

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

QUALIDADE DO SOLO APÓS A CONVERSÃO DE CAMPOS NATIVOS PARA  
AGRICULTURA NO PAMPA

**Jéssica Maciel Machado**  
**(Dissertação)**

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

QUALIDADE DO SOLO APÓS A CONVERSÃO DE CAMPOS NATIVOS PARA  
AGRICULTURA NO PAMPA

JÉSSICA MACIEL MACHADO  
Engenheira Agrônoma (UERGS)

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

Porto Alegre (RS) Brasil  
Abril de 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Machado, Jéssica Maciel  
Qualidade do solo após a conversão de campos  
nativos para agricultura no Pampa / Jéssica Maciel  
Machado. -- 2021.  
93 f.  
Orientador: Carlos Gustavo Tornquist.

Coorientadora: Bruna Raquel Winck.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,  
2021.

1. Solo. 2. Estoques de Carbono. 3. Bioma Pampa. 4.  
Agricultura. 5. Conversão de uso da terra. I.  
Tornquist, Carlos Gustavo, orient. II. Winck, Bruna  
Raquel, coorient. III. Título.

JÉSSICA MACIEL MACHADO  
Engenheira Agrônoma (UERGS)

## DISSERTAÇÃO

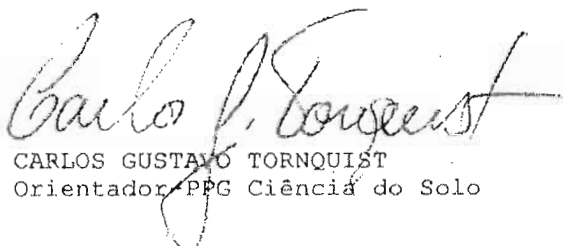
Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### 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: 29/04/2021  
Pela Banca Examinadora

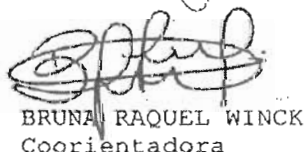
Homologado em: 10/10/2023  
Por



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST  
Orientador PPG Ciência do Solo

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR  
Data: 10/10/2023 17:30:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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



BRUNA RAQUEL WINCK  
Coorientadora

AMANDA POSSELT MARTINS  
PPG Ciência do Solo/UFRGS  
(MConf UFRGS)

FABIANE MACHADO VEZZANI  
PPG Ciência do Solo/UFPR  
(MConf UFRGS)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CARLOS ALBERTO BISSANI  
Data: 10/10/2023 22:09:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

RODRIGO JOSEMAR SEMINOTTI JACQUES  
PPG Ciência do Solo/UFSM  
(MConf UFRGS)

CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*"O segredo da vida é o solo, porque do solo dependem as plantas, a água, o clima e nossa vida. Tudo está interligado. Não existe ser humano sadio se o solo não estiver sadio."*

*Ana Primavesi*

## AGRADECIMENTOS

À minha família, minha mãe Magda e minhas irmãs Gabriele, Maitê e Luiza por toda compreensão, apoio e incentivo incondicionais ao longo de mais este capítulo da minha jornada.

Ao meu orientador, professor Carlos Gustavo Tornquist pela orientação, apoio, confiança e por todo conhecimento transmitido ao longo destes dois anos.

À minha co-orientadora Bruna Winck, pelas dicas, esclarecimento de dúvidas e por cada contribuição que fez com que a execução desta dissertação fosse possível.

Às gurias da salinha Tati, Edsleine e Letícia, pelo acolhimento, amizade e experiências partilhadas. Às “Jéssicas”, Jéssica Pereira e Jéssica Cavalcante, pela troca de conhecimentos e pelo incentivo nos muitos dias de análises em laboratório. À bolsista de iniciação científica Elena, pela ajuda na condução das análises de laboratórios e pela amizade.

Aos meus amigos do mestrado, em especial à Carol e ao Cadu por toda amizade e apoio fundamentais ao longo da execução deste estudo. À minha amiga Suane, por estar sempre presente, me apoiando e incentivando a cada passinho. A minha amiga Valeria e aos demais amigos que estiveram comigo, acreditando e torcendo por mim.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo por todo conhecimento transmitido.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao Centro de Ecologia da UFRGS por permitir a utilização laboratórios e equipamentos para a realização das análises biológicas. E aos integrantes do projeto Nexus que tiveram papel fundamental na execução deste estudo.

Ao CNPq pelo financiamento da bolsa. A todos, meu muito obrigada!

# QUALIDADE DO SOLO APÓS A CONVERSÃO DE CAMPOS NATIVOS PARA AGRICULTURA NO PAMPA<sup>1</sup>

Autora: Jéssica Maciel Machado

Orientador: Carlos Gustavo Tornquist

Co-Orientadora: Bruna Raquel Winck

## RESUMO

Mesmo apresentando aptidão natural para produção pecuária e outros usos da terra conservadores da biodiversidade campestre, os campos do Pampa vem sendo convertidos para usos intensivos como a sojicultura. A conversão de uso do solo pode alterar o equilíbrio ecossistêmico, levando a redução da qualidade do solo (QS). O objetivo deste estudo foi investigar os impactos causados pela mudança de uso da terra no bioma Pampa sobre a QS. Para isso, foram realizadas análises físicas: granulometria e densidade do solo, em seis profundidades amostrais; químicas: teores de C e N totais, estoques de C orgânico (ECOS) e estoques de N totais (ENTs); e biológicas: respiração basal do solo, carbono da biomassa ( $C_{mic}$ ), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e microbiano ( $qMic$ ), e atividade das enzimas urease e hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA), na profundidade de 0-5 cm. As amostras de solo foram coletadas em áreas de campo nativo e lavouras em sistema plantio direto, compondo um par (campo x lavoura). Estes pares estavam localizados em cinco sítios, Jarí, Alegrete, Santo Antônio das Missões, São Gabriel e Aceguá, situados no bioma Pampa. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou diferença significativa entre os usos do solo, apenas entre os sítios. Os valores médio de ECOS na área de campo nativo foi de 28,7; 48 e 63,7  $Mg\ ha^{-1}$  e em SPD 24,7; 43,1 e 59  $Mg\ ha^{-1}$ , nas profundidades de 0-10, 0-20 e 0-30, respectivamente. Quanto às análises biológicas, apenas o quociente microbiano do solo ( $qMic$ ) apresentou diferença estatística, nas áreas de campo o quociente observado foi de 3,42% e nas áreas em SPD de 2,55%. Demonstrando uma redução na eficiência de utilização do material orgânico aportado pelas comunidade microbianas presentes nas áreas que passaram pela conversão, bem como uma possível reação ao estresse provocado pela atividade agrícola. Embora não tenham sido verificadas diferenças significativas para os demais indicadores de QS analisados, foi possível verificar uma superioridade da atividade biológica das áreas de campo em comparação às áreas de lavoura. Especialmente para a respiração basal, que foi de 7.224,7  $mg\ CO_2.kg^{-1}$  em campo e 5.935,1  $mg\ CO_2.kg^{-1}$  em SPD, apresentando um  $qCO_2$  de 4,04 e 4,91  $mg\ CO_2.g^{-1}\ BMS-C.h^{-1}$ , respectivamente. Apesar de serem observadas diferenças pontuais entre sítios, a conversão de áreas de campo nativo em lavoura não provocou redução na qualidade do solo. Pelo índice de qualidade do solo foi verificada uma pequena redução de 7% da QS nas áreas convertidas, sendo os indicadores biológicos os mais sensíveis a mudanças no uso das terras.

Palavras-chave: Indicadores, mudança de uso da terra, manejo do solo

---

<sup>1</sup> 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, RS. (82p.) – Abril, 2021

## SOIL QUALITY AFTER THE CONVERSION OF NATIVE FIELDS FOR AGRICULTURE IN PAMPA<sup>1</sup>

Author: Jéssica Maciel Machado  
Adviser: Carlos Gustavo Tornquist  
Co-advisor: Bruna Raquel Winck

### ABSTRACT

Despite their natural suitability for livestock and other land uses that maintain rural biodiversity, fields in the Pampas have been converted to intensive uses such as soybean cultivation. Land use conversion can alter the balance of the ecosystem and lead to soil degradation (SQ). The objective of this study was to investigate the effects of land use change in the Pampa biome at QS. For this purpose, physical analyzes were performed: Granulometry and soil density at six sample depths; chemical analyzes: total C and N content, organic C stocks (ECOS) and total N stocks (ENTS); and biological analyzes: soil basal respiration, biomass carbon (Cmic), metabolic (qCO<sub>2</sub>) and microbial (qMic) quotients, and urease enzyme activity and fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis at 0-5 cm depth. Soil samples were collected in areas of native field and soybean in a no-till system that formed a pair (field x soybean). These pairs were located in five sites, Jarí, Alegrete, Santo Antônio das Missões, São Gabriel and Aceguá, located in the Pampa biome. None of the analyzed parameters showed a significant difference between land uses, but only between sites. The average ECOS values in the original field area were 28.7; 48 and 63.7 Mg ha<sup>-1</sup> and in the SPD 24.7; 43.1 and 59 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively at depths 0-10, 0-20 and 0-30. In the biological analyzes, only the soil microbial quotient (qMic) showed a statistical difference. In the field areas, the observed quotient was 3.42% and in the SDP areas it was 2.55%. This indicates a lower efficiency in the use of the organic material contributed by the microbial communities in the transformed areas, as well as a possible response to the stress caused by the agricultural activity. Although no significant differences were found in the other indicators analyzed QS, a superiority of the biological activity of the croplands compared to the soybean plots was demonstrated. This is especially true for basal respiration, which was 7224.7 mg CO<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup> in the field and 5935.1 mg CO<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup> in the SPD, corresponding to qCO<sub>2</sub> of 4.04 and 4.91 mg CO<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup> BMS-C.h<sup>-1</sup>, respectively. Despite occasional differences between sites, conversion of land from original grassland to soybean crops did not lead to soil quality degradation. Based on the soil quality index, a small decrease of 7% was observed on converted land at QS, with biological indicators being the most sensitive to changes in land use.

Keywords: Indicators, land use change, soil management.

---

<sup>1</sup>Master's Dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (39p.) April, 2021



## Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>14</b> |
| 2.1. Contexto agroambiental regional .....   | 16        |
| 2.2 Desafios para a manutenção dos ecossistemas naturais no Pampa  | 20        |
| 2.3 Qualidade do solo .....  | 22        |
| 2.3.1. Indicadores físicos de QS.....  | 23        |
| 2.3.2. Principais indicadores químicos de QS .....   | 24        |
| 2.3.3. Principais indicadores biológicos de QS.....  | 25        |
| 2.3.4. Índice de QS.....   | 26        |
| 2.4. Estudos de Qualidade do Solo no Pampa .....   | 27        |
| <b>3. HIPÓTESE.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>4. OBJETIVO.....</b>  | <b>31</b> |
| <b>5. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>32</b> |
| 5.1. Delineamento amostral .....   | 32        |
| 5.2. Caracterização granulométrica dos sítios amostrais .....  | 34        |
| 5.3. Preparo das amostras para análises físicas e químicas .....   | 39        |
| 5.4. Análises químicas e físicas do solo .....   | 39        |
| 5.4.1. Carbono orgânico do solo (COS) e Nitrogênio total<br>(NT) pelométodo de combustão por via seca .....        | 39        |
| 5.4.2. Biomassa de raíz.....   | 40        |
| 5.4.3. Densidade do solo.....  | 40        |
| 5.5. Análises microbiológicas.....   | 41        |
| 5.5.1. Coleta e Preparo das amostras .....   | 41        |
| 5.5.2. Respiração basal, quociente metabólico do solo<br>( $qCO_2$ ) e quocientemicrobiano do solo ( $qMic$ )..... | 41        |
| 5.5.3. Carbono microbiano ( $C_{mic}$ ).....   | 42        |
| 5.5.4. Atividade enzimática.....   | 42        |
| 5.5.4.1. Hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) .....  | 42        |
| 5.5.4.2. Urease.....   | 43        |
| 5.6. Índice de Qualidade do Solo (IQS) .....   | 43        |
| 5.7. Análises estatísticas .....   | 44        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>45</b> |
| 6.1. Densidade (Ds).....  | 45        |
| 6.2. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo.....  | 47        |
| 6.3. Estoques de C e N.....   | 49        |
| 6.4. Biomassa de raízes.....  | 53        |
| 6.5. Carbono da biomassa microbiana (Cmic).....   | 54        |
| 6.6. Respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico do solo (qCO <sub>2</sub> ) equociente microbiano do solo (qMic). ..... | 55        |
| 6.8. Análise de Correlação entre Indicadores de QS.....   | 62        |
| 6.9. Índice de qualidade do solo (IQS).....   | 64        |
| <b>7. CONCLUSÕES .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>67</b> |
| <b>APÊNDICES.....</b>   | <b>82</b> |

## RELAÇÃO DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Evolução da produção de soja e arroz e do número de bovinos no Rio Grande do Sul (1999-2019). Fonte: (IBGE, 2020a, 2020b). .....   | 18 |
| <b>Figura 2.</b> Histórico da cobertura e uso do solo no Bioma Pampa de 1985 a 2018. Fonte: Map Biomas, 2021. ....  | 19 |
| <b>Figura 3.</b> Demarcação dos sítios de coleta localizados em áreas de abrangência do Pampa no Rio Grande do Sul (delimitado em amarelo no mapa).....   | 33 |
| <b>Figura 4.</b> Localização dos pontos de coleta conforme RAPELD nos transectos. ....  | 34 |
| <b>Figura 5.</b> Esquema da coleta de amostras indeformadas de solo (0-30 cm) com anéis volumétricos. ....  | 34 |
| <b>Figura 6.</b> Estoques de COS acumulados por uso das terras em cada profundidade avaliada. <sup>ns</sup> : não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA. ....                  | 51 |
| <b>Figura 7.</b> Estoques de ENTS acumulados por uso das terras em cada profundidade avaliada. <sup>ns</sup> não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA. ....                   | 52 |
| <b>Figura 8.</b> Teores de carbono da biomassa microbiana em campo nativo e SPD. <sup>ns</sup> : não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA. ....                               | 55 |
| <b>Figura 9.</b> Respiração microbiana média acumulada em 93 dias de incubação do solo em áreas de campo e SPD. <sup>ns</sup> : não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA..... | 58 |
| <b>Figura 10.</b> Atividade da FDA por uso do solo. <sup>ns</sup> : não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.....   | 60 |
| <b>Figura 11.</b> Atividade da urease por uso do solo. <sup>ns</sup> : não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.....  | 61 |
| <b>Figura 12.</b> Teste de correlação de Pearson entre os indicadores de QS analisados.....   | 63 |
| <b>Figura 13.</b> Deterioração da QS pela conversão de campos em lavouras conforme Indicadores químico, físicos e biológicos agrupados. ....  | 65 |

## RELAÇÃO DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Principais indicadores físicos sugeridos para avaliação da Qualidade do solo. ....  | 24 |
| <b>Tabela 2.</b> Indicadores químicos sugeridos para avaliação da Qualidade do Solo.....   | 25 |
| <b>Tabela 3.</b> Principais indicadores biológicos sugeridos para avaliação da Qualidade do Solo. ....   | 26 |
| <b>Tabela 4.</b> Determinação das frações granulométricas do solo das áreas de campo nativo e no SPD por sítio e profundidade amostrada. ....                                    | 36 |
| <b>Tabela 5.</b> Análise textural das áreas de SPD e campo nativo por camada e sítio amostral. ....  | 38 |
| <b>Tabela 6.</b> Densidade do solo sob campo nativo (CN) e no SPD por camada e sítio. ....   | 46 |
| <b>Tabela 7.</b> Valores médios de teores de carbono orgânico do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras. ....                                      | 47 |
| <b>Tabela 8.</b> Valores médios de teores de nitrogênio total do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras. ....                                      | 48 |
| <b>Tabela 9.</b> Massa seca e C em raízes por sítio nos campos nativos. ....   | 53 |
| <b>Tabela 10.</b> Respiração basal do solo (RBS), Quociente metabólico (qCO <sub>2</sub> ), Carbono orgânico total (COT) e Quociente microbiológico (qMic) por uso do solo. .... | 58 |

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

|   |    |
|---|----|
| <b>Apêndice 1.</b> Teores de carbono e nitrogênio por sítio, camada e uso do solo.                                    | 82 |
| <b>Apêndice 2.</b> Teores de C e N das amostras destinadas as análises microbiológicas, por sítio e uso do solo. .... | 84 |
| <b>Apêndice 3.</b> Teores de areia, silte e argila por sítio, profundidade e uso do solo. ....                        | 87 |
| <b>Apêndice 4.</b> Análise de variância das análises físicas e químicas.....  | 91 |
| <b>Apêndice 5.</b> Análise de variância variáveis microbiológicas, modelo estatístico. ....                           | 92 |
| <b>Apêndice 6.</b> Dados meteorológicos referentes aos dias das amostragens de solo. ....                             | 93 |

## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais têm sido amplamente utilizados para obtenção de matéria prima, alimentos e energia, sendo estes necessários à sobrevivência e bem-estar da humanidade. No entanto, devido ao aumento da população mundial e demanda crescente desses recursos ofertados pelos ecossistemas, os sistemas de produção de alimentos tem se tornado cada vez mais intensificados. No Brasil, por exemplo, a agricultura passou de subsistencial e policultora à exportadora e altamente especializada, tendo como um de seus principais sistemas o monocultivo de grãos. Sendo um sistema de cultivo advindo da Revolução Verde, essas monoculturas têm como característica um grande aporte de insumos externos, tais como pesticidas, fertilizantes e o uso de sementes geneticamente modificadas, o que possibilitou a ascensão do país no mercado de exportação.

Segundo o Ministério da Agricultura (MAPA, 2019), estima-se que nos próximos 10 anos (2018/2019 e 2028/2029) as áreas destinadas à produção de grãos cresçam em 15,3% no Brasil, passando de 62,8 para 72,4 milhões de hectares cultivados, sendo a soja o principal responsável por este crescimento. No Rio Grande do Sul, mais especificamente sobre o bioma Pampa, a supressão dos campos naturais para o cultivo da soja é uma realidade há décadas. Observa-se uma tendência de que a expansão da soja ocorra principalmente sobre estas pastagens naturais, uma vez que este cultivo tem sido mais rentável em curto prazo quando comparado com a produção pecuária. Por sua vez, a conversão do Pampa em soja vem acompanhada da perda de biodiversidade e eminente degradação do ecossistema.

O Pampa passou a ser reconhecido oficialmente como um bioma apenas em 2004. Detentor de grande biodiversidade de flora e fauna e com grande número de espécies endêmicas, este bioma ocupava inicialmente uma área de aproximadamente 178.000 km<sup>2</sup> (± 64% do RS). Atualmente, restam cerca de 36 % de vegetação campestre no bioma, sendo as demais áreas já

convertidas para lavouras e silvicultura.

Frente ao cenário atual e da perspectiva do aumento das áreas destinadas a monocultivos, as discussões sobre sustentabilidade começaram a tomar força, mobilizando pesquisadores e instituições preocupadas com a manutenção do equilíbrio ambiental. Entre os diversos compartimentos do ecossistema, este trabalho teve o solo e seus componentes como objeto de estudo. O solo atua direta e indiretamente na regulação e suporte de serviços ecossistêmicos. Um solo funcional pode assegurar não apenas a qualidade de outros compartimentos do ecossistema, como também garantir a rentabilidade dos cultivos e da soberania alimentar de um país.

Diante de tamanha importância ecológica e social, a qualidade do solo (QS) tem sido alvo de diversos estudos ao longo das últimas décadas. Preocupados com o uso sustentável deste recurso natural, pesquisadores vêm buscando atributos simples e práticos capazes de monitorar as mudanças provocadas por ações antrópicas. Apesar de ser uma busca constante, não se tem um conjunto universal de atributos químicos, físicos e biológicos a serem empregados na avaliação da QS. Entretanto, alguns deles são utilizados com maior frequência pelos pesquisadores da área, como densidade do solo, capacidade de retenção e infiltração de água no solo, textura, teores de C e N orgânico total, condutividade elétrica, pH, N potencialmente mineralizável, respiração basal e quociente metabólico do solo ( $qCO_2$ ), entre outros. O conjunto de atributos escolhidos deve permitir mensurar o impacto das atividades desenvolvidas sobre a QS em questão, podendo esta ser entendida como a capacidade do solo em exercer suas funções naturais. A obtenção de parâmetros que quantifiquem a QS pode servir como um critério para a adoção de práticas conservacionistas ou até mesmo o desenvolvimento de políticas públicas que preconizem a conservação deste recurso. Neste caso, servindo como uma forma de avaliar os impactos provocados pela mudança de uso da terra. Uma vez que as alterações das condições naturais do ecossistema pode provocar consequências negativas, afetando o funcionamento do sistema solo e ameaçando a sustentabilidade da atividade agrícola em longo prazo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Contexto agroambiental regional

Tendo como principal objetivo o aumento da produção de alimentos, a Revolução Verde trouxe para a agricultura um novo modelo de produção, disponibilizando uma série de insumos e tecnologias que proporcionaram a expansão e a implantação de lavouras em monocultivo (ALBERGONI; PELAEZ, 2007). Entre 1970 e 1985 houve um aumento de 20% na produção de alimentos destinados à alimentação humana, enquanto que produtos destinados à exportação, principalmente grãos, cresceu na ordem de dez vezes. Assim, o Brasil saiu do posto de importador para figurar entre os maiores exportadores de produtos agrícolas mundiais (VIEIRA FILHO; GASQUES, 2016). Esta rápida expansão de áreas destinadas a monocultivos, em especial da soja, tem causado a modificação das paisagens naturais do país. A exemplo do Bioma Pampa, tradicionalmente conhecido por seus campos destinados à criação pecuária de gado bovino e ovino, vem passando por modificações produtivas e socioeconômicas provocadas pela expansão das lavouras anuais (MOREIRA, 2019).

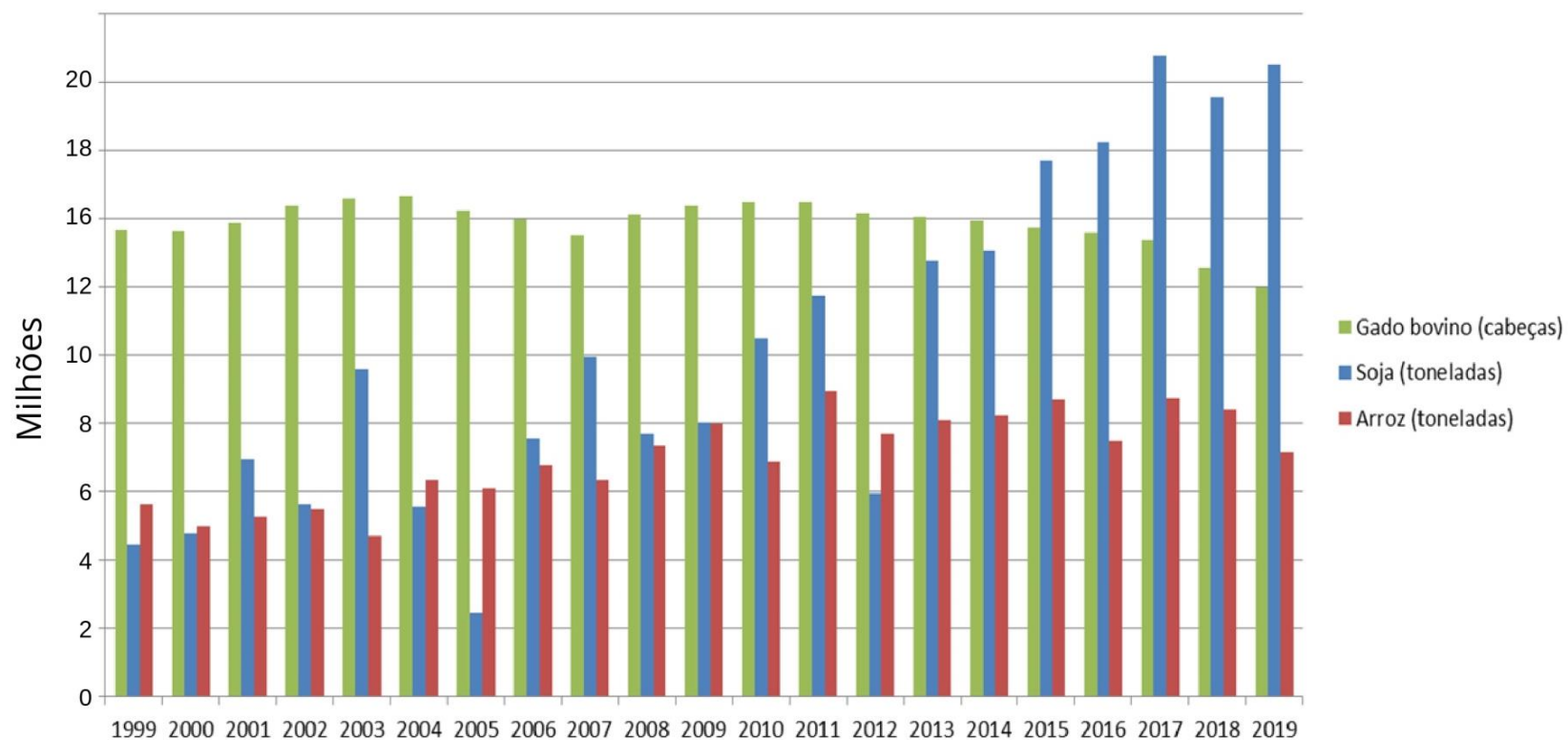
Ainda na década de 1970, a sojicultura ganhou destaque, tendo uma enorme expansão do número de áreas agrícolas destinadas ao seu cultivo, bem como no incremento de sua produtividade, consolidando a produção deste grão como principal produto do agronegócio nacional (DALL'AGNOL *et al.*, 2007). Entre os anos de 2000 e 2015 a produção de soja no Rio Grande do Sul apresentou um crescimento de 188,5% (TATIANA MORA KUPLICH; CAPOANE; COSTA, 2018). Na safra de 2019, 5.843.533 ha foram destinados à cultura no estado (Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Soja (em grão); Arroz (em casca) . Área plantada (Hectares). IBGE, 2020).

O aumento produtivo deste cultivo, destinado em sua grande maioria à exportação, influenciou não somente o setor agrícola, mas todo o contexto econômico, social e ambiental do país. A busca por maiores produções exigiu

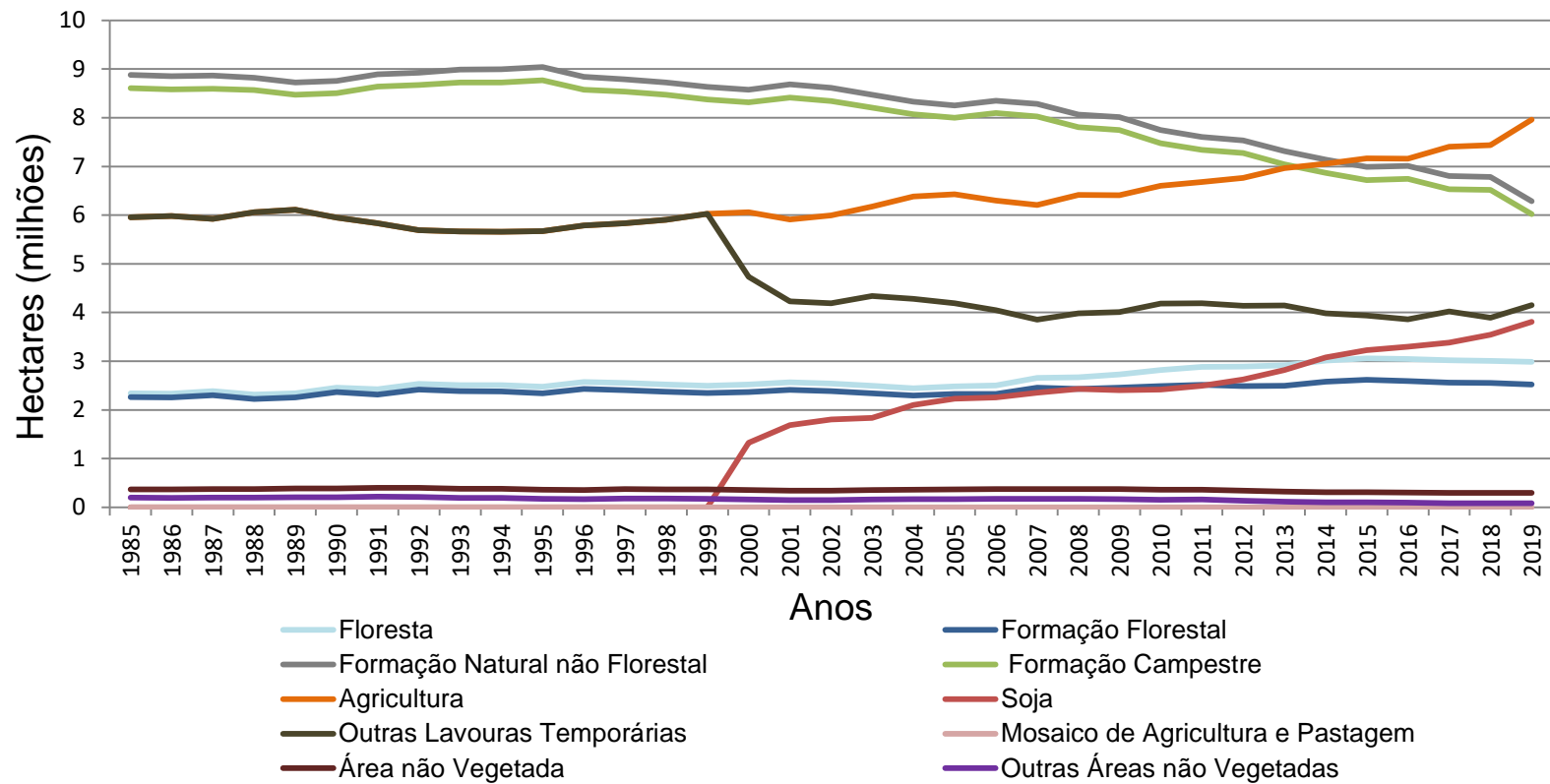


que novas terras agriculturáveis fossem incorporadas, ampliando as fronteiras agrícolas (BARROS *et al.*, 2020; VICENTE *et al.*, 2021; WESZ JUNIOR *et al.*, 2021). Com isso, áreas anteriormente destinadas à pecuária e lavouras de arroz, localizadas em maior proporção na metade Suldo estado, estão sendo substituídas gradualmente pela soja (TATIANA MORA KUPLICH; CAPOANE; COSTA, 2018). Em vinte anos (1999 a 2019), a quantidade de soja produzida no Rio Grande do Sul mais do que quadruplicou, passando de 4.467.110 para 18.498.119 toneladas (Figura 1). No bioma Pampa, a área destinada à agricultura cresceu de 6.059.445,78 ha para 7.961.778,49 ha entre os anos de 2000 e 2019. Neste mesmo período o cultivo da soja foi de 1.325.042,68 para 3.810.503,37 ha, havendo uma redução das áreas de formação campestre, que passaram de 8.314.693,51 para 6.018.016,03 ha, segundo levantamento do MapBiomas (2020) (Figura 2). Tornando-se evidente a expansão das lavouras de soja sobre os campos nativos do bioma Pampa.

O Pampa se estende por três países da América Latina, Argentina, Brasil e Uruguai. No Brasil, está presente apenas no Rio Grande do Sul, ocupando aproximadamente 63% do território do estado (SUERTEGARAY; SILVA, 2009). Sua vegetação consiste num mosaico campo-floresta, composto por diferentes fisionomias campestres, matas ciliares de galeria, capões de mato e matas de encostas (CORDEIRO; HASENACK, 2009). É constituído por ecossistemas naturais de grande diversidade de espécies, sendo muita delas endêmicas deste bioma (OVERBECK *et al.*, 2009). Segundo Boldrini *et al.* (2010) ocorrem mais de 2.200 espécies campestres, em sua maioria gramíneas e leguminosas. Apesar de pouco explorada, a biodiversidade florística do bioma constitui um riquíssimo patrimônio genético, agora ameaçado pela expansão de monocultivos. Além disso, as gramíneas, dominante nessas comunidades vegetais campestres, apresentam elevado valor forrageiro, possibilitando uma pecuária sustentável e assegurando a preservação dos campos nativos (CASTILHOS; MARCELO; PINTO, 2009).



**Figura 1.** Evolução da produção de soja e arroz e do número de bovinos no Rio Grande do Sul (1999-2019). **Fonte:** (Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Soja (em grão); Arroz (em casca) . Área plantada (Hectares).IBGE, 2020; Efetivos dos rebanhos2020).



**Figura 2.** Histórico da cobertura e uso do solo no Bioma Pampa de 1985 a 2018. **Fonte:** MapBiomias, 2021.

## 2.2 Desafios para a manutenção dos ecossistemas naturais no Pampa

No Pampa brasileiro, há cerca de 2.200 espécies de plantas, deste total, estima-se que 213 espécies, pertencentes a 23 famílias, estão sob ameaça de extinção, sendo 146 endêmicas do Pampa (BOLDRINI, 2009; PILLAR *et al.*, 2009). A principal causa da perda de espécies é a expansão da agricultura sobre os ecossistemas naturais, como vem ocorrendo também em outras regiões do Brasil (DOBROVOLSKI *et al.*, 2011). Nas últimas três décadas, cerca de 25% das áreas originalmente cobertas por campos nativos foram convertidas em plantações de soja, milho e pela silvicultura (OVERBECK *et al.*, 2009). Além da soja, a rizicultura, principalmente a partir da década de 60, foi um dos monocultivos de grande expansão sob os campos nativos inundáveis e banhados no Pampa (GOMES; MARTINS, 2004). Na safra de 2019, a área destinada ao cultivo no bioma foi de 982.886 ha (Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Soja (em grão); Arroz (em casca) . Área plantada (Hectares).IBGE, 2020). Além dos problemas causados pela conversão, o uso de agroquímicos na agricultura pode provocar a contaminação dos recursos hídricos adjacentes, afetando toda a biota local (OVERBECK *et al.*, 2009).

Assim como na agricultura, nas últimas décadas a silvicultura tem recebido incentivos, principalmente para a produção de celulose. Inicialmente, campos foram convertidos em plantações de *Pinus sp.* nos Campos de Cima da Serra, por apresentarem uma alternativa de maior retorno financeiro ao pecuarista (OVERBECK *et al.*, 2009). Mas recentemente, a partir de 2004, empresas florestais instalaram-se no Sul do RS (SILVA, 2012), promovendo a silvicultura com eucalipto (SUERTEGARAY e SILVA, 2009). De acordo IBGE (2020c) a área destinada ao cultivo de pinus e eucalipto no Pampa foi de 303.987 e 607.618 ha, respectivamente.

A expansão da conversão dos campos nativos do Pampa pode ser explicada em parte pela pouca importância e atenção dada à conservação de ecossistemas não florestais, os quais abrangem extensas áreas do território brasileiro, como os campos (OVERBECK *et al.*, 2015).

Os serviços ecossistêmicos são também afetados pelas modificações de uso das terras (BUNEMANN et al., 2018). Estes podem ser entendidos como a obtenção, pelos seres humanos, de benefícios diretos e indiretos a partir dos ecossistemas naturais (VEZZANI, 2015). Os ecossistemas campestres no Pampa provisionam serviços ecossistêmicos importantes, tais como a proteção do solo, conservação de recursos hídricos, mitigação de mudanças climáticas pela manutenção de estoques de carbono, manutenção da biodiversidade, além da provisão de alimento, em particular forragem para a pecuária. No entanto, estes serviços estão ameaçados pela crescente conversão em cultivos de grãos e o plantio de madeira para obtenção de celulose. Além disso, essa perda da vegetação nativa provoca a descaracterização das paisagens campestres, influenciando não somente o contexto econômico e ecológico, mas também a cultura e as tradições regionais (BOLDRINI, 2009).

De outra parte, muitos estudos têm mostrado que o manejo racional das áreas de campo nativo, por exemplo, com ajuste da carga animal, permite conduzir a pecuária de forma sustentável, mantendo a integridade do bioma e preservando seus serviços ecossistêmicos (CASTILHOS; MARCELO e PINTO, 2009). Além disso, há evidências de que o sistema pastoril desenvolvido sob os campos nativos do sul do Brasil mantém importantes estoques de carbono no solo (PILLAR; TORNQUIST; BAYER, 2012), por atuar como um dreno de CO<sub>2</sub>, sobretudo em intensidades baixas e moderadas de pastejo ou em áreas sem pecuária (NICOLOSO et al., 2008; TORNQUIST e BAYER, 2009).

A expansão das lavouras anuais, especialmente para cultivo da soja, sobre campos nativos tem dividido opiniões e gerado incertezas também entre os pecuaristas. Apesar de ser uma atividade rentável em curto prazo, há uma preocupação crescente sobre os impactos desta conversão de uso da terra. Entre os pecuaristas, a principal questão é a perda da biodiversidade de espécies forrageiras e os impactos negativos do uso de agrotóxicos na qualidade do solo e saúde a população rural (MATTE; WAQUIL, 2020).

### 2.3 Qualidade do solo

O debate sobre a qualidade do solo (QS) se iniciou na década de 1990, ganhando espaço no meio científico nas últimas décadas. Diante da preocupação crescente com a degradação dos recursos naturais, busca por uma agricultura mais sustentável e a manutenção das funções básicas do solo, tem havido incremento nas publicações científicas sobre o tema (SILVA, M. de O. *et al.*, 2020; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Nesse contexto, o solo passou a ser visto não apenas como um meio para a produção de alimentos e fibras, mas um componente central na manutenção da qualidade ambiental (DORAN; PARKIN, 1994). O solo de fato é considerado um importante regulador de processos para a provisão e o suporte de serviços ecossistêmicos (ALMEIDA, 2019; TURETTA; CASTRO; POLIDORO, 2017).

O termo qualidade do solo foi primeiramente referido pelo pesquisador Mause (1971), sendo definido basicamente como a capacidade do solo em produzir. Mais tarde, na década de 1990, com a intensificação das discussões sobre o tema, autores começaram a questionar o termo QS. Neste período surge então a denominação “Saúde do Solo” e o debate científico entre a correta utilização destes termos (BUNEMANN *et al.*, 2018). Ao analisarem as diferentes definições de “Qualidade do solo” e “Saúde do solo” ao longo dos anos, Bunemann *et al.* (2018) concluíram que são equivalentes, sendo sua utilização muito mais uma questão de preferência do que de princípios. Ainda nesta década, foram propostas diferentes definições de QS. Para Doran e Zeiss (2000), a QS pode ser compreendida como a capacidade que este tem de funcionar como um sistema vital, capaz de sustentar a produtividade e a saúde das plantas e dos animais, além de proporcionar a manutenção ou a melhoria da qualidade da água e do ar. Em termos mais simples, a QS pode ser definida como “a capacidade do solo em funcionar”, como definido em 1995 pelo *Agronomy News* (KARLEN *et al.*, 1997).

QS está estritamente ligada ao desenvolvimento sustentável da agricultura e reflete a produtividade do agroecossistema (DUBEY *et al.*, 2019). A demanda crescente por produtos agrícolas tem gerado uma pressão exacerbada sob os ecossistemas naturais. Havendo a necessidade de se

atingir um equilíbrio entre a preservação da biodiversidade de ambientes naturais e o aumento das áreas de produção agrícola, essencial para suprir a demanda por alimentos (MILHEIRAS *et al.*, 2022). A avaliação de sustentabilidade do uso da terra é baseada em cinco pilares: produtividade do sistema, qualidade do que é produzido, proteção, viabilidade e acessibilidade (SMYTHL; DUMANSKI, 1995). Todos estes pilares têm como objetivo promover o desenvolvimento da agricultura, mas manter a qualidade do solo. Uma vez que, o solo pode ser considerado como um dos principais componentes na manutenção da qualidade ambiental a níveis locais e globais (DALMOLIN; CATEN, 2012).

A qualidade do solo pode ser avaliada ao longo do tempo por um conjunto de atributos físicos, químicos e biológicos, podendo servir como indicador para avaliação e monitoramento do manejo do solo (DORAN, 2002). Quando aplicados de forma sistêmica, a avaliação de indicadores de QS torna-se uma importante ferramenta para determinar os impactos ambientais provocados pela ação antrópica (KARLEN *et al.*, 1997).

Neste sentido, um bom indicador deve apresentar as seguintes características: ser economicamente acessível, de fácil execução, refletir o funcionamento do ecossistema e ser sensível a alterações provocadas pelo manejo adotado (SILVA, M. de O. *et al.*, 2020). Estes indicadores podem ser agrupados em três grandes grupos: físicos, químicos e biológicos (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

### **2.3.1. Indicadores físicos de QS**

As propriedades físicas do solo estão envolvidas em importantes processos, como armazenamento de água, trocas gasosas com o meio atmosférico, suprimento de nutrientes, suporte ao crescimento radicular e a atividade microbológica (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Desempenham influência fundamental nos processos hidrológicos e são essenciais para manutenção da qualidade do solo, como taxa de infiltração, escoamento superficial e drenagem (GOMES e FILIZOLA, 2006). Entre os indicadores empregados e mais recomendados no contexto de avaliação de QS, destacam-se a textura, a densidade, a resistência à penetração, a

porosidade, a capacidade de retenção de água, a condutividade hidráulica, a estabilidade dos agregados, a profundidade do solo e raízes, e a temperatura do solo (ARAÚJO et al., 2012; DORAN e PARKIN, 1994) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Principais indicadores físicos sugeridos para avaliação da Qualidade do solo.

| Indicadores Físicos               | Métodos mais empregados                                  |
|-----------------------------------|--|
| Textura                           | Método da pipeta ou<br>Densímetro                        |
| Resistência à<br>Penetração       | Método do penetrômetro                                   |
| Porosidade total                  | Saturação do solo  |
| Capacidade de retenção de<br>água | -  |
| Densidade                         | Método do anel<br>Volumétrico                            |
| Infiltração                       | Método do infiltrometro<br>de anel                       |
| Profundidade do solo e raízes     | Extração/escavação ou<br>Método dos torrões indeformados |
| Estabilidade dos<br>Agregados     | Via úmida  |
| Temperatura                       | Termômetro manual  |

### 2.3.2. Principais indicadores químicos de QS

As propriedades químicas do solo são altamente influenciadas pela vegetação presente, podendo ser rapidamente comprometidas por processos de degradação e pelo uso e manejo do solo (TELLEN; YERIMA, 2018). Dentre as principais modificações que podem ocorrer em solos cultivados, temos o aumento do pH e da disponibilidade de nutrientes em decorrência da aplicação de calcário e fertilizantes (GOLDIN e LAVKULICH, 1988). A matéria orgânica do solo tem sido sugerida como um excelente indicador de QS, por desempenhar funções essenciais como fonte energética e de nutrientes para organismos, melhoria na estruturação do solo, capacidade de armazenamento de água, ciclagem de nutrientes e poder de tamponamento (DE-POLLI; PIMENTEL, 2005; CONCEIÇÃO et al., 2005; GOMES e FILIZOLA, 2006). Além



da matéria orgânica, indicadores químicos como o pH do solo, a disponibilidade de nutrientes, os estoques de C e N, a condutividade elétrica, e a presença de elementos fitotóxicos, como  $Al_3^+$ , tem sido sugeridos na literatura (DORAN; PARKIN, 1994; ARAÚJO et al., 2012) (Tabela 2).

**Tabela 2.** Indicadores químicos sugeridos para avaliação da Qualidade do Solo.

| Indicadores químicos           | Métodos mais empregados                  |
|--------------------------------|--|
| pH                             | pH em água                               |
| Disponibilidade de Nutrientes  | K e P Mehlich 1; Ca, Mg<br>KCl 1M        |
| Capacidade de troca de cátions | Cálculo CTC =<br>Soma de bases+(H+Al)    |
| Carbono orgânico               | Digestão úmida com dicromato de potássio |
| C e N totais                   | Oxidação por via seca ou úmida           |
| Condutividade elétrica         | Condutímetro                             |
| N mineral                      | Kjeldahl                                 |

### 2.3.3. Principais indicadores biológicos de QS

Os organismos edáficos, por desempenharem atividades metabólicas e bioquímicas no solo, apresentam grande sensibilidade às mudanças ocorridas no sistema, apresentando-se como um excelente indicador de QS (LIU *et al.*, 2018; MAHARJAN *et al.*, 2017). No solo, estes microrganismos desempenham papéis essenciais, como decomposição da matéria orgânica, produção de húmus, fixação biológica de nitrogênio, degradação de compostos tóxicos, ciclagem de nutrientes e armazenamento de energia (FENG *et al.*, 2017; GRZADZIEL, 2017; XU *et al.*, 2018). Sendo um dos indicadores mais utilizados, a biomassa microbiana, além de desempenhar funções essenciais no solo, representa ainda uma reserva de nutrientes. Suprindo as necessidades metabólicas de diferentes organismos que

compõem o ecossistema ao longo de seus ciclos (GREGORICH *et al.*, 1994). Outros indicadores microbiológicos aplicados na determinação da QS são a respiração basal do solo, o coeficiente metabólico, o N potencialmente mineralizável, e a atividade enzimática de microrganismos (DORAN e PARKIN, 1994; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Principais indicadores biológicos sugeridos para avaliação da Qualidade do Solo.

| Indicadores biológicos                                   | Métodos mais empregados        |
|--|--------------------------------|
| Carbono da biomassa                                      | Fumigação por Clorofórmio      |
| Nitrogênio potencialmente Mineralizável                  | Incubação anaeróbica           |
| Respiração basal   | Respirometria                  |
| Coeficiente metabólico                                   | Respiração basal/C da Biomassa |
| Atividade enzimática: $\beta$ -glucosidase, uréase e FDA | -                              |

#### 2.3.4. Índice de QS

A QS pode ser matematicamente explicitada utilizando índices (KAZMIERCZAK, 2018). Um índice consiste em alguma forma de agregação dos diferentes indicadores selecionados (NESS *et al.*, 2007), sendo que a cada um desses pode ser atribuído um peso de acordo com sua maior ou menor relevância para a análise (Karlen e Stott, 1994). Na literatura, diferentes índices são reportados para quantificação da QS, escolhidos de acordo com o objetivo do estudo. Velasquez, Lavelle e Andrade, (2007) propuseram o “General Indicator of Soil Quality” (GISQ) que integra indicadores para gerar um índice que varia entre 0,1 e 1,0. A construção do índice é baseada em uma sequência de análises de componentes principais para cada grupo de variáveis analisadas, com o objetivo de identificar aquelas que melhor explicam a variabilidade dos dados. A partir disto, subindicadores são calculados, constituídos por um conjunto de atributos, qualidade física do solo, fertilidade, matéria orgânica, morfologia e macrofauna do solo, com valores entre 0,1 e

1,0. Estes subindicadores são combinados em um índice geral de QS variando entre 0,1 e 1,0. Adejuwon e Ekanade (1988) propuseram um “Índice de deterioração do solo” a fim de avaliar os impactos no solo da conversão da vegetação nativa em cultivos agrícolas. Posteriormente, Islam e Weil (2000) utilizaram este mesmo índice com o objetivo de avaliar as alterações na QS em floresta tropical convertida para pastagens e silvicultura. Os autores partiram do pressuposto de que os solos que passaram por processos de conversão apresentavam, antes da conversão, as mesmas propriedades químicas, físicas e biológicas, de solos adjacentes sob vegetação natural. Sendo assim, o sistema natural é empregado como referência (recebendo IQS de 1) e o IQS da área convertida é calculada pela diferença entre os valores dos indicadores de qualidade do solo destes dois ecossistemas. No Brasil, diversos autores já empregaram de forma eficiente deste índice para avaliar QS em áreas de vegetação natural convertida a diferentes usos (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007; FREITAS *et al.*, 2012).

Dentre os índices desenvolvidos mais recentemente, o “Soil Management Assessment Framework” (SMAF), criado nos Estados Unidos, tem sido empregado para quantificação das alterações na QS de solos submetidos a diferentes usos e práticas agrícolas (ANDREWS *et al.*, 2002; CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017). No SMAF, cada atributo referente a propriedades físicas, químicas e biológicas do solo recebem notas que variam de 0 a 1, desenvolvendo-se uma curva de pontuação para cada indicador (CHERUBIN *et al.*, 2017). Em solos brasileiros o primeiro estudo publicado sobre a aplicação do SMAF foi realizado por Cherubin *et al.*, (2016), tendo os autores concluído que o SMAF se mostrou uma ferramenta eficiente na determinação da QS no RS. Mais recentemente, Rieth, (2019) investigou as alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo sob diferentes usos e a viabilidade de utilização da metodologia SMAF no RS, com conclusões similares.

#### **2.4. Estudos de Qualidade do Solo no Pampa**

Como já discutido, a preocupação com a conservação do Pampa é recente e, conseqüentemente, são poucos os estudos que avaliem os impactos das mudanças de uso e cobertura da terra, em especial da expansão da

agricultura nestas áreas e como influenciam na QS.

Conceição et al., (2005) avaliaram a matéria orgânica do solo e seus atributos como indicador de QS. O experimento consistiu na comparação entre três sistemas de manejo, convencional (PC), reduzido (PR) e plantio direto (PD), combinados com diferentes cultivos e duas doses de adubação nitrogenada. Uma área de campo nativo foi utilizada como referência. Para os três sistemas de manejos testados, houve alteração da QS, sendo o COT e NT os mais eficientes e evidenciar tais alterações.

Ao analisar diferentes atributos biológicos, como atividade enzimática, atividade respiratória e biomassa microbiana, Lisboa et al. (2012) compararam a influencia dos sistemas de manejo sobre a QS: sistema plantio direto e convencional, combinados com pousio de inverno e duas rotações, e o campo nativo sendo a área de referência de qualidade. O sistema plantio convencional apresentou os menores valores de atividade enzimática, biomassa e respiração microbiana em comparação ao plantio direto e campo nativo. Estes últimos apresentarem resultados semelhantes para todas as avaliações, havendo ligeiro aumento das taxas em alguns dos atributos quando em campo nativo. Quanto aos sistemas de culturas, não foi verificada influencia significativa nos parâmetros de QS avaliados.

Morais et al., (2021), ao comparar a QS após conversão de campo nativo para silvicultura com eucalipto, não verificaram alterações dos estoques totais de carbono (COT). Também não foi verificada diferença na atividade biológica e biomassa microbiana dos solos estudados, sendo as taxas de emissão de CO<sub>2</sub> muito semelhantes entre os dois usos das terras, bem como entre classes de solo.

Comparando três diferentes níveis de pressão de pastejo, alta (HP), moderada (MP) e baixa (LP), tendo o campo nativo como área de referência, Vargas (2014), avaliou o impacto dos sistemas pastoris sobre a QS, com ênfase em atributos microbiológicos. Verificou que as maiores intensidades de pastejo MP e HP favoreceram a microbiota do solo, aumentando a biomassa microbiana e atividade enzimática. Já as comunidades bacterianas foram afetadas positivamente na LP, havendo maior diversidade de espécies diazotróficas neste manejo de pastagem.

SILVA et al. (2020a) avaliou dois sistemas de pastejo, contínuo e

rotativo Voisin sobre campo nativo, usando atributos físicos e biológicos para avaliar a QS. No sistema Voisin, foi verificado um aumento do pH e CTC do solo, bem como a matéria orgânica, disponibilidade de K, Ca, Mg, a partir do segundo ano de adoção deste sistema em relação ao contínuo. O sistema Voisin também aumentou os teores de N e carbono orgânico, e reduziu a relação C/N. Apresentou ainda uma redução dos teores de Al e H+Al a partir do segundo ano. Nas avaliações microbiológicas foi verificada a duplicação das comunidades de ácaros e colêmbolos quando no sistema Voisin. Não foi verificada alterações significativas nos índices de uniformidade, diversidade e similaridade destas populações nos sistemas pastoris avaliados.

Em propriedades de agricultura familiar sob Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária, Kunde et al., (2018) avaliaram quais os atributos químicos, físicos e biológicos seriam mais eficientes na determinação de QS. No total, foram utilizados 12 indicadores, sendo a matéria orgânica o mais responsivo, evidenciado pela aplicação de análise fatorial. Este fator foi constituído por C orgânico total e N total, C da fração particulada e associada aos minerais, C da biomassa e respiração basal do solo, C da fração leve livre, oclusa e da fração pesada.

Rieth (2019) investigou solos sob mata e campos nativos, pastagens e lavouras de soja em três municípios do RS, dois deles no bioma Pampa. Foi evidenciado que monocultivo de soja e pastagem cultivada provocaram alterações negativas na qualidade física do solo, ao mesmo tempo em que favoreceram propriedades químicas. Na maior parte dos casos, a mata nativa apresentou QS superior aos demais usos de solo.

Esses resultados sugerem que uma abordagem de avaliação da QS usando atributos físicos, químicos e biológicos, e uma integração para síntese destas observações, possibilitaria entender o impacto da conversão de campos nativos do Pampa em lavouras anuais.

### **3. HIPÓTESE**

A conversão dos campos do bioma Pampa em lavouras sob sistema plantio direto (SPD) afeta negativamente a qualidade do solo por provocar alterações no ecossistema, principalmente perda da biodiversidade, causando redução das funções bioquímicas e conseqüentemente afetando os demais atributos do solo.

#### **4. OBJETIVO**

Avaliar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo a fim de comparar os efeitos da conversão de campos nativos para lavouras anuais de soja/aveia/zevém em sistema plantio direto no bioma Pampa do Rio Grande do Sul sobre a qualidade do solo.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

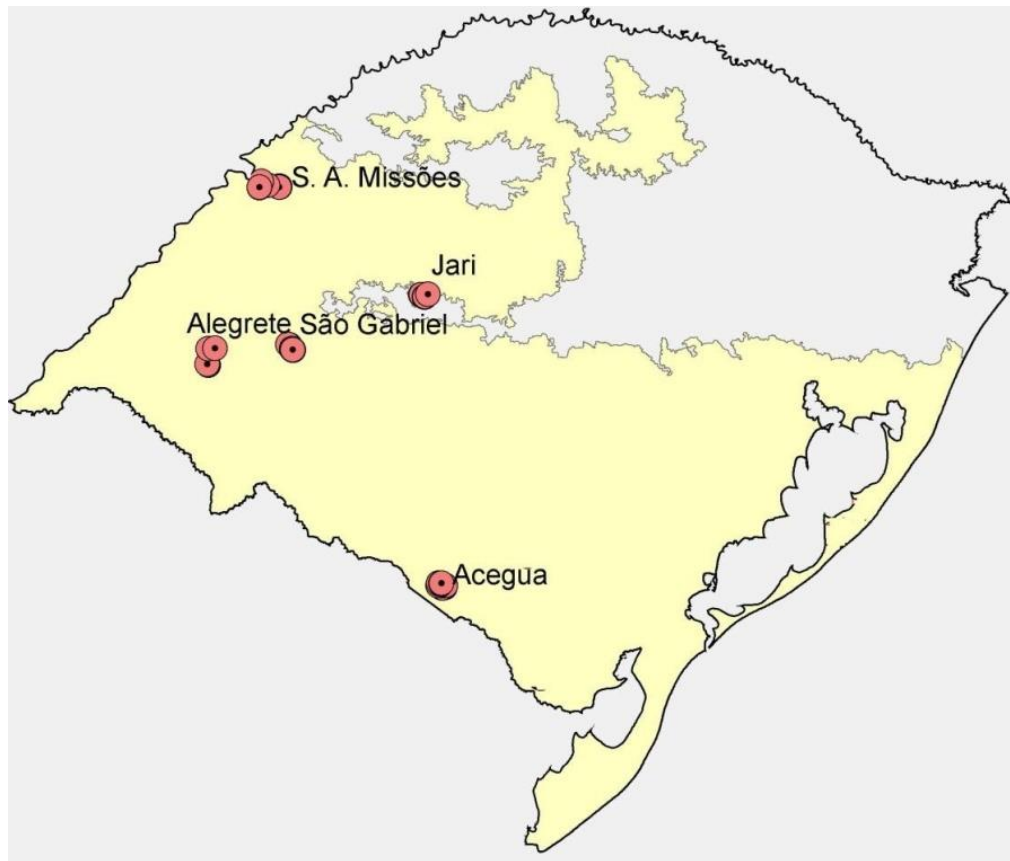
Este estudo está vinculado a um projeto mais amplo, em atendimento à Chamada MCTI/CNPq nº 20/2017-Nexus II, intitulado de “Cenários de Conversão da Vegetação Nativa e a Sustentabilidade de Agroecossistemas no Bioma Pampa”, coordenado pelo Prof. Valério De Patta Pillar, do Departamento de Ecologia da UFRGS. Nesse contexto, alguns aspectos fundamentais de projeto como os sítios de amostragem já haviam sido pré-selecionados, havendo intenção de integrar os resultados deste estudo no contexto das outras avaliações realizadas.

### **5.1. Delineamento amostral**

O estudo foi realizado em cinco sítios localizados no bioma Pampa (municípios de Aceguá, Alegrete, Jari, Santo Antônio das Missões e São Gabriel) (Figura 3). Estes sítios foram estabelecidos quando proposição do Projeto Nexus II utilizando como critério central as diferentes fisionomias da vegetação campestre neste bioma como descritas por Andrade et al., (2019).

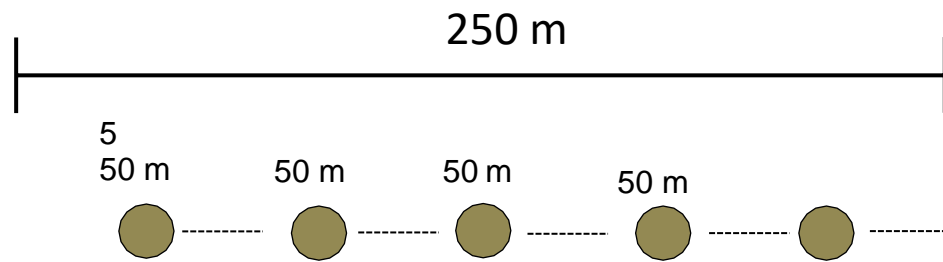
Estes sítios abrangeram parcelas pareadas: áreas de campos nativos com pecuária extensiva e campos convertidos em sistema de cultivo plantio direto (SPD), sendo a soja a cultura comercial de verão e no período de inverno gramíneas (como aveia e azevém), utilizadas como planta de cobertura. As coletas foram realizadas após a colheita da soja, entre os meses março a setembro, estando os cultivos de inverno já estabelecidos na maioria dos sítios amostrados. Cada par, campo e SPD, foram coletados ao mesmo tempo, afim de manter as mesmas condições climáticas e reduzir a influencia de fatores aleatórios no momento da amostragem. As parcelas pareadas foram selecionadas mantendo-se a máxima similaridade edáfica e geomorfológica, estabelecidas de acordo com proposição do sistema RAPELD.



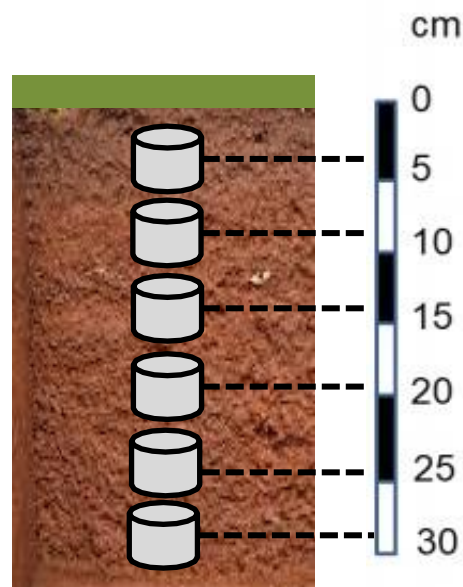


**Figura 3.** Demarcação dos sítios de coleta localizados em áreas de abrangência do Pampa no Rio Grande do Sul (delimitado em amarelo no mapa).

(MAGNUSSON *et al.*, 2005), minimizando as variações nos fatores abióticos, especialmente as variações de solo e relevo. As unidades amostrais foram delineadas como polígonos longos e estreitos, com 250 m de comprimento, mantendo aproximadamente a mesma cota no terreno. A coleta das amostras nas unidades amostrais foi realizada em cinco pontos, espaçados aproximadamente 50 m (Figura 4). 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 5), sendo essas amostras compostas no campo para obtenção de uma amostra, por profundidade, para cada parcela.



**Figura 4.** Localização dos pontos de coleta conforme RAPELD nos transectos.



**Figura 5.** Esquema da coleta de amostras indeformadas de solo (0-30 cm) com anéis volumétricos.

## 5.2. Caracterização granulométrica dos sítios amostrais

A análise granulométrica foi realizada preliminarmente para avaliar a similaridade entre as parcelas amostradas, de forma a confirmar a homogeneidade entre os pares “campo x SPD” previamente definidos pela equipe do projeto Nexus (Tabelas 4 e 5). A determinação expedita das classes de solo foi realizada por meio de consultas ao mapa de solos do RS (IBGE, 2017) e por observações complementares realizadas no momento da amostragem. A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método do densímetro (PAULO CÉSAR *et al.*, 2017).

Os sítios de Alegrete e São Gabriel apresentaram as maiores proporções de areia, variando de 69 a 89% da granulometria destes solos,

apresentando classe textural “franco-arenosa” a “areia”. O percentual foi ligeiramente maior nos sítios de São Gabriel, em campo natural, sendo enquadrado na classe textural “areia” (Tabela 4). Estes solos foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho Amarelo, respectivamente (Tabela 5).

Aceguá, Jarí e Santo Antônio das Missões apresentaram classe textural variando de “franco-argilosa” a “muito-argilosa”. Nestes sítios os teores de argila variaram de 43 a 64%, sendo os valores mais altos verificados em Jarí, nas áreas de SPD, sendo classificado como “muito argiloso” nas camadas de 10 a 25 cm de profundidade (Tabela 4). Estes solos foram classificados como Chernossolo Ebânico Carbonático vértico, Argissolo Vermelho-amarelo distrofico, Neossolo Litólico distroúmbrico e Nitossolo Vermelho Eutroférico, respectivamente (Tabela 5).

**Tabela 4.** Determinação das frações granulométricas do solo das áreas de campo nativo e no SPD por sítio e profundidade amostrada.

| Sítio       | Camada (cm) | Campo  |       |       |              | SPD    |       |       |              |
|-------------|-------------|--------|-------|-------|--------------|--------|-------|-------|--------------|
|             |             | Argila | Silte | Areia | Classe text. | Argila | Silte | Areia | Classe text. |
|             |             | %      |       |       |              | %      |       |       |              |
| Alegrete    | 0-5         | 15,4   | 5,3   | 79,3  | AF*          | 19,2   | 5,1   | 75,7  | FA           |
|             | 5-10        | 14,8   | 5,7   | 79,5  | AF           | 19,5   | 5,8   | 74,7  | FA           |
|             | 10-15       | 15,4   | 5     | 79,6  | AF           | 21,3   | 5,1   | 73,6  | FA           |
|             | 15-20       | 18,5   | 4,4   | 77,2  | FA           | 22,2   | 6,5   | 71,3  | FA           |
|             | 20-25       | 18,7   | 5,2   | 76,1  | FA           | 23,1   | 6,3   | 70,6  | FA           |
|             | 25-30       | 19,8   | 5,2   | 74,9  | FA           | 24,6   | 6,6   | 68,8  | FA           |
| São Gabriel | 0-5         | 7,8    | 6,5   | 85,7  | Areia        | 24,1   | 3,7   | 72,2  | FA           |
|             | 5-10        | 7,4    | 4,1   | 88,5  | Areia        | 15,7   | 8,3   | 76,1  | FA           |
|             | 10-15       | 7,2    | 4     | 88,8  | Areia        | 17,1   | 9     | 73,9  | FA           |
|             | 15-20       | 7,1    | 4     | 88,9  | Areia        | 15,7   | 10,3  | 73,9  | FA           |
|             | 20-25       | 8,1    | 6,8   | 85,1  | Areia        | 16,5   | 8,7   | 74,8  | FA           |
|             | 25-30       | 7,2    | 4     | 88,8  | Areia        | 15,3   | 8,1   | 76,7  | FA           |

**Tabela 4. (cont.)**

|                                  |       |      |      |      |        |      |      |      |        |
|----------------------------------|-------|------|------|------|--------|------|------|------|--------|
| Aceguá                           | 0-5   | 53,5 | 38,4 | 8,1  | Argila | 52,3 | 38,6 | 9,1  | Argila |
|                                  | 5-10  | 50,1 | 39,8 | 10,1 | Argila | 54   | 33,7 | 12,3 | Argila |
|                                  | 10-15 | 48,4 | 40,8 | 10,8 | Argila | 54,5 | 32,8 | 12,7 | Argila |
|                                  | 15-20 | 47,9 | 41,4 | 10,7 | Argila | 56,8 | 30,7 | 12,5 | Argila |
|                                  | 20-25 | 51,3 | 39,1 | 9,6  | Argila | 56,7 | 30,4 | 12,9 | Argila |
|                                  | 25-30 | 53,4 | 37,7 | 8,9  | Argila | 57,3 | 29,8 | 12,8 | Argila |
| Jarí                             | 0-5   | 33,4 | 25,1 | 33,5 | FAR    | 46,8 | 36,6 | 16,6 | Argila |
|                                  | 5-10  | 33,4 | 25,0 | 33,4 | FAR    | 57,4 | 26,3 | 16,3 | Argila |
|                                  | 10-15 | 36,9 | 21,7 | 36,9 | FAR    | 60   | 23,2 | 16,8 | MA     |
|                                  | 15-20 | 34,4 | 22,0 | 34,4 | FAR    | 61,1 | 22,3 | 16,5 | MA     |
|                                  | 20-25 | 33,8 | 22,2 | 33,8 | FAR    | 59,9 | 20,8 | 19,3 | MA     |
|                                  | 25-30 | 30,6 | 22,3 | 30,6 | FAR    | 53,9 | 30,2 | 15,9 | Argila |
| S.<br>Antônio<br>odas<br>Missões | 0-5   | 52,5 | 27,9 | 19,6 | Argila | 56   | 23,8 | 20,2 | Argila |
|                                  | 5-10  | 52,4 | 27,9 | 19,7 | Argila | 54,9 | 25,3 | 19,8 | Argila |
|                                  | 10-15 | 53,3 | 28,3 | 18,3 | Argila | 56,2 | 24,2 | 19,7 | Argila |
|                                  | 15-20 | 52,7 | 29,2 | 18,1 | Argila | 56,9 | 22,7 | 20,4 | Argila |
|                                  | 20-25 | 56,3 | 28   | 15,7 | Argila | 49,1 | 25,5 | 25,5 | Argila |
|                                  | 25-30 | 53,4 | 30,2 | 16,4 | Argila | 63,9 | 16,6 | 19,5 | MA     |

\*AF: Areia-franca; FA: Franco-arenosa; MA: muito argilosa; FAR: Franco-argilosa.

**Tabela 5.** Análise textural das áreas de SPD e campo nativo por camada e sítio amostral.

| Sítio                     | Classe de solo*              |       |
|---------------------------|------------------------------|-------|
|                           | SPD                          | Campo |
| Alegrete                  | Latossolo Vermelho           |       |
| São Gabriel               | Argissolo Vermelho Amarelo 1 |       |
| Aceguá                    | Chernossolo Ebânico          |       |
| Jarí                      | Argissolo Vermelho-amarelo 2 |       |
| Santo Antônio das Missões | Nitossolo Vermelho           |       |

\* Classificação expedita derivada do mapa de solos (IBGE 2014) e observações nos locais de amostragem.

### 5.3. Preparo das amostras para análises físicas e químicas

As amostras foram preparadas em laboratório após a coleta a campo. Para isso, foram realizadas pesagens das amostras úmidas e a sua secagem em estufa a 55°C por 48h. Após a secagem, as raízes presentes no solo foram separadas manualmente, e as amostras foram novamente pesadas.

### 5.4. Análises químicas e físicas do solo

#### 5.4.1. Carbono orgânico do solo (COS) e Nitrogênio total (NT) pelo método de combustão por via seca

As amostras secas foram moídas em moedor de solo automático e peneiradas (malha 2 mm) para obtenção das frações >2mm, sendo determinada a pedregosidade do solo. Uma alíquota de 1 g de cada amostra, menor que 2mm, foi moída em graal de ágata para a determinação de COS e NT. As amostras foram enviadas ao Laboratório de análise elementar de C e N da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde foram analisadas pelo método da combustão por via seca em analisador elementar (Thermo Flash 2000). Os estoques de C na terra fina do solo foram calculados por camadas equivalentes, conforme Poeplau, Vo e Don, (2017) e FAO (2019):

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

Onde:

ECOS: estoque de C orgânico do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); COS: C orgânico do solo (%);

Ds: densidade do solo considerando a terra fina ( $\text{g cm}^{-3}$ ); E: espessura da camada (cm);

FC : fator de conversão de  $\text{mg C cm}^{-2}$  para  $\text{Mg C ha}^{-1}$  (0,1)

#### 5.4.2. Biomassa de raiz

As raízes foram separadas manualmente a partir do volume total de solo coletado. Após a separação, com o auxílio de pinças, a biomassa foi pesada em balança de precisão para determinação da massa fresca e seca em estufa a 55°C até peso constante (cerca de 48h). A partir da massa seca de raiz e do volume total de solo coletado obteve-se o volume de raiz da amostra.

#### 5.4.3. Densidade do solo

Para determinação da densidade as amostras de solo indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos (8,5 cm de diâmetro x 5 cm de altura) adaptado de Teixeira et al. (2017).

Determinou-se a densidade do solo, considerando terra fina (< 2mm) e peso seco da massa de solo (105°C), conforme Poeplau, Vos e Don (2017) e FAO (2019):

$$DS_{\text{terra fina}} = (Ms - Mp) / (Vs - Vp)$$

Onde:

Ds: densidade do solo considerando a terra fina ( $\text{g cm}^{-3}$ ); Ms: massa total da amostra seca 105°C (g);

Mp: massa da fração > 2 mm (g);

Vs: Volume total da amostra seca em estufa 105°C ( $\text{cm}^{-3}$ );

Vp: volume da fração > 2 mm (g).



## **5.5. Análises microbiológicas**

### **5.5.1. Coleta e Preparo das amostras**

Um conjunto adicional de amostras para análises microbiológicas foram coletadas apenas na camada superficial (0-5 cm). Estas amostras foram peneiradas (malha de 2,8 mm) e mantidas sobre refrigeração até o momento das análises. Os dados meteorológicos e datas das coletas são descritas no apêndice (apêndice 8). Nos sítios onde não há estação meteorológica, foram coletados dados de estações próximas e com altitude semelhante ao do sítio de coleta.

Previamente foi realizada a determinação da capacidade de retenção de água do solo, de acordo com metodologia proposta por Monteiro e Frighetto, (2000), descrita por Dionísio et al., (2016). Vinte gramas de solo foram dispostos em funis sob papel filtro, sendo adicionadas ao solo 100 g de água destilada. Após 24 horas, a água percolada foi pesada para determinação da capacidade de retenção. O objetivo da determinação foi definir a quantidade de água necessária para atingir 70 % da capacidade de retenção do solo, ideal a atividade microbiológica, minimizando a diferença de umidade entre as amostras.

### **5.5.2. Respiração basal, quociente metabólico do solo ( $qCO_2$ ) e quocientemicrobiano do solo ( $qMic$ ).**

A determinação da respiração basal do solo foi realizada pelo método adaptado, descrito por Silva, Azevedo e De-Polli, (2007a). O método consistiu na incubação de 50 g de solo, com umidade corrigida para 70% da capacidade de retenção, em ambiente hermeticamente fechado. Sendo o  $CO_2$  liberado pela atividade microbiana capturado por uma solução de NaOH (0,5 M) e quantificada por condutivímetro (RODELLA; SABOYA, 1999). Foram realizadas quantificações a cada 10 dias de incubação, por um período de três meses. A curva padrão, com concentrações variando de 0 a 20 mM, foi construída com solução de  $Na_2CO_3$  0,25 mol L<sup>-1</sup>. O quociente metabólico do solo ( $qCO_2$ ) foi obtido pela razão entre respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana, proposto por Anderson e Domsch, (1993) e descrito por Silva, Azevedo e De-Polli, (2007a). E o quociente microbiano

( $q_{Mic}$ ) pela razão entre carbono da biomassa microbiana e carbono orgânico total, proposto por Anderson e Domsch (1993).

### **5.5.3. Carbono microbiano ( $C_{mic}$ )**

A fumigação do solo foi realizada pelo método da fumigação-extração com clorofórmio isento de etanol conforme Vance, Brookes e Jenkin (1987), com adaptações descritas por Silva, Azevedo e De-Polli, (2007b). Para isso, 20 gramas de solo úmido foram dispostas em frascos de vidro e adicionado clorofórmio isento de etanol, diretamente sob as amostras. Estes frascos foram incubados por um período de 24 horas. Decorrido este período, a extração das amostras foi realizada pela adição de solução de sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ). A análise foi realizada em duplicata, com e sem a fumigação com clorofórmico. A determinação do carbono da biomassa foi realizada por titulação com sulfato ferroso amoniacal edifenilamina como solução indicadora. O C biomassa microbiana foi calculado pela diferença entre as amostras fumigadas e não fumigadas, multiplicando estes valores pelo coeficiente ( $K_c$ ) 0,33 (SPARLING; WEST, 1988).

### **5.5.4. Atividade enzimática**

A atividade enzimática do solo foi avaliada pela hidrólise da hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) e da enzima urease.

#### **5.5.4.1. Hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA)**

Para avaliação da atividade da FDA, foi empregada metodologia descrita por Schnurer e Rosswall (1982), utilizando-se como substrato a solução FDA  $1000\mu\text{g mL}^{-1}$ , sendo a leitura da fluoresceína realizada em 490 nm por colorimetria. A curva padrão foi feita utilizando-se uma solução de fluoresceína ( $20\mu\text{g mL}^{-1}$ ) nas seguintes concentrações: 0; 1; 2; 3; 4; 5  $\mu\text{g/mL}$ .

#### 5.5.4.2. Urease

Para avaliação da atividade da urease, medida pela liberação do amônio, seguiu-se o método proposto por Kandeler e Gerber, (1988). Sendo o amônio liberado quantificado por colorimetria pelo método do ácido-salicílico, a 690 nm (BUNDY e MEISINGER, 2018). A curva padrão foi feita utilizando-se uma solução de NH<sub>4</sub>Cl nas seguintes concentrações: 17,85; 35,7; 71,4; 178,5; 285,6; 428,4; 571,2; 714,0 μmol L<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

#### 5.6. Índice de Qualidade do Solo (IQS)

O IQS teve como base o “índice de deterioração do solo” desenvolvido por Adejuwon e Ekanade (1988), indicado como um IQS por Islam e Weil (2000). O cálculo adotou a equação descrita por Freitas et al. (2012), com adaptações.

$$Q_A = \frac{(\frac{w_1 - K_1}{K_1}) + (\frac{w_2 - K_2}{K_2}) + (\frac{w_3 - K_3}{K_3}) + (\frac{w_n - K_n}{K_n})}{n}$$

$$IQS = 1 - \left( \frac{Q_{aq} + Q_{ab} + Q_{af}}{3} \right)$$

Onde:

QA: refere-se à média dos desvios dos indicadores de cada atributo em relação à referência;

w: refere-se ao valor do indicador medido nos sistemas em estudo;

k: valor do indicador medido no sistema referência;

n: número de indicadores que compõem cada conjunto de atributos;

Qaq: média dos desvios dos atributos químicos do solo; Qab: média dos desvios dos atributos biológicos do solo; Qaf: média dos desvios dos atributos físicos do solo.

O campo nativo foi utilizado como o sistema de referência, sendo

atribuído a ele IQS de 1, sua diferença em relação à deterioração do solo nas áreas lavouras anuais constitui o IQS desta área convertida. O índice de deterioração de cada conjunto de atributos foi apresentado como porcentagem, quanto mais próximo de 100%, menor a porcentagem de deterioração. Nos casos em que a redução do valor numérico do atributo é favorável a qualidade do solo (neste caso a densidade), valores menores que os da área de referência foram considerados positivos para a QS.

### **5.7. Análises estatísticas**

As análises estatísticas foram realizadas no programa estatístico *R*. Os dados foram testados quanto à sua normalidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk e homocedasticidade pelo teste de Bartlett. Quando necessário, os dados foram transformados por Box-Cox. Para as análises dos dados foi utilizado um modelo linear misto, onde o uso do solo (campo x sistema plantio direto) foi considerado a variável preditora, e o sítio de coleta e o par como variáveis aleatórias. Quando observada diferença estatística, as médias foram comparadas pelo teste de Duncan ao nível de significância de 5%. Esta análise foi realizada por meio do pacote Linear and Nonlinear Mixed Effects Models (nlme) no programa estatístico *R*. Os indicadores de QS foram, avaliados pelo teste de correlação de Pearson.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Densidade (Ds)

A Ds nas áreas de campo nativo variou entre 1,16 e 1,52 g/cm<sup>3</sup> e entre 1,13 e 1,39 g/cm<sup>3</sup> nas áreas de SPD, ao longo das profundidades amostradas, não sendo essa diferença significativa quando comparada entre usos do solo (Tabela 6). Foi possível observar uma maior Ds no sítio em São Gabriel, em área de campo, na maioria das camadas analisadas, variando de 1,41 a 1,88 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 6). Este solo é classificado como Argissolo Vermelho, com classe textural areia, os quais normalmente apresentam maior densidade. A Ds é afetada pela granulometria do solo, sendo usualmente maior em solos arenosos do que em solos argilosos. Densidades elevadas podem indicar solos compactados, potencialmente afetando desenvolvimento radicular das culturas. Para solos arenosos, densidades em torno de 1,75 g cm<sup>-3</sup> podem limitar o desenvolvimento da cultura, já em solos argilosos, esses valores situam-se em torno 1,35 g cm<sup>-3</sup> (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003; REINERT *et al.*, 2008).

Em campo nativo, Rosa et al., (2018) encontrou Ds entre 1,55 e 1,66 g/cm<sup>3</sup> para as mesmas classes de solo, superiores ao observados neste estudo. O maior adensamento nos campos nativos pode ser em decorrência do pisoteio do gado bovino e ausência de revolvimento do solo (Tabela 6). A menor densidade observada nos sítios em SPD pode ser em decorrência do uso de plantas de cobertura, já que se trata de sistema plantio direto o que favorece o aumento da porosidade do solo pela atuação das raízes (HARUNA *et al.*, 2020).

**Tabela 6.** Densidade do solo sob campo nativo (CN) e no SPD por camada e sítio.

| Sítios            | Usos das terras          |      |         |      |          |      |          |      |          |      |          |      |
|-------------------|--------------------------|------|---------|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
|                   | CN                       | SPD  | CN      | SPD  | CN       | SPD  | CN       | SPD  | CN       | SPD  | CN       | SPD  |
|                   | 0-5 cm                   |      | 5-10 cm |      | 10-15 cm |      | 15-20 cm |      | 20-25 cm |      | 25-30 cm |      |
|                   | Ds (g cm <sup>-3</sup> ) |      |         |      |          |      |          |      |          |      |          |      |
| Alegrete          | 1,50                     | 1,26 | 1,59    | 1,54 | 1,58     | 1,55 | 1,56     | 1,54 | 1,51     | 1,50 | 1,43     | 1,48 |
| São Gabriel       | 1,41                     | 1,07 | 1,76    | 1,24 | 1,84     | 1,35 | 1,88     | 1,38 | 1,82     | 1,35 | 1,47     | 1,29 |
| Aceguá            | 0,82                     | 1,05 | 1,26    | 1,34 | 1,22     | 1,29 | 1,35     | 1,35 | 1,23     | 1,20 | 1,06     | 1,01 |
| Jarí              | 1,04                     | 1,15 | 1,28    | 1,39 | 1,19     | 1,32 | 1,30     | 1,35 | 1,45     | 1,33 | 1,38     | 1,33 |
| S. Antônio das M. | 1,05                     | 1,11 | 1,29    | 1,26 | 1,37     | 1,37 | 1,52     | 1,34 | 1,33     | 1,36 | 1,11     | 1,23 |
| Média geral       | 1,16                     | 1,13 | 1,44    | 1,35 | 1,44     | 1,38 | 1,52     | 1,39 | 1,47     | 1,35 | 1,29     | 1,27 |

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

Entre as médias gerais dos usos do solo avaliados neste estudo, não foi observada diferença significativa entre os teores de C e N. Obtendo-se uma média geral das profundidades e sítios bastante próximos, 16,1 e 1,4 g/kg em áreas de campo nativo e 14,3 e 1,3 g/kg em área destinada a sojicultura, para C e N, respectivamente (Tabela 7 e 8). A ausência de diferença significativa pode ter sido em decorrência do manejo do solo empregado nas áreas de lavoura. Entende-se que o sistema de plantio direto mantenha os teores de C e N do solo em níveis estáveis, uma vez que este sistema preconiza práticas conservacionistas do solo (MATHEW *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2020).

Entretanto, ao comparar apenas o uso do solo dentro do sítio de amostragem, Aceguá apresentou um teor de C de 25 % menor, passando de 25,9 em campo nativo, para 19,47 g/kg nas áreas de SPD (Tabela 7). O maior teor de C nos campos nativos pode ser em decorrência do maior volume de raízes perenes, resultando em maior incorporação de C ao solo (DUPONT *et al.*, 2010).

**Tabela 7.** 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              | SPD     |
|                           | C (g/kg)           |         |
| Alegrete                  | 7,37               | 8,13    |
| São Gabriel               | 7,32               | 8,85    |
| Jarí                      | 21,14              | 20,0    |
| Santo Antônio das Missões | 18,66              | 15,20   |
| Aceguá                    | 25,94              | 19,47   |
| Média                     | 16,09 A            | 14,34 A |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre sítios nas colunas, e letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre usos da terra em cada sítio pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 8.** Valores médios de teores de nitrogênio total do solo de acordo com o uso da terra e os sítios de coleta das amostras.

| Sítio                     | Teor de N<br>total |           |
|---------------------------|--------------------|-----------|
|                           | Campo              | SDP       |
| N(g/kg)                   |                    |           |
| Alegrete                  | 0,70               | 0,75      |
| São Gabriel               | 0,75               | 0,87      |
| Jarí                      | 1,59               | 1,84      |
| Santo Antônio das Missões | 1,80               | 1,28      |
| Aceguá                    | 2,30               | 1,78      |
| Média                     | 1,43 A             | 1,30<br>A |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre sítios nas colunas, e letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre usos da terra em cada sítio pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

Entre os sítios, para o mesmo uso do solo (Tabela 7 e 8), pode ser observada uma diferença expressiva entre os teores de carbono e nitrogênio, sendo mais acentuada entre os sítios de Alegrete e São Gabriel, em comparação com os sítios de Jarí, Santo Antônio das Missões e Aceguá, para ambos os usos. Os maiores teores de C e N, observados nos sítios em Jarí, Santo Antônio das Missões e Aceguá podem ser explicados por esses solos serem mais argilosos (Tabela 4). A argila pode contribuir para a agregação, com proteção física do material orgânico, pela oclusão no interior dos agregados, e também com a estabilidade química da matéria orgânica pela formação de complexos organominerais (Bayer et al., 2006, LLORENTE; GLASER e TURRIÓN, 2010). Por outro lado, solos com a presença de horizontes mais arenosos, como os encontrados nos sítios de Alegrete e São Gabriel, apresentam uma menor capacidade de formação de agregados e, portanto, reduzida proteção física dos agregados (SANTOS *et al.*, 2011).



### 6.3. Estoques de C e N

Os estoques de C (ECOS) e N (ENTS) cumulativos foram calculados em três profundidades, 0-10, 0-20 e 0-30 cm, sendo estas as profundidades observadas com maior recorrência na literatura, o que permite a comparação com outros estudos. Além disso, de 0-30 cm é a profundidade mínima recomendada para dados de ECOS integrarem os inventários nacionais de gases de efeito estufa, sendo mais recomendada a profundidade de 0-100 cm (IPCC, 2019).

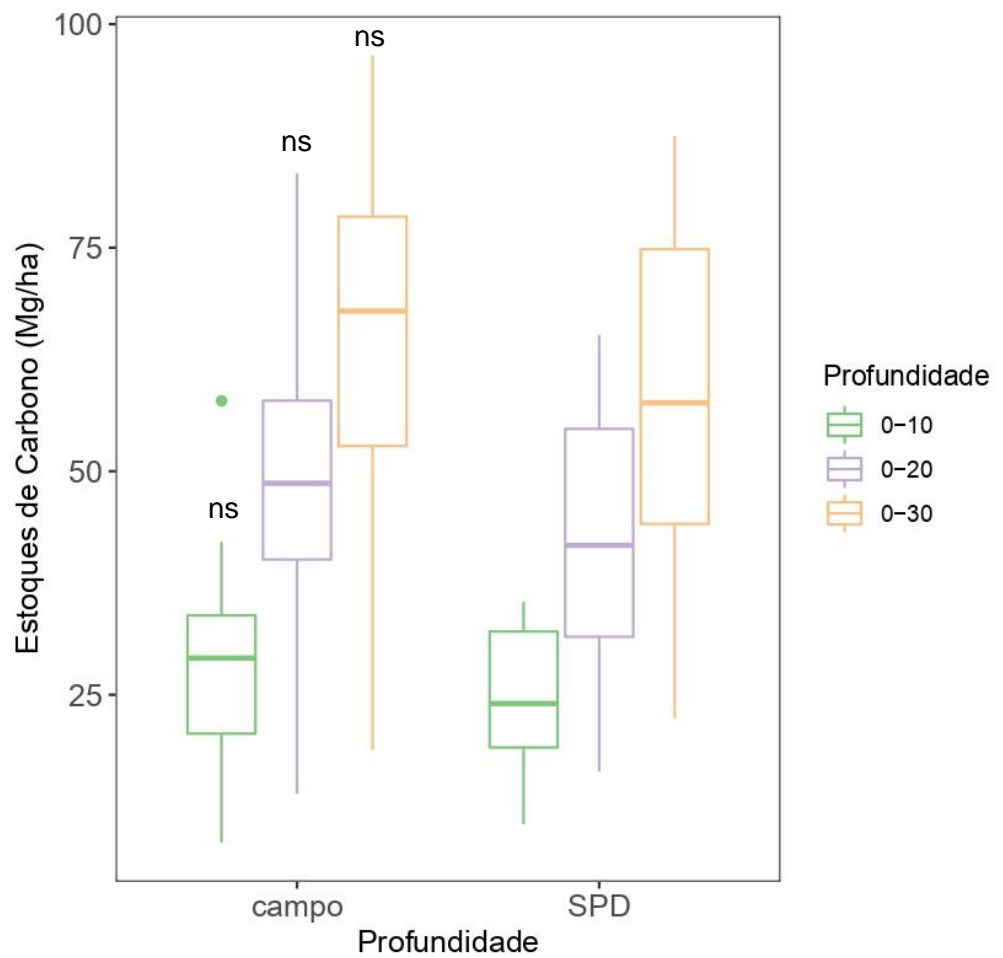
Não foram observadas diferenças significativas entre ECOS e ENTS sob usos das terras estudados nas três profundidades analisadas (Figuras 6 e 7). As médias gerais dos estoques entre as áreas de campo e SPD foram bastante semelhantes, no campo as médias observadas foram: 28,7, 48,0 e 63,7 Mg/ha de carbono nas profundidades de 0-10, 0-20 e 0-30, respectivamente. Nas áreas em SPD as médias foram de 24,7, 43,1 e 59,0 Mg/ha de C para as mesmas camadas. Nos estoques de N também foram observadas médias bastante próximas entre os usos. Nas áreas de campo as médias para as profundidades 0-10, 0-20 e 0-30 foram de 2,5, 4,2, e 5,5 Mg/ha de N, respectivamente. Para as áreas em SPD, as médias observadas foram: 2,3, 4,0 e 5,3 Mg/ha de N para as mesmas profundidades amostradas nas áreas de campo, respectivamente. Apesar dos valores muito próximos, a variabilidade dos ECOS foi menor nas lavouras, o que pode ser atribuído ao manejo, principalmente ao preparo inicial seguido de adição de corretivos e fertilizantes, que uniformiza a área.

Cecagno et al., (2017) encontraram  $25,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$  e  $2,5 \text{ Mg N ha}^{-1}$  a 0-20 cm de profundidade em área de campo nativo no bioma Pampa. Estes valores de ECOS são 43% menores dos que os obtidos neste estudo. Schirmann (2016), ao estudar diferentes níveis de pastejo em campo nativo no bioma Pampa, obteve valores médios de ECOS a 0-30 cm de  $49 \text{ MgC ha}^{-1}$ , 20% a menos que o conteúdo de ECOS aqui obtidos. A diferença entre os valores de estoques de carbono e nitrogênio encontrados nestes estudos, demonstra a alta variabilidade nos teores de C e N nas áreas de campo nativo. Os estoques de carbono do solo são diretamente influenciados pelas espécies

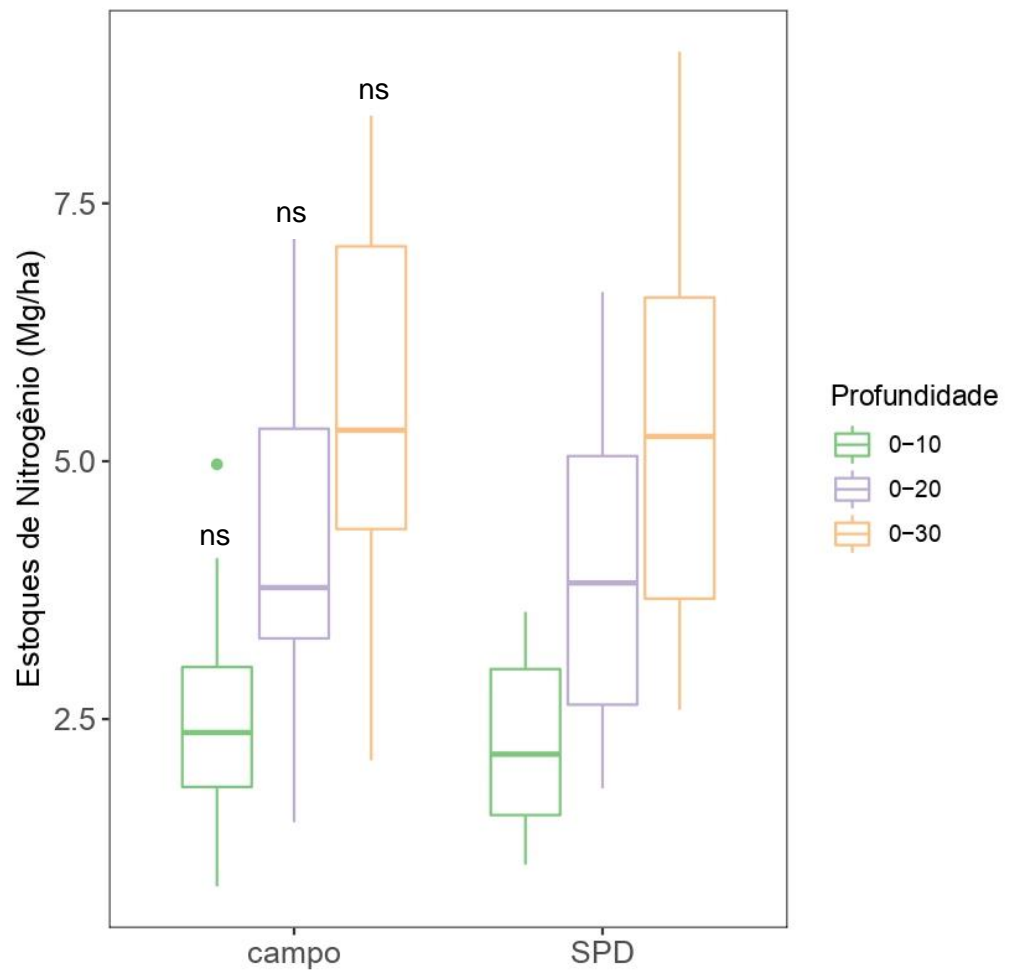
vegetais presentes no ecossistema, que fixam o CO<sub>2</sub> atmosférico em sua biomassa. Logo, por se tratar de um bioma com alta diversidade florística, na ordem de 2.200 espécies (BOLDRINI, 2009) é esperado que haja variação entre os estoques de carbono observados de acordo com a região e composição florística dos locais amostrados dentro do bioma. Embora o sequestro de C em áreas agrícolas possa contribuir com a manutenção dos estoques, esta biodiversidade florística pode garantir uma maior estabilidade dos estoques em longo prazo (HENRY *et al.*, 2009).

Em lavouras de soja no bioma Pampa, Alves *et al.*, (2020) encontraram conteúdos de ECOS de 45 Mg C ha<sup>-1</sup> e ENTS de 5 Mg N ha<sup>-1</sup> a 0-30 cm de profundidade, valores próximos aos observados neste estudo. Neste mesmo estudo, os autores observaram uma correlação positiva entre os aumentos dos estoques de C e o monocultivo da soja em razão do aporte de N propiciado pela decomposição da palhada desta cultura. Nesse cenário, a contribuição de N da soja, oriundo da fixação biológica de nitrogênio, parece estar relacionada a um maior suprimento de nitrogênio ao solo. Proporcionando um balanço positivo entre mineralização/imobilização de nitrogênio pelos microrganismos do solo (CIAMPITTI; SALVAGIOTTI, 2018). Fator que pode ter contribuído para a manutenção dos estoques de C e N nas áreas em sistema plantio direto aqui amostradas.

Além disso, a ausência de diferenças dos estoques de C e N entre as áreas de campo e SPD pode ser em decorrência do curto tempo de conversão: alterações em estoques de C e N são de difícil detecção em curto prazo. O tempo decorrido desde a mudança de uso das terras nos locais aqui amostrados pode ter sido insuficiente para que modificações significativas nos ECOS e ENTS fossem verificadas. Além disso, todas as áreas de lavoura amostradas empregam o sistema plantio direto, um sistema de manejo conservacionista (TURETTA *et al.*, 2020). Sistemas conservacionistas podem atuar como sumidouros de C atmosférico, recuperando parcialmente o C perdido do ecossistema nativo (PILLAR; TORNQUIST; BAYER, 2012) o que pode ter contribuído para mitigar os impactos provocados pela conversão, tornando-as menos detectáveis em curto prazo.



**Figura 6.** Estoques de COS acumulados por uso das terras em cada profundidade avaliada. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.



**Figura 7.** Estoques de ENTs acumulados por uso das terras em cada profundidade avaliada. <sup>ns</sup>não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.

#### 6.4. Biomassa de raízes

Neste estudo foi determinada apenas a biomassa de raízes sob campos nativos, uma vez que a amostragem foi realizada após a colheita da soja. Para fins de comparação foram utilizados dados da biomassa radicular em lavouras de soja disponíveis na literatura.

Em Aceguá e Jarí foram verificados os maiores teores de massa seca das raízes, 8,34 e 12,35 Mg ha<sup>-1</sup> e 3,75 e 5,56 Mg C ha<sup>-1</sup> (usando fator de 45% de C na biomassa), respectivamente (Tabela 9). Nestes sítios, os solos apresentaram classe textural argilosa (Tabela 4). Solos com maiores teores de argila apresentam uma maior capacidade de retenção/armazenamento de água (OLIVEIRA; SILVA; MELLO, 2020), o que pode favorecer o desenvolvimento das raízes.

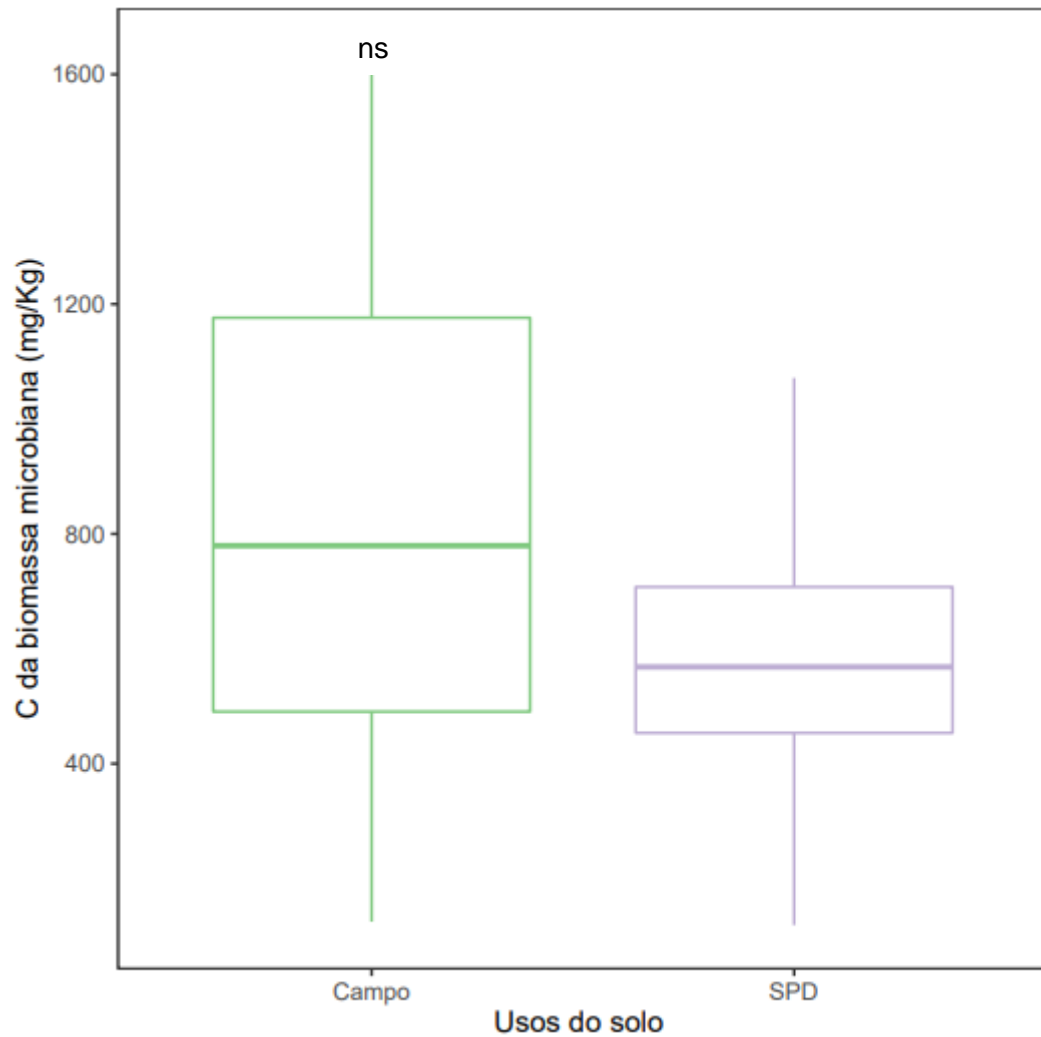
**Tabela 9.** Massa seca e C em raízes por sítio nos campos nativos.

| Sítios                 | Raízes (0-30 cm)    |      |
|------------------------|---------------------|------|
|                        | Massa seca          | C    |
|                        | Mg ha <sup>-1</sup> |      |
| São Gabriel            | 5,01                | 2,25 |
| S. Antônio das Missões | 6,45                | 2,90 |
| Aceguá                 | 8,34                | 3,75 |
| Jarí                   | 12,35               | 5,56 |
| Alegrete               | 7,84                | 3,35 |
| Média                  | 8,0                 | 3,6  |

São poucos os trabalhos que avaliem teores de biomassa de raiz na cultura da soja na região sul do país. Walter et al. (2009), encontraram valores de biomassa seca de raiz que variaram entre 2,35 e 0,37 Mg ha<sup>-1</sup> em solos classificados como Latossolo e Neossolo. Os teores de C estimados, considerando que 42% da matéria seca seja de carbono, variaram entre 1,06 e 0,15 Mg ha<sup>-1</sup>. Para Bordin *et al.*, (2008), estes valores foram de 1,94 Mg ha<sup>-1</sup> e 0,61 Mg ha<sup>-1</sup>, considerando a profundidade de coleta de 0-100 cm. Ambos os estudos avaliaram lavouras de soja em sistema plantio direto.

### 6.5. Carbono da biomassa microbiana (Cmic)

A comparação entre teores de carbono da biomassa microbiana das áreas de campo nativo e SPD não apresentou diferença estatística significativa (Figura 8). A média geral entre os cinco sítios amostrados em campo nativo foi de 827,0 mg C Kg<sup>-1</sup> e de 593,1 mg C Kg<sup>-1</sup> em SPD. Lisboa et al., (2012), em estudo realizado no bioma Pampa, encontrou valores médios de Cmic em campo nativo que variaram entre 476,7 e 238,3 mg C Kg<sup>-1</sup>, dependendo do período de coleta. Em área de soja, no mesmo estudo, os autores reportaram valores médios de Cmic de 119,9 e 195,0 mg C Kg<sup>-1</sup>, de acordo com o tipo de manejo empregado. Para ambos os usos, os valores encontrados por estes autores são inferiores aos observados neste estudo, podendo ser em decorrência de características físicas e químicas intrínsecas do solo avaliado. No entanto, os autores também não encontraram diferença significativa entre a biomassa de campo nativo e lavoura de soja em sistema plantio direto (SPD), relatando a capacidade deste sistema de manejo em manter a quantidade de Cmic semelhante ao campo nativo. Este sistema mantém a cobertura do solo ao longo do ano, preservando a umidade e reduzindo as variações de temperatura no solo (OLIVEIRA et al., 2018; RODRIGUES et al., 2018; TURETTA et al., 2020). Além disso, a deposição de biomassa vegetal contribui para o aumento dos teores de C e N no solo (LEITE et al., 2010) fatores que podem contribuir para o incremento da biomassa microbiana.



**Figura 8.** Teores de carbono da biomassa microbiana em campo nativo e SPD. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.

### 6.6. Respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico do solo ( $qCO_2$ ) e quociente microbiano do solo ( $qMic$ ).

Os resultados obtidos mostram que o uso do solo não afetou significativamente a respiração basal, considerando a taxa de emissão de  $CO_2$  acumulada ao longo dos 93 dias de avaliação. As áreas de campo nativo apresentaram uma taxa média de  $7.224,7 \text{ mg } CO_2 \text{ Kg}^{-1}$  e as áreas de SPD  $5.935,1 \text{ mg } CO_2 \text{ Kg}^{-1}$  (Figura 9). Já a média de  $CO_2$  emitido por hora foi de  $3,2$

e  $2,6 \text{ mg CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 10). Lisboa et al., (2012) também não observaram diferença estatística entre a emissão de  $\text{CO}_2$  de áreas em sistema plantio direto e campo nativo no bioma Pampa. Segundo Bradford e Peterson, (2000) sistemas agrícolas como o plantio direto podem favorecer a atividade microbiológica por não haver a movimentação do solo, havendo aporte gradual de C, manutenção da umidade e menor variação de temperatura pela permanência de cobertura no solo.

A respiração basal do solo refere-se ao conjunto de todas as reações metabólicas ocorrentes no solo que liberam dióxido de carbono, sendo os fungos e bactérias os principais responsáveis por essas reações (SILVA; AZEVEDO e DE-POLLI, 2007a). Logo, a RBS está diretamente relacionada ao teor de carbono microbiano do solo. O que pode explicar a maior taxa de emissão de  $\text{CO}_2$  observada, mesmo sem diferença estatística, nas áreas de campo nativo, que apresentou um teor de  $C_{mic}$  de  $7.224,7 \text{ mg C Kg}^{-1}$  (Figura 8).

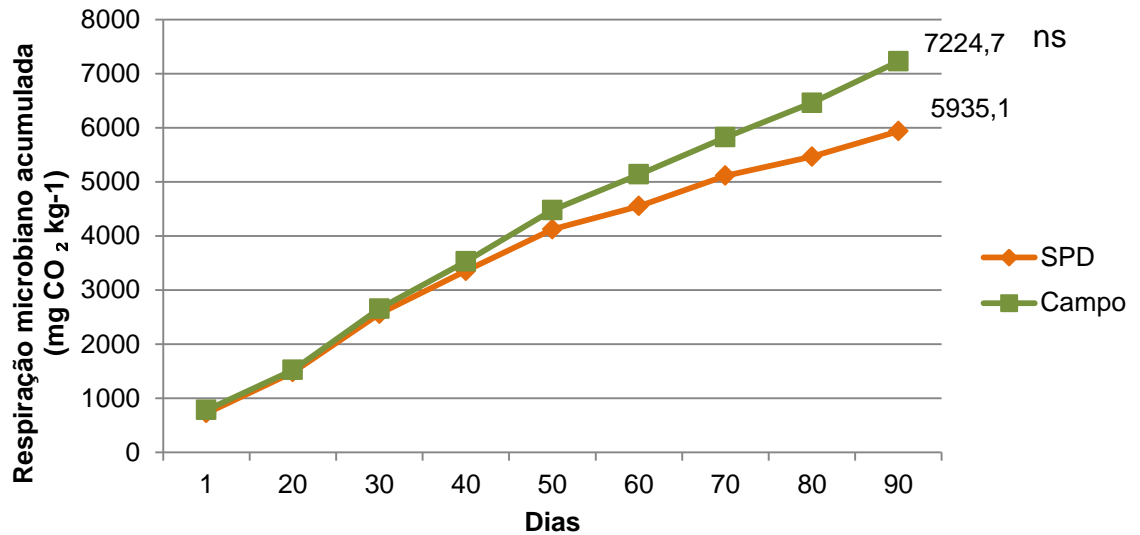
A atividade metabólica do solo pode ser também mensurada pelo quociente metabólico ( $q\text{CO}_2$ ): que é dado pela razão entre taxa de  $\text{CO}_2$  da RBS e o C da biomassa microbiana (ANDERSON e DOMSCH, 1993). Considera-se uma atividade microbiana mais eficiente quando há menor perda de C na forma de  $\text{CO}_2$  pela respiração, e maior incorporação de C aos tecidos microbianos (MORAES, 2012). O valor médio do  $q\text{CO}_2$  observado nas áreas de campo nativo foi de  $4,04 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ BMS-C} \cdot \text{h}^{-1}$ , inferior as áreas de SPD que foi de  $4,91 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ BMS-C} \cdot \text{h}^{-1}$  (Tabela 10). Apesar de não ser observada diferença estatística entre os sítios, as áreas de lavoura apresentaram um quociente metabólico mais alto, que pode estar associado a um estresse ambiental provocado pela atividade antrópica e/ou ao uso ineficiente do substrato (NIEMEYER *et al.*, 2012). Sugerindo uma comunidade microbiana menos eficaz na utilização do material orgânico aportado ao solo, havendo uma maior perda de C através da emissão de  $\text{CO}_2$  e por consequência uma menor incorporação aos tecidos microbianos (SILVA *et al.*, 2010).

O quociente microbiano ( $q\text{Mic}$ ) por sua vez permite avaliar quanto C orgânico está sendo imobilizado como biomassa microbiana, sendo possível inferir



também a qualidade da matéria orgânica. O  $q_{Mic}$  é dado pela razão entre CBM e COT (ANDERSON e DOMSCH, 1993). Para as áreas de campo nativo o  $q_{Mic}$  foi de 3,42% e em SPD de 2,55% (Tabela 10), apresentando diferença estatística entre si. A média observada para as áreas de SPD é significativamente menor do que nas áreas de campo, podendo indicar uma situação de estresse e/ou uma baixa qualidade do material orgânico aportado (SILVA *et al.*, 2010), quando em comparação a área de campo nativo. Embora o sistema plantio direto aporte ao solo uma quantidade significativa de material orgânico, a qualidade e a diversidade deste material influencia na manutenção da biodiversidade microbiana do solo, alterando a atividade metabólica do solo (PATERSON *et al.*, 2008).

Embora difiram entre si, avaliando cada média de forma individual, ambos os usos estariam dentro da faixa de equilíbrio do solo considerada por Jenkinson e Ladd (1981) de 1 a 4% do teor de COT do solo. Valores de  $q_{Mic}$  inferiores a 1% podem indicar limitação ao desenvolvimento da biomassa microbiana (JAKELAITIS *et al.*, 2008). Os valores aqui obtidos indicam que o carbono está presente no solo de forma estável, sendo imobilizado pela biomassa microbiana. Portanto, o sistema plantio direto pode estar mantendo a atividade biológica do solo a um nível saudável pela ocorrência da seleção de espécies mais resistentes as alterações ambientais ocorridas, em detrimento da biodiversidade microbiológica (BROWN *et al.*, 2015). Visto que, a redução da biodiversidade de plantas tende a reduzir de forma significativa a diversidade da comunidade microbiana, em especial a de bactérias (LORANGER-MERCIRIS *et al.*, 2006).



**Figura 9.** Respiração microbiana média acumulada em 93 dias de incubação do solo em áreas de campo e SPD.<sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA

**Tabela 10.** Respiração basal do solo (RBS), Quociente metabólico ( $qCO_2$ ), Carbono orgânico total (COT) e Quociente microbiológico ( $qMic$ ) por uso do solo.

| Indicador                                    | Campo nativo       | SPD              |
|--|--------------------|------------------|
| RBS ( $mg\ CO_2\ Kg^{-1}\ solo\ h^{-1}$ )    | 3,2 <sup>ns</sup>  | 2,6              |
| $qCO_2$ ( $mg\ CO_2\ g^{-1}\ BMS-C.h^{-1}$ ) | 4,0 <sup>ns</sup>  | 4,9              |
| COT ( $g\ kg^{-1}$ )                         | 28,7 <sup>ns</sup> | 26,4             |
| $qMic$ (%)                                   | 3,4 <sup>a</sup>   | 2,5 <sup>b</sup> |

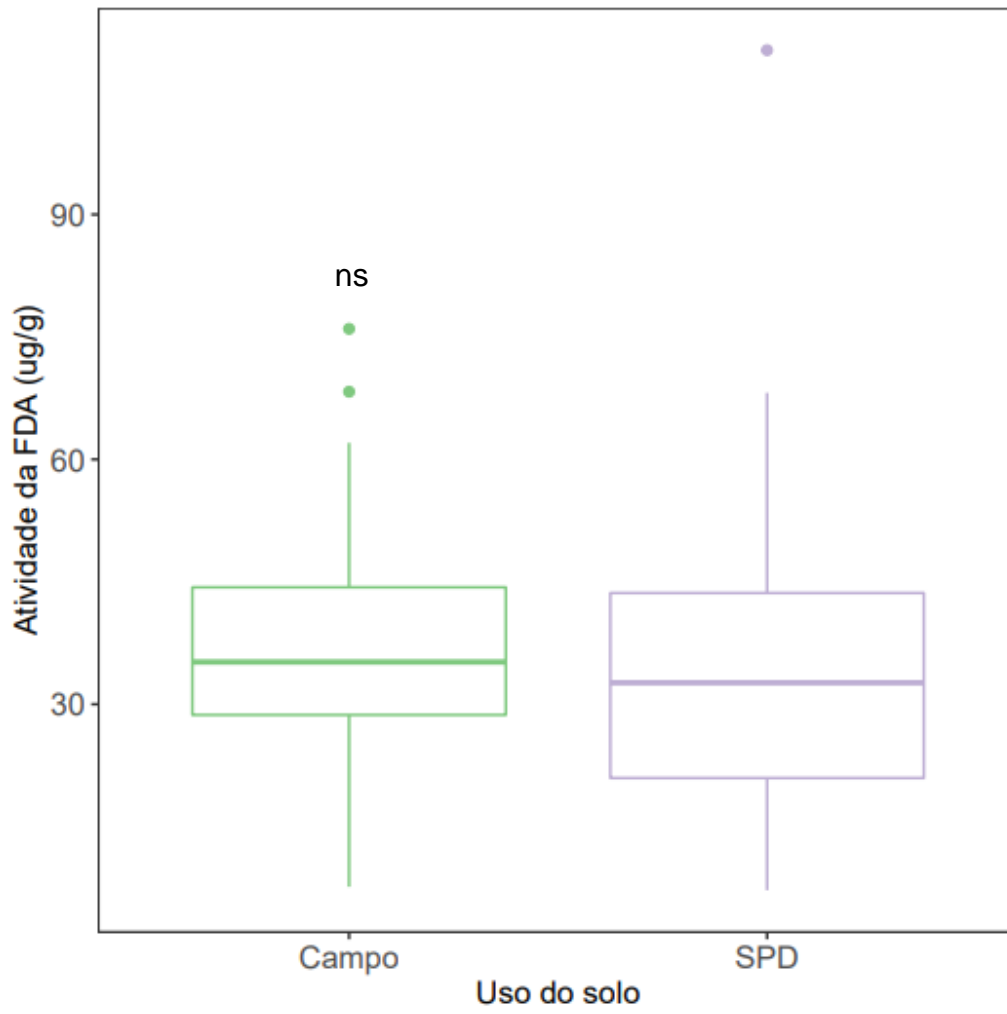
<sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre usos pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

### 6.7. Atividade enzimática

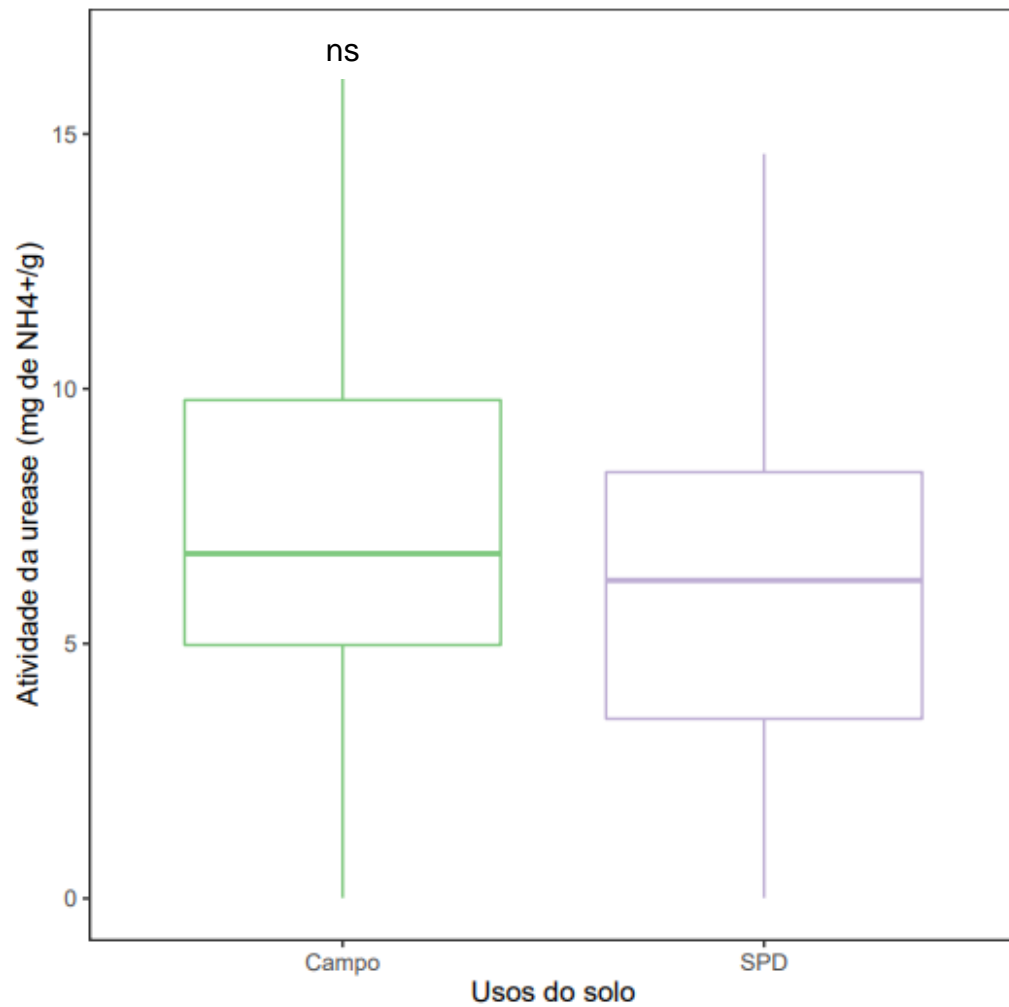
A atividade enzimática (FDA e uréase) foi utilizada como uma forma de avaliar a atividade microbiana heterotrófica do solo, sendo. A hidrólise da FDA expressa a capacidade de um grupo de enzima capaz de realiza-lá, como lipases, esterases, proteases (PEIXOTO, 2010). Entre os usos das terras estudados não foi verificada diferença significativa. Nas área de campo nativo, o valor médio de hidrólise da FDA foi de 36,74 ug fluoresceína por g de solo e em área de SPD de 32,52 ug fluoresceína por g de solo (Figura 10).

A uréase é a enzima responsável por catalisar a hidrólise da ureia em amônia ( $\text{NH}_3$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (LLOYD; SHEAFFE, 1973). Assim como a FDA, a atividade da enzima urease não apresentou diferença significativa entre os usos. A área de campo nativo apresentou como média geral 6,9 mg  $\text{NH}_4^+$  por g de solo e 6,12 mg  $\text{NH}_4^+$  por g de solo em SPD (Figura 11).

Apesar de não ter sido verificada diferença significativa entre os usos de solo para os indicadores biológicos avaliados, a conversão de áreas naturais para outros usos pode provocar a seleção de espécies. Permanecendo aquelas mais resistentes e adaptáveis ao distúrbio causado no ecossistema (BROWN *et al.*, 2015). Embora os efeitos do monocultivo sob a biodiversidade de microrganismos ainda estejam sendo estudados, sabe-se que a redução da biodiversidade de plantas promove um ambiente específico para determinadas espécies, favorecendo o crescimento de microrganismos capazes de colonizar a rizosfera destas plantas. Estudos recentes sugerem que a perda da biodiversidade de planta provoca o declínio da riqueza e abundância da fauna em longo prazo. E que tal efeito pode acarretar no comprometimento de funções básicas, como decomposição e formação dos solos (ZHANG *et al.*, 2022).



**Figura 10.** Atividade da FDA por uso do solo. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.



**Figura 11.** Atividade da urease por uso do solo. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de análise de variância ANOVA.

## 6.8. Análise de Correlação entre Indicadores de QS

A análise de correlação identificou algumas correlações significativas entre indicadores físicos e químicos (Figura 12). Os indicadores C e N apresentaram correlação positiva e significativa com o teor de argila e silte. Os mesmos indicadores apresentaram correlação negativa significativa com o percentual de areia, indicando menor capacidade de acúmulo de MO em solos mais arenosos. Estes resultados apoiam a observação anterior de que solos mais argilosos tendem a apresentar maior estabilidade da matéria orgânica (BAYER et al., 2006; LLORENTE; GLASER e TURRIÓN, 2010; SANTOS et al., 2011). A correlação negativa de C e N com a Ds pode ser explicada porque as maiores Ds são justamente observadas nos solos mais arenosos.

Pela matriz de correlação (Figura 12) é possível observar uma estreita relação entre fontes de nutrientes e energia e o desenvolvimento microbiológico no solo. Essa relação pode ser verificada pela correlação positiva e significativa entre os teores de C e N e C<sub>mic</sub>, pois a matéria orgânica do solo é principal fonte energética e carbono para a biota do solo (INSAM; DOMSCH, 1988; XAVIER *et al.*, 2006). Esta correlação positiva pode ainda indicar a qualidade do material orgânico adicionado ao sistema, de baixa recirculação e, portanto passível de ser imobilizado pela fração microbiana (MONTEIRO; GAMA-RODRIGUES, 2004).

A atividade da urease foi também favorecida pela disponibilidade de material orgânico, apresentando correlação positiva e significativa, o que reforça a relação entre disponibilidade e qualidade, facilidade de decomposição, do composto orgânico adicionado ao sistema (LANNA *et al.*, 2010).

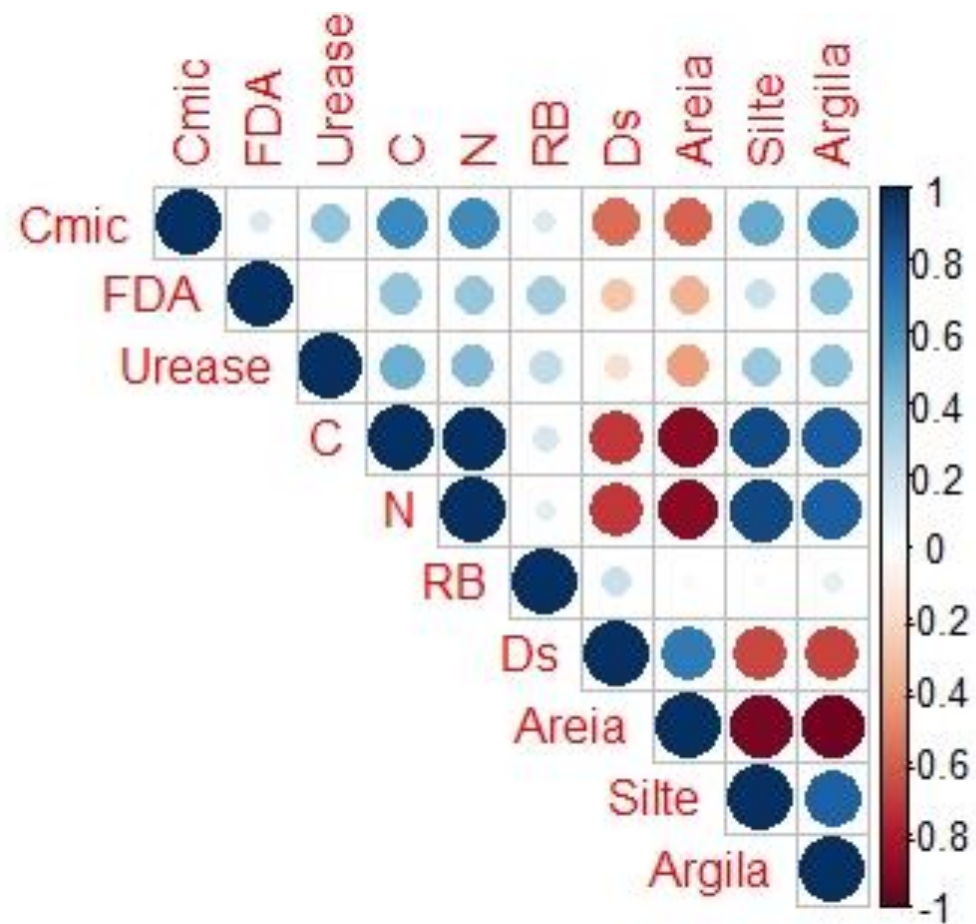


Figura 12. Teste de correlação de Pearson entre os indicadores de QS analisados.

### 6.9. Índice de qualidade do solo (IQS)

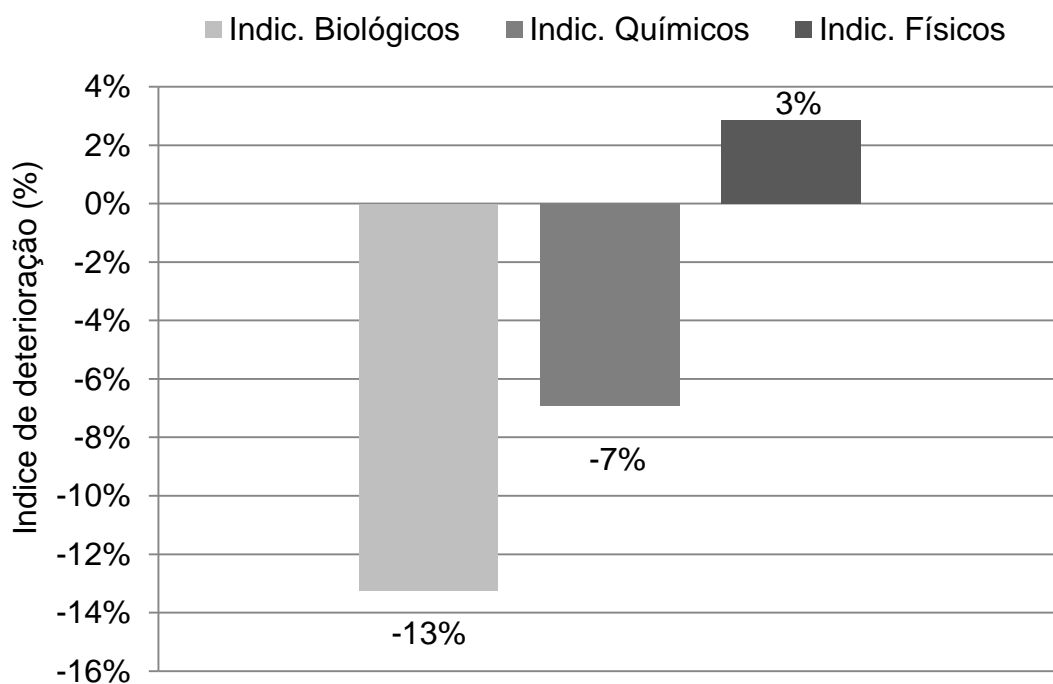
O índice de qualidade do solo proposto por Islam e Weil (2000) se mostrou eficiente em detectar as mudanças ocorridas na QS após a conversão dos campos nativos em lavouras anuais (Figura 13). A conversão apresentou um IQS de 0,94 (94%), sendo o valor 1 (100%) considerado como máxima QS atribuído à área de referência (os campos). Foi verificada uma deterioração dos atributos químicos do solo (7%), considerando os indicadores químicos aqui avaliados. Mesmo sendo o sistema plantio direto um sistema conservacionista (PILLAR; TORNQUIST e BAYER, 2012; TURETTA et al., 2020) a quantidade e qualidade das adições de biomassa podem variar bastante, dependendo dos sistemas de cultivo e insumos utilizados, seria fator determinante para a manutenção da MOS (ALVARENGA et al., 2001).

Com relação aos atributos físicos, houve uma melhoria de 3% na área de SPD com relação ao campo, atribuída a uma pequena redução na densidade do solo de 5,4 % nas áreas de SPD (1,31 g/cm<sup>3</sup>) com relação ao campo nativo (1,39 g/cm<sup>3</sup>). Esta melhoria na densidade pode ser em decorrência do manejo adotado no SPD, é possível que em alguma das áreas onde foram realizadas as coletas tenham sido empregada a escarificação mecânica. Esta prática pode ser adotada de forma pontual para reduzir a compactação do solo em áreas sob sistema de semeadura direta consolidada, reduzindo principalmente a compactação superficial do solo (NICOLOSO, R. da S. et al., 2008). Além disso, o efeito da utilização de plantas de cobertura em SPD já é bastante conhecida pelo seu potencial em reduzir a compactação e melhorar a estrutura física do solo. Nas áreas amostradas, a aveia preta era amplamente empregada como planta de cobertura durante o período de inverno. Esta cultura apresenta um vasto sistema radicular fasciculado que se desenvolvem principalmente na camada superior do solo, favorecendo a estrutura física do solo e ajudando na diminuição da compactação (SUSTAKOWSKI et al., 2020).

Os indicadores microbiológicos apresentaram a maior porcentagem de deterioração (13%), demonstrando maior sensibilidade dos organismos edáficos em responder as alterações provocadas pelo manejo do solo (SILVA



*et al.*, 2021). Sendo possível inferir uma redução da atividade metabólica nas áreas de SPD, quantificada pela atividade enzimática (FDA e Urease) e mineralização de carbono (Respiração basal). A atividade metabólica microbiana é um dos principais mecanismos responsáveis pela transformação de nutrientes no solo (FERREIRA *et al.*, 2008), sendo influenciada pela disponibilidade de C e N no sistema. Como mencionado, o material orgânico aportado nas áreas de SPD, pode ter apresentado certa recalcitrância, dificultando o processo de mineralização do material orgânico e consequentemente reduzindo a atividade biológica do solo. Por outro lado, a redução da mineralização de carbono pode ser favorável, indicando uma maior eficiência da utilização das fontes energéticas (MORAES, 2012). No entanto, somado a menor atividade enzimática e a redução dos teores de C e N, pela redução observada nos indicadores químicos, sustentam a hipótese de que a conversão de uso da terra causou uma degradação da atividade microbiana do solo.



**Figura 13.** Deterioração da QS pela conversão de campos em lavouras conforme Indicadores químico, físicos e biológicos agrupados.

## **7. CONCLUSÕES**

Com base nos parâmetros escolhidos, a conversão de áreas de campo nativo no Pampa para lavouras anuais de soja/aveia/azevem em SPD não afetou negativamente a Qualidade do Solo. A ausência de mudanças significativas nos estoques de carbono e nitrogênio pode ser em decorrência do pouco tempo de conversão destas áreas. Como todas as áreas de sojicultura aqui avaliadas foram estabelecidas em SPD com cobertura de inverno (aveia/azevem) espera-se uma mitigação dos potenciais efeitos negativos desta conversão de usos do solo, ocorrendo alterações na QS de forma mais lenta do que seria percebido em sistemas não conservacionistas.

Entretanto, algumas inferências poder ser feitas, como a seleção de espécies mais resistentes ao distúrbio ambiental causado no solo no momento da conversão de uma área natural e a consequente dominância destas sobre a comunidade microbológica do solo. Assim, a atividade metabólica do solo pode se manter estável, mas poderia ter havido uma perda de biodiversidade. Pelo IQS empregado foi possível verificar uma pequena redução na QS após a conversão dos campos, mais notável no conjunto de indicadores biológicos, o que pode evidenciar a maior sensibilidade destes as mudanças no manejo do solo.

## 8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ADEJUWON, J. O.; EKANADE, O. A comparison of soil properties under different landuse types in a part of the Nigerian cocoa belt. **Catena**, [Amsterdam], v. 15, n. 3–4, p. 319–331, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(88\)90054-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(88)90054-9). Acesso em: 20 dez. 2020.

ALBERGONI, Leide; PELAEZ, Victor. Da Revolução Verde à agrobiotecnologia: ruptura ou continuidade de paradigmas?. **Revista de Economia**, Curitiba, v. 33, n. 1, p. 31–53, 2007. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5380/re.v33i1.8546>. Acesso em: 12 fev. 2021.

ALMEIDA, Brivaldo Gomes de *et al.* Densidade do Solo. *In*: TEIXEIRA, Paulo César; FONTANA, Guilherme Kangussu Donagemma Ademir; TEIXEIRA, Wenceslau Gerales (org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo - 3ª edição revista e ampliada**. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 65–75. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo> <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 3 jan. 2020.

ALMEIDA, Gustavo Cesar Araujo de. **Serviços ecossistêmicos do solo sob sistemas agroflorestais: estado da arte e estudo de caso em São Gonçalo - RJ**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019. Disponível em: [https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1109924/1/Dissertacao GustavoCesarAraujodeAlmeida2019.pdf](https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1109924/1/Dissertacao%20GustavoCesarAraujodeAlmeida2019.pdf). Acesso em: 3 jan. 2021.

ALVARENGA, R. C. *et al.* Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 25–36, 2001. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/485005>. Acesso em: 3 jan. 2021.

ALVES, Lucas Aquino *et al.* The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, [Amsterdam], v. 203, n. April, p. 104678, 2020. Disponível em: [10.1016/j.still.2020.104678](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678). Acesso em: 2 fev. 2021.

ANDERSON, Traute Heidi; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Great Britain, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993. Disponível em: [10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7). Acesso em: 3 março. 2020.

ANDRADE, Bianca O. *et al.* Classification of South Brazilian grasslands: Implications for conservation. **Applied Vegetation Science**, [Upsala ], v. 22, n. 1, p. 168–184, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/avsc.12413>. Acesso em: 2 fev. 2021.

ANDREWS, Susan S *et al.* On-Farm Assessment of Soil Quality in California ' s Central Valley. **Agronomy Journal**, [Madison], v. 94, p. 12–23, 2002.

ARAÚJO, Edson Alves de *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 187–206, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5777/paet.v5.n1.12>. Acesso em: 13 dez. 2020.

ARAÚJO, Ricardo; GOEDERT, Wenceslau J.; LACERDA, Marilusa Pinto Coelho. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1099–1108, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000500025>. Acesso em: 5 jan. 2021.

ARAÚJO, Ademir Sérgio Ferreira de; MONTEIRO, Regina Teresa Rosim. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Journal of Biosciences**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0001-4001\(98\)80116-5](https://doi.org/10.1016/s0001-4001(98)80116-5). Acesso em: 21 out. 2020.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, Birl; GROSSMAN, Bob. Physical tests for monitoring soil quality BT - Methods for Assessing Soil Quality. **Methods for Assessing Soil Quality**, [Madison], v. 49, p. 123–141, 1996. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/articles/sssaspecialpubl/methodsforasses/123?show-t-f=figures&wrapper=no%5Cnpapers3://publication/uuid/1DB545E0-66AF-42A3-A53B-8564799479C5>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BARROS, Márcio Júnior Benassuly *et al.* Fronteira agrícola e conflitos territoriais nas amazônias brasileiras : a expansão do agronegócio da soja e seus efeitos no Planalto de Santarém , Pará-Amazônia-Brasil. **Ciência Geográfica**, Bauru, v. 24, n. 2, p. 893–911, 2020. Disponível em: [https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/revista/anoXXIV\\_2/agb\\_xxiv\\_2\\_web/agb\\_xxiv\\_2-28.pdf](https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/revista/anoXXIV_2/agb_xxiv_2_web/agb_xxiv_2-28.pdf). Acesso em: 3 mar. 2021.

BAYER, C. *et al.* Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, [Amsterdam], v. 86, n. 2, p. 237–245, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.023>. Acesso em: 23 jan. 2021.

BOLDRINI, I. I.; FERREIRA, P. M. A.; ANDRADE, B. O.; SCHNEIDER, A. A.; SETUBAL, R. B.; TREVISAN, R; FREITAS, E.M. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Pallotti, 2010.

BOLDRINI, I. I. A flora dos Campos do Rio Grande do Sul. *In*: PILLAR, Valério De Patta *et al.* (org.). **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, DF, 2009. p. 63–77. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 27 jul. 2020.

BORDIN, Ivan *et al.* Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**,

Brasília, v. 43, n. 12, p. 1785–1792, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200020>. Acesso em: 22 jan. 2021.

BRADFORD, J.M.; PETERSON, G.A. Conservation tillage. *In*: SUMNER, M. E. (org.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 2000. p. 247–266.

BROWN, G. G. *et al.* **Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais**. Brasília: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/129844/1/GeorgeB-LivroServicosAmbientais.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2020.

BUNDY, L.G.; MEISINGER, J.J. Nitrogen Availability Indices. *In*: WEAVER, R. W. *et al.* (org.). **Methods of soil analysis: part 2—microbiological and biochemical properties**. [Madison]: Soil Science Society of America, 1994. p. 951–984. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c41>. Acesso em: 3 jan. 2021.

BÜNEMANN, Else K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, [Amsterdam], v. 120, n. January, p. 105–125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. Acesso em: 3 abr. 2020.

CASTILHOS, Zélia Maria de Souza; MARCELO, Mirela Dias Machado; PINTO, Marcelo Fett. Produção animal com conservação da flora campestre do bioma Pampa. *In*: PILLAR, Valério De Patta *et al.* (org.). **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, DF, 2009. p. 199–205. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 21 out. 2020.

CECAGNO, Diego *et al.* Long-term nitrogen fertilization in native pasture with Italian ryegrass introduction - Effects on soil health attribute indicators. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150635>. Acesso em: 13 jan. 2021.

CHERUBIN, Maurício R. *et al.* A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, [Madison], v. 80, n. 1, p. 215–226, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>. Acesso em: 29 set. 2019.

CHERUBIN, Maurício Roberto; TORMENA, Cássio Antônio; KARLEN, Douglas L. Soil quality evaluation using the soil management assessment framework (SMAF) in Brazilian oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1–18, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160148>. Acesso em: 20 out. 2020.

CIAMPITTI, Ignacio A.; SALVAGIOTTI, Fernando. New insights into soybean biological nitrogen fixation. **Agronomy Journal**, [Madison], v. 110, n. 4, p. 1185–1196, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>. Acesso em: 23 dez. 2020.

CONCEIÇÃO, Paulo Cesar *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, v. 29, n. 5, p. 777–788, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832005000500013>. Acesso em: 31 jan. 2021.

CORDEIRO, José Luís Passos; HASENACK, Heinrich. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. *In*: PILLAR, Valério De Patta *et al.* (org.). **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, DF, 2009. p. 285–299. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 20 dez. 2020.

DALL'AGNOL, Amélio *et al.* **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. Londrina-PR: Embrapa, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470318>. Acesso em: 5 jul. 2019.

DALMOLIN, Ricardo Simão Diniz; CATEN, Alexandre ten. Uso da terra do bioma brasileiro e o impacto sobre a qualidade do solo. **Entre-Lugar**, Dourados, p. 181, 2012. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/entre-lugar/article/view/2454>. Acesso em: 5 maio 2020.

DE-POLLI, Helvécio; PIMENTEL, Márcio Sampaio. Indicadores de Qualidade do Solo. *In*: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (org.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005. p. 17–28.

DIONÍSIO, Jair Alves *et al.* **Guia prático de biologia do solo**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Núcleo Estadual Paraná, 2016. Disponível em: [https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1043646/1/Diana\\_Signorguiapratobicologiasolo.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1043646/1/Diana_Signorguiapratobicologiasolo.pdf). Acesso em: 30 jan. 2021.

DOBROVOLSKI, Ricardo *et al.* Agricultural expansion can menace Brazilian protected areas during the 21 st century. **Natureza e Conservação**, Goiânia, v. 9, n. 2, p. 208–213, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2011.027>. Acesso em: 11 fev. 2021.

DORAN, John W. Soil health and global sustainability: translating science into practice. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [Amsterdam], p. 119–127, 2002. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1190&context=usdaarsfacpub>. Acesso em: 25 jul. 2019.

DORAN, J W; PARKIN, T. B. Defining soil quality for a sustainable environment. *In*: STEWART, B. A. (org.). **Defining and assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of Amer, 1994. v. 35, p. 3–20. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>. Acesso em: 20 nov. 2019.

DORAN, John W.; ZEISS, Michael R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, [Amsterdam], v. 15, n. 1, p. 3–11, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00066-4). Acesso em: 17 maio 2020.

DUBEY, Anamika *et al.* Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. **Biodiversity and Conservation**, [Dordrecht], v. 28, n. 8–9, p. 2405–2429, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01760-5>. Acesso em: 20 jan. 2021.

DUPONT, S. Tianna *et al.* No-tillage conversion of harvested perennial grassland to annual cropland reduces root biomass, decreases active carbon stocks, and impacts soil biota. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [Amsterdam], v. 137, n. 1–2, p. 25–32, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.12.021>.

FAO. **Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment**. Rome: Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/3/I9693EN/i9693en.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021.

FENG, Wenting *et al.* Enhanced decomposition of stable soil organic carbon and microbial catabolic potentials by long-term field warming. **Global Change Biology**, [Hoboken], v. 23, n. 11, p. 4765–4776, 2017. Disponível em: [10.1111/gcb.13755](https://doi.org/10.1111/gcb.13755). Acesso em: 7 nov. 2020.

FERREIRA, Adão de Siqueira *et al.* Atividade respiratória da microbiota e conteúdo de glicose em resposta à adição de fósforo em solo do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 1, p. 1891–1897, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500010>. Acesso em: 2 fev. 2022.

FREITAS, Diego Antonio França de *et al.* Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente 1 Soil quality indexes under different forestry and adjacent native scrubland use and. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 417–428, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300002>. Acesso em: 23 nov. 2019.

GOLDIN, Alan; LAVKULICH, L. M. Historical Land Clearing in the Fraser Lowland of British Columbia and Washington State: I. Effects on Soil Genesis. **Soil Science Society of America Journal**, [Madison], v. 52, n. 2, p. 467–473, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200020031x>. Acesso em: 10 jul. 2019.

GOMES, Marcos Antonio Ferreira; FILIZOLA, Heloisa Ferreira. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: Embrapa, 2006.

GOMES, Algenor da Silva; MARTINS, Ariano de Magalhães Júnior. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Disponível em: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00073850.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2021.

GREGORICH, E. G. *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, [Ottawa], v. 74, n. 4, p. 367–385, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss94-051>. Acesso em: 20 out. 2020.

GRZĄDZIEL, Jarosław. Functional redundancy of soil microbiota – Does more always mean better?. **Polish Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 75–81, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.17951/pjss.2017.50.1.75>. Acesso em: 11 nov. 2020.

HARUNA, Samuel I. *et al.* Improving soil physical properties through the use of cover crops: A review. **Agrosystems, Geosciences and Environment**, [Hoboken], v. 3, n. 1, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agg2.20105>. Acesso em: 25 out. 2020.

HENRY, M. *et al.* Biodiversity, carbon stocks and sequestration potential in aboveground biomass in smallholder farming systems of western Kenya. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [Amsterdam], v. 129, n. 1–3, p. 238–252, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.09.006>. Acesso em: 22 nov. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Efetivos dos rebanhos**. [Rio de Janeiro], 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/393>. Acesso em: 11 fev. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática: Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Soja (em grão); Arroz (em casca) . Área plantada (Hectares)**. [Rio de Janeiro], 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. Acesso em: 11 fev. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática: Tabela 5930 – Área total existente em 31/12 dos efetivos da silvicultura, por espécie florestal**. [Rio de Janeiro], 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5930>. Acesso em: 11 fev. 2021.

INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. **Microbial Ecology**, [New York], v. 15, n. 2, p. 177–188, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02011711>. Acesso em: 2 dez. 2021.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [Amsterdam], v. 79, n. 1, p. 9–16, 2000. Disponível em:



[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0). Acesso em: 11 dez. 2021.

JAKELAITIS, Adriano *et al.* Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, p. 118–127, 2008. Disponível em:

<https://revistas.ufg.br/pat/article/view/4171/3665>. Acesso em: 2 dez. 2021.

JENKINSON, David S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (org.). **Soil biochemistry**. 5. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1981. p. 415–471. Disponível em:

[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang\\_en%7Clang\\_pt&id=qtYC715zIboC&oi=fnd&pg=PA415&dq=Microbial+biomass+in+soil++measurement+an&ots=QfE3XliO-z&sig=q2lPmhc-XmoVeS-Yzh4cjLNawEk&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Microbial%20biomass%20in%20oil%20%20measurement%20an&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang_en%7Clang_pt&id=qtYC715zIboC&oi=fnd&pg=PA415&dq=Microbial+biomass+in+soil++measurement+an&ots=QfE3XliO-z&sig=q2lPmhc-XmoVeS-Yzh4cjLNawEk&redir_esc=y#v=onepage&q=Microbial%20biomass%20in%20oil%20%20measurement%20an&f=false). Acesso em: 13 jan. 2021.

KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, [Berlin], v. 6, n. 1, p. 68–72, 1988. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/BF00257924>. Acesso em: 12 ago. 2020.

KARLEN, D.L. *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, [Madison], v. 61, 1997. Disponível em: <http://naldc.nal.usda.gov/catalog/16713>. Acesso em: 5 jul. 2020.

KAZMIERCZAK, Regiane. **Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistema de preparo**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de concentração – Agricultura uso e manejo do solo) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf%0Ahttp://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022%0Ahttps://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper%0Ahttps://tore.tuhh.de/hand>. Acesso em: 11 jun. 2020.

KUNDE, Roberta Jeske *et al.* Soil quality under integrated crop-livestock system in the pampa biome. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 4, p. 1–8, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.5039/agraria.v13i4a5591>. Acesso em: 12 dez. 2020.

LANNA, Anna Cristina *et al.* Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1933–1939, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000600018>. Acesso em: 2 fev. 2021.

LEITE, Luiz F. C. *et al.* Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolo sob plantio direto no cerrado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina, v. 14, n. 12, p. 1273–1280, 2010. Disponível em: [10.1590/s1415-43662010001200004](https://doi.org/10.1590/s1415-43662010001200004). Acesso em: 20 out. 2020.

LISBOA, Bruno Brito *et al.* Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 45–55, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832012000100004>.

LIU, Dong *et al.* Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. **Catena**, [Amsterdam], v. 162, p. 345–353, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.028>. Acesso em: 11 out. 2020.

LLORENTE, Mireia; GLASER, Bruno; TURRIÓN, M. Belén. Storage of organic carbon and Black carbon in density fractions of calcareous soils under different land uses. **Geoderma**, [Amsterdam], v. 159, n. 1–2, p. 31–38, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.011>. Acesso em: 3 fev. 2021.

LLOYD, A. B.; SHEAFFE, M. Jane. Urease activity in soils. **Plant and Soil**, [Berlin], v. 39, n. 1, p. 71–80, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00018046>. Acesso em: 22 out. 2020.

LORANGER-MERCIRIS, Gladys *et al.* Rapid effects of plant species diversity and identity on soil microbial communities in experimental grassland ecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, [Amsterdam], v. 38, n. 8, p. 2336–2343, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.02.009>. Acesso em: 20 jul. 2020.

MAGNUSSON, William E. *et al.* RAPELD: a modification of the Gentry method for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 5, n. 2, p. 19–24, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1676-06032005000300002>. Acesso em: 21 abr. 2021.

MAHARJAN, Menuka *et al.* Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. **Applied Soil Ecology**, [Amsterdam], v. 113, p. 22–28, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.008>. Acesso em: 12 jan. 2021.

MATHEW, Reji P. *et al.* Impact of No-tillage and conventional tillage systems on soil microbial communities. **Applied and Environmental Soil Science**, [Londres], v. 2012, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2012/548620>. Acesso em: 11 jul. 2020.

MATTE, Alessandra; WAQUIL, Paulo Dabdab. Productive changes in Brazilian Pampa: impacts, vulnerabilities and coping strategies. **Natural Hazards**, [Dordrecht], v. 102, n. 1, p. 469–488, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03934-9>. Acesso em: 14 out. 2020.

MAUSE, Paul W. Soil quality in illinois-an example of a soils geography resource analysis. **The Professional Geographer**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 127–136, 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1971.00127.x>. Acesso em: 12 out. 2020.

MILHEIRAS, Sergio G. *et al.* A Framework to Assess Forest-Agricultural

Landscape Management for Socioecological Well-Being Outcomes. **Frontiers in Forests and Global Change**, [Lausanne], v. 5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.709971>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MONTEIRO, R. T. R.; FRIGHETTO, R. T. S. Determinação da umidade, pH e capacidade de retenção de água do solo. Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo. *In*: FRIGHETTO, Rosa Toyoko Shiraishi; VALARINI, Pedro José (org.). **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 37–40. *E-book*. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/13251/1/2000DC01.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2020.

MONTEIRO, M. T.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 819–826, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000500004>. Acesso em: 30 maio 2021.

MORAES, Júlia Rodegheiro de. **Alterações nos atributos microbiológicos e nos estoques de carbono do solo decorrentes do cultivo de eucalipto no Bioma Pampa**. 2012. 1–127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/123456789/2436>. Acesso em: 20 out. 2020.

MORAIS, Júlia Rodegheiro *et al.* Carbon and nitrogen stocks and microbiological attributes of soil under eucalyptus cultivation in the Pampa biome of southern Brazil. **Geoderma Regional**, [Amsterdam], v. 25, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00392>. Acesso em: 17 dez. 2020.

MOREIRA, Juliana Gomes. **Transformações produtivas no Pampa brasileiro: as mudanças na bovinocultura de corte diante do avanço da soja**. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/197665>. Acesso em: 13 set. 2020.

NESS, Barry *et al.* Categorising tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**, [Amsterdam], v. 60, n. 3, p. 498–508, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>. Acesso em: 21 out. 2022.

NICOLOSO, Rodrigo Da Silveira *et al.* Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 4, p. 2425–2433, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600020>. Acesso em: 24 fev. 2021.

NICOLOSO, Rodrigo da Silveira *et al.* Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1723–1734, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000400037>. Acesso em: 23 abr. 2020.

NIEMEYER, Júlia Carina *et al.* Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. **Applied Soil Ecology**, [Amsterdam], v. 59, p. 96–105, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.03.019>. Acesso em: 10 dez. 2020.

OLIVEIRA, Matheus Messias *et al.* Capim vetiver: uma alternativa para o plantio direto na agricultura familiar. **Revista Terceiro Incluído**, [Goiânia], v. 8, n. 1, p. 77, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/teri.v8i1.45230>. Acesso em: 17 out. 2021.

OLIVEIRA, Alisson Souza; SILVA, Antônio Marciano; MELLO, Carlos Rogério. Water dynamics in springs recharge areas in two environments in the alto rio grande region, Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 59–67, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020148177>. Acesso em: 22 out. 2020.

OVERBECK, Gerhard E. *et al.* Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. **Diversity and Distributions**, [Hoboken], v. 21, n. 12, p. 1455–1460, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ddi.12380>. Acesso em: 12 dez. 2020.

OVERBECK, Erhard Ernst *et al.* Os Campos Sulinos: um bioma negligenciado. *In*: PILLAR, Valério De Patta *et al.* (org.). **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, DF, 2009. p. 26–41. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 13 jul. 2020.

PATERSON, Eric *et al.* Labile and recalcitrant plant fractions are utilised by distinct microbial communities in soil: Independent of the presence of roots and mycorrhizal fungi. **Soil Biology and Biochemistry**, [Amsterdam], v. 40, n. 5, p. 1103–1113, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.12.003>. Acesso em: 21 nov. 2021.

TEIXEIRA, Paulo Cesar *et al.* **Manual de métodos de análises de solo**. 3<sup>o</sup>ed. Brasília: Embrapa, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2021.

PEIXOTO, Fabiana Gomes Teixeira. **Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos do estado de São Paulo sob vegetação nativa e cultivados**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Jaboticabal, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/88281>. Acesso em: 25 maio 2021.

PILLAR, Valério De Patta *et al.* **Campos sulinos-Coservação e uso sutentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, DF, 2009. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 12

jan. 2021.

PILLAR, V.D.; TORNQUIST, C.G.; BAYER, C. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, p. 673–681, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1519-69842012000400006>. Acesso em: 21 dez. 2020.

POEPLAU, Christopher; VOS, Cora; DON, Axel. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. **Soil**, [Basiléia], v. 3, n. 1, p. 61–66, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017>. Acesso em: 7 jul. 2020.

REICHERT, José Miguel; REINERT, Dalvan José; BRAIDA, João Alfredo. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas Conceitos e abrangência. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29–48, 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/274250019\\_Qualidade\\_dos\\_solos\\_e\\_sustentabilidade\\_de\\_sistemas\\_agricolas](https://www.researchgate.net/publication/274250019_Qualidade_dos_solos_e_sustentabilidade_de_sistemas_agricolas). Acesso em: 7 nov. 2020.

REINERT, Dalvan José *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, v. 32, n. 5, p. 1805–1816, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000500002>. Acesso em: 4 mar. 2021.

RIETH, Gerry. **Impactos da conservação de sistemas nativos em áreas de cultivo agrícolas nos indicadores de qualidade do solo**. 2019. 79 p f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/19085>. Acesso em: 24 nov. 2020.

RODELLA, A. A.; SABOYA, L. V. Calibration for conductimetric determination of carbon dioxide. **Soil Biology and Biochemistry**, [Amesterdam], v. 31, n. 14, p. 2059–2060, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00046-2). Acesso em: 12 nov. 2020.

RODRIGUES, Gilberto Aparecido *et al.* Oscilações da temperatura do solo em função de quantidades de palha e horários ao longo do dia. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 15, n. 1, p. 293–304, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31510/infa.v15i1.353>. Acesso em: 30 mar. 2020.

ROSA, Suzana Ferreira da *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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832040580%0APROPRIEDADES>. Acesso em: 1 maio 2021.

SANTOS, Daiane Carvalho dos *et al.* Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um argissolo vermelho sob sistemas de uso no bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1735–1744,

2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000500028>. Acesso em: 7 out. 2020.

SCHIRMANN, Janquieli. **Balanço de carbono e emissão de gases de efeito estufa em campo nativo do bioma Pampa**. 2016. 92 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/144318>. Acesso em: 1 mar. 2021.

SCHNURER, Johan; ROSSWALL, Thomas. Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Total Microbial Activity in Soil and Litter. **Applied and Environmental Microbiology**, [Washington], v. 43, n. 6, p. 1256–1261, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1256-1261.1982>. Acesso em: 1 fev. 2020.

SILVA, Rubens Ribeiro da *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1585–1592, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000500011>. Acesso em: 17 dez. 2020.

SILVA, Derli João Siqueira da *et al.* Efeito do Sistema de Pastoreio Voisin sobre a qualidade de um solo coberto por pastagem natural. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, p. 72331–72341, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-615>. Acesso em: 10 out. 2020.

SILVA, Michelangelo de Oliveira *et al.* Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838–47855, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>. Acesso em: 3 mar. 2020.

SILVA, Marcelo Dutra da. Os cultivos florestais do Pampa, no sul do Rio Grande do Sul: desafios, perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas. **Floresta**, Curitiba, v. 42, p. 215–226, 2012. Disponível em: [https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/2722/Os cultivos florestais do Pampa%2C no sul do Rio Grande do Sul perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas.pdf?sequence=1](https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/2722/Os%20cultivos%20florestais%20do%20Pampa%20no%20sul%20do%20Rio%20Grande%20do%20Sul%20perdas%20e%20perspectivas%20frente%20ao%20avan%C3%A7o%20de%20novas%20fronteiras%20agr%C3%ADcolas.pdf?sequence=1). Acesso em: 1 maio 2020.

SILVA, Michelangelo de Oliveira *et al.* Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-463>. Acesso em: 25 abr. 2022.

SILVA, Edmilson Evangelista da; AZEVEDO, Pedro Henrique Sabadin De; DE-POLLI, Helvécio. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO<sub>2</sub>)**. Seropédica: Embrapa, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/627577/determinacao-da-respiracao-basal-rbs-e-quociente-metabolico-do-solo-qco2>. Acesso em: 4 jul. 2019.

SILVA, Edmilson Evangelista da; AZEVEDO, Pedro Henrique Sabadin De; DE-POLLI, Helvécio. **Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/625010/determinacao-do-carbono-da-biomassa-microbiana-do-solo-bms-c>. Acesso em: 1 maio 2021.

SMYTHL, A J; DUMANSKI, J. A framework for evaluating sustainable land management. **Canadian Journal of Soil Science**, [Ottawa], p. 401–406, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss95-059>. Acesso em: 17 abr. 2021.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and <sup>14</sup>C labelled cells. **Soil Biology and Biochemistry**, Great Britain, v. 20, n. 3, p. 337–343, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90014-4). Acesso em: 4 jan. 2021.

SUERTEGARAY, Dirce M. A.; SILVA, Luís Alberto Pires da. Tchê Pampa: histórias da natureza gaúcha. In: PILLAR, Valério De Patta *et al.* (org.). **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 42–63. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 2 jul. 2021.

SUSTAKOWSKI, Monica C. *et al.* Ferralsol Porosity and Density After Mechanical Scarification and Crop Rotation Systems. **Journal of Agricultural Science**, [Cambridge], v. 12, n. 10, p. 316, 2020. Disponível em: [10.5539/jas.v12n10p316](https://doi.org/10.5539/jas.v12n10p316). Acesso em: 5 jan. 2021.

KUPLICH, Tatiana Mora; CAPOANE, Viviane; COSTA, Luis Fernando Flenik. O avanço da soja no bioma Pampa. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, n. 31, p. 83–100, 2018. Disponível em: <https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/4102>. Acesso em: 31 jan. 2022.

TELLEN, Valentine Asong; YERIMA, Bernard P. K. Effects of land use change on soil physicochemical properties in selected areas in the North West region of Cameroon. **Environmental Systems Research**, [s. l.], v. 7, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0106-0>. Acesso em: 10 out. 2020.

TORNQUIST, Carlos Gustavo; BAYER, Cimélio. Serviços ambientais: oportunidades para a conservação dos Campos Sulinos. In: PILLAR, Valério De Patta *et al.* (org.). **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 122. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5128>. Acesso em: 2 jul. 2019.

TURETTA, Ana Paula Dias *et al.* **Avaliação do potencial de prestação de serviços ambientais em sistema plantio direto ( SPD )**. Rio de Janeiro:

Embrapa Solos, 2020. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/profile/Alba-Martins-2/publication/341408145\\_Avaliacao\\_do\\_Potencial\\_de\\_Prestacao\\_de\\_Servicos\\_Ambientais\\_em\\_Sistema\\_Plantio\\_Direto\\_SPD/links/5ebeaa4f458515626ca937da/Avaliacao-do-Potencial-de-Prestacao-de-Servicos-Ambientais-em-Sistema-Plantio-Direto-SPD.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alba-Martins-2/publication/341408145_Avaliacao_do_Potencial_de_Prestacao_de_Servicos_Ambientais_em_Sistema_Plantio_Direto_SPD/links/5ebeaa4f458515626ca937da/Avaliacao-do-Potencial-de-Prestacao-de-Servicos-Ambientais-em-Sistema-Plantio-Direto-SPD.pdf). Acesso em: 10 out. 2020.

TURETTA, Ana Paula Dias; CASTRO, Selma Simões de; POLIDORO, José Carlos. **Solos, sustentabilidade e provisão de serviços ecossistêmicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1080522/1/2017040.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKIN, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Great Britain, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987. Disponível em: <papers://c153aa6a-674a-4d9c-be67-ab5f6be3d6cb/Paper/p4>. Acesso em: 4 jul. 2020.

VARGAS, Rafael da Silva. **Comunidade bacteriana de uma área do bioma Pampa**. 2014. 46 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Genética Molecular, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000928904&loc=2014&l=5ef935710ed1fd03>. Acesso em: 25 jan. 2021.

VELASQUEZ, Elena; LAVELLE, Patrick; ANDRADE, Mercedes. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, [Amsterdam], v. 39, n. 12, p. 3066–3080, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013>. Acesso em: 7 nov. 2020.

VEZZANI, Fabiane Machado. Solos e os serviços ecossistêmicos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 08, p. 673–684, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.html>. Acesso em: 22 nov. 2020.

VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. Uma visão sobre a qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 743–755, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>. Acesso em: 7 jul. 2020.

VICENTE, São *et al.* Advances in soybean production and productive transformations in beef cattle farming in São Vicente do Sul - RS / Brazil. **Agrarian Sciences Journal**, Montes Claros, p. 1–9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2021.36935>. Acesso em: 4 maio 2022.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia. **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, 2016. Disponível em: 9788578112806. Acesso em: 16 set. 2019.

WANG, Hao *et al.* No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming



system. **Journal of Environmental Management**, [Amsterdam], v. 261, p. 2–8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110261>. Acesso em: 21 out. 2021.

WESZ JUNIOR, Valdemar João *et al.* Dinâmicas recentes do agronegócio no Oeste do Pará (Brasil): expansão da soja e estruturação de corredores logísticos. **Mundo Agrario**, La Plata, v. 22, p. 174, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24215/15155994e174>. Acesso em: 4 maio 2022.

XAVIER, Francisco Alisson da Silva *et al.* Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba - CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 247–258, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000200006>. Acesso em: 1 nov. 2021.

XU, Yilu *et al.* Microbial control of soil carbon turnover. *In*: CARLOS GARCIA, PAOLO NANNIPIERI, Teresa Hernandez (org.). **The Future of Soil Carbon: Its Conservation and Formation**. [Amsterdam]: Elsevier Inc., 2018. p. 165–194. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00006-1>. Acesso em: 7 nov. 2022.

ZHANG, Yakun *et al.* Plant diversity increases the abundance and diversity of soil fauna: A meta-analysis. **Geoderma**, [Amsterdam], v. 411, p. 1–7, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115694>. Acesso em: 15 dez. 2020.

## APÊNDICES

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

| Sítio    | Prof. (cm) | Campo Nativo |       | SPD   |       |
|----------|------------|--------------|-------|-------|-------|
|          |            | C (%)        | N (%) | C (%) | N (%) |
| Aceguá_1 | 0 – 5      | 6,25         | 0,65  | 3,00  | 0,27  |
|          | 5 – 10     | 3,27         | 0,28  | 2,44  | 0,23  |
|          | 10 - 15    | 2,62         | 0,21  | 2,02  | 0,18  |
|          | 15 - 20    | 2,27         | 0,19  | 2,09  | 0,19  |
|          | 20 - 25    | 2,28         | 0,18  | 1,77  | 0,16  |
|          | 25 - 30    | 1,98         | 0,16  | 1,74  | 0,15  |
| Aceguá_2 | 0 – 5      | 4,77         | 0,40  | 2,41  | 0,21  |
|          | 5 – 10     | 4,85         | 0,42  | 1,70  | 0,16  |
|          | 10 - 15    | 1,93         | 0,17  | 1,28  | 0,13  |
|          | 15 - 20    | 1,63         | 0,14  | 1,12  | 0,12  |
|          | 20 - 25    | 1,32         | 0,11  | 1,28  | 0,13  |
|          | 25 - 30    | 1,06         | 0,10  | 1,02  | 0,10  |
| Aceguá_3 | 0 – 5      | 3,67         | 0,32  | 3,03  | 0,28  |
|          | 5 – 10     | 2,45         | 0,22  | 2,66  | 0,25  |
|          | 10 - 15    | 1,85         | 0,17  | 2,01  | 0,18  |
|          | 15 - 20    | 1,65         | 0,15  | 2,07  | 0,19  |
|          | 20 - 25    | 1,46         | 0,13  | 1,71  | 0,15  |
|          | 25 - 30    | 1,38         | 0,13  | 1,72  | 0,14  |
| Jarí_1   | 0 – 5      | 4,15         | 0,31  | 3,18  | 0,34  |
|          | 5 – 10     | 2,15         | 0,16  | 1,79  | 0,15  |
|          | 10 - 15    | 2,57         | 0,21  | 1,61  | 0,18  |
|          | 15 - 20    | 1,87         | 0,13  | 1,57  | 0,12  |
|          | 20 - 25    | 2,06         | 0,15  | 1,48  | 0,11  |
|          | 25 - 30    | 2,11         | 0,15  | 1,47  | 0,10  |
| Jarí_2   | 0 – 5      | 3,37         | 0,26  | 3,42  | 0,38  |
|          | 5 – 10     | 1,71         | 0,14  | 2,39  | 0,22  |
|          | 10 - 15    | 1,90         | 0,16  | 2,08  | 0,23  |
|          | 15 - 20    | 1,59         | 0,12  | 2,06  | 0,23  |
|          | 20 - 25    | 1,60         | 0,12  | 1,79  | 0,15  |
|          | 25 - 30    | 1,51         | 0,11  | 2,06  | 0,20  |
|          | 0 – 5      | 0,87         | 0,07  | 0,95  | 0,09  |
|          | 5 – 10     | 0,56         | 0,06  | 0,48  | 0,06  |

|                          |         |      |      |      |      |
|--------------------------|---------|------|------|------|------|
| Alegrete_1               | 10 - 15 | 0,53 | 0,06 | 0,40 | 0,05 |
|                          | 15 - 20 | 0,50 | 0,06 | 0,34 | 0,05 |
|                          | 20 - 25 | 0,50 | 0,06 | 0,35 | 0,04 |
|                          | 25 - 30 | 0,49 | 0,06 | 0,38 | 0,05 |
| Alegrete_2               | 0 - 5   | 1,79 | 0,14 | 1,76 | 0,13 |
|                          | 5 - 10  | 1,25 | 0,11 | 1,22 | 0,10 |
|                          | 10 - 15 | 1,04 | 0,09 | 0,88 | 0,07 |
|                          | 15 - 20 | 1,13 | 0,09 | 0,84 | 0,07 |
|                          | 20 - 25 | 0,97 | 0,09 | 0,99 | 0,08 |
|                          | 25 - 30 | 0,97 | 0,08 | 0,92 | 0,07 |
| Alegrete_3               | 0 - 5   | 0,66 | 0,07 | 1,50 | 0,14 |
|                          | 5 - 10  | 0,53 | 0,06 | 0,91 | 0,09 |
|                          | 10 - 15 | 0,36 | 0,04 | 0,70 | 0,07 |
|                          | 15 - 20 | 0,37 | 0,04 | 0,67 | 0,06 |
|                          | 20 - 25 | 0,35 | 0,05 | 0,71 | 0,07 |
|                          | 25 - 30 | 0,38 | 0,04 | 0,64 | 0,06 |
| S. Antônio das Missões_1 | 0 - 5   | 2,62 | 0,32 | 2,19 | 0,19 |
|                          | 5 - 10  | 2,18 | 0,21 | 1,52 | 0,14 |
|                          | 10 - 15 | 1,93 | 0,17 | 1,40 | 0,12 |
|                          | 15 - 20 | 1,74 | 0,21 | 1,32 | 0,11 |
|                          | 20 - 25 | 1,60 | 0,20 | 1,30 | 0,11 |
|                          | 25 - 30 | 1,51 | 0,12 | 1,21 | 0,10 |
| S. Antônio das Missões_2 | 0 - 5   | 2,97 | 0,32 | 2,13 | 0,18 |
|                          | 5 - 10  | 1,58 | 0,12 | 1,78 | 0,15 |
|                          | 10 - 15 | 1,79 | 0,14 | 1,57 | 0,13 |
|                          | 15 - 20 | 1,66 | 0,13 | 1,37 | 0,11 |
|                          | 20 - 25 | 1,54 | 0,12 | 1,20 | 0,09 |
|                          | 25 - 30 | 1,29 | 0,11 | 1,24 | 0,10 |
| São Gabriel_1            | 0 - 5   | 1,92 | 0,16 | 1,87 | 0,16 |
|                          | 5 - 10  | 0,86 | 0,09 | 0,85 | 0,09 |
|                          | 10 - 15 | 0,79 | 0,09 | 0,52 | 0,06 |
|                          | 15 - 20 | 0,56 | 0,06 | 0,37 | 0,04 |
|                          | 20 - 25 | 0,60 | 0,07 | 0,39 | 0,05 |
|                          | 25 - 30 | 0,57 | 0,06 | 0,39 | 0,05 |

**Apêndice 2.** Teores de C e N das amostras destinadas as análises microbiológicas, por sítio e uso do solo.

|                             | C (%) | N (%) |
|-----------------------------|-------|-------|
| <b>Campo</b>                |       |       |
|                             | 4,40  | 0,37  |
|                             | 5,30  | 0,51  |
| Jarí_1                      | 3,78  | 0,32  |
|                             | 3,26  | 0,28  |
|                             | 4,28  | 0,34  |
|                             | 2,64  | 0,25  |
|                             | 3,39  | 0,30  |
| Jarí_2                      | 3,96  | 0,30  |
|                             | 2,95  | 0,26  |
|                             | 2,99  | 0,27  |
|                             | 1,65  | 0,17  |
| São Gabriel_1               | 1,65  | 0,17  |
|                             | 1,65  | 0,17  |
|                             | 5,23  | 0,43  |
|                             | 4,15  | 0,37  |
| Santo Antônio das Missões_1 | 3,32  | 0,27  |
|                             | 2,97  | 0,29  |
|                             | 3,58  | 0,33  |
|                             | 3,31  | 0,32  |
|                             | 3,87  | 0,33  |
| Santo Antônio das Missões_2 | 1,80  | 0,17  |
|                             | 3,78  | 0,33  |
|                             | 2,66  | 0,25  |
|                             | 0,92  | 0,08  |
|                             | 1,08  | 0,09  |
| Alegrete_1                  | 1,00  | 0,09  |
|                             | 0,95  | 0,08  |
|                             | 0,70  | 0,06  |
|                             | 1,71  | 0,15  |
|                             | 1,54  | 0,14  |
| Alegrete_2                  | 1,73  | 0,16  |
|                             | 1,55  | 0,12  |
|                             | 1,81  | 0,16  |
|                             | 2,01  | 0,17  |
|                             | 0,90  | 0,07  |
| Alegrete_3                  | 0,92  | 0,08  |
|                             | 0,62  | 0,05  |

|                               |      |      |
|-------------------------------|------|------|
|                               | 0,73 | 0,06 |
|                               | 2,17 | 0,19 |
|                               | 4,82 | 0,45 |
| Aceguá_1                      | 4,10 | 0,35 |
|                               | 3,93 | 0,37 |
|                               | 4,47 | 0,43 |
|                               | 4,85 | 0,48 |
| Aceguá_2                      | 4,15 | 0,39 |
|                               | 3,85 | 0,37 |
|                               | 3,68 | 0,36 |
|                               | 3,85 | 0,34 |
| Aceguá_3                      | 4,70 | 0,46 |
|                               | 4,21 | 0,44 |
| <b>Sistema Plantio Direto</b> |      |      |
|                               | 3,53 | 0,34 |
|                               | 3,10 | 0,29 |
| Jarí_1                        | 3,45 | 0,34 |
|                               | 4,03 | 0,35 |
|                               | 3,80 | 0,35 |
|                               | 3,54 | 0,32 |
| Jarí_2                        | 3,79 | 0,35 |
|                               | 3,60 | 0,33 |
|                               | 3,77 | 0,34 |
|                               | 3,05 | 0,31 |
|                               | 3,84 | 0,35 |
|                               | 2,70 | 0,25 |
| Jarí_3                        | 2,47 | 0,23 |
|                               | 4,21 | 0,40 |
|                               | 2,04 | 0,19 |
|                               | 2,04 | 0,19 |
| São Gabriel_1                 | 2,04 | 0,19 |
|                               | 3,01 | 0,28 |
|                               | 2,66 | 0,25 |
|                               | 2,44 | 0,23 |
| Santo Antônio das Missões_1   | 2,53 | 0,24 |
|                               | 2,48 | 0,24 |
|                               | 2,44 | 0,22 |
|                               | 2,74 | 0,24 |
|                               | 2,56 | 0,25 |
| Santo Antônio das Missões_2   | 3,00 | 0,29 |
|                               | 2,13 | 0,19 |
|                               | 1,11 | 0,09 |
| Alegrete_1                    | 0,95 | 0,09 |

|            |      |      |
|------------|------|------|
|            | 1,09 | 0,10 |
|            | 0,66 | 0,07 |
|            | 1,19 | 0,11 |
|            | 1,81 | 0,14 |
|            | 1,81 | 0,14 |
| Alegrete_2 | 1,84 | 0,15 |
|            | 1,66 | 0,15 |
|            | 2,01 | 0,18 |
|            | 1,46 | 0,13 |
|            | 1,65 | 0,14 |
| Alegrete_3 | 0,70 | 0,05 |
|            | 1,67 | 0,11 |
|            | 1,87 | 0,16 |
|            | 3,30 | 0,32 |
|            | 2,95 | 0,29 |
| Aceguá_1   | 3,05 | 0,31 |
|            | 3,46 | 0,34 |
|            | 3,02 | 0,30 |
|            | 4,08 | 0,37 |
|            | 3,76 | 0,35 |
| Aceguá_2   | 3,51 | 0,37 |
|            | 3,63 | 0,34 |
|            | 4,17 | 0,38 |
|            | 2,70 | 0,26 |
|            | 2,73 | 0,24 |
| Aceguá_3   | 2,50 | 0,24 |
|            | 2,36 | 0,22 |
|            | 2,58 | 0,25 |

**Apêndice 3.** Teores de areia, silte e argila por sítio, profundidade e uso do solo.

| Sítio                   | Profundidade | Ds(g<br>cm <sup>-3</sup> ) | Areia | Silte | Argila |
|-------------------------|--------------|----------------------------|-------|-------|--------|
| <b>Campo</b>            |              |                            |       |       |        |
|                         |              |                            | %     |       |        |
| São Gabriel_1           | 0 - 5        | 1,41                       | 85,7  | 6,5   | 7,8    |
|                         | 5 - 10       | 1,76                       | 88,5  | 4,1   | 7,4    |
|                         | 10 - 15      | 1,84                       | 88,8  | 4,0   | 7,2    |
|                         | 15 - 20      | 1,88                       | 88,9  | 4,0   | 7,1    |
|                         | 20 - 25      | 1,82                       | 85,1  | 6,8   | 8,2    |
|                         | 25 - 30      | 1,47                       | 88,8  | 4,0   | 7,2    |
| S.Antonio das Missões_1 | 0 - 5        | 1,08                       | 12,4  | 24,3  | 63,2   |
|                         | 5 - 10       | 1,30                       | 12,9  | 24,2  | 62,9   |
|                         | 10 - 15      | 1,34                       | 14,5  | 24,9  | 60,6   |
|                         | 15 - 20      | 1,63                       | 13,0  | 25,3  | 61,6   |
|                         | 20 - 25      | 1,30                       | 10,6  | 29,0  | 60,4   |
|                         | 25 - 30      | 1,20                       | 12,8  | 27,0  | 60,2   |
| S.Antonio das Missões_2 | 0 - 5        | 1,01                       | 26,8  | 31,5  | 41,7   |
|                         | 5 - 10       | 1,28                       | 26,4  | 31,7  | 41,9   |
|                         | 10 - 15      | 1,40                       | 22,1  | 31,8  | 46,1   |
|                         | 15 - 20      | 1,41                       | 23,1  | 33,1  | 43,8   |
|                         | 20 - 25      | 1,36                       | 20,7  | 27,0  | 52,2   |
|                         | 25 - 30      | 1,02                       | 20,1  | 33,3  | 46,6   |
| Aceguá_1                | 0 - 5        | 0,72                       | 5,1   | 33,9  | 61,0   |
|                         | 5 - 10       | 1,05                       | 8,0   | 36,6  | 55,4   |
|                         | 10 - 15      | 1,12                       | 8,2   | 35,0  | 56,8   |
|                         | 15 - 20      | 1,14                       | 8,2   | 32,5  | 59,3   |
|                         | 20 - 25      | 1,08                       | 5,8   | 31,9  | 62,3   |
|                         | 25-30        | 1,08                       | 4,7   | 28,3  | 67,0   |
| Aceguá_2                | 0 - 5        | 0,79                       | 9,9   | 39,4  | 50,7   |
|                         | 5 - 10       | 1,50                       | 12,4  | 34,9  | 52,7   |
|                         | 10 - 15      | 1,26                       | 14,4  | 41,5  | 44,0   |
|                         | 15-20        | 1,58                       | 15,1  | 45,3  | 39,6   |
|                         | 20-25        | 1,33                       | 14,2  | 36,9  | 48,9   |
|                         | 25-30        | 0,80                       | 14,4  | 45,7  | 39,9   |
| Aceguá_3                | 0 - 5        | 0,96                       | 9,2   | 42,0  | 48,8   |
|                         | 5 - 10       | 1,22                       | 9,8   | 47,9  | 42,3   |
|                         | 10 - 15      | 1,28                       | 9,8   | 45,9  | 44,3   |
|                         | 15 - 20      | 1,32                       | 8,8   | 46,4  | 44,8   |
|                         | 20 - 25      | 1,30                       | 9,0   | 48,3  | 42,7   |

|                               |         |      |      |      |      |
|-------------------------------|---------|------|------|------|------|
|                               | 25-30   | 1,30 | 7,5  | 39,2 | 53,3 |
| Jarí_1                        | 0 - 5   | 1,22 | 13,7 | 31,8 | 54,4 |
|                               | 5 - 10  | 0,78 | 13,4 | 37,2 | 49,4 |
|                               | 10 - 15 | 1,70 | 13,6 | 39,4 | 47,1 |
|                               | 15 - 20 | 1,20 | 11,7 | 40,2 | 48,1 |
|                               | 20 - 25 | 1,20 | 15,0 | 40,5 | 44,4 |
|                               | 25 - 30 | 1,02 | 13,4 | 43,4 | 43,2 |
| Jarí_2                        | 0 - 5   | 1,05 | 36,7 | 24,3 | 38,9 |
|                               | 5 - 10  | 1,30 | 31,8 | 27,1 | 41,1 |
|                               | 10 - 15 | 1,02 | 36,2 | 24,6 | 39,3 |
|                               | 15 - 20 | 1,35 | 37,2 | 20,1 | 42,7 |
|                               | 20 - 25 | 1,42 | 37,9 | 18,7 | 43,4 |
|                               | 25 - 30 | 1,24 | 20,6 | 25,4 | 53,9 |
| Alegrete_1                    | 0 - 5   | 1,38 | 82,4 | 6,3  | 11,2 |
|                               | 5 - 10  | 1,56 | 81,9 | 4,9  | 13,2 |
|                               | 10 - 15 | 1,54 | 82,3 | 4,8  | 12,9 |
|                               | 15 - 20 | 1,54 | 79,7 | 2,4  | 17,9 |
|                               | 20 - 25 | 1,52 | 77,2 | 4,9  | 17,9 |
|                               | 25 - 30 | 1,50 | 76,2 | 4,6  | 19,2 |
| Alegrete_2                    | 0 - 5   | 1,76 | 69,7 | 7,4  | 22,9 |
|                               | 5 - 10  | 1,73 | 68,3 | 10,3 | 21,3 |
|                               | 10 - 15 | 1,71 | 69,6 | 8,5  | 21,9 |
|                               | 15 - 20 | 1,68 | 66,2 | 8,8  | 24,9 |
|                               | 20 - 25 | 1,66 | 66,9 | 8,7  | 24,5 |
|                               | 25 - 30 | 1,49 | 64,8 | 9,2  | 26,0 |
| Alegrete_3                    | 0 - 5   | 1,36 | 85,7 | 2,2  | 12,2 |
|                               | 5 - 10  | 1,49 | 88,2 | 1,8  | 10,0 |
|                               | 10 - 15 | 1,49 | 86,9 | 1,7  | 11,3 |
|                               | 15 - 20 | 1,46 | 85,6 | 1,9  | 12,5 |
|                               | 20 - 25 | 1,37 | 84,4 | 2,1  | 13,6 |
|                               | 25 - 30 | 1,31 | 83,8 | 1,9  | 14,4 |
| <b>Sistema Plantio Direto</b> |         |      |      |      |      |
| São Gabriel_1                 | 0 - 5   | 1,07 | 72,2 | 3,7  | 24,1 |
|                               | 5 - 10  | 1,24 | 76,1 | 8,2  | 15,7 |
|                               | 10 - 15 | 1,35 | 73,9 | 9,0  | 17,1 |
|                               | 15 - 20 | 1,38 | 74,0 | 10,3 | 15,7 |
|                               | 20 - 25 | 1,35 | 74,8 | 8,7  | 16,5 |
|                               | 25 - 30 | 1,29 | 76,7 | 8,0  | 15,3 |
| Santo Antônio das Missões_1   | 0 - 5   | 1,15 | 17,4 | 24,1 | 58,6 |
|                               | 5 - 10  | 1,38 | 16,2 | 27,1 | 56,6 |
|                               | 10 - 15 | 1,40 | 16,9 | 25,7 | 57,4 |
|                               | 15 - 20 | 1,31 | 17,6 | 21,9 | 60,5 |
|                               | 20 - 25 | 1,40 | 13,3 | 22,0 | 64,7 |



|                             |         |      |      |      |      |
|-----------------------------|---------|------|------|------|------|
|                             | 25 - 30 | 1,26 | 27,8 | 17,5 | 54,7 |
| Santo Antônio das Missões_2 | 0 - 5   | 1,08 | 23,1 | 23,5 | 53,4 |
|                             | 5 - 10  | 1,13 | 23,3 | 23,5 | 53,2 |
|                             | 10 - 15 | 1,34 | 22,5 | 22,6 | 54,9 |
|                             | 15 - 20 | 1,38 | 23,2 | 23,5 | 53,3 |
|                             | 20 - 25 | 1,32 | 37,6 | 28,9 | 33,5 |
|                             | 25 - 30 | 1,21 | 11,2 | 15,7 | 73,1 |
| Aceguá_1                    | 0 - 5   | 1,08 | 10,9 | 33,0 | 56,1 |
|                             | 5 - 10  | 1,49 | 11,6 | 31,3 | 57,1 |
|                             | 10 - 15 | 1,24 | 8,6  | 28,3 | 63,1 |
|                             | 15 - 20 | 1,51 | 6,6  | 24,8 | 68,6 |
|                             | 20 - 25 | 1,14 | 10,3 | 23,8 | 65,9 |
|                             | 25 - 30 | 0,69 | 3,9  | 24,5 | 71,6 |
| Aceguá_2                    | 0 - 5   | 1,06 | 8,5  | 46,7 | 44,8 |
|                             | 5 - 10  | 1,36 | 15,3 | 37,0 | 47,7 |
|                             | 10 - 15 | 1,40 | 21,9 | 37,8 | 40,3 |
|                             | 15 - 20 | 1,35 | 24,8 | 34,5 | 40,7 |
|                             | 20 - 25 | 1,31 | 22,4 | 37,4 | 40,2 |
|                             | 25 - 30 | 1,22 | 26,8 | 32,8 | 40,3 |
| Aceguá_3                    | 0 - 5   | 1,00 | 7,8  | 36,1 | 56,0 |
|                             | 5 - 10  | 1,16 | 9,9  | 32,8 | 57,2 |
|                             | 10 - 15 | 1,23 | 7,8  | 32,1 | 60,1 |
|                             | 15 - 20 | 1,20 | 6,2  | 32,7 | 61,1 |
|                             | 20 - 25 | 1,15 | 6,2  | 29,9 | 63,9 |
|                             | 25 - 30 | 1,12 | 7,9  | 32,1 | 60,0 |
| Jarí_1                      | 0 - 5   | 1,13 | 11,7 | 38,5 | 49,8 |
|                             | 5 - 10  | 1,34 | 9,8  | 28,6 | 61,7 |
|                             | 10 - 15 | 1,18 | 11,0 | 11,2 | 77,8 |
|                             | 15 - 20 | 1,37 | 9,9  | 28,7 | 61,4 |
|                             | 20 - 25 | 1,31 | 9,5  | 11,3 | 79,1 |
|                             | 25 - 30 | 1,27 | 17,3 | 41,5 | 41,3 |
| Jarí_2                      | 0 - 5   | 1,06 | 19,4 | 38,3 | 42,3 |
|                             | 5 - 10  | 1,27 | 21,5 | 22,5 | 56,0 |
|                             | 10 - 15 | 1,31 | 22,0 | 30,4 | 47,6 |
|                             | 15 - 20 | 1,24 | 22,3 | 13,0 | 64,7 |
|                             | 20 - 25 | 1,25 | 30,5 | 23,2 | 46,2 |
|                             | 25 - 30 | 0,82 | 21,5 | 21,0 | 57,5 |
| Jarí_3                      | 0 - 5   | 1,16 | 18,7 | 33,2 | 48,1 |
|                             | 5 - 10  | 1,39 | 17,6 | 28,0 | 54,4 |
|                             | 10 - 15 | 1,37 | 17,5 | 28,0 | 54,5 |
|                             | 15 - 20 | 1,30 | 17,4 | 25,3 | 57,3 |
|                             | 20 - 25 | 1,32 | 17,9 | 27,9 | 54,2 |
|                             | 25 - 30 | 1,28 | 9,0  | 28,2 | 62,8 |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| Alegrete_1 | 0 - 5   | 1,45 | 84,6 | 2,4  | 12,9 |
|            | 5 - 10  | 1,51 | 83,8 | 2,6  | 13,6 |
|            | 10 - 15 | 1,56 | 83,8 | 2,6  | 13,7 |
|            | 15 - 20 | 1,63 | 82,9 | 2,3  | 14,7 |
|            | 20 - 25 | 1,61 | 83,1 | 4,1  | 12,9 |
|            | 25 - 30 | 1,61 | 81,3 | 5,1  | 13,6 |
| Alegrete_2 | 0 - 5   | 1,20 | 70,7 | 5,2  | 24,1 |
|            | 5 - 10  | 1,58 | 68,3 | 7,1  | 24,6 |
|            | 10 - 15 | 1,56 | 68,9 | 8,7  | 22,4 |
|            | 15 - 20 | 1,50 | 65,2 | 11,3 | 23,4 |
|            | 20 - 25 | 1,44 | 66,1 | 8,9  | 25,1 |
|            | 25 - 30 | 1,41 | 64,6 | 6,9  | 28,5 |
| Alegrete_3 | 0 - 5   | 1,12 | 71,8 | 7,7  | 20,5 |
|            | 5 - 10  | 1,53 | 72,0 | 7,7  | 20,4 |
|            | 10 - 15 | 1,54 | 68,2 | 4,1  | 27,7 |
|            | 15 - 20 | 1,48 | 65,7 | 5,9  | 28,5 |
|            | 20 - 25 | 1,44 | 62,5 | 6,0  | 31,4 |
|            | 25 - 30 | 1,41 | 60,5 | 7,7  | 31,8 |

**Apêndice 4.** Análise de variância das análises físicas e químicas.

| <b>Estoques de Carbono (0-10)</b>    |       |        |         |         |    |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|---------|----|
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 11     | 85,63   | 0       | ** |
| Uso                                  | 1     | 11     | 1,86    | 0,1996  | ns |
|                                      | R2m   | 0.0315 | R2c     | 0,6099  |    |
| <b>Estoques de Carbono (0-20)</b>    |       |        |         |         |    |
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 11     | 89,321  | 0       | *  |
| Uso                                  | 1     | 11     | 1,453   | 0,2533  | Ns |
|                                      | R2m   | 0.0187 | R2c     | 0,7030  |    |
| <b>Estoques de Carbono (0-30)</b>    |       |        |         |         |    |
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 11     | 91,5902 | 0       | ** |
| Uso                                  | 1     | 11     | 1,24467 | 0,2884  | Ns |
|                                      | R2m   | 0,0119 | R2c     | 0,7789  |    |
| <b>Nitrogenio (Mg/ha)</b>            |       |        |         |         |    |
| <b>Estoques de Nitrogênio (0-10)</b> |       |        |         |         |    |
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 11     | 87,6250 | 0       | ** |
| Uso                                  | 1     | 11     | 0,6433  | 0,4395  | Ns |
|                                      | R2m   | 0,0136 | R2c     | 0,513   |    |
| <b>Estoques de Nitrogênio (0-20)</b> |       |        |         |         |    |
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 11     | 98,0074 | 0       | ** |
| Uso                                  | 1     | 11     | 0,1930  | 0,6689  | Ns |
|                                      | R2m   | 0,0039 | R2c     | 0,5295  |    |
| <b>Estoques de Nitrogênio (0-30)</b> |       |        |         |         |    |
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 11     | 91,5902 | 0       | ** |
| Uso                                  | 1     | 11     | 1,24467 | 0,2884  | Ns |
|                                      | R2m   | 0,0024 | R2c     | 0,5874  |    |
| <b>Teores de carbono</b>             |       |        |         |         |    |
|                                      | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                            | 1     | 71     | 1,5306  | 0,2200  | Ns |
| Uso                                  | 1     | 71     | 3,4995  | 0,0655  | Ns |

|                             |       |        |         |         |    |
|-----------------------------|-------|--------|---------|---------|----|
|                             | R2m   | 0,0032 | R2c     | 0,8671  |    |
| <b>Teores de nitrogênio</b> |       |        |         |         |    |
|                             | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                   | 1     | 71     | 96,6874 | 0       | ** |
| Uso                         | 1     | 71     | 0,2510  | 0,6178  | Ns |
|                             | R2m   | 0,0003 | R2c     | 0,8272  |    |
| <b>Densidade</b>            |       |        |         |         |    |
|                             | numDF | denDF  | F-value | p-value |    |
| Intercept                   | 1     | 131    | 81,5853 | 0       | ** |
|                             | 1     | 131    | 0,8344  | 0,3626  | Ns |
|                             | R2m   | 0,0038 | R2c     | 0,3352  |    |

Não significativo ns, \* significativo  $p < 0,05$ , \*\* significativo  $p < 0,01$ .

#### **Apêndice 5.** Análise de variância variáveis microbiológicas, modelo estatístico.

|                                       |       |         |         |         |    |
|---------------------------------------|-------|---------|---------|---------|----|
| <b>Atividade da FDA</b>               |       |         |         |         |    |
|                                       | numDF | denDF   | F-value | p-value |    |
| Intercept                             | 1     | 84      | 285,781 | 0       | ** |
| Uso                                   | 1     | 84      | 1,9685  | 0,1643  | ns |
|                                       | R2m   | 0,0179  | R2c     | 0,1498  |    |
| <b>Atividade da Urease</b>            |       |         |         |         |    |
|                                       | numDF | denDF   | F-value | p-value |    |
| Intercept                             | 1     | 89      | 109,448 | 0       | ** |
| Uso                                   | 1     | 89      | 1,1051  | 0,296   | Ns |
|                                       | R2m   | 0,0086  | R2c     | 0,2431  |    |
| <b>Respiração basal</b>               |       |         |         |         |    |
|                                       | numDF | denDF   | F-value | p-value |    |
| Intercept                             | 1     | 91      | 1159,00 | 0       | ** |
| Uso                                   | 1     | 91      | 2,588   | 0,1111  | Ns |
|                                       | R2m   | 0,02198 | R2c     | 0,1480  |    |
| <b>Carbono da biomassa microbiana</b> |       |         |         |         |    |
|                                       | numDF | denDF   | F-value | p-value |    |
| Intercept                             | 1     | 92      | 1230,08 | <,0001  | ** |
| Uso                                   | 1     | 92      | 9,2811  | 0,003   | ns |
|                                       | R2m   | 0,0751  | R2c     | 0,3089  |    |
| <b>Quociente metabólico (qco2)</b>    |       |         |         |         |    |
|                                       | numDF | denDF   | F-value | p-value |    |
| Intercept                             | 1     | 87      | 271,43  | <,0001  | ** |
| Uso                                   | 1     | 87      | 2,165   | 0,1447  | ns |
|                                       | R2m   | 0,0195  | R2c     | 0,1313  |    |

| Quociente microbiano (qMic) |       |        |         |         |
|-----------------------------|-------|--------|---------|---------|
|                             | numDF | denDF  | F-value | p-value |
| Intercept                   | 1     | 91     | 133,84  | <,0001  |
| Uso                         | 1     | 91     | 14,15   | 0,0003  |
|                             | R2m   | 0,0932 | R2c     | 0,3501  |

Não significativo ns,\* significativo  $p < 0,05$ , \*\* significativo  $p < 0,01$

**Apêndice 6.** Dados meteorológicos referentes aos dias das amostragens de solo.

| Sítio       | Data da coleta | Precipitação (mm) | Radiação global (Kj/m <sup>2</sup> ) | Temperatura do ar (C°) | Umidade relativa do ar (%) |
|-------------|----------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Alegrete    | 19/08/20       | 0                 | 1347,36*                             | 13,86                  | 72,50                      |
| Alegrete    | 24/09/20       | 0                 | 1735,63                              | 23,67                  | 62,54                      |
| Alegrete    | 25/09/20       | 0                 | 1499,10                              | 23,89                  | 62,08                      |
| São Gabriel | 05/03/20       | 0                 | 2056,30                              | 23,13                  | 56,38                      |
| Jarí        | 30/07/20       | 0                 | 1444,82                              | 7,93                   | 73,33                      |
| Jarí        | 31/07/20       | 0                 | 1110,71                              | 11,79                  | 80,79                      |
| Jarí        | 18/08/21       | 0,04              | 1279,38                              | 24,13                  | 62,67                      |
| Santo A. M. | 03/06/20       | 0                 | 1427,02                              | 11,50                  | 68,00                      |
| Santo A. M. | 04/06/20       | 0,3               | 901,25                               | 14,21                  | 82,42                      |
| Aceguá      | 15/05/20       | 0,01              | 1094,05                              | 9,91                   | 73,67                      |
| Aceguá      | 16/05/20       | 0,0               | 1256,01                              | 15,13                  | 58,67                      |

\*Dados disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).