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Mineralogical changes caused by grape production in a regosol from subtropical Brazilian climate. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 12, p. 854–862, 2012.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Minéralogie de sol ferrallitique sous influence d'eucalyptus. *In*: JOURNEES D'ETUDE DES SOLS - LE SOL FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX, 11., 2015, Versailles-France. [Résumé]. Versailles: AFES, 2015. p. 1–2.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Alterações na mineralogia de um Argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 327–335, 2005.

BRIEDIS, C. *et al.* Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 7, p. 1007–1014, jul. 2012.

CANER, L. *et al.* Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 235/236, p. 100–112, 2014.

CARVALHO, J. S. *et al.* Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1131–1139, set. 2016.

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. 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.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Yield and mineral nutrition of soybean, maize, and Congo signal grass as affected by limestone and slag. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 6, p. 673–681, jun. 2013.

CAVENAGE, A. *et al.* Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 997–1003, 1999.

CHAVES, E. *et al.* Reserva mineral de K por diferentes métodos em Argissolos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 1088–1099, 2015.

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

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 89, n. B7, p. 6329-6340, 1984.

CORBEELS, M. *et al.* Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, London, v. 6, [art.] 21450, 2016.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. 2nd ed. New York: Wiley, 1996.

CORRÊA, J. B. *et al.* Avaliação de H+Al pelo método SMP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 12., 1985, Caxambu. **Anais**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1985. p. 111-112.

COSTA, C. H. M. *et al.* Residual effects of superficial liming on tropical soil under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1633-1642, 2016.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Relatório anual 2013**. Brasília, DF: CPRM, [2013].

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 341-346, 1984.

DE VECHI, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, C. A. O. Aspectos positivos e negativos do *Eucalyptus* spp. e os efeitos ambientais do seu cultivo. **Revista Valore**, Volta Redonda, v. 3, n. 1, p. 495-507, 2018.

DELL, B. *et al.* **Nutrient disorders in plantation eucalypts**. 2nd ed. Canberra: ACIAR, 2001. 188 p.

DICK, D. P. *et al.* Organic matter in constructed soils from a coal mining area in Southern Brazil. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1537-1545, 2006.

DONAGEMA, G. K. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

DRESCHER, M. *et al.* **Avaliação da fertilidade dos solos do Estado do Rio Grande do Sul e necessidade de adubos e corretivos**. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

EKENLER, M.; TABATABAI, M. A. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 39, p. 51-61, 2003.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403 p.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. F. S.; BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, n. 5/6, p. 889-901, 2004.

FINK, J. R. *et al.* Chemical and mineralogical changes in a Brazilian Rhodic Paleudult under different land use and managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 1304-1314, 2014.

GEORGE, T. S. *et al.* Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 34, n. 10, p. 1487-1494, 2002a.

GEORGE, T. S. *et al.* Utilization of soil organic P by agroforestry and crop species in the field, western Kenya. **Plant and Soil**, The Hague, v. 246, n. 1, p. 53-63, 2002b.

GUIMARÃES, T. L. B. **Determinação da cor do solo pela carta de Munsell e por colorimetria**. 2016. 57 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

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

HATI, K. M. *et al.* Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 148, n. 2, p. 173-179, 2008.

HUBERT, F. *et al.* Advances in characterization of soil clay mineralogy using X-ray diffraction: from decomposition to profile fitting. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, n. 6, p. 1093-1105, 2009.

HUBERT, F. *et al.* Unraveling complex < 2 µm clay mineralogy from soils using X-ray diffraction profile modeling on particle-size sub-fractions: Implications for soil pedogenesis and reactivity. **American Mineralogist**, Washington, DC, v. 97, n. 2/3, p. 384-398, 2012.

INDA JUNIOR, A. V. *et al.* Iron oxides dynamics in a subtropical Brazilian Paleudult under long-term no-tillage management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 48-54, 2013.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Goethite and hematite variability via reductive dissolution in soils from tropical and subtropical regions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

INDA JUNIOR, A. V. *et al.* Óxidos de ferro e área superficial de Latossolo subtropical sob campo e floresta nativa. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 289-292, 2014.

INDA JUNIOR, A. V. *et al.* Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v 40, n. 5, p. 1060-1067, 2010a.

INDA JUNIOR, A. V. *et al.* Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtropical Brazilian Oxisol under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 33-41, 2010b.

KAMINSKI, J. *et al.* Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 573-580, 2005.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. *In*: CURI, N. *et al.* (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2003. v. 3. p. 1-54.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de atributos e ambientes pedogenéticos e geoquímicos. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 107-138.

KÄMPF, N.; AZEVEDO, A. C.; COSTA JUNIOR, M. I. Estrutura básica de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas em Latossolos Bruno do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 185-190, 1995.

KÄMPF, N. *et al.* Solos construídos em áreas de mineração da Bacia Carbonífera. *In*: CARVÃO e meio ambiente: Centro de Ecologia da UFRGS. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. cap. 17, p. 596-640.

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração de carvão na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 79-88, 1997.

KARATHANASIS, A. D.; WELLS, K. L. A comparison of mineral weathering trends between two management systems on a catena of loess-derived soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 2, p. 582-588, 1989.

KOCHARGIN, J. *et al.* Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by eucalyptus rhizosphere. **Catena**, Cremlingen, v. 175, p. 132–143, 2019.

KUPLICH, T. M. *et al.* O avanço da soja no Bioma Pampa. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, n. 31, p. 83-100, jun. 2018.

LAIRD, D. A. *et al.* Chemistry of smectitic and illitic phases in interstratified soil smectite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 5, p. 1499-1504, 1991.

LEITE, L. F. C. **Compartimentos e dinâmica da matéria orgânica do solo sob diferentes manejos e sua simulação pelo Modelo Century**. 2002. 146 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

LIETZKE, D. A.; MORTLAND, M. M.; WHITESIDE, E. P. Relationship of geomorphology to origin and distribution of a high charge vermiculitic coil clay. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 39, n. 6, p. 1169-1177, 1975.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley, 1979. 449 p.

MAEDA, S. *et al.* **Estimativa da acidez potencial, pelo método do pH SMP, em solos do Mato Grosso do Sul**. Dourados: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997. 25 p.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 141-150, 2000.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic, 1995. 889 p.

MCBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, p. 203-213, 2014.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 7, p. 317- 327, 2013.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010.

MIJANGOS, I. *et al.* Effects of liming on soil properties and plant performance of temperate mountainous grasslands. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 91, n. 10, p. 2066-2074, 2010.

MOREIRA, S. G. *et al.* Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 39, n. 1, p. 89-97, 2017.

MORELLI, L. A. **A monocultura do *Eucalyptus* spp. e a monopolização do território na metade sul do Rio Grande do Sul.** 2011. 210 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MORTELE, D. *et al.* Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 406, p. 157-172, 2016.

NABINGER, C. *et al.* Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. *In*: PILLAR, V. P. *et al.* (ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade.** Brasília, DF: MMA, 2009. p. 175-198.

NEUMANN, M. H. *et al.* Study of evolution of supergene alteration processes of granitic rocks: Independência Granite, Morro do IPA, Porto Alegre, RS. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 39, n. 3, p. 213-229, set./dez. 2012.

NIEDERBUDDE, E. A.; RÜHLICKE, G. Umwandlung von Al- Chloriten durch Kalkung. *Z. Pflanzenernähr. Düng.* **Bodenkd**, Berlin, v. 144, p. 127-135, 1981.

OFFICER, S. J. *et al.* Variability of clay mineralogy in two New Zealand steep-land topsoils under pasture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3/4, p. 427-440, 2006.

OSORIO FILHO, B. D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada.** 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, n. 2, p. 359-369, 1989.

PEREIRA, M. G. *et al.* Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 159-162, 1998.

PILLAR, V. P. *et al.* **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009. 443 p.

PINTO, L. F. S. **Potencial de acidificação e de neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão.** 1997. 186 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

POGGERE, G. C. **Quantification and characterization of pedogenetic maghemite and digital soil mapping using magnetic measurements**. 2018. 114 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

POTES, M. L. *et al.* Matéria orgânica em Neossolo de altitude: influência do manejo da pastagem na sua composição e teor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 23-32, 2010.

PROBIO – Cobertura vegetal do Bioma Pampa: relatório técnico. Porto Alegre: UFRGS; EMBRAPA, 2007. Disponível em: http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/Publicacoes/Relatorios/2007/Relatorio_bioma_pam_pa.pdf. Acesso em: 12 jan. 2019.

QUAGGIO, J. A.; RAJ, B.; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, n. 3, p. 245-260, 1985.

QUIÑONES, O. R. G. *et al.* Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e a composição do material utilizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 6, p. 1564-1571, 2008.

QUIRK, J. P. Significance of surface areas calculated from water vapour sorption isotherms by use of the Bet equation. **Soil Science**, New Brunswick, v. 80, n. 6, p. 423-430, 1955.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 192, p. 33-41, 2019.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 4, p. 797-805, 2000.

RIDLEY, A. M. *et al.* The importance of the carbon cycle to acidification of a grazed annual pasture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, East Melbourne, v. 30, p. 529-537, 1990.

RODRIGUES, E. G.; RODRIGUES, A. C. G. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. *In*: SANTOS, G. A. *et al.* (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole Editora, 2008. p. 1-10.

RUAN, H. D.; GILKES, R. J. Kinetics of thermal dehydroxylation of aluminous goethite. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 46, p. 1223–1238, 1996.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018a. 187 p.

SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2018b. 100 p.

SANTOS, W. J. R. *et al.* Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center-southern Rio Grande do Sul State. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 1, p. 49-60, 2013.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of brazilian latosols (oxisols): a review. **Clay Minerals**, London, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008.

SCHEINOST, A. C. *et al.* Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 46, p. 528-536, 1998.

SCHNEIDER, M. F. Conseqüências da acumulação de folhas secas na plantação de *Eucalyptus* spp. em Zitundo, Distrito de Matutuine. **Boletim de Investigação Florestal**, Maputo, p. 37-42, 2003.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. *In*: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.). **Minerals in soil environments**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mitammoniumoxalat-lösung. **Zeitschrift Fur Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Berlin, v. 105, n. 3, p. 194-202, 1964.

SCHWERTMANN, U. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant and Soil**, The Hague, v. 130, p. 1-25, 1991.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 7, p. 251-255, 1983.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, New Brunswick, v. 139, p. 344-350, 1985.

SEVERO, F. **Carbono total e abundância natural de ¹³C em perfis de solo sob plantio de *Eucalyptus* spp.**. 2015. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SILVA, M. A. *et al.* Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 2, p. 160-172, 2014.

SILVA NETO, L. F. *et al.* Óxidos de ferro em latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1873-1881, 2008.

SMECK, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 36, n. 3/4, p. 185-199, 1985.

SOUSA, D. M. G. S.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. O. Acidez do solo e sua correção. *In*: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205- 274.

SPERA, S. T. **Atributos físicos e químicos de um latossolo e produtividade de culturas, em função de manejo de solo e de rotação de culturas**. 2009. 242 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER- RS, 2008. 222 p.

TOMASI, C.; INDA JUNIOR, A. V.; DICK, D. P. Substâncias húmicas em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2180- 2184, 2012.

TOMASI, C. A. *et al.* Atributos químicos e área superficial específica em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2172-2179, 2012.

TORRENT, J. *et al.* Magnetic enhancement and iron oxides upper Luochuan loess-paleosol sequence, Chinese Loess Plateau. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 71, n. 5, p. 1570-1578, 2007.

TORRENT, J. Rapid and slow phosphate sorption by mediterranean soils: effect of iron oxides. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 78-82, 1987.

VEIGA, M. *et al.* Manejo da pastagem de inverno afetando atributos de solo e da cultura do milho, em sistema de integração lavoura-pecuária com gado leiteiro. *In*: REUNIÃO TÉCNICA CATARINENSE DE MILHO E FEIJÃO, 8., 2011, Chapecó. **Resumos expandidos**. Chapecó: Epagri, 2011. p. 1-5.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: Ed. dos Autores, 2011.

YAO, H. *et al.* Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 41, n. 7, p. 1425-1432, 2009.

Apêndices

Tabela 15. Tabela Atributos químicos ao longo das camadas do solo sob campo (CA) e florestamento de *Eucalyptus* spp.. (FE).

Prof.	pH	COT	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	H ⁺ +Al ³⁺	CTC	V	m	P	K ⁺	Fed	Ald	Ald/ Ald+Fed
m		g kg ⁻¹	-----cmolc kg ⁻¹ -----						-----%-----		-----mg kg ⁻¹ -----		-----g kg ⁻¹ -----		
CA															
0,0-0,1	4,7	2,0	0,9	2,1	0,8	3,0	4,7	7,8	38,7	22,6	3,6	62,0	34,0	7,6	0,17
0,1-0,2	4,8	1,4	1,2	1,5	0,5	2,0	4,3	6,4	33,0	37,3	2,1	43,3	90,7	12,8	0,12
0,2-0,4	4,6	1,2	2,0	0,7	0,3	1,1	6,2	7,3	15,3	64,4	1,5	32,7	77,3	15,6	0,17
0,4-0,6	4,8	0,8	3,3	0,5	0,4	1,0	6,8	7,8	12,3	77,4	1,0	28,0	90,1	14,6	0,14
0,6-0,8	4,8	0,5	2,7	0,4	0,4	0,9	6,2	7,1	12,0	76,4	1,0	28,3	nd	nd	nd
FE															
0,0-0,1	4,4	1,4	2,1	0,3	0,8	1,3	7,4	8,7	15,3	61,9	3,6	95,0	35,4	6,8	0,16
0,1-0,2	4,5	1,0	2,1	0,2	0,7	1,2	6,2	7,4	16,0	64,2	2,1	103,7	51,3	9,6	0,16
0,2-0,4	4,5	0,9	2,6	0,2	0,5	1,0	7,0	8,0	12,7	72,0	1,3	98,7	75,5	10,3	0,12
0,4-0,6	4,5	1,0	3,4	0,2	0,7	1,1	8,4	9,6	11,7	75,0	2,1	95,0	63,0	10,9	0,15
0,6-0,8	4,6	0,6	3,5	0,2	0,7	1,1	8,6	9,7	12,3	76,1	1,4	77,0	nd	nd	nd

Tabela 16. Atributos químicos e estatísticos avaliados em diferentes profundidades do solo sem e com adição de calcário, sem e com incorporação do calcário.

Dose t ha ⁻¹	Prof. m	pH	COT g kg ⁻¹	Al	Ca	Mg cmol _c kg ⁻¹	SB	H+Al	CTC	V %	m	P	K	S	Zn mg kg ⁻¹	Cu	B	Mn
-----Sem incorporação de calcário-----																		
0	0,0-0,1	4,8	3,0	3,7	4,6	2,2	146,1	21,1	28,3	27,3	39,6	23,1	135	8,4	1,2	0,8	0,3	13,3
	0,1-0,2	4,6	2,5	8,3	1,7	0,7	83,7	35,8	38,4	6,7	76,3	4,8	73	6,7	0,6	0,7	0,3	4,0
	0,2-0,4	4,7	1,4	12,9	2,0	1,1	96,3	42,1	45,4	7,0	79,9	1,5	80	6,0	0,5	0,4	0,3	3,0
	0,4-0,6	4,9	0,9	14,2	2,7	1,9	115,9	40,9	45,7	10,3	74,4	1,2	97	3,7	0,5	0,3	0,2	2,3
	0,6-0,8	5,1	1,0	14,8	4,7	3,7	138,2	43,9	52,5	16,7	63,0	0,9	115	2,5	0,6	0,4	0,2	2,3
17	0,0-0,1	5,0	2,5	1,6	6,3	3,6	85,8	13,3	23,4	43,3	13,7	6,7	74	4,5	0,7	0,7	0,3	10,0
	0,1-0,2	5,0	2,0	3,3	4,8	2,9	65,0	18,3	26,1	32,0	28,4	3,8	54	4,7	0,5	0,6	0,3	3,3
	0,2-0,4	5,1	1,3	7,0	3,3	2,2	70,5	28,2	33,8	17,7	54,7	2,0	58	4,3	0,4	0,5	0,2	2,3
	0,4-0,6	5,0	0,9	13,3	5,7	4,4	138,0	39,3	49,6	21,7	56,1	1,2	114	3,9	0,7	0,5	0,2	4,0
	0,6-0,8	5,1	0,8	12,2	8,0	6,2	159,7	36,33	50,8	30,3	44,9	1,5	133	3,2	0,5	0,6	0,2	5,3
-----Com incorporação de calcário-----																		
0	0,0-0,1	4,7	2,7	4,7	4,0	2,0	124	21,8	28,1	24,0	42,6	9,3	113,3	6,6	0,9	0,8	0,3	10,0
	0,1-0,2	4,7	2,0	7,5	2,6	1,2	91,3	29,8	33,8	12,3	65,2	4,2	80	6,0	0,6	0,6	0,3	3,7
	0,2-0,4	4,7	1,5	13,5	2,4	1,5	96,4	39,1	43,2	9,3	76,7	2,0	79	4,8	0,5	0,5	0,3	2,3
	0,4-0,6	5,0	1,0	17,1	3,5	2,6	122,9	41,9	48,2	13,0	73,0	1,0	99,7	2,7	0,4	0,4	0,2	2,3
	0,6-0,8	5,0	0,8	15,8	5,6	4,4	145,5	38,7	49,1	20,0	61,8	0,8	119,7	2,3	0,43	0,5	0,2	2,3
17	0,0-0,1	5,0	2,2	1,7	6,1	3,5	129,9	12,0	21,9	47,0	16,4	10,8	118,7	6,0	0,8	0,6	0,3	13,3
	0,1-0,2	5,3	1,6	3,6	5,7	3,5	76,4	16,5	25,8	42,7	32,3	3,7	63,7	3,8	0,6	0,7	0,3	4,3
	0,2-0,4	5,0	1,7	6,4	3,5	2,4	60,3	25,6	31,6	21	52,0	1,9	48	4,0	0,4	0,5	0,2	2,7
	0,4-0,6	5,0	1,1	11,5	3,5	2,5	90,5	35,6	41,7	14,7	64,8	1,1	73	3	0,4	0,4	0,2	2,3
	0,6-0,8	5,1	1,0	15,8	7,0	5,3	160,7	39,1	51,7	25	55,67	1,0	132,7	2,8	0,5	0,6	0,2	7,3
-----Valores de P-----																		
Manejo		1,00	0,46	0,51	0,97	0,98	0,98	0,39	0,35	0,63	0,81	0,31	0,93	0,04	0,06	0,72	1,00	0,89
Dose		<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,21	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,17	0,17	<0,01	0,08	0,23	0,15	0,07
Profundidade		0,12	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
M vs D		0,53	0,33	0,74	0,30	0,18	0,99	0,79	0,87	0,87	0,35	0,11	0,90	0,16	0,06	0,36	0,63	0,07
M vs P		0,53	0,06	0,92	0,85	0,80	0,83	0,98	0,99	0,87	0,93	0,54	0,82	0,88	0,48	0,95	0,96	0,84
D vs P		0,02	0,12	0,47	0,70	0,75	0,50	0,30	0,25	0,27	0,17	0,11	0,50	<0,01	0,03	0,38	0,25	0,07
D vs P vs M		0,91	0,97	0,77	0,73	0,61	0,42	0,89	0,77	0,90	0,96	0,03	0,40	0,26	0,10	0,86	0,98	0,16

COT: carbono orgânico total; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio