

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

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA DE SOLOS AFETADOS PELA SILVICULTURA NOS CAMPOS
DO PAMPA**

**Jonathas Carvalhedo Johnson
(Dissertação de Mestrado)**

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

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA DE SOLOS AFETADOS PELA SILVICULTURA NOS CAMPOS
DO PAMPA**

JONATHAS CARVALHEDO JOHNSON
Engenheiro - Agrônomo (UFRGS)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Abril de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Carvalho Johnson, Jonathas

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA DE SOLOS AFETADOS PELA SILVICULTURA NOS
CAMPOS DO PAMPA / Jonathas Carvalho Johnson. --
2020.

55 f.

Orientador: Carlos Gustavo Tornquist.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Carbono e nitrogênio do solo. 2. Condutividade
hidráulica saturada do solo. 3. Mudança de uso do solo
. 4. Bioma Pampa. 5. Conversão de campo nativo para
eucalipto. I. Tornquist, Carlos Gustavo, orient. II.
Título.

JONATHAS CARVALHEDO JOHNSON
Engenheiro Agrônomo - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE 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), Brasil

Aprovado em: 14/04/2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 16/10/2023
Por



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
Orientador-PPG Ciência do Solo

Documento assinado digitalmente

gov.br

AMANDA POSSELT MARTINS
Data: 18/10/2023 16:09:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AMANDA POSSELT MARTINS
PPG Ciência do Solo/UFRGS

Documento assinado digitalmente

gov.br

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Data: 17/10/2023 16:38:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JR
PPG Ciência do Solo/UFRGS

Documento assinado digitalmente

gov.br

FREDERICO COSTA BEBER VIEIRA
Data: 18/10/2023 17:14:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

FREDERICO COSTA BEBER VIEIRA
PPG Ciências Biológicas
UNIPAMPA

Documento assinado digitalmente

gov.br

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Data: 17/10/2023 16:33:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

Documento assinado digitalmente

gov.br

CARLOS ALBERTO BISSANI
Data: 18/10/2023 10:32:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*"...Pampa, matambre esverdeado dos costilhares do prata
que se agranda e se dilata de horizontes estaqueados,
couro recém pelechado que tem pátria nas raízes
aos teus bárbaros matizes, os tauras e campeadores
misturaram sangue às cores pra desenhar três países..."*

*Jayme Caetano Braun e Noel Guarany em
"Payador, Pampa e Guitarra"*

*Dedico à minha irmã Carolina, minha
mãe Lizabeth, meu pai Luiz (in
memoriam) e a minha vó Estela (in
memoriam).*

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional em todas as etapas deste trabalho e na vida. Agradecimento especial ao meu querido pai, que nunca mediu esforços para que alcançasse meus objetivos.

Aos colegas e amigos do PPGCS da UFRGS, pelo companheirismo, cumplicidade e por deixarem mais leves os dias mais pesados dessa caminhada.

Ao professor Carlos Gustavo Tornquist, pela orientação exemplar e grande contribuição à minha formação.

Aos professores do PPGCS da UFRGS, pelas contribuições e trocas de experiências nesta caminhada.

Ao Departamento de Solos e servidores da Faculdade de Agronomia, que dão o suporte necessário para os alunos realizarem seus trabalhos. À Faculdade de Agronomia, que desde 2010 é minha segunda casa, e não raras vezes a primeira.

Aos participantes do Projeto Nexus, do Departamento de Ecologia/Instituto de Biociências/UFRGS, em especial ao Dr. Valério D. Pillar (coordenador) e a Dra. Bruna Wink, pela facilitação do acesso aos locais de estudo, apoio na logística e disponibilização dos recursos.

Aos produtores rurais e à Celulose Riograndense/CMPC, que franquearam acesso aos locais de estudo e muitas vezes colaboraram com apoio direto no campo, seja com fornecimento de insumos (água e ferramentas) ou mesmo socorro para desatolar veículos.

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS AFETADOS PELA SILVICULTURA NOS CAMPOS DO PAMPA¹

Autor: Jonathas Carvalhedo Johnson

Orientador: Prof. Carlos Gustavo Tornquist

RESUMO

As atividades antrópicas como a silvicultura podem causar alterações importantes nos solos do Pampa, com impactos nas funções ecossistêmicas e produtivas. Este estudo, como parte do Projeto Nexus “*Cenários de conversão da vegetação nativa e a sustentabilidade de agroecossistemas no Pampa*”, buscou avaliar as alterações em atributos do solo após a conversão dos campos com pecuária extensiva para silvicultura com eucalipto. Amostras de solos foram coletadas em minitrincheiras (em camadas de 5 cm de espessura, até 30 cm profundidade) em seis pontos distribuídos em parcelas lineares de 250 m, alocadas aos pares de campo x eucalipto em quatro municípios representativos do Pampa (sítios de São Gabriel, Lavras, Pinheiro Machado e Jaguarão). A condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) foi estimada com método expedito de campo; a análise granulométrica, densidade do solo (D_s), teor carbono orgânico do solo (COS) e nitrogênio total (Nt) foram determinados em laboratório. Os estoques de COS foram calculados por camada equivalente e avaliados de forma cumulativa (0-10,0-20 e 0-30 cm). A maioria dos solos estudados possui textura de areia a franco-arenosa, apenas com alguns sítios apresentando argiloso-arenosa; A pedregosidade foi elevada na maioria dos sítios, atingindo até 60% em Pinheiro Machado (>20 cm de profundidade). A D_s na camada superficial (0-5 cm) em eucalipto foi significativamente maior em relação ao campo (17%). De forma geral, o COS foi 25% maior apenas na camada superficial (0-5 cm) em campo, em especial pela contribuição dos sítios Jaguarão e São Gabriel. Os estoques de COS, assim como os teores de COS foram significativamente maiores no campo que no eucalipto apenas em camadas superficiais, nos sítios de São Gabriel e Jaguarão. Em ambos os casos não foram identificadas diferenças significativas nos estoques COS entre campo e eucalipto nas três camadas. Por outro lado, em geral, os estoques de COS (0-30 cm) no campo (56 Mg C ha⁻¹) e eucalipto (46 Mg C ha⁻¹) foram até 40% maiores em relação ao que outros estudos reportaram para as mesmas regiões no Pampa. A K_{sat} apresentou grande amplitude, com variações muito altas em curto alcance. Foram observadas diferenças significativas na K_{sat} entre campo e eucalipto, sendo a K_{sat} média no eucalipto (67 mm h⁻¹) três vezes maior do que no campo (20 mm h⁻¹). Apesar de diferenças pontuais observadas de alguns atributos como D_s , teor de COS e estoques de COS em algumas camadas amostradas, com exceção do K_{sat} , a conversão dos campos para implantação da silvicultura com eucalipto não alterou significativamente os atributos estudados.

¹Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Abril de 2020. 57p. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq Projeto Nexus II (“*Cenários de conversão da vegetação nativa e a sustentabilidade de agroecossistemas no Pampa - MCTI/CNPq Nº 20/2017*”), com recursos suplementares da CAPES/PROEX.

SOIL PROPERTIES AFFECTED BY EUCALYPTUS SILVICULTURE IN THE PAMPAS GRASSLANDS PAMPA BIOME¹

Author: Jonathas Carvalhedeo Johnson
Orientador: Prof. Carlos Gustavo Tornquist

ABSTRACT

Human activities such as forestry lead to changes in soil properties of the Pampas, affecting soil functions in ecosystems and production potential. This study, as a component of the Nexus Project “Scenarios for conversion of native vegetation and the sustainability of agroecosystems in the Pampas” coordinated by IBIO-UFRGS sought to assess changes in soil properties after conversion of native grasslands low-intensity livestock production to *Eucalyptus* forestry. Soil samples were collected in pits (to 30 cm depth, in 5 cm layers,) in 6 points distributed in 250m linear plots, allocated to field pairs grasslands (GRAS) x *Eucalyptus* (EUC) in 4 representative locations (São Gabriel, Lavras do Sul, Pinheiro Machado e Jaguarão) of the Pampas in Rio Grande do Sul-RS. The saturated hydraulic conductivity (Ksat) was estimated using Bagarello's expedite method; particle size distribution, soil bulk density (Ds), soil organic C (COS) and total N (Nt) were determined in the laboratory. The COS stocks were calculated by equivalent depths and equivalent mass, and also evaluated cumulatively (0-10,0-20 and 0-30cm). The particle size distribution results showed that most of these soils have a sandy texture (from sand to sandy loam), only some clayey-sandy sites; stoniness was high in most sites, reaching up to 60% in Pinheiro Machado (to 20cm depth). The Ds in the topsoil (0-5 cm) in EUC was significantly higher than in GRAS (17%). In general, COS was 25% higher only in the topsoil (0-5cm) in GRAS, especially due to the contribution of the JAG and SAG sites. ECOS, as well as COS were significantly higher in GRAS than in EUC only in superficial layers at Jaguarão (JAG) and São Gabriel (SAG) sites. In both cases no significant differences in ECOS were noted between EUC and GRAS at the three depths. On the other hand, in general ECOS (0-30cm) in GRAS (56.3 Mg ha⁻¹) and EUC (46 Mg C ha⁻¹) were 40% higher than other studies reported for the Pampas in RS. Ksar showed great breadth, with very high variations in short range. An analysis of variance was conducted with log-transformed data showed significant differences between Ksat in EUC and GRAS, with mean Ksat in EUC (67 mm h⁻¹) three times higher than in GRAS (20 mm h⁻¹). In summary, in spite of differences observed for attributes as Ds, COS and ECOS in some sampled layers, the conversion of the implantation fields of silviculture with eucalyptus did not significantly change the studied attributes, with the exception of Ksat.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Abril de 2020. 57p.

Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq Projeto Nexus II (“ Cenários de conversão da vegetação nativa e a sustentabilidade de agroecossistemas no Pampa - MCTI/CNPq Nº 20/2017”), com recursos suplementares da CAPES/PROEX.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Importância ecológica e socioeconômica do Pampa	2
2.2. Carbono e Nitrogênio do solo	6
2.2.1 A influência do uso, manejo e cobertura do solo com campo nativo e eucalipto no Pampa nos estoques de carbono e nitrogênio	8
2.3. Condutividade hidráulica saturada do solo com campo nativo e eucalipto no Pampa	10
2.4. Contextualização do estudo.....	12
3. OBJETIVO	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1. Delineamento experimental	14
4.2. Caracterização granulométrica e classe de solos dos sítios amostrais	16
4.3. Suficiência amostral.....	20
4.4. Amostragem de solo	20
4.4.1. Protocolo de coleta das amostras.....	20
4.4.2. Preparação das amostras para análises.....	22
4.5. Análises realizadas	22
4.5.1. Densidade do solo (Ds).....	22
4.5.2. Carbono (C) e nitrogênio (N) do solo	23
4.5.3. Biomassa de raízes	24
4.5.4. Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat)	24
4.5.5. Análise estatística	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. Densidade do solo (Ds)	28
5.2. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo.....	29
5.3. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N).....	32
5.4. Relações entre estoques de carbono e textura do solo	36
5.5. Biomassa de raízes	37
5.6. Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat)	39
6. CONCLUSÕES	42
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43

8. REFERÊNCIAS	44
APÊNDICES	55

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição das parcelas na região de estudo	15
Tabela 2. Determinação das frações granulométricas do solo das áreas de campo nativo e eucalipto por sítio e profundidade amostrada (médias das parcelas)	18
Tabela 3. Classificação expedita dos solos nos locais de estudo	20
Tabela 4. Classes de Ksat conforme a velocidade de infiltração da água no solo	27
Tabela 5. Densidade do solo sob campo nativo e eucalipto.....	30
Tabela 6. Valores médios de teores de carbono orgânico do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras.....	31
Tabela 7. Valores médios de teores de nitrogênio total do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras.....	32
Tabela 8. Biomassa radicular (matéria seca) e carbono (C) da biomassa radicular em campo e eucalipto (média dos sítios)	38
Tabela 9. Percentual de medições de Ksat dentro das classes propostas por Reichardt (1978)	41

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Locais de amostragem abrangendo principais regiões com ocorrência de plantios de eucalipto no âmbito do Pampa.....	14
Figura 2. Distribuição dos pontos na parcela (transecto)	16
Figura 3. Detalhes da amostragem: a) remoção da amostra indeformada no campo; b) minitrincheira em solos sob eucalipto; c) minitrincheira em campo nativo	21
Figura 4. Esquema de coleta de amostras de solo até 30 cm de profundidade com anéis volumétricos.....	21
Figura 5. Comparação entre: a) uma amostra indeformada em solo com pedregosidade ou fração vegetal > 2mm; b) amostra quando é descontada a fração > 2mm.....	23
Figura 6. Kit de campo adaptado de Bagarello <i>et al.</i> (2004) para avaliação expedita de Ksat	25
Figura 7. Localização dos pontos de amostragem de Ksat em relação à parcela e aos pontos de amostragem de solo	26
Figura 8. Estoques de C orgânico do solo (ECOS) acumulado em cada profundidade avaliada. Não houve diferença significativa entre os usos para cada profundidade pela ANOVA ($p < 0,05$).....	35
Figura 9. Estoques de N total do solo (ENTS) acumulado em cada profundidade avaliada. Não houve diferença significativa entre os usos para cada profundidade pela ANOVA ($p < 0,05$).....	35
Figura 10. Relação entre estoques de C orgânico do solo (ECOS) e teos de argila e silte+argila das camadas de 0-30 cm para eucalipto e campo.....	37

1. INTRODUÇÃO

O Pampa brasileiro é um importante bioma campestre, integralmente localizado no Rio Grande do Sul. Originalmente explorado para pecuária, somente em meados dos anos 2000 começou a receber a devida atenção pela sua importância ecológica e socioeconômica. A pouca atenção do Poder Público favoreceu a mudança de uso das terras, levando à conversão para usos economicamente mais rentáveis que a pecuária, como a produção de grãos e implantação de silvicultura para a indústria de celulose. Esta conversão dos ecossistemas existentes para atividades agrícolas tem provocado discussões no que se refere aos impactos ambientais e sustentabilidade. Assim, os últimos 40 anos foram marcados pelo rápido avanço das lavouras anuais e florestas de eucalipto sobre os campos naturais (nativos) do Pampa. Essas mudanças têm como impactos mais notáveis a perda da paisagem campestre, susceptibilidade à invasão de espécies exóticas, interferência nos refúgios naturais da fauna, alteração nos ciclos biogeoquímicos e aumento da taxa de erosão do solo.

A avaliação ambiental pode utilizar indicadores que permitam a comparação entre áreas e variações temporais. Dentre estes, o carbono orgânico do solo (COS) e o nitrogênio total (Nt) têm grande importância porque são constituintes principais da matéria orgânica do solo que, por sua vez, tem participação fundamental na estrutura e fertilidade e, conseqüentemente, está relacionada à capacidade produtiva destes solos. Além disso, o COS é inerente às práticas adotadas de uso e manejo do solo, pois as quantidades totais e a sua localização no solo podem ser alteradas em função de tais práticas. Outro atributo do solo com papel de indicador de qualidade é a condutividade hidráulica saturada, relacionada à infiltração de água no solo, escoamento superficial, taxa de erosão e contaminação de mananciais. Além disso, a

infiltração de água no solo está diretamente relacionada ao conteúdo de água na rizosfera e, portanto, o conhecimento das relações entre infiltração de água e propriedades do solo é fundamental para o uso e manejo eficientes do solo e da água.

O uso sustentável dos ecossistemas, que assegura a manutenção dos serviços ambientais, requer levantamentos e estudos que caracterizem adequadamente esses ambientes. Quando completas, estas informações podem auxiliar na tomada de decisão pelos gestores ambientais, orientar o ordenamento territorial, e mesmo apoiar medidas mitigatórias e práticas de manejo adequadas.

Nesse sentido, em 2017 foi proposto o projeto “Cenários de conversão da vegetação nativa e a sustentabilidade de agroecossistemas no bioma Pampa” (doravante chamado *Projeto Nexus*) em atendimento à Chamada MCTI/CNPq 20/2017–NEXUS II: Pesquisa e Desenvolvimento em Ações Integradas e Sustentáveis para a Garantia da Segurança Hídrica, Energética e Alimentar nos Biomas Brasileiros. O programa NEXUS II foi concebido alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Agenda 2030 da ONU. Ao completar este projeto e outros cinco apoiados pelo CNPq, espera-se ter uma avaliação robusta dos impactos ambientais atuais, especialmente das conversões de uso e cobertura do solo sobre os serviços ecossistêmicos providos pelo Pampa, essenciais para garantir a tríade segurança hídrica, energética e alimentar para os habitantes da região. Assim, esta pesquisa busca suprir parte das lacunas de dados referentes aos atributos ambientais e agronômicos no contexto do Pampa, especialmente sobre as alterações dos estoques de COS, cujas informações obtidas poderão servir de base para políticas de preservação e conservação dos ecossistemas campestres existentes no Pampa e, desta forma, auxiliar na tomada de decisão por parte dos gestores, produtores, técnicos e demais agentes envolvidos no uso das terras do Pampa. Além disso, cabe ressaltar a importância da CAPES pela concessão da bolsa de estudo, fundamental para a viabilidade do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância ecológica e socioeconômica do Pampa

O bioma Pampa situa-se na América do Sul e abrange todo o território do Uruguai, o nordeste da Argentina, o sul do Paraguai e o extremo sul do Brasil. Na sua porção brasileira, cobre 63% do território do Rio Grande do Sul (aproximadamente 178 mil km²). Embora seja considerado um dos biomas campestres mais importantes do mundo, somente em 2004 foi reconhecido oficialmente como bioma no Brasil, quando passou a integrar o Mapa de Biomas Brasileiros (Caminha, 2010). Mesmo assim, ainda está entre os biomas menos protegidos do Brasil, com apenas 3,3% da sua área em algum tipo de unidade de conservação (Brasil, 2020).

No geral, as feições da paisagem do Pampa constituem um mosaico de matas ciliares, banhados, butiazais, afloramentos rochosos e turfeiras sobre a matriz campestre, áreas que variam de relevos planos até inserções de coxilhas, morros rupestres e serras, e áreas tanto com muito alta quanto muito baixa disponibilidade de água, em função do relevo, profundidade e constituição dos solos. Nos afloramentos rochosos, por exemplo, são encontradas diversas espécies de cactos, bromélias e orquídeas. Já nas turfeiras ocorrem briófitas, com destaque aos esfagnos e ciperáceas. Também são encontradas plantas carnívoras, que indicam baixa disponibilidade de nutrientes (Overbeck *et al.*, 2015).

As formações vegetais naturais existentes no Pampa apresentam alta diversidade de espécies, com destaque à notável diversidade de gramíneas forrageiras, com cerca de 450 espécies, além de 150 espécies de leguminosas (Boldrini, 1997). A vegetação campestre do Pampa também é

constituída por campos com *Andropogoneae*, compostas, campos gramíneos e arbustivos (Hasenak *et al.*, 2010). De acordo com as características da região (campos de solos rasos, gramíneos, arbustivos) w com o manejo adotado (com ou sem pastejo, carga animal) pode ocorrer espécies como o capim-caninha (*Andropogon lateralis*), chirca (*Acanthostyles buniifolius*), mio-mio (*Baccharis coridifolia*), capim-forquilha (*Paspalum notatum*), capim-rabo-de-burro (*Schizachyrium microstachyum*), ampla representação das famílias *Cyperaceae* e *Rubiaceae* (Boldrini, 2009). Por isso, os campos constituem uma importante fonte forrageira para a atividade pecuária, que é uma das principais atividades econômicas do sul do Brasil (Nabinger *et al.*, 2000). Além disto, o pastejo é considerado o principal fator de manutenção das propriedades ecológicas e das características fisionômicas dos campos (Pillar e Quadros, 1997). No entanto, cabe ressaltar que a vegetação campestre nativa é bastante diferente dos campos com pastagens, que resulta na eliminação total ou parcial da vegetação original (Overbeck *et al.*, 2015).

Em um levantamento florístico dos campos de São Gabriel, Silva Filho *et al.* (2017) identificaram 244 táxons, pertencentes a 51 famílias e 152 gêneros. Deste total, 222 são herbáceas, 21 subarbustivas e uma arbustiva. As quatro famílias com maior riqueza foram *Poaceae* (54 espécies), *Asteraceae* (48 espécies), *Cyperaceae* (23 espécies) e *Fabaceae* (11 espécies), seguidas por *Rubiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Iridaceae*, *Oxalidaceae* e *Verbenaceae*, que confirma a riqueza florística do Pampa.

A paisagem existente no Pampa vem sofrendo alterações ao longo dos anos em razão das mudanças climáticas e da forma de ocupação, utilização e manejo adotado nas terras, mas manteve-se predominantemente campestre. Como exemplo das alterações que a paisagem campestre está sujeita, destacam-se os distúrbios causados pelo fogo, que ocorre desde o início da ocupação humana; e o pastejo, que antigamente era realizado por grandes herbívoros, os quais foram extintos e substituídos mais recentemente pelos equinos e bovinos trazidos pelos jesuítas, que rapidamente se espalharam para a metade sul do Rio Grande do Sul (Pillar e Quadros, 1997). É importante salientar que, assim como

ocorre em outros lugares do mundo, o fogo e o pastejo são os principais responsáveis em evitar o adensamento arbustivo e a expansão das florestas sobre os campos naturais (Overbeck *et al.*, 2009).

Nas últimas décadas, a progressiva conversão dos campos em lavouras anuais e em silvicultura vem modificando a dinâmica natural da paisagem campestre do Rio Grande do Sul. Como exemplo, somente entre os anos de 2006 e 2016, a área plantada com eucalipto mais que dobrou, passando de 184,2 mil hectares para 426,7 mil hectares (AGEFLOR, 2017). Essas mudanças de uso e cobertura do solo ameaçam a conservação dos campos do Pampa, além da degradação causada pelas espécies exóticas e pelo mau uso das terras. Isto pode causar, além da descaracterização da paisagem natural, a diminuição da biodiversidade, a perda de solo por erosão, entre outros. Nessa via, a sustentabilidade da atividade pecuária e os benefícios trazidos pelo pastejo em campo nativo são prejudicados, além da resiliência do ambiente natural também ser afetada. Historicamente, as formações não florestais do Brasil não foram tratadas como áreas prioritárias de conservação, o que ajuda a explicar as ameaças e desafios para a conservação dos campos naturais do Pampa (Overbeck *et al.*, 2009).

Com o manejo adequado, as pastagens naturais são capazes de produzir alimentos com segurança alimentar e ainda manter a integridade dos campos. Em contrapartida, Carvalho e Batello (2009) afirmam que o potencial das pastagens não está sendo explorado adequadamente, sendo a baixa produtividade dos campos a sua principal ameaça. Isso explica, em partes, a substituição dos campos naturais por outras atividades mais rentáveis em curto prazo. A retirada dos animais dos campos e a posterior substituição destes por lavouras e silvicultura ocorreram principalmente em função dos aspectos econômicos, visto que o valor de mercado de grãos como a soja, por exemplo, é bastante atrativo aos produtores. No sentido contrário, Nabinger *et al.* (2009) afirmam que a manutenção do campo com pecuária representa a melhor opção de uso sustentável dos campos para fins de produção de alimentos. Para tal, é necessário que o produtor tenha conhecimento sobre as limitações que o campo oferece, tais como: baixa fertilidade natural e necessidade de adubação, diferimento de poteiros,

ajuste de carga animal, entre outros. A manutenção dos animais no campo manejado adequadamente possibilita um bom desempenho animal, além de interferir diretamente no desenvolvimento e na dinâmica da vegetação (Trindade *et al.*, 2011).

Os campos do Pampa não possibilitam apenas a produção de alimentos, mas também possuem importante papel ambiental, através dos serviços ecossistêmicos provisionados (Tornquist e Bayer, 2009). Estes serviços estão ligados à retenção de carbono (C) e gás carbônico (CO₂) atmosférico, reciclagem de nutrientes, manutenção dos recursos genéticos e hidrológicos, preservação e abrigo para biodiversidade, manutenção da paisagem e da beleza cênica, conservação do solo, mitigação de desastres naturais, entre outros. Um ecossistema composto por alta diversidade de espécies presta um importante serviço ecossistêmico ao ambiente, que é a resistência a espécies invasoras, por exemplo. Outro serviço ambiental importante que a cobertura vegetal natural presta é a conservação do solo, pois tende a prevenir e controlar a erosão do solo e a consequente deposição de sedimentos (Tornquist e Bayer, 2009), especialmente se compararmos ambientes com vegetação natural com sistemas agrícolas que utilizam práticas como o revolvimento de solo.

Os benefícios trazidos pelos campos naturais são inúmeros, tanto na questão ambiental quanto na produtiva, o que corrobora com a necessidade de preservação destes ambientes. O uso adequado das terras é fundamental para que os campos do Pampa sejam preservados. Assim, aqueles que dependem destes ambientes para seu sustento – e a sociedade em geral – poderão contar com todos esses benefícios prestados por esse importante ecossistema do sul do Brasil.

2.2 Carbono (C) e nitrogênio (N) do solo

O solo é um importante reservatório de C do planeta, sendo o principal reservatório terrestre de C orgânico. Lal (2004) estimou que 2.500 Pg (1 Pg = 1 bilhão de toneladas) de C total (orgânico e inorgânico) esteja

localizado no solo. De acordo com IPCC (2013), somente o estoque de carbono orgânico do solo é três vezes maior que o C total da atmosfera e quatro vezes maior que o C total contido na biomassa vegetal do planeta. O carbono orgânico do solo é o principal constituinte da matéria orgânica do solo (cerca de 58% de sua massa), a qual participa de diversas funções e processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no solo (Vezzani e Mielniczuk, 2009). Estas funções da matéria orgânica do solo também estão relacionadas à qualidade do solo, tais como potencial de rendimento das culturas, estrutura do solo, formação de agregados estáveis, espaço poroso, entre outras. Nessa via, o carbono orgânico do solo tem papel fundamental na sustentabilidade de uso do solo e seu estoque tem sido utilizado como indicador de qualidade (Conceição *et al.*, 2005; Souza *et al.*, 2008).

Assim como o C, o N é um elemento importante nos estudos em matéria orgânica, pois esta é a principal reserva de N no solo (o N corresponde a cerca de 5% da massa da matéria orgânica do solo). No solo, o N encontra-se distribuído em vários compartimentos (N_2 , N-orgânico, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$), com cerca de 50% em formas quimicamente estáveis e os maiores reservatórios muito pouco reativos (Moreira e Siqueira, 2006). Dentre todos os elementos que circulam no sistema solo-planta-atmosfera, o que sofre maiores transformações bioquímicas é o N. Além das transformações naturais que o N está sujeito, as ações antrópicas sobre o ciclo do N são muito intensas. O cultivo intensivo de plantas não leguminosas, por exemplo, recebe grande quantidade de N reduzido e acelera a mineralização da matéria orgânica do solo. Diversos estudos demonstraram que a baixa disponibilidade de N é o principal fator limitante à produção de biomassa vegetal em solos degradados (Bayer e Mielniczuk, 1997; 2008) e a influência disso na recuperação do conteúdo de matéria orgânica do solo. Por isso as espécies de leguminosas tem importante papel na a recuperação ou incremento do conteúdo de matéria orgânica do solo, pois além do C fotossintetizado, também adicionam N atmosférico (N_2) fixado simbioticamente via resíduos vegetais. (Bayer e Mielniczuk, 2008).

2.2.1. A influência do uso, manejo e cobertura do solo com campo nativo e eucalipto no Pampa nos estoques de carbono e nitrogênio

O uso, manejo e a cobertura do solo interferem diretamente nos estoques de carbono e nitrogênio do solo. Nos ecossistemas florestais há uma grande quantidade de C na biomassa das plantas, na liteira, no sistema radicular e, conseqüentemente, elevado potencial de incrementar o estoque de carbono orgânico do solo. Os ecossistemas campestres também podem conter importantes estoques de carbono orgânico do solo. Embora a biomassa superficial seja menor em relação aos ecossistemas florestais, os campos apresentam grande quantidade de biomassa radicular, que favorece o acúmulo de C pela maior agregação do solo e a conseqüente proteção do carbono orgânico do solo nos agregados (Schirmann, 2016). No entanto, a conversão dos campos em lavouras anuais de grãos e silvicultura pode favorecer a decomposição da matéria orgânica do solo, reduzindo os estoques de carbono orgânico do solo e aumentando as emissões dos gases de efeito estufa (Pillar *et al.*, 2012). Em contrapartida, Chaves (2019) e Santos (2020) não verificaram redução dos estoques de carbono orgânico do solo pela substituição do campo pelo florestamento com eucalipto.

Para a FAO (2019), a conversão de sistemas naturais ou seminaturais para sistemas coordenados por ações humanas determina queda nos estoques de carbono orgânico do solo. A conversão de pastagens naturais para lavouras, por exemplo, tende a provocar uma queda nos estoques de carbono orgânico do solo, principalmente em sistemas convencionais, onde há remoção ou incorporação dos resíduos da colheita. Já em sistemas conservacionistas, onde não há preparo e revolvimento – ou estes são mínimos – e os resíduos são mantidos sobre o solo, a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo é reduzida, retendo C no solo por mais tempo. De acordo com Tornquist *et al.* (2009), os estoques originais de carbono orgânico do solo sob vegetação nativa não perturbada são geralmente considerados em equilíbrio dinâmico com outros reservatórios de carbono terrestre, sendo controlados pelo clima (precipitação e temperatura principalmente), relevo, vegetação, mineralogia do solo e interações entre esses fatores. Além desses, a textura do solo

também é um importante fator, visto que há ligações estáveis entre os compostos orgânicos e componentes da fração argila (Bayer *et al.*, 2011).

As alterações nos estoques originais de carbono orgânico do solo, além dos fatores citados, também são controladas pela diferença entre o C adicionado pelos resíduos orgânicos (entradas) e o C perdido nos processos de decomposição e erosão (saídas) (Janzen *et al.*, 1998). Nas áreas com vegetação nativa não perturbada, as entradas e saídas de C no solo são equivalentes, de modo que a quantidade de C armazenado é estática ou próxima disso. Em contrapartida, em solos que sofrem alguma ação antrópica o equilíbrio dinâmico do carbono orgânico do solo é afetado em escala local. Janzen *et al.* (1998) apresentaram uma visão conceitual sobre a mudança no uso e manejo do solo em relação ao C, cuja mudança no manejo do solo pode afetar a condição de equilíbrio, resultando em perda ou ganho temporário nos estoques de carbono orgânico do solo, até que se estabeleça novamente a condição de equilíbrio e os estoques de carbono orgânico do solo voltem a ficar próximos aos níveis anteriores à perturbação. Entretanto, dependendo do grau do impacto antrópico, o equilíbrio pode ser rompido de maneira que o potencial de amortização deste impacto seja insuficiente para fazer o sistema retornar aos níveis anteriores à perturbação. Os efeitos do manejo do solo sobre esse processo podem não ser perceptíveis imediatamente, sendo necessários vários anos para apresentar variação nos estoques de carbono orgânico do solo ou para que o novo equilíbrio seja alcançado, como o período de 20 a 30 anos estimado por Tornquist e Bayer (2009). Specht e West (2003) relatam que diversos estudos realizados na Austrália sugerem que o carbono orgânico do solo diminui ao longo de alguns anos após o plantio de florestas de eucalipto, em áreas ocupadas anteriormente por campo ou floresta nativa e em diversas classes de solo.

O sistema radicular do campo nativo também apresenta um importante papel no acúmulo de carbono orgânico do solo, com a descamação de células epidérmicas e corticais e do processo de rizodeposição, com a exsudação de compostos de C. Isso permite que o C seja incorporado na matriz do solo com um elevado grau de estabilização

física. O processo de pastejo, com uma oferta de forragem e carga animal adequada, influencia positivamente a produção de raízes e os maiores valores de C aportado ao solo são observados nos sistemas que mais estimulem o desenvolvimento radicular das espécies que compõem o campo nativo (Rumpel *et al.*, 2015).

Em um experimento de longa duração (“Nativão”) conduzido na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, os estoques de carbono orgânico do solo em uma área com campo nativo pastejado variaram entre 45,7 e 50,3 Mg C ha⁻¹ na camada de 0-30 cm. Na camada de solo de 0-100 cm os estoques de carbono orgânico do solo variaram de 116 a 136 Mg C ha⁻¹, evidenciando a importância de estudos até camadas mais profundas (Schirrmann *et al.*, 2016).

Em relação ao efeito da silvicultura no conteúdo de C do solo, Wink (2013) estudou a dinâmica do C em povoamentos de eucalipto, observando que o C acumulado na biomassa do eucalipto com 240 meses pode ultrapassar 60 Mg C ha⁻¹, com a maior parte desse C acumulado na madeira (65%), seguido pelas raízes (22%) e copa (13%). Gatto *et al.* (2011) reportou valores para C da biomassa de eucalipto maiores que 157 Mg C ha⁻¹ em uma plantação com 120 meses de idade, associado à produção de biomassa radicular entre 22 e 31 Mg ha⁻¹, correspondente a 13,5 e 20,9% da biomassa total produzida, o que evidencia a importante contribuição do sistema radicular do eucalipto no aporte de C ao solo. A contribuição direta das raízes de eucalipto no aporte de C ao solo pode ser expressiva, não pelo volume e melhor agregação do solo como ocorre com as raízes do campo, mas pela expressiva massa.

2.3 Condutividade hidráulica saturada do solo com campo nativo e eucalipto no Pampa

A condutividade hidráulica saturada (Ksat) também é utilizada como indicador ambiental e de qualidade do solo. Ela expressa a facilidade com que a água se movimenta no perfil do solo, tendo relação com a produção das culturas e manutenção dos recursos hídricos (Klein, 2012). Reflete a

capacidade do sistema poroso do solo e é dependente de atributos da porosidade do solo, tais como tamanho, orientação e quantidade de poros (Libardi, 2005).

A Ksat é um dos atributos mais importantes do solo, pois indica a capacidade de infiltração de água no solo, o escoamento superficial e a lixiviação de poluentes até o lençol freático (Bagarello *et al*, 2004). A Ksat é um processo complexo, pois o solo pode apresentar grande variabilidade no tempo e no espaço. Conseqüentemente, a infiltração de água no solo também poderá apresentar grande variabilidade, uma vez que está sob influência dos fatores intrínsecos do solo, além daqueles relacionados à cobertura, vegetação, fauna edáfica, clima, histórico de uso e manejo, declividade do terreno, forma da paisagem, entre outros (Reichert *et al*, 1992). O conhecimento desse processo é de grande relevância, visto que é um dos principais processos determinantes do escoamento superficial, que pode resultar em erosão hídrica e inundações (Brandão, 2006). Entretanto, existem poucos estudos que avaliam a Ksat em áreas de conversão do campo nativo para eucalipto, especialmente no Pampa.

Reichert *et al.* (2017) realizaram um estudo em duas bacias hidrográficas pareadas no Pampa, com campo nativo sob pastejo e plantação de eucalipto, relatando uma recarga de água subterrânea variável entre estes usos do solo em um ano normal de precipitação. Entretanto, em um ano mais úmido, as áreas com floresta plantada de eucaliptos apresentaram maior recarga do lençol freático. Além disso, as áreas com plantação de eucalipto apresentaram redução de aproximadamente 65% na vazão do exutório da bacia, evidenciando menor perda de água por escoamento e, conseqüentemente, maior infiltração de água no solo. Cabe ressaltar que a diferença entre essas duas áreas não é consequência exclusiva da infiltração de água, visto que há influência da evaporação e evapotranspiração.

2.4. Contextualização do estudo

Como já relatado, existem amplas evidências que as mudanças no uso das terras, neste caso a conversão dos ecossistemas campestres para silvicultura impactam o funcionamento do sistema solo, em particular os ciclos do C e N, e a dinâmica da água, em particular a condutividade hidráulica saturada enquanto componente crítico do ciclo hidrológico. Todavia, estudos mais amplos nos campos do Pampa ainda são necessários, em especial aqueles que abranjam a variabilidade de solos e fisionomias campestres existentes (Overbeck *et al*, 2009).

Este estudo parte da premissa que a conversão do campo nativo manejado com pecuária extensiva para silvicultura intensiva com eucalipto provoca mudanças importantes em relação aos ciclos citados, podendo ser negativas, como a possível redução dos estoques de carbono, ou positivas, como a maior infiltração de água no solo e, conseqüentemente, menor escoamento superficial. Adicionalmente, o esforço da pesquisa busca suprir parte das lacunas de dados referentes aos atributos ambientais e agronômicos no contexto do bioma, especialmente sobre C e N, estando assim alinhado com avaliação e recomendações de Pillar *et al.* (2012). Em conjunto com outros trabalhos desenvolvidos no âmbito do *Projeto Nexus*, as informações obtidas em sítios representativos do Pampa, considerando as mudanças observadas, poderão servir de base para políticas de preservação e conservação dos ecossistemas campestres existentes no Pampa e, desta forma, auxiliar na tomada de decisão por parte dos gestores, produtores, técnicos e demais agentes envolvidos no uso das terras neste importante bioma brasileiro.

3.OBJETIVO

Avaliar as alterações em atributos do solo (carbono orgânico do solo, nitrogênio total, estoques de carbono e nitrogênio e condutividade hidráulica saturada) após a conversão dos campos do Pampa sob pecuária extensiva para silvicultura intensiva com eucalipto na região centro-sul do Rio Grande do Sul.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Delineamento experimental

O estudo foi realizado em quatro sítios de amostragem (Figura 1), localizados nos municípios de São Gabriel, Lavras do Sul, Pinheiro Machado e Jaguarão, apresentado conforme limites atualizados recentemente pelo IBGE (2019). Estes sítios abrangeram um total de 24 parcelas pareadas (Tabela 1): 12 parcelas de campo nativo com pecuária extensiva e 12 parcelas de campos convertidos em silvicultura de eucalipto. Assim foram definidos “pares” de parcelas campo x eucalipto.

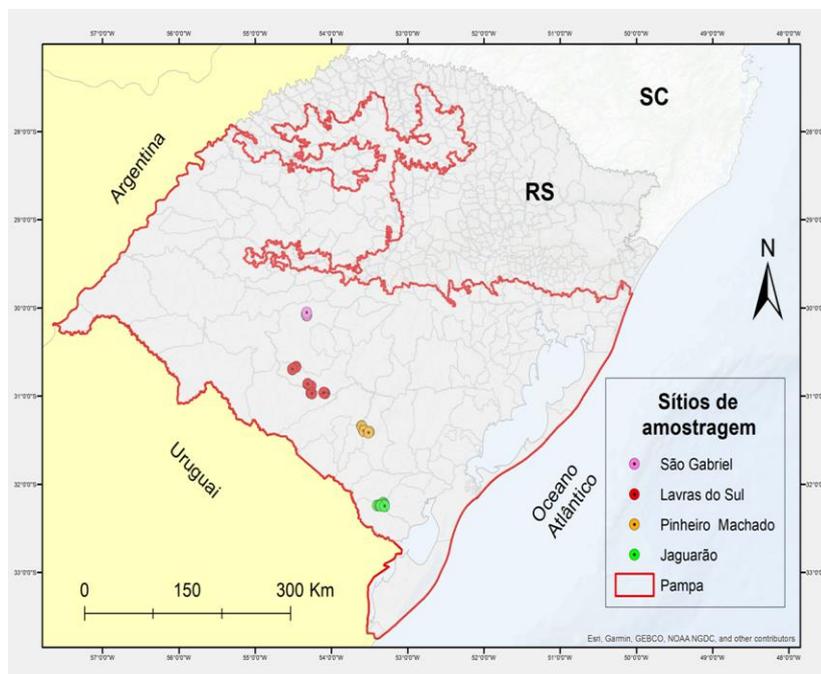


Figura 1. Locais de amostragem abrangendo principais regiões com ocorrência de plantios de eucalipto no âmbito do Pampa.

Tabela 1. Distribuição das parcelas na região de estudo.

Sítios	Nº de parcelas	
	Campo	Eucalipto
São Gabriel	2	2
Jaguarão	3	3
Pinheiro Machado	3	3
Lavras do Sul	4	4
Total	12	12

O delineamento experimental adotado havia sido previamente definido na preparação do *Projeto Nexus* em 2017, priorizando a diversidade dos campos do Pampa e utilizando como critério central as diferentes fisionomias da vegetação campestre neste bioma, tais como descritas por Andrade *et al.* (2019). O critério de seleção dos locais de amostragem priorizou parcelas em propriedades rurais definidas como representativas para outras coletas previstas no *Projeto Nexus*, em campos pouco alterados, com histórico de conversão e/ou regeneração conforme informação dos proprietários. Os povoamentos de eucaliptos para amostragem foram escolhidos como representativos do manejo silvicultural vigente e que apresentassem a máxima similaridade edáfica e geomorfológica com a parcela de campo mais próxima. As informações sobre o histórico dos povoamentos de eucalipto encontram-se no apêndice 3. A definição destas áreas contou com auxílio dos órgãos de extensão rural e a principal empresa atuante no setor de silvicultura na região do Pampa (Celulose Riograndense - CMPC).

Nesse processo, as orientações gerais do sistema RAPELD proposto por Magnusson *et al.* (2005) foram adotadas com adaptações pelas peculiaridades locais, priorizando a amostragem da diversidade biológica. Em síntese: o sistema propõem parcelas longas e estreitas, com seu maior eixo orientado ao longo das curvas de nível do terreno, minimizando a variação interna de topografia em cada parcela. Seis pontos amostrais espaçados em 50 m foram distribuídos em uma parcela linear de 250 m (Figura 2). Os seis pontos amostrais formaram uma amostra composta para cada profundidade

em cada parcela. A composição de amostras é recomendada quando se conhece a variabilidade e há restrição de recursos FAO (2019).

A amostragem de solo assumiu que os sítios são diferentes quanto aspectos ambientais, inclusive edáficos, enquanto as parcelas foram alocadas de forma a obter a maior similaridade possíveis (segundo sistema RAPELD), mas não constituindo uma abordagem estritamente pareada como exemplificada no estudo de Hewitt *et al.* (2012). Assim, devem ser consideradas *pseudo-replicações*, o que é inevitável em estudos de grande escala. Conforme Hurlbert (1984): “quando são previstos efeitos grosseiros de um tratamento, ou quando apenas uma estimativa aproximada do efeito é requerida; ou quando o custo da replicação é muito grande, estudos com tratamentos não replicados podem ser a única ou a melhor opção”.

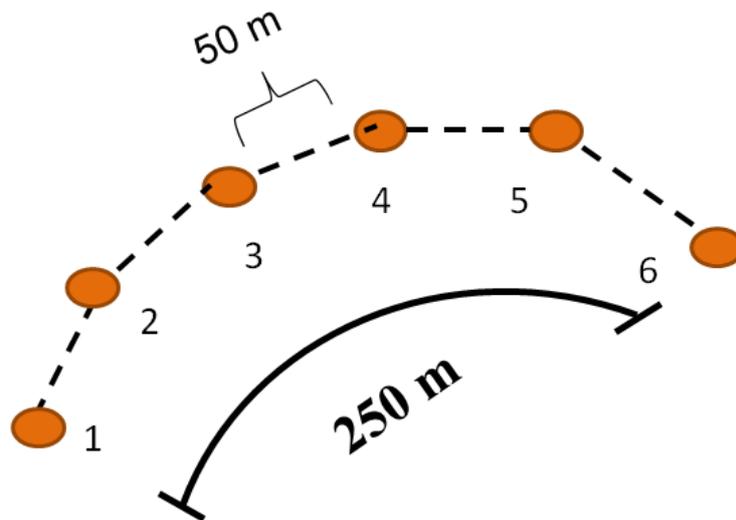


Figura 2. Distribuição dos pontos na parcela (transecto).

4.2. Caracterização granulométrica e classe de solos dos sítios amostrais

Os solos da região têm sua origem em diversos materiais derivados de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, além de sedimentos de rios e planícies aluviais, o que possibilitou a formação de solos de diferentes classes (Streck *et al.*, 2018), dentre os quais predominam Argissolos, Neossolos, Planossolos, Luvisolos, entre outros. Em razão dessa diversidade de solos, foi

realizada preliminarmente a análise granulométrica para avaliar a similaridade entre as parcelas amostradas e, assim, confirmar a homogeneidade entre os pares Campo X Eucalipto (Tabela 2).

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro (usando o hidrômetro de Bouyoucos), conforme proposto por Teixeira *et al.* (2017) e Gee e Or (2002), com adaptações. Todas as amostras foram preliminarmente tratadas com H₂O₂ (solução a 10%) para remoção da matéria orgânica. Após secagem, foram submetidas a uma dispersão química e mecânica e então realizadas as medições com hidrômetro ASTM 152, com escala Bouyoucos (na unidade g L⁻¹). A separação da fração areia foi realizada via tamisação. Para a dispersão química, foi utilizada solução de hexametáfosfato de sódio e hidróxido de sódio, seguida de agitação em agitador horizontal por 16 horas, a 150 ciclos por minuto.

A análise granulométrica (Tabela 2) confirmou a avaliação expedita inicial pela equipe do *Projeto Nexus*, quando da definição dos sítios de amostragem em relação às características dos sítios e classes de solo abrangidas. O sítio de São Gabriel apresentou as maiores proporções de areia, com classe textural variando de areia e areia franca (textura grossa) até franco arenosa (textura moderadamente grossa), enquanto que os demais sítios variaram entre franco arenosa a franco (textura média) e franco argiloarenosa (textura moderadamente fina), com exceção à profundidade de 20-25 cm para eucalipto em Jaguarão, que apresentou classe textural argiloarenosa (textura fina).

A pedregosidade é um aspecto fundamental na maioria dos solos estudados, pois afeta fundamentalmente a dinâmica e taxa de acúmulo de água, matéria orgânica e nutrientes dos solos. O sítio de Jaguarão apresentou pedregosidade elevada (variando de 8 a 46% da massa total da amostra), enquanto o sítio de São Gabriel não apresentou fração > 2 mm nas amostras coletadas.

A determinação expedita das classes de solos apresentada foi baseada no Mapa Exploratório de Solos do Rio Grande do Sul em escala 1:1.000.000 (IBGE, 2017), em observações morfológicas simplificadas nas mini-trincheiras e a partir de dados e levantamentos realizados pelo Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, conforme Tabela 3.

Tabela 2. Determinação das frações granulométricas do solo das áreas de campo nativo e eucaliptos por sítio e profundidade amostrada (médias das parcelas).

Sítio	Camada (cm)	Eucalipto					Campo				
		Argila	Silte	Areia	>2mm	Classe text.	Argila	Silte	Areia	>2mm	Classe text.
		%					%				
PIM	0 - 5	17	18	65	5	FA	11	18	71	15	FA
	5 - 10	28	14	58	17	FArA	24	16	60	25	FArA
	10 - 15	27	17	56	21	FArA	23	21	56	17	FArA
	15 - 20	29	17	54	32	FArA	28	17	55	30	FArA
	20 - 25	30	18	52	30	FArA	26	20	54	30	FArA
	25 - 30	35	17	48	11	FArA	26	18	56	40	FArA
SAG	0 - 5	7	6	87	0	AF	5	6	89	0	A
	5 - 10	6	8	86	0	AF	7	5	88	0	AF
	10 - 15	9	7	84	0	AF	5	5	90	0	A
	15 - 20	9	8	83	0	AF	10	2	88	0	AF
	20 - 25	13	6	81	0	FA	7	6	87	0	AF
	25 - 30	13	6	81	0	FA	7	6	87	0	AF

Tabela 2. Continuação.

Sítio	Camada (cm)	Eucalipto					Campo				
		Argila	Silte	Areia	>2mm	Classe text.	Argila	Silte	Areia	>2mm	Classe text.
		%					%				
JAG	0 - 5	27	17	56	33	FArA	20	29	51	8	F
	5 - 10	31	12	57	43	FArA	25	25	50	20	FArA
	10 - 15	27	18	55	46	FArA	28	19	53	23	FArA
	15 - 20	34	16	50	40	FArA	24	24	52	28	FArA
	20 - 25	37	13	50	39	ArA	29	21	50	31	FArA
	25 - 30	31	16	53	26	FArA	29	23	48	32	FArA
LAV	0 - 5	16	15	69	6	FA	24	24	52	6	FArA
	5 - 10	14	13	73	9	FA	22	22	56	12	FArA
	10 - 15	19	11	70	8	FA	28	20	52	17	FArA
	15 - 20	19	13	68	6	FA	30	21	49	25	FArA
	20 - 25	20	13	67	12	FArA	34	15	51	17	FArA
	25 - 30	19	13	68	16	FA	31	16	53	27	FArA

*A: areia/arenoso; AF: areia franca; FA: franco arenosa; F: franca; FArA: franco argiloarenosa; ArA: argiloarenosa.

Tabela 3. Classificação expedita* dos solos nos locais de estudo.

Sítio	Classes de Solos
Pinheiro Machado	Neossolo Litólico e/ou Regolítico
São Gabriel	Argissolo Vermelho Amarelo
Jaguarão	Argissolo Vermelho Amarelo
Lavras do Sul	Neossolo Litólico e/ou Regolítico

* Baseada no Mapa Exploratório de Solos do Rio Grande do Sul em escala 1:1.000.000 (IBGE, 2017), em observações morfológicas simplificadas nas mini-trincheiras e a partir de dados e levantamentos realizados pelo Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFRGS.

4.3. Suficiência amostral

Uma avaliação exploratória de suficiência amostral foi conduzida preliminarmente, no sítio de São Gabriel. O método *bootstrap* (Efron; Tibshirani, 1993) conhecido em português como *auto-reamostragem* (Pillar, 2004) foi aplicado para calcular a precisão de estimativas com limites de confiança calculados. Assim, seis pontos por parcela foram suficientes para determinação da densidade do solo, teor de C e estoques de C orgânico do solo, e foram considerados aceitáveis para uma precisão adequada aos objetivos deste estudo. Para Ksat, reconhecidamente um atributo de solo com grande variabilidade espacial (Osterbaan e Nijland, 1994), estimou-se que 18 medições por parcela seriam suficientes para avaliar a diferença entre campo e eucalipto, com uma diferença detectável de 232 segundos, também pelo método *bootstrap*. Assim, a análise de suficiência amostral realizada foi assumida para todos os sítios de amostragem: seis pontos para densidade do solo, C orgânico do solo, N total e estoques de C orgânico do solo; e 18 pontos para Ksat.

4.4. Amostragem de solo

4.4.1. Protocolo de coleta das amostras

A amostragem (figura 3) de solo ocorreu entre novembro de 2018 a dezembro de 2019 (as datas de amostragem e as informações sobre as condições meteorológicas em cada sítio estão descritas no apêndice 3). Foram coletadas amostras indeformadas de solo com anéis volumétricos (8,5 cm de diâmetro x 5 cm de altura) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm (Figura 4). Nas parcelas de eucalipto, as amostras foram coletadas no centro das linhas de plantio das árvores.



Figura 3. Detalhes da amostragem: a) remoção da amostra indeformada no campo; b) minitrincheira em solos sob eucaliptos; c) minitrincheira em campo nativo;

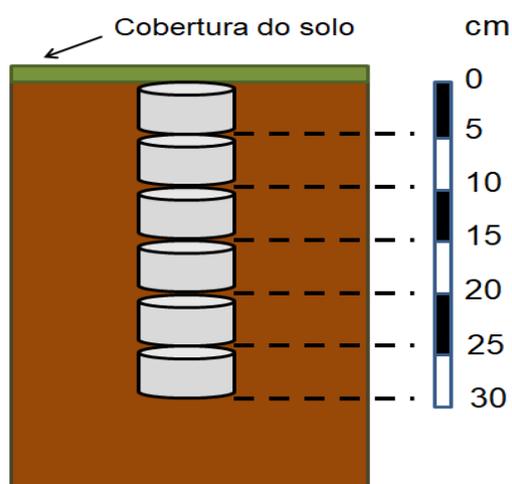


Figura 4. Esquema de coleta de amostras de solo até 30 cm de profundidade com anéis volumétricos

4.4.2. Preparação das amostras para análises

As amostras trazidas do campo passaram por secagem em estufa a 50°C por 24h. Após, foram peneiradas (malha 2 mm) para separação de cascalhos e calhaus para determinação da pedregosidade. Adicionalmente, as raízes visíveis foram separadas e pesadas manualmente, para estimar o estoque de C da biomassa subsuperficial. Frações de 1 g de solo foram separadas para a determinação do C orgânico do solo e N total. Em sequência, foi obtida a umidade remanescente na amostra pela secagem de uma fração de solo a 105°C. A massa total da amostra seca a 105°C precisou ser corrigida (proporcionalmente) pela retirada da fração de 1 g.

4.5. Análises realizadas

4.5.1. Densidade do Solo (Ds)

A determinação da densidade do solo em locais de elevada pedregosidade, aqui entendida como abrangendo indistintamente as frações > 2 mm, inclusive material vegetal, como raízes e tuberculos, é complexa e normalmente imprecisa. Este aspecto se torna mais crítico no âmbito do *Projeto Nexus*, com locais de amostragem distantes, de difícil acesso, e com elevado número de amostras por local, o que não permitiu adoção de métodos mais adequados nesta situação, como o *método da escavação* (Viana *et al.*, 2008).

Esta dificuldade se estende para a determinação de estoques de carbono e nitrogênio. Poeplau *et al.* (2017) revisaram abordagens usualmente adotadas para cálculo de estoques de carbono e nitrogênio em solos pedregosos ou com grande volume de material vegetal de maior diâmetro e propuseram uma padronização a qual foi recentemente recomendada pela FAO (2019):

$$D_{s_{\text{terra fina}}} = \frac{(M_s - M_p)}{(V_s - V_p)}$$

onde:

Ds: densidade do solo considerando a terra fina (g cm^{-3});

Ms: massa total da amostra seca a 105°C (g);

Mp: massa da fração > 2 mm seca a 105°C (g);

Vs: volume total da amostra seca em estufa 105°C (cm^3);

Vp: volume da fração > 2 mm (cm^3).

A aplicação desta abordagem pode ser entendida pela figura abaixo (Figura 5), modificada de Poeplau *et al.* (2017).

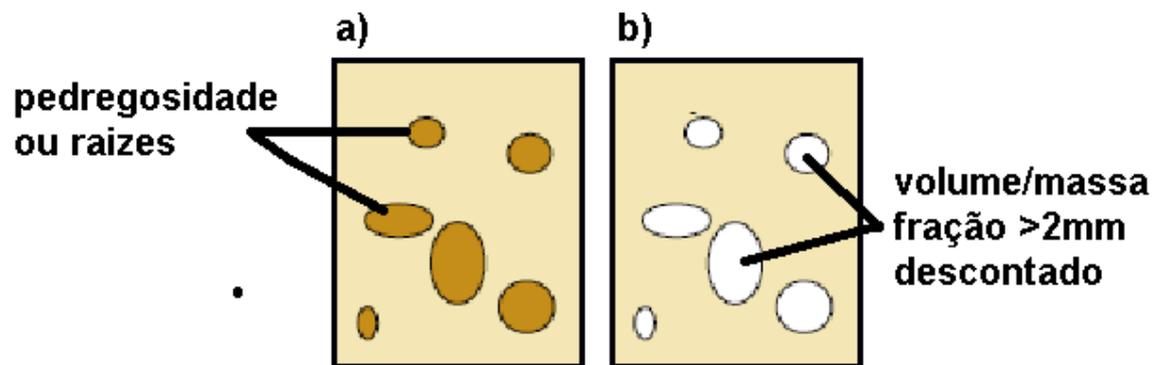


Figura 5. Comparação entre a) uma amostra indeformada em solo com pedregosidade ou fração vegetal > 2 mm; b) a amostra quando é descontada a fração > 2 mm.

4.5.2. Carbono e Nitrogênio do solo

As frações de 1 g das amostras secas a 50°C foram moídas em gral de ágata, até passarem em peneira de 0,25 mm determinação do carbono e nitrogênio em analisador elementar (Thermo Flash 2000). Os estoques de C orgânico do solo na fração fina do solo foram calculados como camadas equivalentes, conforme FAO (2019):

$$\text{ECOS} = \text{COS} \times D_{s_{\text{terra fina}}} \times E$$

Onde:

ECOS: estoque de C orgânico do solo (Mg ha^{-1})

COS: C orgânico do solo (%)

Ds: densidade do solo considerando a terra fina (g cm^{-3});

E: espessura da camada (cm)

A equação acima foi aplicada em todas as camadas amostradas (até 30 cm), em cada par de parcelas campo x eucalipto. Essa abordagem assume que a densidade do solo nas áreas onde foram implantados os povoamentos de eucalipto (há cerca de 10 anos) era idêntica ao seu respectivo “par” de campos.

O cálculo dos estoques de C orgânico do solo pela massa equivalente de solo como proposto por Carvalho *et al.* (2009), modificando a proposta original de Ellert; Bettany (1995), não foi adotado. A distância entre as parcelas e as diferenças de textura e pedregosidade identificadas indicam que não seria possível estabelecer de forma conclusiva e inequívoca mudanças da densidade do solo atribuídas exclusivamente aos sistemas de uso das terras em estudo. Além disso, também é usual em estudos com larga amplitude geográfica adotar exclusivamente a camada equivalente, como visto em Bernoux *et al.* (2002) e Schöning *et al.* (2013).

4.5.3. Biomassa de raízes

As raízes das áreas de campo foram separadas manualmente com auxílio de peneiras e pinças, a partir do volume total de solo coletado. Após a separação, as raízes foram secadas em estufa (55°C) até massa constante (cerca de 48h). A partir da matéria seca das raízes e do volume total de solo coletado foi possível determinar a matéria seca total por volume de solo e estimar o conteúdo de C (fator de 45% da matéria seca). O levantamento dendométrico dos povoamentos de eucalipto foi realizado a partir das equações propostas por Mello & Gonçalves (2008) e a matéria seca de raízes foi estimada considerando o fator de 20% da massa total (valor médio de diversos trabalhos: Cairns *et al.* (1997); Gatto *et al.* (2011); Faria (2012); Wink (2013).

4.5.4. Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat)

A condutividade hidráulica saturada do solo foi determinada aplicando uma adaptação do *método expedito* proposto por Bagarello *et al.* (2004), o qual apresenta maior facilidade de execução em comparação ao reconhecido *método do duplo anel* (Bernardo *et al.*, 2008), pela menor demanda de água e facilidade de transporte do aparato. O anel foi inserido entre 5 a 8 cm de profundidade e, em seguida adicionados 350 mL de água, suficiente para criar uma lâmina completa sobre o solo dentro do anel; em seguida foi realizada a determinação do tempo de infiltração da água, até o desaparecimento da lâmina de água. A superfície do solo foi tratada diferentemente em cada uso do solo: sob eucalipto foi retirada a serrapilheira, pois esta normalmente formava uma camada bastante entrelaçada com folhas e galhos de diferentes dimensões, sendo impossível a inserção do anel sem distúrbio significativo na superfície. Nos pontos de amostragem nos campos, não seria possível a retirada total da vegetação sem que houvesse a retirada parcial da camada mais superficial do solo, o que prejudicaria a análise. Assim, foi realizado o corte da vegetação o mais rente ao solo possível (Figura 6).



Figura 6. Kit de campo adaptado de Bagarello *et al.* (2004) para avaliação expedita de Ksat.

A Ksat foi determinada em 18 pontos por parcela (Figura 7), conforme definido pela análise de suficiência amostral. Os pontos de inserção dos anéis

foram distribuídos de forma aleatória, próximos aos pontos de coleta de solo para as demais análises.

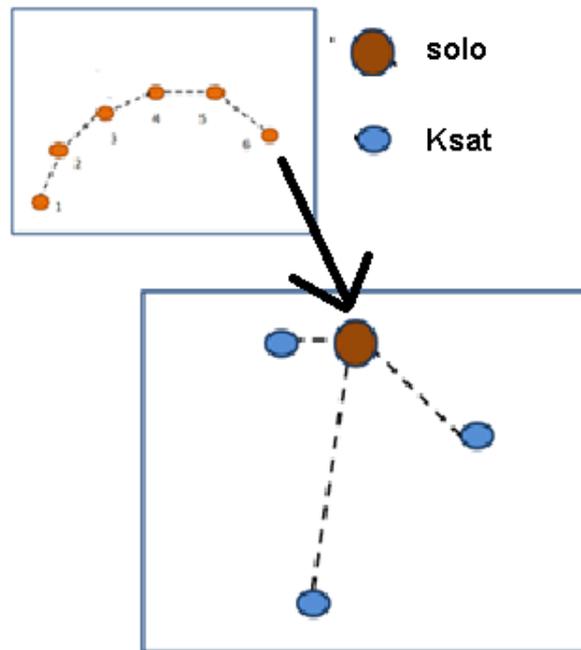


Figura 7. Localização dos pontos de amostragem de Ksat em relação à parcela e aos pontos de amostragem de solo.

Para a determinação da variação da umidade volumétrica, as amostras coletadas foram levadas para estufa por 24h a 105°C, e posteriormente foram determinadas as umidades inicial e final com os cálculos das relações de massa e volume de água no solo e outros parâmetros físicos. Com os dados da umidade e o tempo de infiltração, foi possível realizar o cálculo da Ksat utilizando a equação de Bagarello *et al.* (2004):

$$K_{sat} = \frac{\Delta\theta}{(1 - \Delta\theta)ta} \left[\frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D + \left(\frac{1}{\alpha^*}\right)}{1 - \Delta\theta} \ln \left(1 + \frac{(1 - \Delta\theta)D}{\Delta\theta(D + (1/\alpha^*))} \right) \right]$$

Onde:

K_{sat} : condutividade hidráulica saturada ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);

$\Delta\theta$: variação de umidade volumétrica (v/v);

$D = V/A$: relação entre o volume da água e a área do anel;

t_a : tempo de infiltração da água no solo (s);

α^* : constante (entre 1, 4, 12 e 36). No presente estudo, $\alpha^* = 12$ conforme padronização inicial, podendo ser alterado em condições específicas de solo e tempo de infiltração que não se aplicam neste trabalho.

A interpretação dos valores de K_{sat} utilizou classes propostas por Reichardt (1978), conforme Tabela 4.

Tabela 4: Classes de K_{sat} conforme a velocidade de infiltração da água no solo.

Classe	K_{sat} (mm h^{-1})
Impermeável	~ 0
Muito lenta	< 1
Lenta	≤ 5
Moderadamente lenta	≤ 20
Moderada	≤ 60
Moderadamente rápida	≤ 120
Rápida	≤ 180
Muito rápida	> 180

4.5.5. Análise Estatística

As análises estatísticas foram realizadas no SAS Studio com SAS 9.4 (SAS Institute, 2020). Os dados foram inicialmente testados para normalidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk e homocedasticidade pelo teste de Bartlett. Quando necessário, foram aplicadas transformações logarítmicas. As análises (ANOVA) foram feitas utilizando um modelo linear misto (proc mixed) considerando uso da terra como fator fixo (campo X eucalipto) e o sitio de amostragem como fator aleatório. As comparações de médias foram feitas com teste de Duncan (nível de significância de 5%).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade do solo (Ds)

A densidade do solo nas áreas de campo nativo variou entre 0,98 e 1,27 g cm⁻³, enquanto que nas áreas de eucalipto a densidade do solo variou entre 1,11 e 1,35 g cm⁻³. Essa diferença na comparação entre os usos não é significativa (Tabela 5). No sítio de São Gabriel, as densidades do solo foram maiores em todas as profundidades avaliadas em comparação aos outros sítios amostrais. Esta observação pode ser explicada porque os Argissolos neste sítio são os solos mais arenosos estudados, com a fração areia variando entre 81-90%. A densidade do solo é normalmente maior em solos arenosos (Reichardt, 1978), sendo que valores superiores a 1,75 g cm⁻³ podem causar limitações ao desenvolvimento das culturas, enquanto que em solos argilosos essas limitações podem ocorrer com densidade do solo a partir de 1,35 g cm⁻³ (Reinert *et al.*, 2008). Ainda em São Gabriel, apenas na camada de 10-15 cm a densidade foi maior para eucalipto em comparação aos campos.

Em um estudo no município de Rosário do Sul/RS, Avila (2014) não observou diferenças significativas na densidade do solo entre solos de campo nativo (densidade do solo entre 1,40 e 1,54 g cm⁻³) e solos com eucalipto (densidade do solo entre 1,27 e 1,41 g cm⁻³) sob um Argissolo Bruno similar ao do sítio São Gabriel. Essas variações estão próximas àquelas encontradas neste trabalho para o mesmo sítio (1,20 a 1,56 g cm⁻³ para campo nativo e 1,46 a 1,60 g cm⁻³ para eucalipto). De maneira similar, em São Francisco de Assis na mesma classe de solo (Argissolo Vermelho) do sítio São Gabriel, Rosa *et al.* (2018) não encontraram alterações na densidade do solo nas áreas de eucalipto no primeiro ano de cultivo (com variação entre 1,44 e 1,66 g cm⁻³ na camada de 0-40 cm), em comparação à densidade do solo antes da

implantação do experimento (campo nativo pastejado). Os mesmos autores ainda observaram maiores densidades na camada de 0-20 cm (entre 1,57 e 1,66 g cm⁻³) em relação à camada de 20-40 cm (entre 1,56 e 1,59 g cm⁻³), sem diferença significativa, e sugeriram a ocorrência de compactação pelo pisoteio por bovinos pré existente à implantação da silvicultura.

5.2. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo

Em relação às médias avaliadas neste estudo, não foram observadas diferenças significativas nos teores de C e N na comparação entre os usos do solo (campo x eucalipto) dentro de cada sítio. As médias gerais de cada uso foram bastante próximas, com 1,92% (campo) e 1,63% (eucalipto) para o C, enquanto que para N foram de 0,16% (campo) e 0,14% (eucalipto) (Tabelas 6 e 7). Os resultados gerais dos teores de C e N estão disponíveis no apêndice 1.

O sítio de São Gabriel apresentou os menores teores de C e N em comparação aos outros sítios (cerca de cinco vezes menor que o sítio de Jaguarão), tanto no campo quanto no eucalipto, o que pode ser explicado pelos atributos dos solos deste sítio (Argissolos muito arenosos). Todos os sítios apresentaram maiores teores de C e N nas áreas de campo em relação às áreas de eucalipto, que pode ser explicado pelo maior volume de raízes perenes, resultando em maior incorporação de C ao solo (DUPONT *et al.*, 2010). A exceção disto foi o sítio de Pinheiro Machado, o qual foi o único que apresentou teores de C e N maiores no eucalipto em comparação ao campo, que pode ser explicado pelas próprias características dos solos (Neossolos bastante rasos e com forte presença de afloramentos rochosos) e da dinâmica natural das espécies vegetais presentes nestas áreas de campo.

Em levantamento análogo a este trabalho, comparando povoamentos de eucaliptos e campos em solos arenosos do Pampa com locais de amostragem em Santa Maria e Manoel Viana, Wink (2013) reportou teores similares de C e N entre os dois usos do solo. Esses dois sítios estavam localizados em Argissolo Vermelho Amarelo similares ao sítio São Gabriel, tendo obtido teores de C (entre 1,4 e 0,7%) e N (0,15 a 0,07%) nas camadas mais superficiais similares aos medidos neste estudo (Tabelas 6 e 7).

Tabela 5. Densidade do solo sob campo nativo e eucalipto.

Sítios	Usos do solo											
	Campo	Eucalipto	Campo	Eucalipto	Campo	Eucalipto	Campo	Eucalipto	Campo	Eucalipto	Campo	Eucalipto
	0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm		25-30 cm	
Ds (g cm ⁻³)												
Pinheiro Machado	1,17	1,08	1,18	1,21	1,19	1,15	1,17	1,07	1,19	0,88	1,12	1,32
São Gabriel	1,20	1,46	1,45	1,60	1,53	1,61	1,56	1,60	1,54	1,57	1,53	1,55
Jaguarão	0,77	0,80	1,11	0,85	1,22	0,95	1,03	0,84	1,10	0,87	0,98	1,02
Lavras do Sul	0,89	1,20	1,22	1,29	1,24	1,36	1,22	1,37	1,18	1,38	1,13	1,36
Média geral	0,98	1,11	1,22	1,21	1,27	1,24	1,22	1,20	1,22	1,16	1,16	1,35

Em outro experimento recente sobre impacto do manejo de resíduos de eucalipto em Neossolos Quartzarênicos no Pampa gaúcho, São José (2019) determinou teores menores de C até 30 cm profundidade (variando entre 1,3 até 0,2%). Os solos naquele estudo tinham teores muito elevados de areia (~98%) até em camadas profundas (> 1 m). Assim, a capacidade de acúmulo de C e N foi maior nos solos amostrados em nosso estudo pelo maior conteúdo de silte e argila, os quais podem formar ligações mais estáveis com matéria orgânica, provendo maior agregação e proteção da matéria orgânica do solo.

Estudos em outras regiões onde a silvicultura com eucaliptos é relevante podem ser comparados com os resultados aqui obtidos. Os teores de C e N observados neste trabalho foram superiores aos encontrados em Minas Gerais (0,73 % para C e 0,04% para N), em local de clima tropical, por Gama-Rodrigues *et al.* (2005) em solos arenosos sob eucaliptos de sete anos. Já no Espírito Santo, em solos com textura média, Barreto *et al.* (2008), observaram em solos mais argilosos teores de C variando de 2,4 - 2,7% para C e N entre 0,17 - 0,18% sob eucalipto em fim de ciclo (5 - 13 anos). Esses maiores teores de C e N podem ser atribuídos a maior produtividade (taxa de crescimento) do eucalipto nessas regiões, com maior aporte de C no sistema de produção e maior acúmulo de C e N.

Tabela 6. Valores médios de teores de carbono orgânico do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras.

Sítios	Teor de C orgânico	
	Campo	Eucalipto
	C (%)	
Pinheiro Machado	1,75	1,90
São Gabriel	0,6	0,43
Jaguarão	2,51	2,50
Lavras do Sul	2,26	1,42
Média geral	1,92	1,63

* Não houve diferenças significativas entre usos da terra dentro de cada sítio bem como não há diferenças significativas entre as médias gerais de cada uso da terra pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Tabela 7. Valores médios de teores de nitrogênio total do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras.

Sítios	Teor de N total	
	Campo	Eucalipto
	N (%)	
Pinheiro Machado	0,15	0,17
São Gabriel	0,06	0,04
Jaguarão	0,21	0,21
Lavras do Sul	0,18	0,12
Média geral	0,16	0,14

* Não houve diferenças significativas entre usos da terra dentro de cada sítio bem como não há diferenças significativas entre as médias gerais de cada uso da terra pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

5.3. Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N)

Os estoques de C e N são usualmente calculados em profundidades recomendadas pelo IPCC (0-30 cm ou 0-100 cm) para integrarem os inventários nacionais de gases de efeito estufa (IPCC, 2019). Portanto, neste trabalho, os cálculos dos estoques cumulativos de carbono e nitrogênio foram realizados em três camadas (0-10, 0-20 e 0-30 cm), o que permitiu comparações com estudos prévios com abordagem voltada para auxiliar na elaboração destes inventários.

A análise de variância não identificou diferenças significativas nos estoques de carbono e nitrogênio nas três camadas consideradas, comparando as áreas de campo com as áreas de eucalipto. As médias gerais dos estoques de carbono observadas nas áreas de campo foram superiores às médias observadas nas áreas com eucalipto nas três camadas, com valores de 26,5, 41,6 e 58,5 Mg C ha⁻¹ nas áreas de campo, enquanto nas áreas com eucalipto as médias foram de 20,7, 33,4 e 48,5 Mg C ha⁻¹ (em ambos os casos, respectivamente nas camadas de 0-10, 0-20 e 0-30 cm) (Figura 8). Em relação aos estoques de nitrogênio, as médias gerais observadas para as áreas de

campo foram de 2,3, 3,9 e 5,2 Mg N ha⁻¹, enquanto nas áreas de eucalipto as médias foram 1,8, 3,2 e 4,2 Mg N ha⁻¹ (em ambos os casos, respectivamente nas camadas de 0-10, 0-20 e 0-30 cm) (Figura 9). A variação dos estoques de carbono ao longo da camada 0-30 cm foi menor nas áreas de eucalipto, possivelmente pela maior uniformidade das áreas, característico de áreas com produção de eucalipto. Após o estabelecimento destas áreas, a vegetação mais rasteira sofre uma redução em quantidade e variabilidade de espécies causada pelo fechamento do dossel do eucalipto, que reduz drasticamente a radiação solar necessária para o desenvolvimento das plantas do estrato inferior.

Os estoques de carbono (0-30 cm) observados nas áreas de campo (58,5 Mg C ha⁻¹) são similares aos reportados para essas classes de solos por Bernoux *et al.* (2003) no mapa de estoques de carbono do Brasil (aproximadamente 61 Mg C ha⁻¹). A base de dados do mapa de solos do RS de Tornquist *et al.* (2009) para campos em Neossolos Litólicos em clima temperado também apresentou valores próximos (63 Mg C ha⁻¹). Este mesmo trabalho apontou estoque de carbono de 38 Mg C ha⁻¹ para campos sobre Argissolo Vermelho Amarelo. Em ambos os estudos os estoques de carbono referem-se a áreas com vegetação natural. Entretanto, solos pertencentes a uma mesma classe podem apresentar estoques de carbono (e nitrogênio) bastante distintos, como o caso dos sítios de São Gabriel e Jaguarão, pertencentes à classe dos Argissolos, bem como os sítios de Pinheiro Machado e Lavras do Sul, pertencentes à classe dos Neossolos (Tabela 3). Isso se deve ao fato que os estoques de carbono e nitrogênio não são dependentes somente das características do solo, mas também das características da vegetação e do clima de cada local, que interferem nas entradas e saídas destes elementos no sistema solo-planta-atmosfera, além do preparo do solo e sistema de culturas quando nos referimos a práticas agrícolas (Bayer *et al.*, 2011). Embora o objetivo deste trabalho não tenha sido a comparação do uso da terra (campo x eucalipto) individual dentro de cada sítio ou para cada classe de solo, cabe ressaltar as diferenças de cada local, especialmente no que se refere à variabilidade dos estoques de carbono e nitrogênio, a qual é esperada

em razão da alta diversidade de espécies vegetais presentes no Pampa, como já amplamente relatado por Boldrini (2009).

Existem poucos estudos que avaliaram os estoques de carbono e nitrogênio em relação aos usos das terras escolhidos neste projeto no âmbito do Pampa. Schirmann (2016) avaliou estoque de carbono em campos com diferentes níveis de pastejo (“Nativão”) na EEA Eldorado/UFRGS. Nesse levantamento, conduzido até 100 cm, foi observado, em média, estoque de carbono de 49 Mg C ha⁻¹ na camada 0-30 cm, 16% inferior à média encontrada neste trabalho (58,5 Mg C ha⁻¹). Ferreira *et al.* (2016), em estudo sobre sistema plantio direto para recuperação dos estoques de carbono, reportou 33 Mg C ha⁻¹ em Neossolo Regolítico sob campo em Manoel Viana (RS), 43% inferior ao observado neste estudo. Wink *et al.* (2013), em estudo avaliando o efeito de plantações de eucalipto com diferentes idades nos estoques de carbono no Pampa, conduzido em um Argissolo Vermelho Amarelo em Santa Maria, similar a alguns solos deste estudo, não constatou diferenças significativas entre áreas com eucalipto de 2, 4 e 20 anos e os campos adjacentes, sendo o estoque de carbono nas áreas de eucalipto, na camada de 0-30 cm, de aproximadamente 35 Mg C ha⁻¹, 28% inferior à média das áreas com eucalipto observadas no presente estudo (48,5 Mg C ha⁻¹).

O enfoque do estudo de Wink *et al.* (2013) aborda um aspecto fundamental a ser observado em estudos com mudanças no manejo do solo e uso da terra em relação aos estoques de carbono e nitrogênio (especialmente o carbono), que é o tempo de conversão das áreas (no caso deste trabalho) (Apêndice 3) ou mudanças no manejo de sistemas produtivos, como a transição do sistema plantio convencional até a consolidação do sistema plantio direto em lavouras, por exemplo. Isso se deve ao fato que as alterações (acúmulo de carbono) causadas nos estoques de carbono em razão dessas mudanças de uso da terra ou manejo do solo são de difícil detecção em curto período de tempo (Bayer *et al.*, 2000), que pode ser uma das razões para a ausência de diferenças significativas nos estoques de carbono e nitrogênio observados neste trabalho.

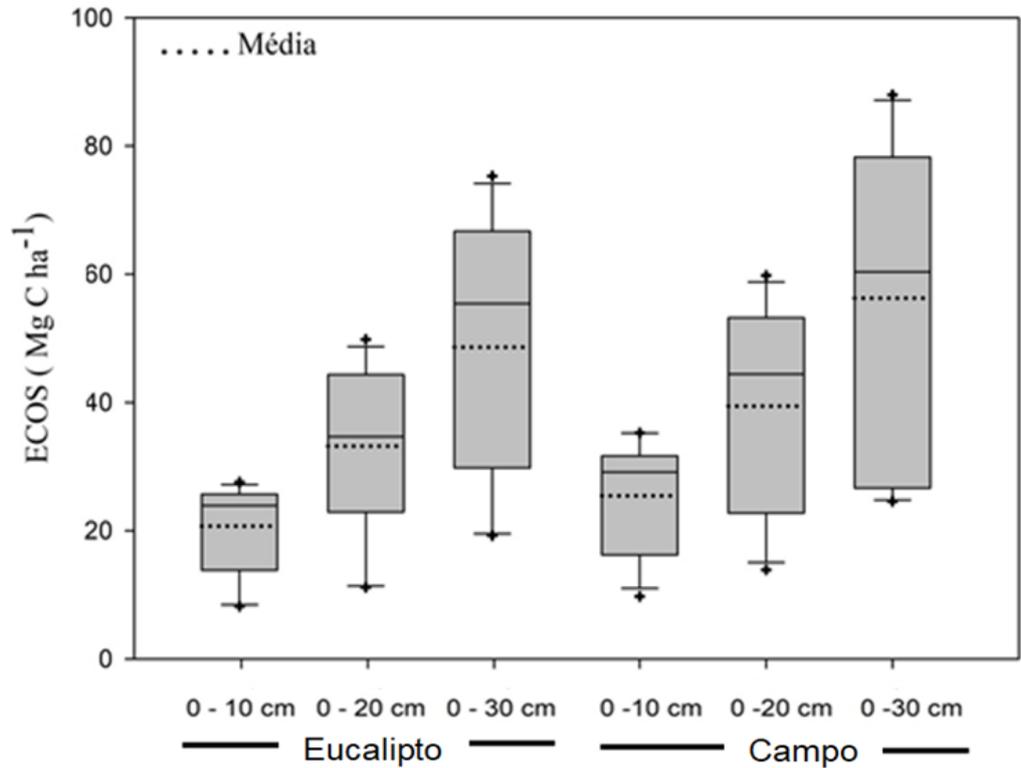


Figura 8. Estoques de C orgânico do solo (ECOS) acumulados em cada profundidade avaliada. Não houve diferença significativa entre os usos para cada profundidade pela ANOVA ($p < 0,05$).

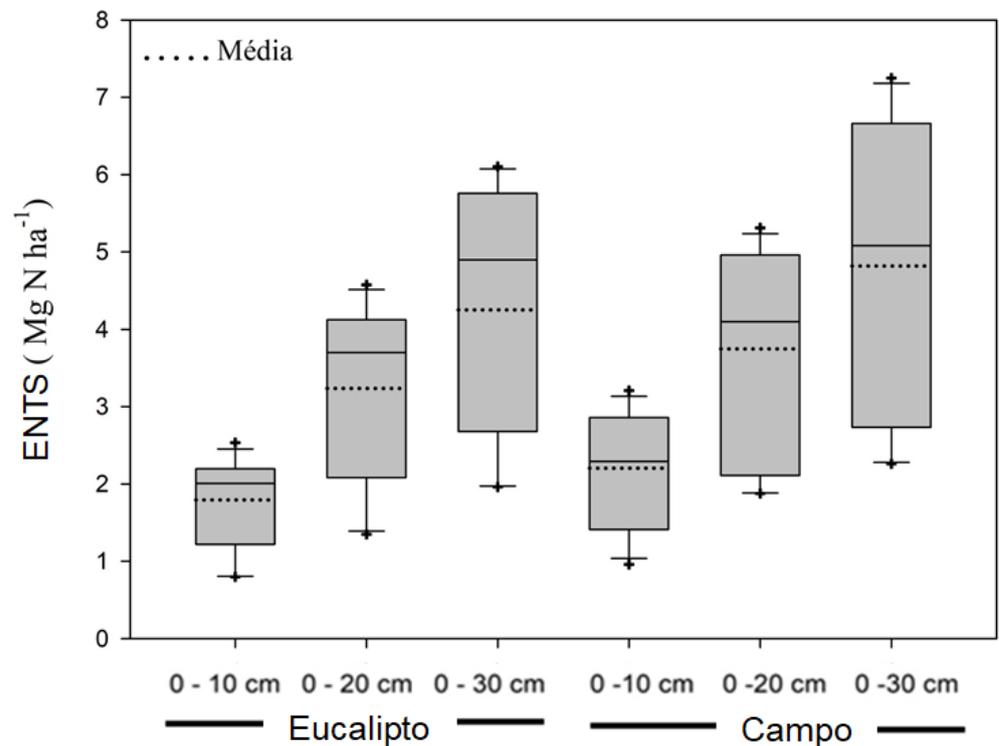


Figura 9. Estoques de N total do solo (ENTS) acumulados em cada profundidade avaliada. Não houve diferença significativa entre os usos para cada profundidade pela ANOVA ($p < 0,05$).

5.4. Relações entre estoques de carbono e textura do solo

É bastante conhecida a relação entre estoques de carbono e textura do solo. Geralmente, solos com maior conteúdo de argila apresentam maiores estoques de carbono. Lal *et al.* (2007) sugeriram que solos mais arenosos apresentam maiores perdas de carbono possivelmente pela maior lixiviação e menor agregação. Ao explorar essas relações em nosso conjunto de dados (Figura 10), é possível observar inexistência de correlação entre os estoques de carbono orgânico e as frações mais fina do solo (silte e argila), indicando que os teores de argila e silte não foram os fatores preponderantes para o acúmulo de carbono nos locais estudados.

Geralmente, o eucalipto para produção de celulose é bastante precoce, com corte ocorrendo entre 5 - 7 anos. Como citado anteriormente, as alterações nos estoques de carbono ocorrem lentamente (Bayer *et al.*, 2000). Portanto, o curto período desde a mudança de uso das terras nesses locais para implantação dos povoamentos de eucalipto (cerca de 10 anos) dificilmente mostraria alterações mais evidentes dos estoques de carbono. Entretanto, a utilização de um manejo inadequado pode reduzir mais rapidamente os estoques de carbono do solo, como apontado por Assis *et al.* (2006), especialmente pelo preparo intensivo de solos com elevados teores de areia, como é o caso da maioria das áreas deste estudo. Isso evidencia a maior facilidade do solo em perder carbono (CO₂) para a atmosfera (sistema solo-planta-atmosfera) quando é manejado de forma inadequada, em relação à sua capacidade de armazenar carbono atmosférico assimilado pelas plantas, mesmo em um manejo adequado (sem revolvimento e cobertura de solo, por exemplo). Contudo, as campanhas de amostragem não identificaram manejos inadequados nas áreas florestais da CMPC.

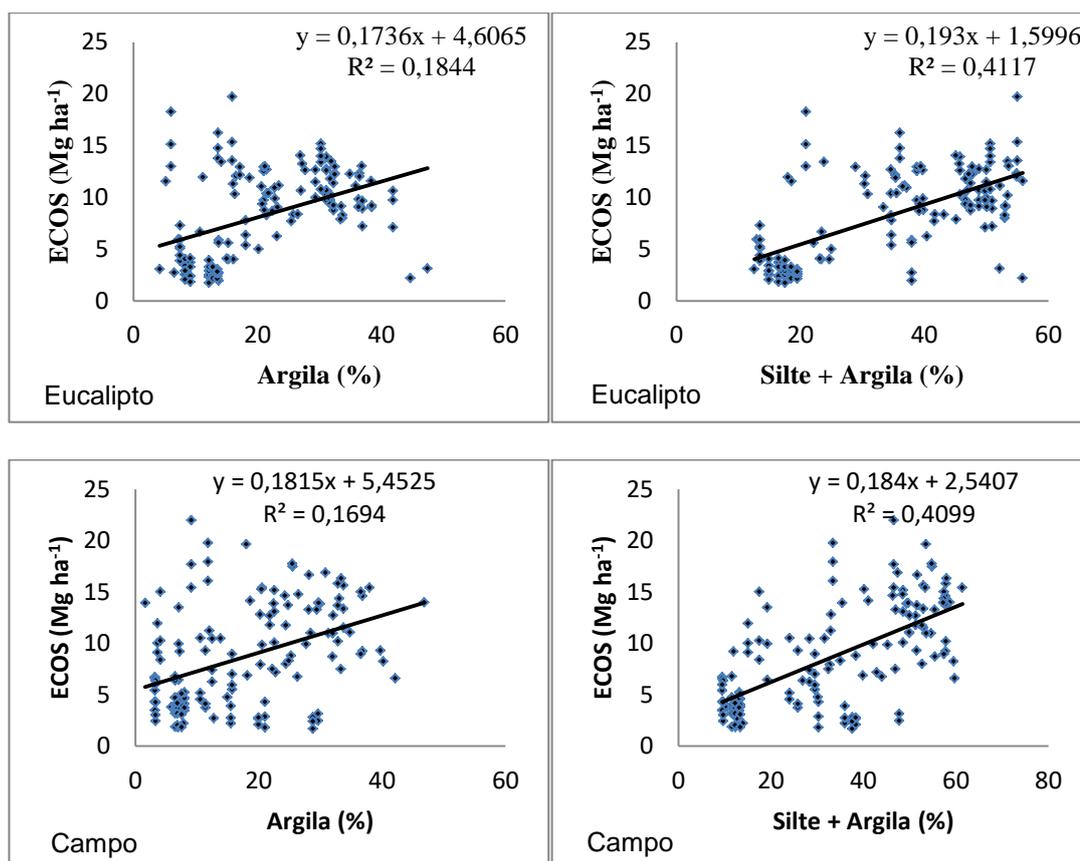


Figura 10. Relação entre estoques de C orgânico do solo (ECOS) e teor de argila e silte + argila das camadas de 0-30 cm para eucalipto e campo.

5.5. Biomassa de raízes

A avaliação de biomassa de raízes quantificadas a partir das amostras de campo identificou importantes diferenças entre os sítios (Tabela 8). Neste estudo a coleta de raízes foi restrita à camada superficial do solo (0-30 cm), na qual reconhecidamente é encontrada a maior parte sistema radicular dos ecossistemas campestres: cerca de 83% conforme a síntese global de Jackson e Canadell (1996), reiterado por Abichequer *et al.* (2009), que mediu 82% das raízes em campos de Dom Pedrito (RS) na camada superficial do solo (0-10 cm). A avaliação da biomassa de eucalipto foi realizada através de levantamento dendométrico (apêndice 2) e a estimativa da biomassa de raízes foi realizada utilizando a relação de 20% de raízes em relação à parte aérea (média dos valores encontrados por Wink (2013) e Gatto *et al.* (2011)).

Tabela 8. Biomassa radicular (matéria seca) e carbono (C) da biomassa radicular em campo e eucalipto (média dos sítios).

Sítios	Campo		Eucalipto	
	Matéria seca	C	Matéria seca	C
 Mg ha ⁻¹			
Pinheiro Machado	11,9	5,4	41,5	18,7
São Gabriel	7,4	3,3	33,3	15,0
Jaguarão	18,8	8,5	56,9	25,6
Lavras do Sul	4,9	2,2	40,8	18,3
Média geral	10,4	4,6	43,1	19,4

Apesar dos sítios de Jaguarão e Lavras do Sul apresentar classe textural, densidade do solo e estoques de carbono semelhantes, a biomassa radicular entre ambos foi bastante distinta, sugerindo que a adição de carbono tenha sido maior, o que poderia ser explicado pela maior profundidade dos solos em Jaguarão e, portanto, maior disponibilidade hídrica, assim como de nutrientes (não avaliada neste estudo). Por outro lado, os sítios de Pinheiro Machado e São Gabriel, apresentam classe textural, Ds e estoques de carbono distintos, mas as biomassas foram mais próximas. Isso pode ter relação com aspectos edáficos e composição florística desses campos, além do manejo do gado aplicado em cada área, que pode estimular a produção de fitomassa e por consequência, de raízes. As considerações acima devem levar em conta que a coletas foram realizadas entre agosto e dezembro de 2019, portanto não podemos descartar efeitos da sazonalidade no desenvolvimento desses campos.

Em relação às áreas com eucalipto, foi possível observar que Jaguarão apresentou os maiores valores de biomassa, sugerindo melhor desenvolvimento do eucalipto nesse local, visto que apresenta densidade de plantio menor que a maioria dos outros locais. Apesar da conversão de uso da terra de campo para eucalipto causar diversas implicações de ordem ambiental, o eucalipto apresenta grande capacidade de reter carbono na sua

biomassa e no solo, tende em vista o fato de que as raízes permanecem no solo após a colheita da parte aérea.

Ferreira *et al.* (2018) em pesquisa restrita às raízes em São Gabriel (RS), determinaram que raízes finas de eucalipto (<2mm) são encontradas prioritariamente superfície e próximas às linhas de plantio, diminuindo bruscamente em profundidade. Neste estudo o protocolo de amostragem não era adequado para estimar biomassa de raízes em silvicultura, pois foi restrita ao centro das entrelinhas. Entretanto, a literatura científica apresenta alguns dados apropriados para uma comparação, ainda que eventual: Cavalli *et al.* (2019) reportou biomassa radicular de 24,1 Mg MS ha⁻¹ com 9,2 Mg C ha⁻¹ (usando fator de 45% de C na biomassa) em povoamento de eucalipto com cerca de 7 anos cultivados em Argissolos e Neossolos no RS. Esses valores são abaixo dos encontrados neste trabalho, apesar de serem cultivados nas mesmas classes de solo. Isso pode ser explicado pela idade dos povoamentos.

5.6. Condutividade hidráulica saturada (Ksat)

O atributo Ksat apresentou alta variabilidade, mesmo dentro das parcelas e às vezes em pontos de inserção dos anéis em locais contíguos. A variabilidade espacial deste atributo é notória (Oosterbaan & Nijland. 1994). Os resultados obtidos indicaram grande amplitude de Ksat.

A análise de variância mostrou diferenças significativas na comparação de Ksat entre campo e eucalipto. A Ksat média em eucalipto (67 mm h⁻¹) foi três vezes maior em relação ao campo (20 mm h⁻¹). Dentre os fatores citados que explicariam essa diferença temos as diferenças em porosidade, presença de raízes e pedregosidade, que podem estabelecer vias de fluxo preferencial para a água superficial. O manejo dos campos como o pisoteio pelo gado e tráfego de equipamentos são fatores de confundimento adicionais. Neste estudo não foi possível obter detalhes do manejo adotado no processo de implantação do eucalipto pelo proprietário dos povoamentos (Celulose Riograndense-CMPC), atualmente conduzido por empresas terceirizadas, as quais não mantêm registro detalhado das operações. Da mesma forma, os registros de carga animal (bovinos e equinos) nas áreas de campo não

estavam acessíveis no momento deste estudo. Além disso, foi observada a presença de bovinos e equinos em alguns povoamentos amostrados, o que torna a interpretação da K_{sat} observada ainda mais complexa.

Em um estudo comparando usos distintos do solo no Pampa, Avila (2014) encontrou uma capacidade de infiltração de água no solo significativamente maior em uma área com floresta plantada de eucalipto, seguida por uma área com campo nativo pastejado. Nas áreas com eucalipto, foram encontradas taxas médias de infiltração inicial de 227 mm h^{-1} e 280 mm h^{-1} , nas cotas superior e inferior, respectivamente, no inverno e 338 mm h^{-1} e 330 mm h^{-1} no verão, enquanto que nas áreas com campo nativo foram encontradas as taxas médias de infiltração inicial de 48 mm h^{-1} e 93 mm h^{-1} no inverno e 189 mm h^{-1} e 103 mm h^{-1} para as mesmas cotas. Esses valores são superiores às médias observadas neste trabalho (164 mm h^{-1} para eucalipto e 34 mm h^{-1} para campo), onde também foi possível confirmar a alta variabilidade e a diferença significativa entre os dois diferentes usos do solo. A autora relata a influência do sistema radicular do eucalipto na formação de poros ao longo do perfil, o que favoreceria a estruturação e maior infiltração de água no solo com esse cultivo. Entretanto, essa influência pode ser limitada ou localizada, visto que nem todos os locais de inserção dos anéis para determinação da K_{sat} sofrem influência das raízes de eucalipto. Possivelmente o espaçamento utilizado no povoamento e a colocação dos anéis próximos das árvores sejam fatores que contribuam para essa influência.

Os valores de K_{sat} foram relacionados com as classes propostas por Reichardt (1978), conforme Tabela 9. Não foram observados valores de K_{sat} para as classes “impermeável” e “muito lenta”, tanto para o campo quanto para o eucalipto. Quase metade dos valores de K_{sat} observados para o campo (45%) situa-se na classe “moderadamente lenta”, ao passo que apenas 19% dos valores observados para o eucalipto situam-se nesta classe. Outra importante diferença está na classe “muito rápida”, com o eucalipto apresentando número de observações (23%) bastante superior ao número de observações do campo (3%).

Tabela 9. Percentual de medições de Ksat dentro das classes propostas por Reichardt (1978).

Classe	Ksat (mm h ⁻¹)	Medições (%)	
		Campo	Eucalipto
Impermeável	~ 0	0	0
Muito lenta	< 1	0	0
Lenta	≤ 5	10	3
Moderadamente lenta	≤ 20	45	19
Moderada	≤ 60	32	19
Moderadamente rápida	≤ 120	8	22
Rápida	≤ 180	2	14
Muito rápida	> 180	3	23

6. CONCLUSÕES

Após a condução das análises propostas e análise dos dados, não há indícios que a implantação da silvicultura de eucalipto nas áreas de campo do Pampa alterou significativamente os atributos estudados (exceto Ksat), apesar das áreas de campo apresentar estoques de C superiores às áreas de eucalipto, sendo 28%, 25% e 21% superiores nas camadas de 0-10, 0-20 e 0-30 cm, respectivamente. Isso pode estar relacionado à idade dos povoamentos de eucalipto (aproximadamente 10 anos): alterações solo podem ser lentas e somente detectáveis após vários ciclos de cultivo, especialmente em relação aos estoques de C.

A diferença observada em Ksat pode ter implicações importantes na dinâmica das águas superficiais, já que um volume de água aproximadamente três vezes maior infiltra nas áreas de eucalipto.

Este estudo contribuiu para suprir a carência de estudos no âmbito do Pampa em relação a alguns aspectos dos ciclos biogeoquímicos, no caso, C, N e o ciclo hidrológico.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em que pese a contribuição apresentada ao *Projeto Nexus*, persiste a necessidade de estudos mais prolongados, com mais abrangência espacial e mais repetições para uma análise mais robusta desses importantes atributos. Em particular, precisaríamos “romper a barreira” das camadas superficiais de solo, buscando pelo menos 1 m de profundidade nos estudos, e eventualmente atingindo a totalidade dos perfis. Igualmente, a reamostragem dos mesmos sítios e/ou parcelas (ou parte destas) em 5 ou 10 anos poderia ser o esboço de uma “rede de monitoramento”. Entretanto, isso só seria viável se superadas as notórias dificuldades de execução de um projeto de amplo alcance geográfico, de grande demanda de pessoal e infraestrutura logística e analítica, respaldado por recursos financeiros adequados.

Outro aspecto importante a ser destacado é a influência de outros fatores atuantes na conversão dos campos, tais como composição da micro e mesofauna, composição botânica, qualidade dos ecossistemas aquáticos, capacidade produtiva, eficiência energética, os quais são de fundamental importância para uma melhor compreensão das efetivas mudanças e impactos que possam estar ocorrendo no bioma Pampa. Nesse sentido, a integração destes resultados com outros estudos em andamentos no âmbito do Projeto Nexus “*Cenários de Conversão da Vegetação Nativa e a Sustentabilidade de Agroecossistemas no Pampa*” contribuirá de forma categórica para uma agenda de preservação e conservação deste bioma, alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis.

8. REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, A. D. *et al.* Crescimento e distribuição de raízes de campim-annoni-2 e do campo nativo: vantagem competitiva do capimannoni-2? **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 15, n. 1, p. 7-12, 2009.
- AGEFLOR - ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **A indústria de base florestal no RS: ano base 2016**. Porto Alegre: AGEFLOR, 2017. Disponível em: <http://www.ageflor.com.br/dados/anuario>. Acesso em: 7 mar. 2020.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ANDRADE, B. O. *et al.* Classification of South Brazilian grasslands: implications for conservation. **Applied Vegetation Science**, Oxford, v.22, p.168-184, 2019.
- ASSIS, C. P. *et al.* Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 10, p. 1541-1550, 2006.
- AVILA, C. B. **Variação da infiltração devido a alterações de uso do solo: estudo de caso de implantações de floresta em bioma Pampa**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 66–73, 2004.
- BARRETO, P. A. B. *et al.* Atividade, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 611-619, 2008.
- BAYER, C. *et al.* Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases e efeito estufa na agricultura conservacionista. *In*: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, cap. 3, p. 55-118.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por método de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 105-112, 1997.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. *In*: SANTOS, G. A. *et al.* **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 2, p. 7-18.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 599-607, 2000.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Capacidade total de água no solo (CTA). *In*: BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. cap. 1, p. 15-44.

BERNOUX, M. *et al.* Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 888–896, 2002.

BOLDRINI, I. I. Campos do Rio Grande do Sul: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, v. 56, p. 1-39, 1997.

BOLDRINI, I. I. Campos sulinos: a flora dos campos do Rio Grande do Sul. *In*: PILLAR, V. D. P. *et al.* **Campos sulinos**. Brasília, DF: MMA, 2009. cap. 4, p. 63-77.

BONFATTI, B. R.; HARTEMINK, A. E.; GIASSON, E. Comparing soil C stocks from soil profile data using four different methods. *In*: HARTEMINK, A. E.; MINASNY, B. **Digital soil morphometrics**. New York: Springer, 2016. p. 315-329.

BRANDÃO, V. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento**. 2003. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pampa**. Brasília, DF: MMA, [2020]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/pampa.html>. Acesso em: 2 mar. 2020.

CAIRNS, M. A. *et al.* Root biomass allocation in the world's upland forests. **Oecologia**, Berlin, v. 111, p. 1-11, 1997.

CAMINHA, A. F. **A biodiversidade pouco conhecida do Pampa**. Brasília, DF: MMA, 18 out. 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/a-biodiversidade-pouco-conhecida-do-pampa#:~:text=Poucos%20sabem%2C%20no%20entanto%2C%20que,quase%20500%20esp%C3%A9cies%20de%20aves>. Acesso em: 2 mar. 2020.

CARVALHO, P. C. F.; BATELLO, C. Access to land, livestock production and ecosystem conservation in the Brazilian Campos biome: the natural grasslands dilemma. **Livestock Science**, Wageningen, v. 120, p. 158-162, 2009.

- CARVALHO, J. L. N. *et al.* Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil Amazon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n. 2, p.342-349, 2009.
- CAVALLI, J. P. *et al.* Composition and functional soil properties of arenosols and acrisols: effects on eucalyptus growth and productivity. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 196, p. 1-10, 2019.
- CÉSPEDES-PAYRET, C. *et al.* Land use change in a temperate grassland soil: afforestation effects on chemical properties and their ecological and mineralogical implications. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 438, p. 549-557, 2012.
- CHAVES, E. **Alterações mineralógicas em solos sob usos e manejos distintos**. 2019. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- CONCEIÇÃO, P. C. *et al.* Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 777-788, 2005.
- CONCEIÇÃO, P. C. *et al.* Estoques de carbono orgânico num Chernossolo Argilúvico manejado sob diferentes ofertas de forragem no Bioma Pampa Sul-Riograndense. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31^o., 2007, Gramado. **Anais**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- EFRON, B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. **The Annals of Statistics**, Stanford, v. 7, p. 1-26, 1979.
- EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. The bootstrap estimate of standard error. *In*: EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. **An introduction to the Bootstrap**. London: Chapman & Hall, 1993. cap. 6, p. 45-57.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems**: guidelines for assessment: version 1. Rome: FAO, 2019. 173 p.
- FARIA, R. A. V. B. **Estoques de carbono e atributos florísticos e edáficos de ecossistemas florestais em processo de restauração**. 2012. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

- FERREIRA, A. O. *et al.* Can no-till grain production restore soil organic carbon to levels natural grass in a subtropical Oxisol? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 229, p. 13-20, 2016.
- FERREIRA, G. W. D. *et al.* Nitrogen alters initial growth, fine-root biomass and soil organic matter properties of a *Eucalyptus dunnii* maiden plantation in a recently afforested grassland in southern Brazil. **Forests**, Basel, v. 9. n. 2, [art.] 62, [p. 1-14], 2018.
- FITZSIMMONS, M. J.; PENNOCK, D. J.; THORPE, J. Effects of deforestation on ecosystem carbon densities in central Saskatchewan, Canadá. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 188, n. 1/3, p. 349-361, 2004.
- FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 129, p. 28-36, 2009.
- GAMA-RODRIGUES, E. F. *et al.* Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 393-901, 2005.
- GATTO, A. *et al.* Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore, Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, MG, v. 35, p. 895-905, 2011.
- GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. *In*: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. cap. 2, p. 255-293.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.
- HASENACK, H. *et al.* **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das Savanas Uruguaias em escala 1:500.000**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro de Ecologia, 2010. Projeto IB/CECOL/TNC, Produto 4.
- HEWITT, A. *et al.* Afforestation effects on soil carbon stocks of low productivity grassland in New Zealand. **Soil Use and Management**, Cranfield, v. 28, p. 508-516, 2012.
- HURLBERT, S. H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments: ecological monographs. **Journal Storage**, New York, v. 54, p. 187-211, 1984.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGES. **Climate change: the physical science basis**. Geneva: IPCC, 2013.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES.
Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva: IPCC, 2019.

JACKSON, R. B. *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, Springer Nature Switzerland AG, v. 108, p.389-411, 1996.

JANZEN, H. H. *et al.* Soil carbon dynamics in canadian agroecosystems. *In:* LAL, R. *et al.* **Soil processes and the carbon cycle.** Boca Raton: CRC Press, 1998. cap. 5, p. 57-80.

KLEIN, V. A.; Condutividade hidráulica do solo saturado. *In:* KLEIN, V. A. **Física do solo.** 3. ed. Passo Fundo: UPF, 2014. cap12, p. 229-240.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 12, p. 31-22, 2004.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, Dordrecht, v. 12, n. 2, p. 303-322, 2007.

LIBARDI, P. L. Métodos de medida da condutividade hidráulica dos solos *In:* LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: USP, 2005. cap. 9, p. 231-250.

MAGNUSSON, W. E. *et al.* A modification of the Gentry method for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 5, p. 1-6, 2005.

NABINGER, C.; MORAES, A.; MARASCHIN, G. Campos in southern Brazil. *In:* LEMAIRE, G. *et al.* **Grassland ecophysiology and grazing ecology.** Wallingford: CABI, 2000. p. 355-376.

NABINGER, C. *et al.* Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. *In:* PILLAR, V. D. P. *et al.* **Campos Sulinos.** Brasília, DF: MMA, 2009. cap. 13, p. 175–198.

OVERBECK, G. E. *et al.* Campos sulinos: um bioma negligenciado. *In:* PILLAR, V. D. P. *et al.* **Campos Sulinos.** Brasília, DF: MMA, 2009. cap. 2, p. 26-41.

OVERBECK, G. E. *et al.* Campos do sul: fisionomia dos campos. *In:* PILLAR, V. D. P.; LANGE, O. **Campos do sul.** Porto Alegre: Rede Campos Sulinos - UFRGS, 2015. cap. 3, p. 33-44.

OOSTERBAAN, R. J.; NIJLAND, H. J. Determining the saturated hydraulic conductivity. *In:* RITZEMA, H. P. **Drainage principles and applications.** 2nd ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994. cap. 12, p. 435-475.

POEPLAU, C.; VOS, C.; DON, A. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. **Soil Journal**, Göttingen, v. 3, p. 61–66, 2017.

PILLAR, V. D. P. Suficiência amostral. *In*: BICUDO, C.; BICUDO, D. **Amostragem em limnologia**. São Carlos: RIMA, 2004. p. 25-43.

PILLAR, V. D. P.; QUADROS F. L. F. Grassland-forest boundaries in Southern Brazil. **Coenoses**, Gorizia, v. 12, p. 119-126, 1997.

PILLAR, V. D. P.; TORNQUIST, C. G.; BAYER, C. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. **Revista Brasileira de Biologia**, São Carlos, v. 72, p. 673-681, 2012.

PRIMIERY, S. **O impacto da mudança no uso do solo sobre o seqüestro de carbono e seus atributos microbiológicos**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoque e frações da matéria orgânica de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1341-1353, 2007.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1978. 188 p.

REICHERT, J. M. *et al.* Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 16, p. 289-298, 1992.

REICHERT, J. M. *et al.* Water balance in paired watersheds with Eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 237/238, p. 282-295, 2017.

REINERT, D. J. *et al.* Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1805–1816, 2008.

RIBEIRO, S. C. *et al.* Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in southeast Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, p. 353-363, 2015.

ROSA, S. F. *et al.* Propriedades físicas e químicas de um Argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa gaúcho. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, p. 580-590, 2018.

RUMPEL, C. *et al.* The impact of grassland management on biogeochemical cycles involving carbon, nitrogen and phosphorus. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v.15, p. 353-371, 2015.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, T. F. **Alterações mineralógicas, químicas e físicas de Solos do Brasil determinadas por fatores bióticos (térmitas e plantas)**. 2020. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SÃO JOSÉ, J. F. B. **Indicadores de qualidade do solo arenoso, matéria orgânica, e emissões de gases de efeito estufa afetados pelo manejo dos resíduos da colheita do eucalipto**. 2019. Tese. (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SAS Institute. **Studio 3.8/SAS 9.4**. Cary: SAS Institute, 2020. Disponível em: <https://support.sas.com/en/software/studio-support.html#documentation>. Acesso em: 5 abr. 2020.

SCHIRMANN, J. **Balanço de carbono e emissão de gases de efeito estufa em campo nativo do bioma Pampa**. 2016. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SCHÖNING, I. *et al.* Causes of variation in mineral soil C content and turnover in differently managed beech dominated forests. **Plant and Soil**, The Hague, v. 370, p. 625-639, 2013.

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

SISTI, C. P. J. *et al.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 39-58, 2004.

SOUZA, E. D. *et al.* Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistemas de integração agricultura e pecuária submetidos a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1273-1282, 2008.

SPECHT, A.; WEST, P. W. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales, Australia. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 25, n. 4, p. 363-379, 2003.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS. EMATER/RS-ASCAR, 2018. p. 135-151.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e amp. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

TORNQUIST, C. G. *et al.* Soil organic carbon stocks of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 975-982, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.0112>. Acesso em: 1º mar. 2020.

TORNQUIST, C. G.; BAYER, C. Serviços ambientais: oportunidades para a conservação dos Campos Sulinos. *In*: PILLAR, V. D. P. *et al.* **Campos Sulinos**. Brasília, DF: MMA, 2009. cap. 8, p.122-127.

TRINDADE, J. P. P.; BORBA, M. F. S.; VOLK, L. B. **Pastejo e a estabilidade de pastagens naturais**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2011. p. 1-17.

TURNER, J.; LAMBERT, M. J. Litterfall and forest floor dynamics in *Eucalyptus pilularis* forests. **Austral Ecology**, Carlton, v. 27, n. 2, p. 192-199, 2002.

VEZZANI, F. M. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 743-755, 2009.

VIANA, J. H. M. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. 11 p. (EMBRAPA Milho e Sorgo. Comunicado Técnico 154).

VOGT, K. A. *et al.* Dynamics of forest floor and soil organic matter accumulation in boreal, temperate, and tropical forests. *In*: LAL, R. *et al.* **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 159-178.

WINK, C. *et al.* A idade das plantações de *Eucalyptus sp.* influenciando os estoques de carbono. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 333-343, 2013.

WINK, C. **Dinâmica do carbono e nitrogênio em Argissolos com plantações de *Eucalyptos sp.*** 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

WINK, C. Dinâmica do carbono e nitrogênio em plantações de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 1623-1632, 2015.

APÊNDICES

Apêndice 1. Teores de carbono e nitrogênio por sítio, camada e uso do solo.

Sítio	Prof. (cm)	Campo Nativo		Eucalipto	
		C (%)	N (%)	C (%)	N (%)
Pinheiro Machado_1	0 – 5	2,45	0,19	2,99	0,21
	5 – 10	1,76	0,15	1,82	0,16
	10 - 15	1,55	0,13	1,68	0,15
	15 - 20	1,60	0,13	1,79	0,15
	20 - 25	1,58	0,14	2,51	0,21
	25 - 30	1,68	0,15	*	*
Pinheiro Machado_2	0 – 5	2,03	0,17	2,27	0,20
	5 – 10	1,32	0,12	1,64	0,16
	10 - 15	1,13	0,13	1,48	0,15
	15 - 20	1,03	0,09	1,41	0,15
	20 - 25	0,95	0,08	1,80	0,16
	25 - 30	0,91	0,08	1,25	0,12
Pinheiro Machado_3	0 – 5	3,51	0,31	2,81	0,25
	5 – 10	2,38	0,22	1,91	0,18
	10 - 15	2,22	0,20	1,83	0,17
	15 - 20	1,91	0,17	1,93	0,17
	20 - 25	1,80	0,15	1,68	0,15
	25 – 30	*	*	1,56	0,13
São Gabriel_1	0 – 5	1,56	0,12	0,77	0,06
	5 – 10	0,64	0,07	0,38	0,04
	10 - 15	0,50	0,05	0,35	0,03
	15 - 20	0,34	0,03	0,34	0,03
	20 - 25	0,27	0,03	0,36	0,04
	25 - 30	0,23	0,03	0,34	0,03
São Gabriel_2	0 – 5	0,93	0,08	0,78	0,06
	5 – 10	0,61	0,07	0,37	0,04
	10 - 15	0,53	0,06	0,37	0,04
	15 - 20	0,52	0,06	0,36	0,04
	20 - 25	0,48	0,06	0,34	0,04
	25 - 30	0,52	0,06	0,34	0,03
Jaguarão_1	0 – 5	3,11	0,26	3,11	0,26
	5 – 10	2,01	0,17	2,53	0,22
	10 - 15	1,57	0,14	2,55	0,21
	15 - 20	1,30	0,11	2,45	0,20
	20 - 25	1,40	0,12	2,35	0,18
	25 - 30	1,57	0,13	2,36	0,18

Jaguarão_2	0 - 5	4,46	0,40	2,23	0,18
	5 - 10	2,71	0,24	1,87	0,16
	10 - 15	2,47	0,20	1,57	0,13
	15 - 20	2,51	0,19	1,39	0,12
	20 - 25	2,32	0,17	1,26	0,10
	25 - 30	2,30	0,16	1,27	0,10
Jaguarão_3	0 - 5	5,54	0,50	6,00	0,46
	5 - 10	3,33	0,30	4,00	0,33
	10 - 15	2,33	0,21	3,01	0,25
	15 - 20	2,22	0,19	2,51	0,23
	20 - 25	2,06	0,15	2,11	0,20
	25 - 30	2,03	0,15	*	*
Lavras do Sul_1	0 - 5	3,98	0,30	1,11	0,10
	5 - 10	1,99	0,17	0,94	0,09
	10 - 15	1,62	0,13	0,78	0,07
	15 - 20	1,38	0,11	0,80	0,07
	20 - 25	1,25	0,10	0,61	0,05
	25 - 30	1,21	0,10	0,65	0,06
Lavras do Sul_2	0 - 5	4,98	0,41	2,20	0,20
	5 - 10	2,83	0,25	1,81	0,16
	10 - 15	2,31	0,19	1,43	0,13
	15 - 20	1,83	0,15	1,21	0,10
	20 - 25	1,43	0,11	1,07	0,09
	25 - 30	1,18	0,09	0,84	0,06
Lavras do Sul_3	0 - 5	4,05	0,33	2,39	0,19
	5 - 10	2,46	0,22	1,92	0,16
	10 - 15	2,52	0,21	1,83	0,15
	15 - 20	2,17	0,19	1,70	0,14
	20 - 25	2,28	0,21	1,75	0,14
	25 - 30	2,33	0,18	1,76	0,13
Lavras do Sul_4	5 - 10	2,81	0,22	1,91	0,17
	10 - 15	2,03	0,16	1,70	0,15
	15 - 20	1,88	0,15	1,54	0,14
	20 - 25	1,96	0,15	1,48	0,13
	25 - 30	1,94	0,15	1,43	0,12
	25 - 30	1,83	0,14	1,21	0,10

*Não coletado por impedimento de rocha ou regolito

Apêndice 2. Informações dos Hortos Florestais de Eucalipto.

Sítio	Horto	Plantio	Árvores m ⁻²	Biomassa
-------	-------	---------	-------------------------	----------

					(t ha ⁻¹)
	São Geraldo	2008	N.I.	N.I.	
Pinheiro Machado	BA	2008	N.I.	N.I.	
	Potreiro do Lajeado	2009	0,13	207,6	
São Gabriel	Cezar Machado 1	2010	0,11	200,9	
	Cezar Machado 2	2009	0,15	132,5	
Jaguarão	Campo Bonito 1	2009	N.I.	N.I.	
	Campo Bonito 2	2009	0,11	281,2	
	Osório	2007	0,11	288,5	
Lavras do Sul	Rincão dos Soares	2008	0,12	202,7	
	São Brás	2008	0,10	229,1	
	Saibro	2011	0,10	151,2	
	Estância da Floresta	2008	0,10	233,3	

N.I. Não informado

Apêndice 3. Dados meteorológicos referentes aos dias das coletas de solo.

Sítio	Data da	Precipitação	Radiação	Temperatura	Umidade
-------	---------	--------------	----------	-------------	---------

	coleta	(mm)	global (Kj/m ²)	do ar (C°)	relativa do ar (%)
Pinheiro Machado	14/11/2018	0,8	2158,07	22,1	70,0
	13/02/2019	0	1776,82	17,0	74,2
São Gabriel	20/03/2019	1,4	1370,51	19,9	71,3
	21/03/2019	0	1372,32	16,5	67,6
	04/05/2019	2,2	644,70	23,6	90,5
Jaguarão	20/06/2019	0	1033,76	11,6	83,1
	21/06/2019	0	846,85	12,5	88,2
	10/07/2019	0	376,62	10,6	88,7
	11/07/2019	0,2	784,17	13,7	88,0
Lavras do Sul	25/10/2019	0	2000	17,7	59,2
	26/10/2019	0	2119,14	20,7	49,8

*Dados disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes às estações automáticas mais próximas dos sítios de coleta. Precipitação: Acumulado em 24h. Radiação global, temperatura do ar e umidade relativa do ar: Média diária.