

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

**IMPACTOS DO MANEJO DA ADUBAÇÃO EM SISTEMA INTEGRADO DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NOS ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS DO SOLO**

**Rafaela Dulcieli Daneluz Rintzel**  
**(Dissertação de mestrado)**

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

**IMPACTOS DO MANEJO DA ADUBAÇÃO EM SISTEMA INTEGRADO DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NOS ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS DO SOLO**

RAFAELADULCIELI DANELUZ RINTZEL  
Engenheira-Agrônoma (UTFPR)

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

Porto Alegre (RS) Brasil  
Março de 2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Daneluz Rintzel, Rafaela Dulcieli  
IMPACTOS DO MANEJO DA ADUBAÇÃO EM SISTEMA INTEGRADO  
DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NOS ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS DO  
SOLO / Rafaela Dulcieli Daneluz Rintzel. -- 2023.  
101 f.  
Orientadora: Amanda Posselt Martins.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,  
2023.

1. qualidade do solo. 2. microrganismos. 3.  
integração lavoura-pecuária. 4. adubação de sistema.  
I. Posselt Martins, Amanda, orient. II. Título.

RAFAELA DULCIELI DANELUZ RINTZEL  
Engenheira Agrônoma (UTFPR)

## DISSERTAÇÃO

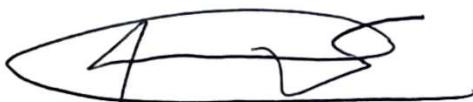
Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### 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:  
Pela Banca Examinadora

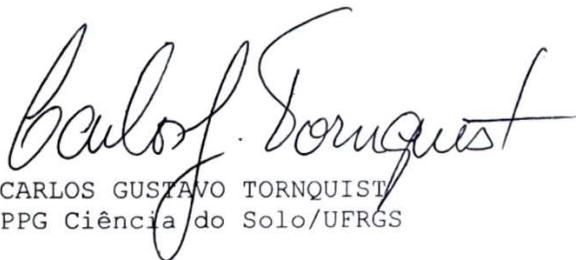
Homologado em:  
Por



AMANDA POSSELT MARTINS  
Orientadora - PPG Ciência do Solo  
UFRGS

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR  
Data: 04/07/2024 00:09:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST  
PPG Ciência do Solo/UFRGS

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GUSTAVO DUARTE FARIAS  
Data: 27/03/2023 07:39:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

GUSTAVO DUARTE FARIAS  
CONSIPA/PR  
(através de videoconferência)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCO AURELIO CARBONE CARNEIRO  
Data: 24/03/2023 10:07:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MARCO AURÉLIO CARBONE CARNEIRO  
PPG Ciência do Solo/UFLA  
(através de videoconferência)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CARLOS ALBERTO BISSANI  
Data: 08/07/2024 16:15:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia/UFRGS

**" Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma. "**

*(Antoine Laurent de Lavoisier)*

*Dedico à minha mãe,  
Odete Daneluz Rintzel,  
e ao meu pai, Nelson Rintzel, que  
são meus maiores exemplos na vida.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, por ouvir minhas orações e fazer que este momento seja possível.

À minha família, em especial ao meu pai, Nelson Rintzel por me aconselhar e apoiar a entrar no “mundo na ciência” desde o início da minha vida acadêmica e a minha mãe, Odete Daneluz Rintzel, por todo apoio, cuidado e zelo nesta caminhada. Agradeço também a minha vó Dulce Daneluz, por todos os pães de queijos assados e enviados em forma de amor.

À Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela estrutura e pelo ensino público de qualidade, e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela excelência na área, e pela oportunidade e acolhimento no mestrado, me tornando uma profissional mais qualificada.

À Estação Experimental Agronômica (EEA) da UFRGS, por ceder a área e a estrutura para a condução do experimento, e ao Grupo de Pesquisa de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (GPSIPA) pela oportunidade e auxílio neste processo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, dando suporte para que o presente trabalho pudesse ser desenvolvido.

À minha orientadora, Amanda Posselt Martins, pela oportunidade, conhecimento e compreensão nestes últimos dois anos. Você é uma profissional inspiradora.

A todos os professores do PPG Ciência do Solo e do Departamento de Solos, por cada aula, ensinamentos nos laboratórios e corredores, e por sempre nos instigarem pela busca do conhecimento.

Ao professor Marco Aurélio Carbone e sua família, em especial a sua esposa Andréa Marta, que me receberam e me acolheram muito bem em Lavras. Bem como, agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA) por abrir suas portas e aos integrantes do Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, que me deram todo o suporte para realizar parte da minha pesquisa. Vocês me instigaram a gostar ainda mais da parte biológica do solo, e me encheram de vontade de retornar um dia.

Aos servidores do Departamento de Solos da UFRGS, em especial ao seu Zé pelo sorriso e simpatia todas as vezes que me via carregando vidrarias para o Laboratório de Carbono, e ao querido técnico de laboratório Adão Luís Ramos, por todos os “conselhos” de técnicas analíticas, paciência, disposição e pelas longas conversas e amizade no laboratório.

Ao Laboratório de Carbono por ceder sua estrutura, e à, agora, pós-doutoranda Jéssica Pereira Souza, por acolher minhas necessidades no laboratório.

Aos colegas e amigos do grupo Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGEB), em especial aos colegas da pós-graduação do Laboratório de Fertilidade, pela ajuda em todas as partes do meu trabalho, mas principalmente pela amizade e companheirismo: Adriano Garcia, Érico Schmaltz, Janildes de Jesus, Mateus Goulart, Luciano Brauwers e Thamires Valle. E ao futuro colega de profissão e graduando desta instituição Edvandro Souza, que acompanhou este estudo e se manteve à disposição, espero que tenha se encantado pelo mundo da ciência do solo. Aos demais colegas e amigos que fiz neste programa, e que tornaram meus dias melhores.

Agradeço em especial ao meu amigo Vicente Simões, não só por todas as horas de trabalho em conjunto, mas principalmente parceria, conversas, risadas, discussões científicas (e não científicas), pelo incentivo e pela baita amizade construída, que certamente levarei para a vida.

À minha querida amiga Andria Paula Lima, que tornou meus dias de mestrado mais leves e divertidos, compartilhando conquista e frustrações, e ao querido amigo Luciano Brauwers, que nunca mediu esforços para me ajudar, dividindo mates e experiências. Sem vocês dois, e nossas horas de conversas no banquinho na frente do PPG, regado de café e risada, essa conquista seria mais árdua.

Ao meu namorado, Luan Trevisan Giacomini, pelo incondicional apoio, amor, compreensão, e por ter sido meu suporte, secando minhas lágrimas nos momentos difíceis e me incentivando a continuar. Deus foi muito generoso quando colocou você na minha vida, não teria pessoa melhor para construir ela comigo.

# IMPACTOS DO MANEJO DA ADUBAÇÃO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NOS ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS DO SOLO<sup>1</sup>

Autora: Eng<sup>a</sup>. Agr<sup>a</sup>. Rafaela Dulcieli Daneluz Rintzel

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Amanda Posselt Martins

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a variação temporal em um ano agrícola e a influência de diferentes épocas de reposição de fósforo (P) e potássio (K), e ação do pastejo hibernar nos bioindicadores de qualidade do solo. Além disso, foi avaliado se um solo biologicamente ativo é capaz de realizar a manutenção das produtividades primárias, após dois anos consecutivos sem adição de fertilizantes (NPK) em solo com altos teores de P e K, mantido ou não com a ação do pastejo hibernar. Para isso, avaliações foram conduzidas em um experimento iniciado em 2017, localizado na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em sistema de produção de soja-azevém, em um Plintossolo Argilúvico distrófico típico. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com quatro repetições, em sistema fatorial 2 x 2 x 2, onde os fatores consistem em: época de reposição de P e K (no estabelecimento da cultura da pastagem ou da lavoura), ação do pastejo de ovinos (com ou sem) e adubação com NPK (presença da adubação do protocolo ou ausência de adubação desde 2020). As avaliações foram realizadas no ano agrícola 2021/2022, com coletas de solo na camada de 0-10 cm em cinco momentos distintos, sendo eles: início e meio da fase pastagem, transição entre as fases pastagem e lavoura, floração e colheita da soja. Os parâmetros microbiológicos avaliados foram: carbono (C), nitrogênio (N) e relação C:N da biomassa microbiana do solo, respiração basal do solo, quociente metabólico e microbiano do solo e atividade enzimática (hidrólise de diacetato de fluoresceína, arilsulfatase,  $\beta$ -glicosidase e fosfatase ácida), além do C orgânico total do solo. De forma geral, a época de reposição de P e K e a ação do pastejo não influenciaram os bioindicadores de qualidade do solo, possivelmente pelo histórico de manejo conservacionista da área, com SPD desde 2003, entretanto, os bioindicadores se mostraram sensíveis aos diferentes momentos de avaliação, sendo que, a maior atividade foi encontrada na transição entre a fase pastagem e a fase lavoura. Foi constatado também, que um solo biologicamente ativo, mantém sua atividade mesmo na ausência da adubação por dois anos consecutivos, onde somente a arilsulfatase e a fosfatase ácida tiveram sua atividade diminuída na ausência de adubação. A produtividade do azevém não foi influenciada pela ausência da adubação e a ação do pastejo. Entretanto, a ação do pastejo hibernar manteve a produtividade de soja mesmo após dois anos consecutivos na ausência de adubação.

Palavras-chave: qualidade do solo, microrganismos, integração lavoura-pecuária, adubação de sistema.

---

<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. (84p.) Março, 2023.

# IMPACTS OF FERTILIZATION MANAGEMENT IN AN INTEGRATED AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEM ON SOIL BIOCHEMICAL ATTRIBUTES<sup>2</sup>

Author: Rafaela Dulcieli Daneluz Rintzel  
Adviser: Prof. Amanda Posselt Martins

## ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the temporal variation in an agricultural year and the influence of different phosphorus (P) and potassium (K) replacement times, and the action of winter grazing on soil quality bioindicators. Furthermore, it was evaluated whether a biologically active soil is capable of maintaining primary productivity after two consecutive years without the addition of fertilizers (NPK) in soil with high levels of P and K, maintained or not with the action of winter grazing. For this, evaluations were conducted in an experiment started in 2017, located at the UFRGS Agronomic Experimental Station, in a soy-ryegrass production system, in a typical dystrophic Acrisol. The experimental design was randomized blocks with four replications, in a 2x2x2 factorial system, where the factors consist of: time of P and K replacement (in the establishment of pasture or crop culture), grazing action of sheep (with or without) and NPK fertilization (presence of protocol fertilization or absence of fertilization since 2020). The evaluations were carried out in the 2021/2022 growing season, with soil sampling in the 0-10 cm layer at five different times, namely: beginning and middle of the pasture phase, transition between the pasture and crop phases, soybean flowering and soybean harvest. The microbiological parameters evaluated were: carbon (C), nitrogen (N) and C:N ratio of soil microbial biomass, soil basal respiration, soil metabolic and microbial quotient and enzymatic activity (hydrolysis of fluorescein diacetate, arylsulfatase,  $\beta$ -glucosidase and acid phosphatase), in addition to total soil organic C. In general, the time of P and K replacement fertilization and the action of grazing did not influence the bioindicators of soil quality, possibly due to the history of conservation management in the area, with SPD since 2003, however, the bioindicators were sensitive to the different moments of evaluation, and the greatest activity was found in the transition between the pasture phase and the crop phase. It was also found that a biologically active soil maintains its activity even in the absence of fertilization for two consecutive years, where only arylsulfatase and acid phosphatase had their activity decreased in the absence of fertilization. The productivity of ryegrass was not influenced by the absence of fertilization and the action of grazing. However, the action of winter grazing maintained soybean productivity even after two consecutive years in the absence of fertilization.

Keywords: soil quality, microorganisms, integrated crop-livestock system, system fertilization.

---

<sup>2</sup>Masters dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (84p.) March, 2023.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I - Introdução Geral</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>4</b>
2.1 Sistema Integrado de Produção Agropecuária.....	4
2.2 Época de reposição de nutrientes via adubação.....	6
2.3 Bioindicadores de qualidade de solo.....	9
2.3.1 Variabilidade temporal dos microrganismos de solo .....	12
2.4 Carbono orgânico total.....	14
2.5 Carbono, nitrogênio microbiano e relação C:N da biomassa microbiana do solo..	16
2.6 Respiração basal do solo.....	18
2.7 Quociente metabólico e microbiano do solo.....	19
2.8 Atividade enzimática .....	20
2.9 Enzimas: FDA, $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida.....	21
<b>CAPÍTULO III – Material e Métodos Geral</b> .....	<b>23</b>
3.1. Local, clima e solo .....	23
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	24
3.3 Coletas de solo .....	28
3.4 Análises bioquímicas do solo.....	29
3.4.1 Carbono, nitrogênio e relação C:N da biomassa microbiana.....	29
3.4.2 Respiração basal .....	33
3.4.3 Carbono orgânico total.....	34
3.4.4 Quociente metabólico e microbiano .....	34
3.4.5 Análises enzimáticas .....	35
3.4.5.1 Hidrólise de diacetato de fluoresceína .....	35
3.4.5.2 $\beta$ -glicosidase.....	36
3.4.5.3 Arilsulfatase .....	37
3.4.5.4 Fosfatase ácida.....	38
3.4.6 Produtividade de biomassa de azevém e de soja .....	38
<b>CAPÍTULO IV – Variação temporal dos bioindicadores de qualidade do solo em função da época de reposição de fósforo e potássio e do pastejo hibernal em sucessão soja-azevém no subtropical brasileiro</b> .....	<b>40</b>
4.1. Introdução.....	40
4.2 Material e métodos .....	41
4.2.1 Local, clima e solo .....	41
4.2.2 Delineamento experimental .....	42
4.2.3 Coletas de solo e análises laboratoriais .....	42
4.2.4 Análise estatística .....	43

4.3 Resultados e Discussão .....	43
4.4 Conclusões.....	56
<b>CAPÍTULO V – Influência da microbiologia do solo na manutenção da produtividade após dois anos sem adubação em solo com altos teores de P e K e manejado com ação do pastejo.....</b>	<b>57</b>
5.1 Introdução.....	57
5.2 Material e métodos .....	58
5.2.1 Local, clima e solo .....	58
5.2.2 Delineamento experimental .....	59
5.2.3 Fases do sistema produtivo .....	60
5.2.4 Coletas de solo e análises realizadas .....	60
5.2.5. Análise estatística .....	60
5.3 Resultados e discussão .....	61
5.4 Conclusões.....	68
<b>CAPÍTULO VI - Conclusões Gerais.....</b>	<b>70</b>
<b>PERSPECTIVAS FUTURAS DE PESQUISA.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>
<b>RESUMO BIOGRÁFICO .....</b>	<b>84</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

- Tabela 1.** Atividade da hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA),  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida e seu valor médio no solo. ....21
- Tabela 2.** Caracterização química do solo realizada antes da instalação do protocolo experimental, em agosto de 2017. Eldorado do Sul-RS.....24
- Tabela 3.** Adubação de nitrogênio (N), e reposição de fósforo ( $P_2O_5$ ) e potássio ( $K_2O$ ) utilizada em cada safra, total acumulado e média por safra, desde o início do protocolo experimental (2017). Eldorado do Sul-RS.....28
- Tabela 4.** Caracterização química e textural do solo, na camada de 0-10 cm, realizada antes do ano avaliado, em maio de 2021. Eldorado do Sul-RS. ....42
- Tabela 5.** Caracterização química do solo, do início do protocolo experimental (2017), e do ano que foi alocado as subparcelas mantidas na ausência de adubação (2020) – em Plintossolo Argilúvico Distrófico típico em Eldorado do Sul-RS. ....59
- Tabela 6.** Influência da presença e ausência de adubação por dois anos consecutivos, ação do pastejo e fases do sistema produtivo no C-BMS, N-BMS, C:N-BMS e qMIC no ano agrícola 2020/2021. Eldorado do Sul-RS. ....61
- Tabela 7.** Influência da presença e ausência de adubação por dois anos consecutivos, ação do pastejo e fases do sistema produtivo na atividade enzimática do solo (FDA,  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida) no ano agrícola 2020/2021. Eldorado do Sul-RS.....63

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Modelo conceitual de alguns manejos que afetam os bioindicadores de qualidade do solo..... 11
- Figura 2.** Modelo conceitual exemplificando a manutenção da produtividade primária, em um solo biologicamente ativo, mantido com ação do pastejo hibernar, e com altos níveis de fertilização (P e K). ..... 12
- Figura 3.** Modelo conceitual da variação temporal que podem influenciar na atividade dos bioindicadores de qualidade de solo, dentro de um ano agrícola (condições meteorológicas meramente ilustrativas) no Rio Grande do Sul..... 14
- Figura 4.** Configuração da área experimental na Estação Experimental Agronômica da UFRGS. Eldorado do Sul-RS.....25
- Figura 5.** Precipitação pluvial e temperatura atmosférica do ano de avaliação (2021/2022) na Estação Experimental Agronômica da UFRGS. Eldorado do Sul-RS.....26
- Figura 6.** Adubação de P e K nas parcelas (A) com o espalhador de granulado manual All-Agri AG 10 (B), utilizado, tanto na fase pastagem como na fase lavoura. Foto: Autoria própria.....27
- Figura 7.** Principais manejos realizados na pastagem de azevém (2021) e na lavoura de soja (2021/2022), especificando a data que ocorreu os cinco momentos de avaliação. Eldorado do Sul-RS. ....29
- Figura 8.** Amostras sendo irradiadas (A) em forno micro-ondas e decantando (B) para realizar análise de carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS) e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N-BMS). Foto: Autoria própria. ...30
- Figura 9.** Amostras para determinação de carbono da biomassa microbiana do solo, após a adição de  $K_2Cr_2O_7$ ,  $H_2SO_4$  e água destilada. Laboratório de Química do Solo da UFRGS, Porto Alegre – RS. Foto: Autoria própria.....31
- Figura 10.** Amostras para determinação de nitrogênio da biomassa microbiana do solo, no bloco digestor. Laboratório de Química do Solo da UFRGS, Porto Alegre-RS. Foto: Autoria própria..... 32
- Figura 11.** Vidros hermeticamente fechados e prontos para a incubação a fim de determinar o fluxo de  $CO_2$ . Laboratório de Carbono da UFRGS, Porto Alegre-RS. Foto: Autoria própria. ....33

- Figura 12.** Análise de hidrólise de FDA, amostras após sair da incubação (A) e sendo filtradas em papel de filtro Whatman n° 42 (B), para posteriormente serem lidas em espectrofotômetro em 490 nm. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.....35
- Figura 13.** Solução contendo a concentração de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 µg de p-nitrofenil (PNF) para fazer a curva padrão que posteriormente foi usada para a equação no cálculo de atividade enzimática da β-glicosidase. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.....36
- Figura 14.** Amostras para análise de arilsulfatase, sendo filtradas em papel de filtro Whatman n° 42, para posteriormente serem lidas em espectrofotômetro em 410 nm. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria. ....37
- Figura 15.** Reagente sendo adicionados em tubo falcon, contendo 1 g de solo para realizar análise de fosfatase ácida. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.....38
- Figura 16.** Carbono da biomassa microbiana (C-BMS) (A), nitrogênio da biomassa microbiana (N-BMS) (B), quociente microbiano (qMIC) (C) e quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) (D) de um Plintossolo, na camada de 0-10 cm, em diferentes momentos de avaliação, independentemente da época de reposição de P e K (na lavoura ou na pastagem) e do pastejo hibernar (com ou sem), em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05) e as barras indicam o erro padrão da média.....44
- Figura 17.** Influência da época de reposição de P e K e ação do pastejo hibernar no qMIC do solo, em um Plintossolo cultivado com sucessão soja-azevém em SPD consolidado, considerando a camada de 0-10 cm. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pela mesma letra em maiúscula não diferem estatisticamente entre a ação do pastejo dentro de cada época de reposição de P e K, e médias seguidas pela mesma letra em minúscula não diferem estatisticamente para ação do pastejo entre as épocas de reposição de P e K, pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras indicam o erro padrão da média.....47
- Figura 18.** COT do solo, de um Plintossolo, na camada de 0-10 cm. Interação entre momentos de avaliação (início e metade da fase pastagem, transição entre a fase pastagem e lavoura, floração da soja e após a colheita da soja) e ação do pastejo hibernar (com e sem), em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra em minúscula não diferem para momentos de avaliação e maiúsculo não diferem estatisticamente para a ação do pastejo pelo teste de Tukey (p<0,05) e as barras indicam o erro padrão da média. ....48
- Figura 19.** FDA do solo, interação entre os fatores: momento de e ação do pastejo para cada época de reposição de P e K, em um Plintossolo cultivado em

sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra em minúscula não diferem para momento de avaliação, dentro de cada pastejo, e médias seguidas pela mesma letra em maiúsculo não diferem estatisticamente para a ação do pastejo, dentro de cada momento de avaliação, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras indicam o erro padrão da média. ....50

**Figura 20.** Atividade enzimática do solo:  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase-ácida ( $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$ ), de um Plintossolo, na camada de 0-10 cm, em diferentes momentos de avaliação. Independentemente da época de reposição de P e K (na lavoura ou na pastagem) e do pastejo hibernal (com ou sem), em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e as barras indicam o erro padrão da média. ....52

**Figura 21.** Interação entre época de reposição de P e K e ação do pastejo na fosfatase ácida do solo, na camada de 0-10 cm de um Plintossolo cultivado em sucessão soja-azevém, em SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente para a ação do pastejo dentro de cada época de reposição de P e K, e médias seguida pela mesma letra em minúsculo não diferem estatisticamente para ação do pastejo entre as épocas de reposição de P e K, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) as barras indicam o erro padrão da média. ....54

**Figura 22.** Interação entre época de reposição de P e K e ação do pastejo na produtividade do azevém (A) e da soja (B) submetidos a diferentes épocas de reposição de P e K (na pastagem ou na lavoura) e ação do pastejo (com e sem), em Eldorado do Sul - RS. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente para a ação do pastejo dentro de cada época de reposição de P e K e médias seguida pela mesma letra em minúsculo não difere estatisticamente para ação do pastejo entre as épocas de reposição de P e K pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) as barras indicam o erro padrão da média. ....55

**Figura 23.** Interação entre fases do sistema produtivo (pastagem lavoura) e ação do pastejo hibernal (com ou sem), no  $\text{qCO}_2$  do solo, em um Plintossolo na camada de 0-10 cm, cultivado em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguida da mesma letra em minúscula, não diferiram para a ação do pastejo nas diferentes fases do sistema produtivo e médias seguidas pela mesma letra em maiúsculo não diferem estatisticamente para a ação do pastejo pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e as barras indicam o erro padrão da média. ....62

**Figura 24.** Interação entre adubação (presença e ausência desde 2020) e ação do pastejo hibernal (com e sem) na produtividade do azevém e da soja em Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente dentro do fator adubação, e médias seguida pela mesma letra em minúsculo não difere estatisticamente para ação do pastejo pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) as barras indicam o erro padrão da média. ....65

**Figura 25.** Correlação de Pearson entre a produtividade da soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e a atividade da  $\beta$ -glicosidase (A) e arilsulfatase (B) em  $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$  no nas parcelas sem a ação do pastejo hiberna, em um Plintossolo cultivado em sucessão soja-azevém com SPD consolidado, na camada de 0-10 cm. Eldorado do Sul-RS. ....66

**Figura 26.** Correlação de Pearson entre a produtividade da soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e a atividade da  $\beta$ -glicosidase (A) e arilsulfatase (B) em  $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$  nas parcelas manejadas com a ação do pastejo hiberna, em um Plintossolo Argiluvico cultivado em sucessão soja-azevém com SPD consolidado, na camada de 0-10 cm. Eldorado do Sul-RS.....68

## RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

BioAS – Bioanálise de solo  
BMS – Biomassa microbiana do solo  
C – Carbono  
CH<sub>4</sub> – Gás metano  
C:N-BMS – Relação carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo  
C-BMS – Carbono da biomassa microbiana do solo  
COT – Carbono orgânico total  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
FDA – Hidrólise de diacetato de fluoresceína  
GEE – Gases de efeito estufa  
ILP – Integração Lavoura-Pecuária  
K – Potássio  
MOS – Matéria orgânica do solo  
MS – Massa seca  
N – Nitrogênio  
N-BMS – Nitrogênio da biomassa microbiana do solo  
P – Fósforo  
PR – Paraná  
qCO<sub>2</sub> – Quociente metabólico do solo  
qMIC – Quociente microbiano  
RBS – Respiração basal do solo  
RS – Rio Grande do Sul  
S – Enxofre  
SIPA – Sistema Integrado de Produção Agropecuária  
UFLA – Universidade Federal de Lavras  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## CAPÍTULO I - Introdução Geral

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro de um ecossistema natural ou manejado, sustentando a vida ou a produtividade vegetal e animal, mantendo ou melhorando a qualidade da água e do ar, suportando a saúde humana e habitações (KARLEN *et al.*, 1997). Apesar de estar ligada aos processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no sistema solo-planta (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009), a parte biológica tem ganhado bastante destaque, devido aos diversos serviços ecossistêmicos providos pela microbiota do solo.

Tendo consciência da relevância da parte biológica, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) do Cerrado lançou em 2020 a bioanálise de solo (BioAS). Essa tecnologia agrega o componente biológico às análises de rotina de solos, tendo como base a análise das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, associadas aos ciclos do enxofre (S) e do carbono (C), respectivamente. A análise BioAS fornece informações que remetem se o sistema de manejo adotado está promovendo ou não o incremento da qualidade do solo (EMBRAPA CERRADO, 2020). O manejo realizado no solo e nas culturas, influencia na manutenção e na melhoria da qualidade do solo, por modificar sua estrutura, e conseqüentemente, o habitat dos microrganismos (GONÇALVES *et al.*, 2019). Onde, práticas conservacionistas, como o sistema de plantio direto (SPD), rotação de culturas, adubação adequada e os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), visam aumentar a ação dos microrganismos no solo.

Neste sentido, os SIPA têm se mostrado muito eficaz, principalmente o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), que atua como um intensificador ecológico, melhorando a sinergia funcional e biológica criada pela interação de componentes vegetais e animais (CARVALHO *et al.*, 2018). Dentre as vantagens

destaca-se a liberação de dejetos, o estímulo do pastejo no aumento da massa de raízes, e consequente liberação de compostos orgânicos (SOUZA *et al.*, 2008), usados como substratos pelos microrganismos do solo.

No sistema ILP, o uso intensivo do solo requer um manejo eficaz da fertilidade, pois o pastejo altera a dinâmica da disponibilidade de nutrientes, uma vez que, semelhante as culturas agrícolas, a presença de animais pode induzir a acidificação do solo, extraindo nutrientes (MARTINS *et al.*, 2016). Segundo a FAO (2019), em publicação que aborda sobre a conduta adequada para o uso e o manejo de fertilizantes, a correta utilização dos nutrientes favorece a produção de biomassa e contribui para aumentar a matéria orgânica e a saúde dos solos. No entanto, se utilizados de forma inadequada, os fertilizantes podem ter efeitos negativos no solo, animais e humanos.

Uma das formas de otimizar o uso dos fertilizantes, é através da correta época de adubação. Neste sentido o, conceito de adubação de sistema, que tem como base a ciclagem biológica de nutrientes entre as fases de um sistema de rotação de culturas, buscando a máxima eficiência de uso de nutrientes, reduzindo entradas de fertilizantes, evitando perdas e mantendo a fertilidade do solo a longo prazo (ASSMANN *et al.*, 2017).

Entretanto, o atual Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS - RS/SC, 2016), possui uma lacuna de como e quando deve ser feita a adubação deste sistema integrado, que tradicionalmente recebem a adubação na cultura produtora de grãos, sem considerar a ciclagem biológica de nutrientes e as modificações resultantes do pastejo no sistema produtivo. Esse maior investimento, dá-se pela ideia de que é a cultura de grão que gera maior retorno econômico dentro da propriedade rural.

Baseado nisso, ao longo deste trabalho se buscará entender qual a melhor época para repor nutrientes, quais as consequências no sistema após dois anos consecutivos sem nenhum tipo de adubação e as modificações causadas pela ação do pastejo na microbiota, que participa do incremento de qualidade do solo (aqui denominado como bioindicadores de qualidade do solo) em sistema de sucessão soja-azevém no subtropical brasileiro. Os bioindicadores de qualidade de solo, abordados neste trabalho serão: carbono (C-BMS), nitrogênio (N-BMS) e relação C:N da biomassa microbiana do solo

(C:N-BMS), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e microbiano ( $qMIC$ ) do solo e a atividade enzimática (hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA),  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida) do solo, além do carbono orgânico total do solo (COT).

## **CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Sistema Integrado de Produção Agropecuária**

Grandes áreas da região subtropical da América do Sul vem mantendo há décadas uma agricultura de monocultura e de exploração convencional, bem como, uma pecuária em estágio avançado de degradação, resultando em sistemas produtivos cada vez mais distantes da sustentabilidade (MORAES *et al.*, 2011). A reversão desse quadro vem ocorrendo através de manejos conservacionistas, como por exemplo o uso de plantio direto, adubação equilibrada e SIPA.

Para alguns autores, como Antonio *et al.* (2009), os SIPA visam alternar, na mesma área, o cultivo de pastagens destinadas à produção animal e o cultivo de lavouras destinadas à produção vegetal, sendo considerado como um sistema de produção em que vários fatores biológicos, econômicos e sociais se inter-relacionam e determinam a sua sustentabilidade. Dentre os SIPA, a implantação do sistema ILP vem se tornando expressivo em todo o Brasil, em virtude de ser uma alternativa de manejo que traz inúmeros benefícios (ANDREOLLA *et al.*, 2015). Na região subtropical do Brasil, a ILP tem sido cada vez mais adotada entre os produtores rurais, onde Brum *et al.* (2021) afirmam que comumente usa-se aveia preta e azevém no inverno e soja ou milho no verão.

O aumento da produtividade da lavoura e da pecuária em SIPA é resultante da interação de vários fatores, os quais resultam em melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além da quebra de ciclos bióticos de pragas e doenças, que contribui para aumentar a produtividade do sistema (BALBINO; CORDEIRO; MARTÍNEZ, 2011). O manejo adequado do solo, no setor agropecuário, podem resultar em aumento nos estoques de C

no solo, bem como, atuar na redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera e, conseqüentemente, resultar na atenuação do aquecimento global (CARVALHO *et al.*, 2010).

Muitos benefícios são oriundos do pastejo hibernar, um deles é a presença de dejetos animais sobre o solo, que além de ciclar parte dos nutrientes, aumenta a população da microfauna, mesofauna e macrofauna. Dentre eles encontra-se os besouros coprófagos (popularmente conhecidos como “rola-bosta”) e minhocas, organismos que possuem papel fundamental na construção de canais preferencias no solo, os quais são ocupados pelas raízes das plantas cultivadas, além de possibilitar a maior infiltração de água e a descida e distribuição de nutrientes em profundidade (ASSMANN *et al.*, 2017; GARCÍA *et al.*, 2023).

Além disso, os dejetos animais também servem de substrato microbiano, aumentando a microfauna do solo. As interações benéficas de microrganismos e plantas estão basicamente envolvidas no estímulo do crescimento das plantas, seja pela mineralização e pela disponibilização de nutrientes ou pela produção de hormônios de crescimento, metabólitos secundários e sideróforos (LANNA *et al.*, 2021).

Em estudo realizados por Williams e Haynes (1995) em Nova Zelândia, testando o efeito de esterco de ovino, bovino e cervídeo no crescimento de pastagens e no estado nutricional do solo, constatou-se que, em manchas de esterco bovinos, foi encontrado maior biomassa microbiana do solo (BMS), e maior atividade das enzimas arilsulfatase e fosfatase (ligadas ao ciclo do S e P, respectivamente). Além disso, efeito residual nos níveis de C eram evidentes três anos após aplicação de esterco bovino, neste local. Isso mostra a importância dos dejetos animais na microbiota do solo.

Outro benefício do pastejo hibernar, é a compensação radicular, onde a forragem pastejada pelo animal aumenta a massa de raízes no solo, conseqüentemente aumentando a exsudação de compostos orgânicos, resultando em maior biomassa microbiana no solo. Fato estudado por Souza *et al.* (2008), que constatou uma alta correlação ( $r = 0,94$ ), entre massa de raiz de planta forrageira e biomassa microbiana do solo (significativo a 5 % pelo teste T), uma vez que, os compostos exsudados servem como fonte de energia para esses microrganismos.

## 2.2 Época de reposição de nutrientes via adubação

A abordagem realizada na adubação tradicional, segundo Assmann *et al.* (2018) é de fertilizar especificamente a cultura a ser implantada, a qual na maioria das vezes é a de grão. Entretanto, ao trabalhar com ILP, diversos grupo de pesquisa vem buscando compreender em que momento dentro do sistema, a adubação é mais eficiente. Rios (2010) apontou que a presença de animais em pastejo e a adubação nitrogenada na pastagem alteram de forma qualitativa e quantitativa o aporte de resíduos, o que pode alterar os estoques de carbono do solo, sendo que as alterações no estoque de COT no solo, ocorrem a longo prazo, mas as alterações decorrentes do manejo podem ser percebidas mais rapidamente nas frações mais lábeis da matéria orgânica, ou seja, na biomassa microbiana e na matéria orgânica particulada do solo.

Outro estudo que mostra a influência da adubação na pastagem, foi publicado por Ribeiro *et al.* (2022), que constatou que o pastejo moderado de aveia preta, adubado com 75 ou 150 kg ha<sup>-1</sup> de N em sistema ILP, aumenta a resistência da aveia preta, pois estimula o comprimento radicular, desenvolvendo raízes finas, aumentando a produção de matéria seca da parte aérea, especialmente em ano com déficit hídrico.

Devido à importância de se adubar na época adequada, vários pesquisadores passaram a estudar o efeito de se realizar a adubação na pastagem hibernal. Tais estudos deram origem ao conceito de “adubação de sistema”, que tem como base a ciclagem biológica de nutrientes entre as fases de um sistema de rotação buscando a máxima eficiência de uso de nutrientes, reduzindo entradas de fertilizantes, evitando perdas e mantendo a fertilidade do solo a longo prazo (ASSMANN, *et al.*, 2017).

A ciclagem de nutrientes no solo envolve reações bioquímicas, químicas e físico-químicas, sendo os processos bioquímicos mediados por microrganismos, raízes de plantas e animais (TABATABAI, 1994). Os processos bioquímicos que envolvem a ciclagem de nutrientes são caracterizado pela decomposição de materiais orgânicos, que é um processo enzimático, onde os organismos que são capazes de degradá-la, produzem um conjunto de enzimas envolvidas na hidrólise dos compostos orgânicos (CUNHA-SANTINO *et al.*,

2008). Além do processo de imobilização e mineralização de nutrientes, onde a imobilização é o processo de retenção dos nutrientes em sua forma orgânica na biomassa microbiana do solo, e o processo inverso, que é a liberação dos nutrientes da biomassa microbiana para o solo denomina-se mineralização (MARQUES *et al.*, 2000).

Além de que, diversos microrganismos podem realizar o processo de solubilização de nutrientes, um exemplo é a solubilização do fósforo (P) (SOUCHIE EDSON *et al.*, 2005), onde alguns microrganismos são capazes de solubilizar o P de rochas naturais, disponibilizando-o as plantas. O P e o K são macronutrientes essenciais para otimizar a produção agropecuária e, nos solos, a disponibilidade biológica do N, juntamente com o P, K e S, tem relação direta com a produtividade agrícola, sendo esses nutrientes normalmente limitantes ao desenvolvimento das plantas (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

O P é encontrado no solo em duas formas: inorgânica e orgânica, onde a forma orgânica representada pelos íons fosfatos ligados aos compostos orgânicos. Neste caso, sua labilidade está diretamente relacionada à suscetibilidade de decomposição do radical orgânico ao qual o fosfato está ligado. Assim, os fosfatos diésteres são bastante suscetíveis ao ataque microbiano e compõem o “pool” de P lábil do solo (GATIBONI *et al.*, 2008). A deficiência de P é um dos principais fatores da baixa produtividade das culturas em solos tropicais e subtropicais, onde, nessas condições, a mineralização do P orgânico pode ser importante na nutrição das plantas.

Após a dissolução do P aplicado como fertilizante na implantação da cultura comercial de grãos, uma pequena parte permanece na solução, outra parte é incorporada na biomassa microbiana e a maior parte é incorporada na fração inorgânica do solo (ANGHINONI *et al.*, 2011). A porção biológica do ciclo do P é controlada pela decomposição de restos culturais por bactérias e fungos, imobilização e mineralização, além de absorção pelas plantas (JANEGITZ; INOUE; ROSOLEM, 2013), bem como, pode-se acrescentar a solubilização microbiana de P.

Em SIPA, na implantação da pastagem hiberna, o P da solução é absorvido e incorporado na biomassa vegetal, que será consumida pelo animal, com pequena quantidade retida no corpo animal. Assim, a maior parte do P retorna ao solo, como resíduo da pastagem e da excreta animal (esterco e urina)

(ANGHINONI *et al.*, 2011). Quanto mais pobre em P disponível for o sistema maior é a dependência das formas orgânicas, inclusive do P armazenado na biomassa microbiana (GATIBONI *et al.*, 2008), onde além de o P imobilizado na biomassa microbiana constituir-se num reservatório lábil desse nutriente, os microrganismos do solo também desempenham papel fundamental nos processos de mineralização e solubilização do P (MENDES; REIS JÚNIOR, 2003).

Sabendo-se então, que os microrganismos são cruciais para disponibilizar o P para as plantas, Fialho *et al.* (2020) estudaram um sistema de soja em monocultivo submetido ou não à competição com plantas invasoras, e observou que a biomassa, a atividade microbiana, a solubilização do P inorgânico e a atividade da fosfatase ácida foram alteradas positivamente nas áreas de soja em competição com plantas invasoras, em relação à área em que não havia tal competição. Esse resultado demonstra que a diversidade de plantas na área tende a melhorar a disponibilidade de P, devido às interações microbianas.

Ferreira *et al.* (2011) estudaram a ciclagem de K (determinando a quantidade adicionada, acumulada e exportada), no compartimento pastagem, soja e animais em sistema soja e pecuária (aveia preta + azevém), e constataram que a ciclagem onde não houve pastejo foi de 161 kg ha<sup>-1</sup>, considerando a palhada remanescente da soja (8 kg ha<sup>-1</sup>), pastagem residual (57 kg ha<sup>-1</sup>), parte aérea da soja (51 kg ha<sup>-1</sup>) e grãos de soja (45 kg ha<sup>-1</sup>). Já em pastejo moderado (20 cm de altura de pasto), os autores encontraram 231 kg ha<sup>-1</sup> de ciclagem de K, sendo destes, palhada remanescente da soja (5 kg ha<sup>-1</sup>), pastagem residual (30 kg ha<sup>-1</sup>), dejetos animais (85 kg ha<sup>-1</sup>), tecido dos animais (2 kg ha<sup>-1</sup>) parte aérea da soja (60 kg ha<sup>-1</sup>) e grãos de soja (49 kg ha<sup>-1</sup>). Logo, observa-se que a quantidade de K ciclado no sistema é muito superior quando se adiciona o componente animal.

Neste sentido, a quantidade de nutrientes a ser liberada dos resíduos após o ciclo de pastejo é determinada por sua quantidade, do pasto e do esterco, e do seu teor em nutrientes (ANGHINONI *et al.*, 2011), sendo que a liberação de K em ILP com SPD consolidado (mais de 10 anos) é alta, e sua contribuição deve ser levada em consideração no momento da adubação (ASSMANN, 2013).

Em estudo realizado por Arnuti et al., (2020) constatou-se que o esterco ovino resultante do consumo do azevém na fase vegetativa apresenta menores teores de celulose e hemicelulose e maiores teores de P e K em comparação ao esterco oriundo do consumo na fase pós-floração, resultando em uma liberação de P e K mais rápida durante a pastagem comparada a soja em sucessão.

Além do K ser considerado um elemento essencial para as plantas e um dos principais constituintes de todas as células vivas, (ETESAMI; EMAMI; ALIKHANI, 2017), ele também visa aumentar a resistência das plantas a doenças, pragas e estresses abióticos, e é necessário para ativar mais de oitenta diferentes enzimas responsáveis por processos nas plantas e nos animais. Estudos têm demonstrado que diversos grupos de microrganismos, como bactérias e fungos, possuem a capacidade de solubilizar o K retido em minerais silicáticos (ALVES *et al.*, 2021), convertendo em formas disponíveis e facilmente absorvidas pelas plantas (ETESAMI; EMAMI; ALIKHANI, 2017).

### **2.3 Bioindicadores de qualidade de solo**

A qualidade de um solo é um parâmetro importante para o diagnóstico de impactos oriundos das práticas agrícolas, além de permitir o acompanhamento da resposta do solo em função de possíveis estratégias de manejo implantadas (KNUPP *et al.*, 2008). Um solo com qualidade (saudável), possui a capacidade contínua de funcionar como um sistema vital dentro dos limites ecossistêmicos e do uso da terra, sustentando a produtividade biológica, promovendo a qualidade do ar e dos ambientes aquáticos, mantendo a sanidade vegetal, animal e humana (PANKHURST; DOUBE; GUPTA, 1997).

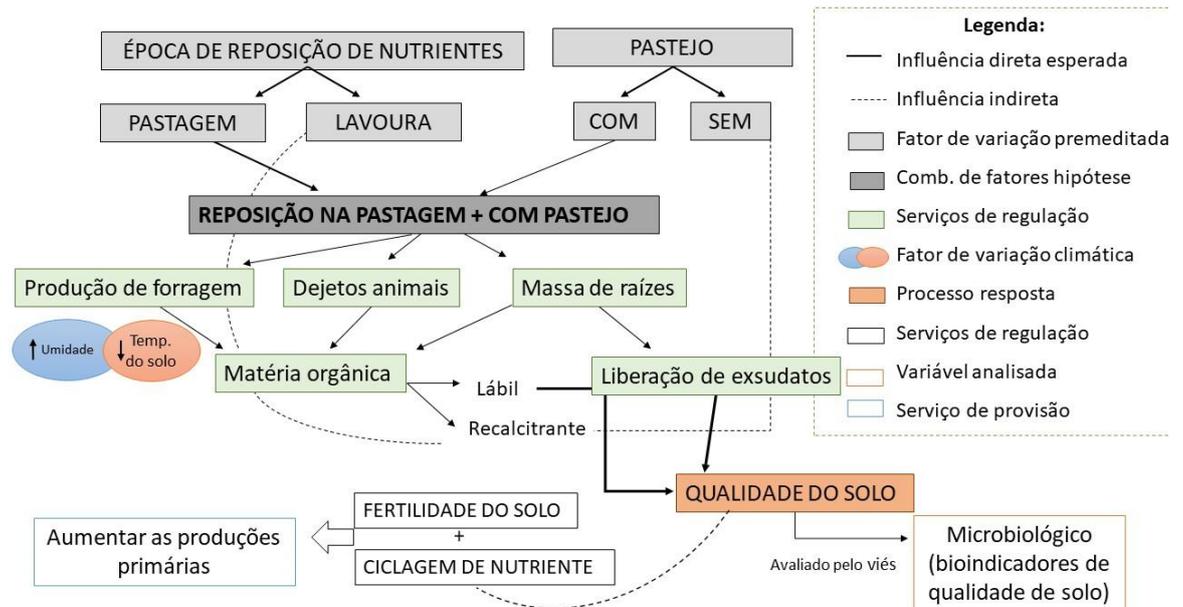
Muito tem se pesquisado para buscar quais são os bioindicadores mais adequados para uso na avaliação da qualidade do solo, sendo considerados como principais: a biomassa microbiana, a respiração, os quocientes microbiano e metabólico e a atividade enzimática do solo (SANTOS; MAIA, 2013). Os indicadores biológicos, por sua vez, são constituintes vivos, presentes principalmente na parte mais superior do solo. São representados por uma grande diversidade de espécies, as quais desempenham inúmeras e complexas funções no solo. Devido a sua ampla funcionalidade e sensibilidade

é possível detectar alterações decorrentes do manejo do solo (SILVA *et al.*, 2021).

O manejo do solo e das culturas agrícolas tem um papel fundamental na manutenção e na melhoria da qualidade do solo, assim como influencia diretamente na sua estrutura e, por consequência, no habitat dos microrganismos (GONÇALVES *et al.*, 2019). Entretanto, para avaliar os efeitos do manejo do solo e das culturas agrícolas na atividade dos microrganismos, é essencial a utilização de indicadores capazes de mostrar, com clareza, como é o impacto desses sobre o solo. A variação desses indicadores, determinada pelo manejo e pelo uso do solo, são importantes para o melhor manejo visando à sustentabilidade do sistema (CARNEIRO *et al.*, 2009).

Para Anghinoni e Vezzani (2021), os procedimentos de avaliação da fertilidade do solo baseados somente na visão mineralista não permitem a compreensão da realidade, e no processo de evolução do sistema solo, tem-se limitações intrínsecas de indicadores para avaliar a fertilidade do solo, o que dificulta a caracterização da relação entre os fatores abióticos, o solo, os organismos edáficos e as plantas. Uma alternativa, é compreender a influência da microbiota neste processo, uma vez que os microrganismos são os responsáveis diretos pelo funcionamento do solo, atuando em diversos processos ecossistêmicos, dentre eles, a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Esse fato, justifica não só a sua importância, mas também a necessidade da inclusão dos indicadores microbiológicos nas avaliações de qualidade do solo (MENDES; SOUSA; JUNIOR, 2015).

Levando em consideração os aspectos relacionados à época de reposição de nutrientes e à ação do pastejo nos bioindicadores de qualidade de solo abordados até o momento, exemplifica-se na Figura 1 como a influência do manejo pode afetar os bioindicadores de qualidade do solo.

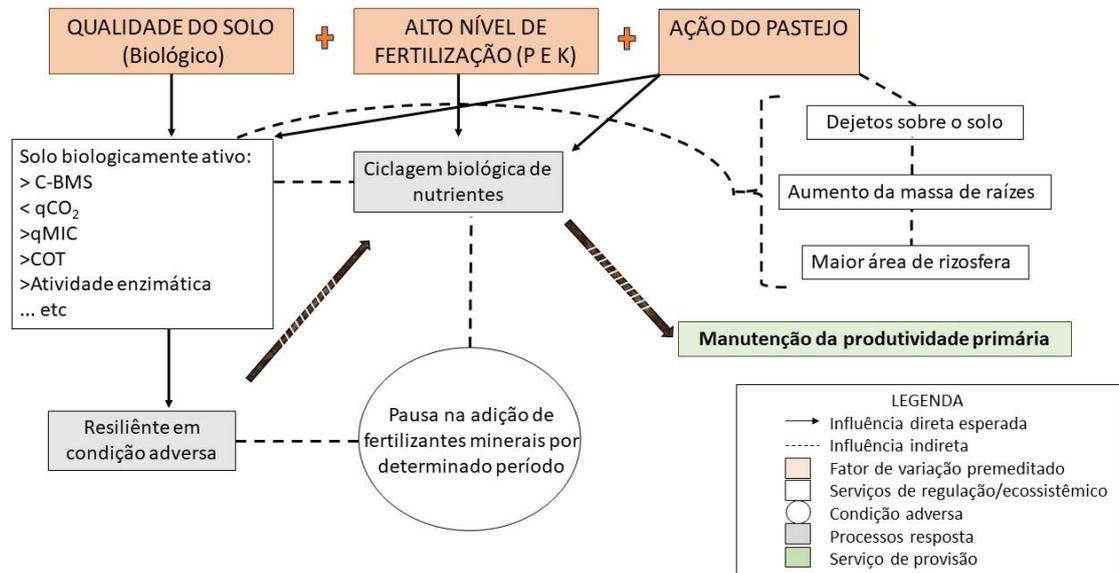


**Figura 1.** Modelo conceitual de alguns manejos que afetam os bioindicadores de qualidade do solo.

Como pode-se observar na Figura 1, pressupõe-se que a reposição de nutrientes na pastagem mantida com a ação do pastejo, resulta em maior produção de forragem e que juntamente com os dejetos animais sobre o solo e a maior massa de raízes (oriunda do maior perfilhamento em resposta ao pastejo) (ANGHINONI *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2010), aumenta a liberação de exsudatos radiculares e a MOS, principalmente em sua fração lábil, que resultam em processos ecossistêmicos mediados pela BMS, como a decomposição. Conseqüentemente, isto pode aumentar a qualidade biológica do solo, refletindo em maiores produtividades primárias, através da ciclagem biológica de nutrientes.

Além de que, acredita-se que solos com qualidade biológica, aliados com a ação do pastejo hibernal, são mais biologicamente ativos e se tornam mais resilientes em condições adversas, como por exemplo, pausa da adição de fertilizantes minerais por um determinado período, sobretudo, quando o histórico de manejo é com altos nível de adubação de P e K. Com isso, acredita-se que a ciclagem de nutrientes realizada pelos microrganismos do solo é capaz de manter a produção primária, mesmo sem nenhuma adição de fertilizantes

minerais, como pode-se observar no modelo conceitual (Figura 2).



**Figura 2.** Modelo conceitual exemplificando a manutenção da produtividade primária, em um solo biologicamente ativo, mantido com ação do pastejo hibernar, e com altos níveis de fertilização (P e K).

### 2.3.1 Variabilidade temporal dos microrganismos de solo

Como visto, estudar os bioindicadores de qualidade do solo é fundamental para entender o quão saudável está o mesmo, entretanto, por se tratar de uma fração viva, presume-se que exista variabilidade espacial e temporal, uma vez que os microrganismos respondem rapidamente a alterações (como ação animal, adubações, condições climáticas, disponibilidade de substrato, etc.) em um curto período de tempo.

O solo é um sistema complexo que contém uma grande variedade de micro-habitat, os quais são caracterizados por propriedades físicas, químicas e biológicas únicas (TORSVIK; ØVREÅS, 2002). Essas propriedades, além de mostrarem grande variabilidade espacial, apresentam também elevada variabilidade temporal, o que dificulta a definição de amostras representativas e, conseqüentemente, o estudo do sistema (LAMBAIS *et al.*, 2005).

Chávez *et al.* (2011) já identificavam que a variabilidade espacial e temporal dos sistemas de pastejo indicam a necessidade de realização de estudos futuros, com coletas mais intensivas, para caracterizar melhor o comportamento da comunidade microbiana. Neste sentido, Wakelin *et al.* (2009)

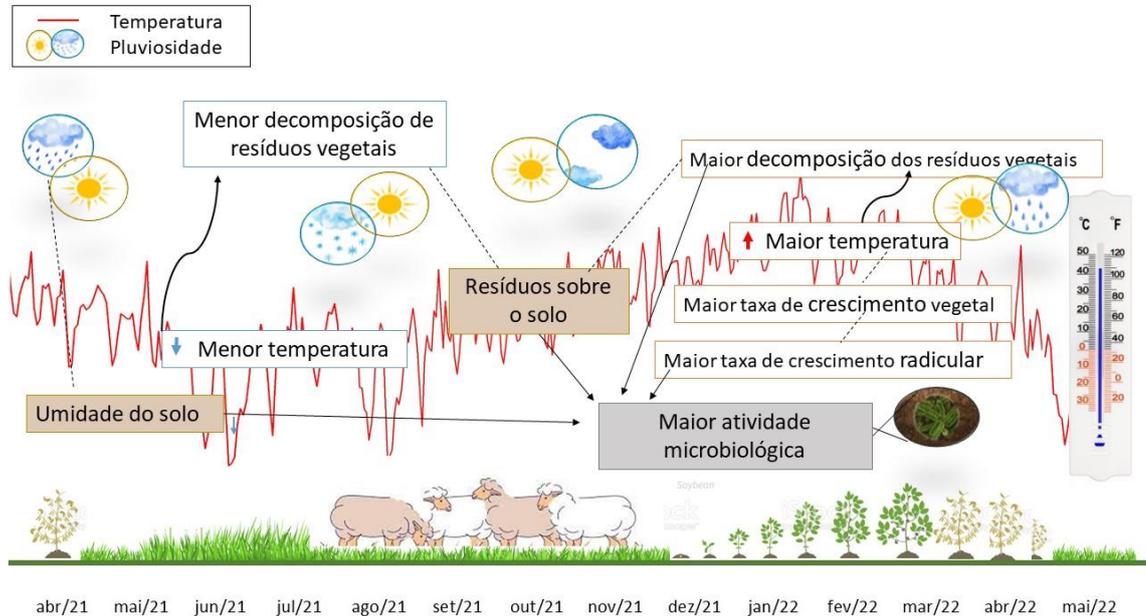
notaram padrões de estrutura da comunidade microbiana indicando mudanças graduais ao longo do tempo, e afirmam que não se pode concluir que o efeito é atribuído à sazonalidade. Para isso, deveria se realizar um ano completo de amostragem para determinar se a estrutura da comunidade biótica sob pastagens é inerentemente cíclica.

Para Fialho *et al.* (2006), condições de temperatura, umidade e aeração, possibilitadas por menores oscilações destas variáveis no solo sob vegetação natural, pode favorecer a população microbiana. A temperatura é um dos fatores que mais influencia a atividade dos microrganismos no solo, intensificando ou retardando as atividades biológicas (ARAUJO *et al.*, 2008). Geralmente, temperaturas mais baixas tendem a retardar as atividades biológicas. Não tem como prever com exatidão mudanças de temperatura e pluviosidade de uma certa região, entretanto, aspectos como temperatura costumam se comportar de forma semelhante em certas épocas do ano no subtropical brasileiro (ex.: inverno frio e verão quente), já a pluviosidade, é bastante variável ao longo do tempo.

Um exemplo de como a temperatura altera a atividade microbiológica, é descrito por Primavesi (2002), que afirma que solos com temperatura  $>20^{\circ}\text{C}$ , predominam comunidades bacterianas, que são extremamente ativas na decomposição da MOS. Segundo a mesma autora, em época de seca, quase toda vida do solo superficial entra em declínio, e somente a 50 cm de profundidade haveria umidade suficiente para a microbiota. Já a umidade excessiva também provoca seletividade microbiológica, sendo que apenas alguns microrganismos podem sobreviver em condições de anaerobiose. A cobertura do solo auxilia neste processo, devido ao fato de proporcionar condições mais favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos, como, por exemplo, menos oscilação de temperatura, umidade, aeração, etc. (BALOTA *et al.*, 1998).

Levando em consideração a variabilidade temporal dos bioindicadores de qualidade do solo, presume-se que a maior atividade microbiológica ocorre nas épocas mais quentes do ano, visto que nestas épocas tem-se maior crescimento vegetal, conseqüentemente, maior crescimento radicular e liberação de exsudatos, que servem de substrato para a biomassa microbiana, favorecendo a maior atividade microbiológica do solo, como pode-

se observar na Figura 3. Já a precipitação, também influencia da atividade dos microrganismos. Entretanto, é uma condição meteorológica variável em um ano agrícola, com baixa previsibilidade ao longo dos anos.



**Figura 3.** Modelo conceitual da variação temporal que podem influenciar na atividade dos bioindicadores de qualidade de solo, dentro de um ano agrícola (condições meteorológicas meramente ilustrativas) no Rio Grande do Sul.

A Figura 3 demonstra que épocas mais quentes favorecem a maior atividade microbológica, comparada a épocas mais frias, uma vez que temperaturas mais elevadas favorecem a decomposição dos resíduos vegetais do material remanescente sobre o solo. Além disso, aumenta a taxa de crescimento vegetal e, conseqüentemente, de raízes e da liberação de exsudatos, que servem de substrato para a biomassa microbiana. Tendo como exemplo um sistema de produção típico do subtropical brasileiro, com soja no verão e azevém no inverno, poderia se pressupor que entre a metade do ciclo da pastagem e floração da soja favoreça a atividade microbológica.

## 2.4 Carbono orgânico total

O COT do solo é um importante parâmetro para avaliar as mudanças de manejo nos sistemas produtivos. Em ecossistemas naturais, há um equilíbrio entre a cobertura do solo e as propriedades físicas, químicas e biológicas do

solo, devido a processos de ciclagem de nutrientes, acúmulo e decomposição de matéria orgânica (MUNIZ *et al.*, 2011), mas em solos que sofreram interferências antrópicas, o COT torna-se susceptível a perdas em sistemas mal manejados, logo, acompanhar suas perdas e acúmulo é importante para entender o funcionamento do sistema.

O COT do solo, é a diferença entre a entrada e a liberação de carbono na atmosfera via CO<sub>2</sub> e/ou CH<sub>4</sub>, na decomposição da matéria orgânica acumulada pelos organismos heterotróficos (MOINET *et al.*, 2023). Segundo Besen *et al.* (2018) a adoção de práticas conservacionistas, como SPD, ILP e formas de cultivo que possibilitem o uso sustentável do solo, e que incrementem a entrada de C através dos resíduos, apresentam-se como medida imprescindível para mitigação de gases do efeito estufa, desde que corretamente manejadas. Segundo Carvalho *et al.* (2010b), os sistemas de uso e manejo de terras em diferentes biomas do Brasil, como o sistema de plantio direto (SPD) e o sistema de ILP, podem alterar consideravelmente os estoques de COT do solo e a emissão de GEE para a atmosfera.

Em estudo realizados por Muniz *et al.* (2011) mostra que o estoque de COT do solo é maior em sistema de ILP do que quando comparado a pastagens degradadas, entretanto, é menor do que solos sob vegetação de florestas naturais. Esse maior estoque de COT em ILP comparado a pastagem degradadas, pode ser resultado do constante surgimento e morte de raízes neste sistema (PIAZZETTA *et al.*, 2014). Nos solos onde há introdução de plantas de cobertura, em especial aquelas com alta produção de resíduos, sem o posterior revolvimento, a disponibilidade de nutrientes está mais ligada ao ciclo do carbono (RHEINHEIMER; ANGHINONI; CONTE, 2000).

O SPD também é capaz de acumular COT no solo, Cerri *et al.* (2004) calcularam um valor médio ponderado de 0,5 t C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de acúmulo de COT, em solos manejados com SPD, na camada de 0-10 cm de profundidade em solos brasileiros. Este valor foi calculado usando as taxas de sequestro de carbono para a região sul (72% da área de SPD na época do estudo) e centro-oeste (28 % da área de SPD na época do estudo), mas ainda destacam que a quantidade de resíduos que retorna ao sistema varia conforme as práticas realizadas e os aspectos climáticos.

LOPES *et al.* (2013) publicou pela primeira vez, tabelas com valores de referências para os indicadores microbianos em solo do cerrado, com base no rendimento relativo acumulado, e encontraram relações entre seis bioindicadores (biomassa microbiana do solo, respiração basal,  $\beta$ -glicosidase, celulase, arilsulfatase e fosfatase ácida) tanto o rendimento relativo acumulado, como o teor de COT do solo, resultado importante, uma vez que o COT é mais fácil avaliar em uma área do que o rendimento relativo acumulado, pensando em vias práticas.

## **2.5 Carbono, nitrogênio microbiano e relação C:N da biomassa microbiana do solo**

Em ecossistemas naturais é mantida estreita e harmônica integração da cobertura vegetal com o sistema físico, químico e biológico do solo, através de processos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, pela formação e decomposição da matéria orgânica (FERREIRA *et al.*, 2007). Entretanto, ao converter estes sistemas harmônicos em sistemas agrícolas, os manejos de preparo de solo, incorporação de corretivos, adubos químicos e entre outros, tendem a alterar a qualidade do solo, através de processos ecossistêmicos.

Segundo Ferreira *et al.* (2007), os principais responsáveis por esses processos são os microrganismos do solo, algas e microfauna, cuja massa ou biomassa microbiana está permanentemente em renovação, obtendo a energia da MOS, atuando assim como fonte e dreno (mineralização/imobilização temporária) dos nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas. Devido a isso, o carbono da biomassa microbiana (C-BMS) é o principal componente da matéria orgânica viva do solo e, junto ao COT vem sendo utilizados como indicador de alterações e de qualidade do solo (DA SILVA *et al.*, 2012).

O C-BMS desempenha um papel fundamental na produtividade e na manutenção dos ecossistemas, pois atua como um catalisador de reações químicas no solo e constitui um reservatório de nutrientes disponíveis às plantas, participando do compartimento central do ciclo do C, N, P e S no solo, por pertencer ao componente lábil da MOS e possuir atividade influenciada pelas condições bióticas e abióticas (CUNHA *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2010). Por isso, e por ser o compartimento da MOS de mais rápida ciclagem, o C-BMS é

um importante parâmetro de avaliação, refletindo mudanças conforme os fatores abióticos e práticas de manejo antes mesmo que ocorram mudanças nos níveis de MOS (BITTENCOURT *et al.*, 2006; DA GAMA-RODRIGUES *et al.*, 2005).

Em relação às alterações microbiológicas do solo, o tempo de permanência da pastagem no sistema é um fator determinante (SOUSA *et al.*, 2020), onde os atributos microbiológicos são gradualmente melhorados durante o desenvolvimento (envelhecimento) da pastagem, em um sistema de ILP. Comparando um sistema convencional e cinco diferentes sistemas de cultivos em ILP, constatou que a maior C-BMS ( $776 \mu\text{g C g}^{-1}$  solo seco<sup>-1</sup>) foi encontrado no sistema com alta diversidade de culturas. O fato é que, um sistema bem manejado tende a aumentar a quantidade de MOS, que representa o principal reservatório de energia para os microrganismos e de nutrientes para as plantas (PEREZ; RAMOS; MCMANUS, 2004).

Pesquisa realizada por Perez, Ramos e McManaus (2005) no Cerrado, encontraram que o N-BMS em solos não perturbados (SPD), comparativamente as áreas que sofrem algum tipo de perturbação de solo, apresentam maiores valores em todas as épocas estudadas durante o ciclo da soja: antes do preparo de solo (em solo que sofre algum tipo de perturbação), trinta dias após a germinação, floração e após a colheita. A biomassa microbiana do solo é um potencial reservatório de N, que pode ficar temporariamente imobilizado. Mas, se por um lado a BMS imobiliza o N, diminuindo temporariamente sua disponibilidade para as culturas, por outro, pode se constituir em uma fonte de N potencialmente mineralizável, pois os nutrientes imobilizados pela comunidade microbiana podem atingir valores elevados, mas a sua reciclagem e a sua liberação são mais rápidas do que as de outras frações da MOS (VARGAS; SELBACH; SÁ, 2005). O processo de imobilização e mineralização, ocorrem permanentemente e simultaneamente no solo, entretanto, alguns manejos favorecem a mineralização.

Já Bittencourt *et al.* (2006) encontraram maiores valores de N-BMS na estação chuvosa no Cerrado (independentemente do tipo de cobertura vegetal e da profundidade de coleta), bem como, o maior teor de N-BMS foi encontrado nos tipos de cobertura vegetal com maior produção e acúmulo de resíduos vegetais, na camada superficial do solo (área de pastagem natural e

mata de Cerrado). Esse resultado, nos mostra que a BMS armazena N em resposta não só a cobertura, mas também em resposta a fatores climáticos.

A relação C:N da biomassa microbiana do solo (C:N - BMS) pode indicar a comunidade microbiana presente, onde relações C:N-BMS mais elevadas indicam maior predominância de comunidades fúngicas em relação a comunidades bacterianas (CAMPBELL *et al.*, 1991) e vice-versa. Mudanças temporais na quantidade e qualidade de matéria orgânica depositada em solos rizosféricos, pode atuar como pressão seletiva para comunidades microbianas do solo (WAKELIN *et al.*, 2009).

Além disso, a relação C:N – BMS, ajuda a indicar a disponibilidade dos nutrientes no solo. De modo geral, quando a relação C:N for maior que 30, o processo de imobilização é maior que de mineralização, diminuindo a disponibilidade de nutrientes para o solo, já a relação C:N entre 20 – 30 significa que o processo de imobilização é igual ao de mineralização, não alterando a disponibilidade de nutrientes, já quando a relação C:N passa a ser <20, o processo de mineralização prevalece sobre o de imobilização, aumentando a disponibilidade de nutrientes para o solo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

## 2.6 Respiração basal do solo

A respiração do solo ou respiração basal (RBS) descreve o nível da atividade microbiana, permite fazer inferências sobre o teor e a decomposição da MOS, além de refletir a capacidade de sustentação da vida no solo, através da atividade de plantas, animais e microrganismos (MOURA *et al.*, 2015). A RBS é a oxidação biológica da MOS a CO<sub>2</sub> pelos microrganismos aeróbios, ocupa uma posição chave no ciclo do C nos ecossistemas terrestres (SILVA *et al.*, 2013).

A emissão de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera, ocorre principalmente por dois processos biológicos: a decomposição de resíduos orgânicos e a respiração de organismos e sistema radicular das plantas (CARVALHO *et al.*, 2010). Segundo Melillo *et al.* (2002), 20% da respiração é oriunda das raízes e 80% são resultante dos microrganismos do solo. Assim como outros processos metabólicos, a RBS é dependente do estado fisiológico da célula microbiana e é influenciada por diversos fatores do solo, como: a umidade, a temperatura, a

estrutura, a disponibilidade de nutrientes, textura, relação C/N, presença de resíduos orgânicos, entre outros (DA SILVA *et al.*, 2010).

O manejo realizado influencia diretamente na taxa de respiração dos microrganismos. Estudo realizado por Gonçalves *et al.* (2019), constataram que as diferentes sucessões de culturas influenciam a taxa respiratória dos microrganismos no solo, principalmente na profundidade de 0-5 cm. Os autores relataram que a sucessão soja-trigo favorece maior atividade dos microrganismos no solo do que a sucessão milho-feijão.

## 2.7 Quociente metabólico e microbiano do solo

A razão entre RBS e o C-BMS, por unidade de tempo, resulta no  $qCO_2$  que é a quantidade de  $CO_2$  liberada pela BMS em função do tempo, sendo considerada a respiração específica dos microrganismos do solo (MARINHO JUNIOR *et al.*, 2021). É uma das maneiras de mensurar o efeito de práticas de manejo e de condições ambientais sobre a BMS (SOUZA *et al.*, 2008), pois os atributos biológicos do solo, possuem a capacidade de medir o nível de desequilíbrio ao qual um determinado ambiente está sujeito, sendo úteis para determinar os efeitos positivos e negativos sobre a qualidade do solo e a sustentabilidade das práticas agrícolas (CUNHA *et al.*, 2011).

O estresse abiótico que atua sobre as comunidades microbianas pode ser quantificado pelo  $qCO_2$ , segundo Anderson e Domsch (1993) quanto mais elevado for o  $qCO_2$ , maior o gasto de energia para manutenção da atividade microbiana. Em pesquisa liderada por Muniz *et al.* (2011), constataram que a substituição de pastagens degradadas por um sistema de ILP faz com que o solo crie um ambiente favorável para o crescimento da BMS, bem como, diminui o estresse ambiental ( $qCO_2$ ) da microbiota do solo.

O quociente microbiano ( $qMIC$ ) é um índice utilizado para fornecer informações sobre a qualidade da MOS, sendo expresso pela relação entre o C-BMS e o COT (JUNIOR; MENDES, 2007). Da Silva *et al.* (2010), testando diferentes sistemas de manejo no Cerrado, mostrou que o  $qCO_2$  indicou que a biomassa microbiana foi menos eficiente na utilização de compostos orgânicos, liberando mais C na forma de  $CO_2$  e incorporando menos C aos tecidos

microbianos (logo, diminuindo o qMIC), nos sistemas caracterizados por manejos mais intensivos do solo.

## 2.8 Atividade enzimática

Dentre os bioindicadores, a atividade enzimática do solo tem se mostrado um indicador eficaz da qualidade de solo, pois as transformações bioquímicas no sistema solo-planta são dependentes ou relacionadas à presença das enzimas, as quais têm participação essencial nos ciclos dos elementos no solo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Uma vez que as enzimas catalisam todas as reações bioquímicas e são partes integrais da ciclagem de nutrientes no solo, e são produzidas por todos os organismos vivos no solo, como microrganismos, raízes de plantas e fauna (TÓTOLA; CHAER, 2002).

As enzimas extracelulares são uma das vias de formação da memória do solo, pois essas enzimas relacionam-se com a formação de complexos com a MOS e com a fração argila do solo (MENDES, 2016). As enzimas são desnaturadas por temperatura elevada e pH extremo (alto ou baixo), sendo que o estado físico-químico que influencia nas reações químicas, são dependentes do pH, da força iônica, da temperatura e da presença ou ausência de inibidores ou ativadores (TABATABAI, 1994).

A atividade enzimática é afetada por vários fatores, como é o caso de fatores climáticos, que afetam diretamente no metabolismo celular. Sousa *et al.* (2020) mostraram alta correlação entre as condições climáticas e a atividade microbiológica do solo, principalmente para a atividade enzimática (correlação > 0,65) onde a  $\beta$ -glicosidase e a fosfatase ácida mostraram atributos comuns, possuindo correlação positiva com a temperatura e correlação negativa com a precipitação e a umidade, o que sugere maior atividade dessas enzimas em ambientes com elevadas temperaturas e menor precipitação. Neste mesmo estudo, constatou-se também uma forte correlação entre o C-BMS e a atividade da fosfatase ácida ( $r = 0,69$ , significativo a 0,1% de probabilidade).

Sabendo da importância dos bioindicadores de qualidade de solo, a Embrapa Cerrado lançou a tecnologia BioAS, que consiste na agregação de parâmetros relacionados ao funcionamento biológico às análises de química do solo (MENDES *et al.*, 2019). Essa análise consiste na avaliação das enzimas

arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, associadas aos ciclos do S e do C, respectivamente.

O crescente estudo e utilização dos bioindicadores de qualidade do solo, traz a necessidade de uma interpretação prática para a agricultura atual. Para tal, Lopes *et al.* (2013) mostraram a necessidade do uso de critérios de referência (avalições comparativas) sugerindo que os valores ideais para bioindicadores podem variar conforme o clima, o tipo de solo, a mineralogia do solo e o manejo e uso da terra.

Neste sentido, Dick, Breakwell e Turco (1996) publicaram valores médios para a atividade de várias enzimas do solo, naquela condição. Dentre elas, consta os valores das enzimas: hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA),  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida, como pode-se observar na Tabela 1.

**Tabela 1.** Atividade da hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA),  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida e seu valor médio no solo.

<b>Enzima</b>	<b>Valor médio no solo</b>
FDA	61 mg de fluoresceína h <sup>-1</sup>
$\beta$ -glicosidase	148 mg pNF kg <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>
Arilsulfatase	80 mg pNF kg <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>
Fosfatase ácida	617 mg pNF kg <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>

pNF: paranitrofenol. Fonte: Dick; Breakwell; Turco (1996).

## 2.9 Enzimas: FDA, $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida

Através da FDA verifica-se que o substrato é hidrolisado por várias proteases, lipases e esterases liberadas pelas bactérias e fungos ativos, que são decompositores primários, fazendo com que o FDA seja um bom indicador da atividade total dos decompositores do solo. Portanto, um bom índice da atividade heterotrófica total do solo (CHÁVEZ *et al.*, 2011; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006a).

Da Silva *et al.* (2015), estudando a atividade microbiana no Rio Grande do Sul (RS), em áreas de mata nativa, pastagem de azevém + tifton com uso de dejetos suínos há dois e a quatorze anos, em duas épocas de coleta: agosto e novembro, constatou-se diferença na FDA tanto para época de coleta quanto para as áreas estudadas, onde as áreas com mata nativa apresentaram maior FDA em agosto, (possivelmente devido a uma alta precipitação antes da

coleta de novembro), que prejudicou a FDA nesta época. Esse resultado mostra a variação temporal que a enzima apresenta em curto espaço de tempo, em função das condições climáticas.

A  $\beta$ -glicosidase atua na fase final da degradação da celulose, da hidrólise de celobiose, liberando glicose como produto final, que é uma fonte importante de energia para os microrganismos do solo (CAPRISTO *et al.*, 2021), sendo capaz de quebrar as ligações beta-glicosídicas em di-glicossacarídeos e oligo-glicossacarídeos e em vários outros glicoconjugados. Devido a isso, essa enzima é amplamente distribuída nos solos e possui papel importante em vários processos biológicos (KHAN; AKHTAR, 2010).

No solo, o S é encontrado predominantemente na forma orgânica. Assim, a capacidade do solo em suprir a demanda da planta pelo nutriente está estreitamente relacionada ao teor e à mineralização da MOS, que, gradualmente, disponibilizará o S na forma de sulfato para a solução do solo, o qual poderá ser absorvido pelas plantas (TIECHER *et al.*, 2012). A enzima arilsulfatase apresenta um papel muito importante no ciclo do S no solo, pois a mesma é responsável por hidrolisar ligações éster de sulfato, liberando íons sulfatos no solo (TABATABAI; BREMNER, 1970).

Quando adicionado ao solo, o ortofosfato é absorvido pelas plantas e transformado em outras formas inacessíveis, ou seja, tornando-se “fixado” por adsorção em minerais do solo ou pelos microrganismos e posteriormente convertido a formas orgânicas pelo processo de metabolização e decomposição (JANES-BASSETT *et al.*, 2022). O P contido na BMS é biologicamente disponível (após passar pelo processo de imobilização, passa a ser mineralizado), especialmente na rizosfera, onde aproximadamente 40% das espécies de microrganismos apresentam fosfatases capazes de hidrolisar o P (RHEINHEIMER; ANGHINONI; CONTE, 2000).

## **CAPÍTULO III – Material e Métodos Geral**

### **3.1. Local, clima e solo**

O estudo foi realizado em um experimento localizado na Estação Experimental Agronômica (EEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no município de Eldorado do Sul, Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil (30° 05' S, 51° 39'W e 46 m de altitude). O clima da região é subtropical úmido (Cfa) de acordo com Köppen, com temperatura média anual de 19°C e precipitação média de 1.500 mm anuais. O solo é classificado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SiBCS) (SANTOS *et al.*, 2018), com relevo suave ondulado, que corresponde à classe Acrisol no sistema internacional (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015).

Desde 2003, a área experimental vem sendo conduzida com sistema de ILP e SPD, em um antigo protocolo experimental, que avaliava diferentes intensidades de pastejo de azevém, diferentes métodos de pastejo hibernar por ovinos, e diferentes sistemas de produção de grãos (milho e soja) no verão. Em abril de 2017, foi instalado o atual protocolo experimental, sendo realizada análise de caracterização química do solo (Tabela 2). Assim, o pH do solo foi corrigido, utilizando 7,4 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (70% de poder relativo de neutralização total), que foram aplicadas na superfície do solo com objetivo de atingir pH 6,0 (CQFS - RS/SC, 2016).

**Tabela 2.** Caracterização química do solo realizada antes da instalação do protocolo experimental, em agosto de 2017. Eldorado do Sul-RS.

Camada de solo	pH (H <sub>2</sub> O)	COT <sup>1</sup>	Ca <sup>2</sup>	Mg <sup>2</sup>	Al <sup>2</sup>	H + Al <sup>3</sup>	P <sup>4*</sup>	K <sup>4*</sup>	Saturação da CTC	
									Bases	Al
Cm		g kg <sup>-1</sup>	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			mg dm <sup>-3</sup>		-----%-----		
0 – 5	3,9	16,7	1,3	0,7	1,4	10,2	95	84	18	40
5 – 10	3,8	8,8	0,8	0,4	1,7	10,2	94	69	12	57
10 – 20	4,0	6,4	0,9	0,4	1,6	8,9	46	68	14	52
20 – 30	4,2	5,9	1,4	0,6	1,6	8,7	17	66	20	42
30 – 40	4,3	5,8	1,4	0,7	1,5	8,7	12	65	21	41

<sup>1</sup> Carbono orgânico total (Walkley-Black); <sup>2</sup> Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); <sup>3</sup>Acidez potencial estimada pelo índice SMP; <sup>4</sup>Fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1). \* O teor crítico de P e K é 30 e 90 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, de acordo com a CQFS RS/SC (2016).

### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

A área experimental possui 4,8 ha, dividida em 16 parcelas variando em tamanho de 0,23 a 0,41 ha, separadas com cerca convencional, além de uma área adjacente de 1,1 ha para manejo de animais reguladores durante o ciclo de pastejo. O sistema produtivo testado foi a sucessão de culturas entre azevém (*Lolium multiflorum*) na fase inverno e soja (*Glycine max*) na fase verão. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com quatro repetições (blocos), em sistema fatorial 2x2x2, onde os fatores consistiram em: época de reposição de P e K (no estabelecimento do pasto ou da lavoura), ação do pastejo (com ou sem) e adubação com NPK (presença da adubação do protocolo ou ausência de adubação desde 2020). A presença e a ausência de adubação são testadas em três blocos com uma subparcela de 16 m<sup>2</sup>, que desde 2020 não recebe adubação de NPK. A configuração do experimento pode ser observada na Figura 4.

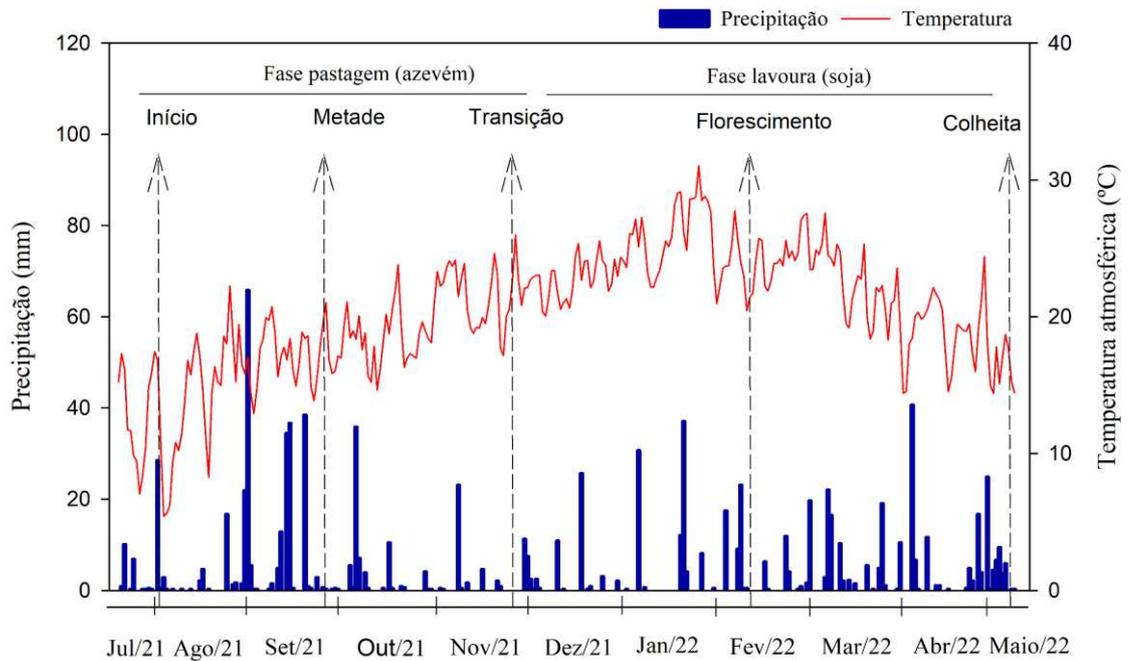


**Figura 4.** Configuração da área experimental na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS. Eldorado do Sul-RS.

O conjunto de manejo descrito na configuração experimental se refere a:

- Manejo 1 - Reposição de P e K na pastagem sem a ação do pastejo hibernar;
- Manejo 2 - Reposição de P e K na pastagem com a ação do pastejo hibernar;
- Manejo 3 - Reposição de P e K na lavoura sem a ação do pastejo hibernar;
- Manejo 4 - Reposição de P e K na lavoura com a ação do pastejo hibernar.

Avaliou-se a fase pastagem e a fase lavoura, do ano agrícola 2021/2022, e as condições meteorológicas referente a esse período encontram-se na Figura 5.



**Figura 5.** Precipitação pluvial e temperatura atmosférica do ano de avaliação (2021/2022) na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Eldorado do Sul-RS.

No ano avaliado, a fase pastagem iniciou com a semeadura do azevém, que aconteceu em abril de 2021, com a cultivar BRS Ponteio, usando-se a dose de  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de sementes viáveis. A adubação para reposição de P e K ocorreu de forma manual, com um espalhador em cobertura de granulado, modelo All Agri AG 10 em cobertura, 14 dias após a semeadura do azevém, nas parcelas que recebiam reposição de P e K na pastagem. A adubação foi calculada baseada na expectativa de produção de  $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de soja (produtividade média de soja do experimento nas duas safras anteriores). Para tal, usou-se a dose de  $35 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  e  $50 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$ , usando superfosfato triplo (41%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e cloreto de potássio (58%  $\text{K}_2\text{O}$ ), respectivamente, como fonte de P e K. A adubação nitrogenada foi realizada em junho de 2021, em todas as parcelas, de forma manual, com um espalhador de granulado All Agri AG 10, na dose de  $150 \text{ kg de N ha}^{-1}$ , usando ureia comum (45% N) como fonte de N. Durante a operação de adubação, as subparcelas que estavam sob ausência de adubação por dois anos consecutivos, foram isoladas com lonas, a fim de evitar a deposição de fertilizantes sobre o solo.

Quando o azevém atingiu cerca de 15 cm de altura (julho de 2021), iniciou-se a ação do pastejo nas parcelas manejadas com este tratamento. O

pastejo foi realizado com ovinos da raça Corriedale, com cerca de 10 meses de idade, no método de pastoreio contínuo com carga animal variável, usando a técnica “put and take” (MOTT; LUCAS, 1952) para manter a altura preconizada do pasto, para tal, foi utilizado animais testes, que estavam sempre em pastejo e a altura de pasto era regulada por meio de animais reguladores, realizando-se ajustes de carga animal semanalmente, para que o pasto permanecesse na altura de 15 cm. O ajuste da carga animal foi baseado na leitura semanal de 150 pontos de altura por parcela, com bastão do tipo “sward stick”. Os animais permaneceram em pastejo até o final do ciclo do azevém, em novembro de 2021, quando houve a dessecação do pasto com a mistura de glifosato ( $4 \text{ L ha}^{-1}$ ) e 2,4D ( $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ ), seguido pela semeadura da soja, iniciando a fase lavoura.

A fase lavoura iniciou em dezembro de 2021, com a semeadura mecanizada (semeadora Vence Tudo SA 11500 A) do cultivar de soja BRS 6105, utilizando-se 12 sementes por metro linear, previamente tratadas com o inseticida Maestro Fs (200 ml de produto para 100 kg de semente) e inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (70 ml do produto comercial GRAP NOD L+ para cada 50 kg de sementes). No mesmo dia da semeadura, realizou-se a adubação de reposição de P e K, de forma manual (Figura 6-A), com um espalhador de granuloso All Agri AG 10 (Figura 6-B), nas parcelas que recebiam a reposição de nutrientes na fase lavoura, visando à reposição de nutrientes para a expectativa de produção de  $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , de acordo com a CQFS-RS/SC (2016). A quantidade e as fontes de P e K foram as mesmas que as aplicadas na fase pastagem.



**Figura 6.** Adubação de P e K nas parcelas (A) com o espalhador de granuloso manual All-Agri AG 10 (B), utilizado, tanto na fase pastagem como na fase lavoura. Foto: Autoria própria.

A dose da adubação de reposição de P e K no protocolo experimental, não foi fixa ao longo dos anos, sendo regularmente ajustada conforme a necessidade de reposição e/ou expectativa de produtividade. Na Tabela 3 consta o histórico das quantidades de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  aplicadas desde o início do experimento, usando-se a fonte de superfosfato triplo e cloreto de potássio.

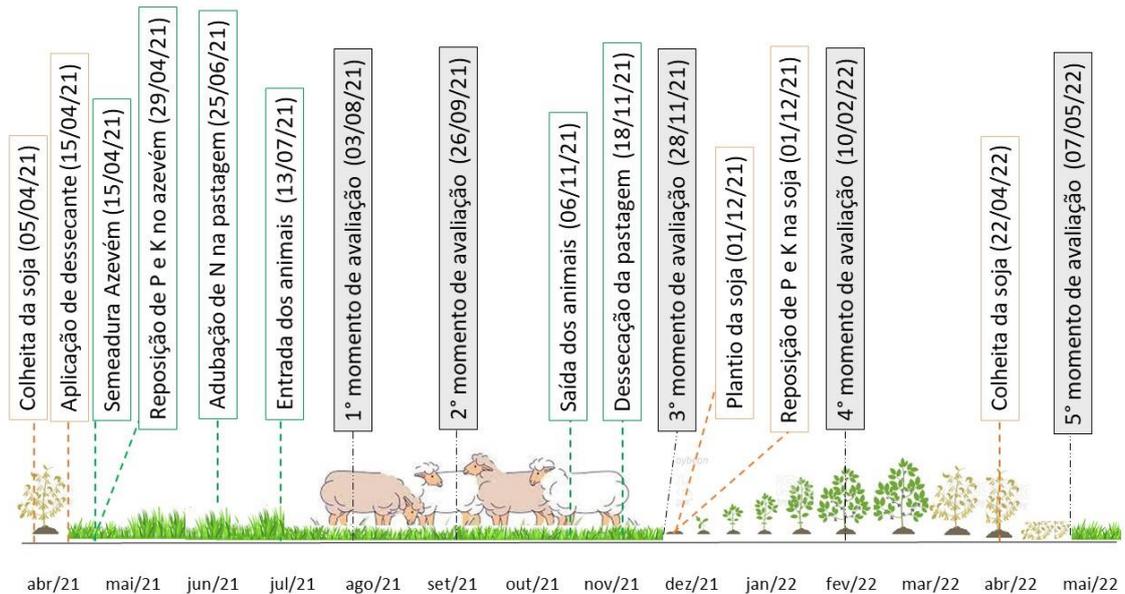
**Tabela 3.** Adubação de nitrogênio (N), e reposição de fósforo ( $P_2O_5$ ) e potássio ( $K_2O$ ) utilizada em cada safra, total acumulado e média por safra, desde o início do protocolo experimental (2017). Eldorado do Sul-RS.

Safra	Nutriente		
	N	$P_2O_5$	$K_2O$
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----	
<b>2017/2018</b>	150	70	70
<b>2018/2019</b>	150	70	70
<b>2019/2020</b>	150	56	80
<b>2020/2021</b>	150	35	50
<b>2021/2022</b>	150	35	50
<b>Média por safra</b>	150	53	64
<b>Total acumulado nas 5 safras</b>	750	266	320

### 3.3 Coletas de solo

As avaliações foram realizadas no ano agrícola 2021/2022, em cinco momentos distintos, buscando-se acompanhar um ano agrícola em diferentes fases, sendo elas: 1º momento de avaliação – início da fase pastagem (após a entrada dos animais na área); 2º momento de avaliação – metade do ciclo da fase pastagem; 3º momento de avaliação – transição entre a fase pastagem e a fase lavoura (após a saída dos animais e dessecação da pastagem e antes da semeadura da soja); 4º momento de avaliação – na floração da soja; 5º momento de avaliação – após a colheita da soja.

Os principais manejos realizados durante o período de avaliação encontram-se na Figura 7.



**Figura 7.** Principais manejos realizados na pastagem de azevém (2021) e na lavoura de soja (2021/2022), especificando a data que ocorreu os cinco momentos de avaliação. Eldorado do Sul-RS.

Os momentos de avaliação foram caracterizados por uma coleta de solo composta (cinco pontos por parcela), realizada com auxílio de trado calador, na camada de 0-10 cm. Após a coleta, a amostra foi homogeneizada, armazenada em sacos plásticos devidamente identificados e levada ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFRGS. Posteriormente, as amostras foram tamisadas em peneiras com malha de 2mm e armazenadas a cerca de  $3 \pm 1^\circ\text{C}$  até o momento da análise, que não foi imediatamente após as coletas, devido questões como restrição de uso de laboratório durante a pandemia, indisponibilidade de algum reagente/equipamento por certo período de tempo, ou até mesmo, viabilidade de transporte de amostras para outro estado (análises enzimáticas). Assim sendo, algumas coletas permaneceram até cerca de 3 meses em condições controladas para análise no laboratório da UFRGS, e até 8 meses (primeira coleta) para análise enzimática no laboratório da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

### 3.4 Análises bioquímicas do solo

#### 3.4.1 Carbono, nitrogênio e relação C:N da biomassa microbiana

O C-BMS e o N-BMS da biomassa microbiana foram analisados pelo método de irradiação-extração, descrito por Mendonça e Matos (2005) e adaptado de Islam e Weil (1998) e Brookes, Powlson e Jenkinson (1982). A metodologia consiste na pesagem de duas subamostras em duplicata (total de quatro subamostras), com 20 g de solo cada. Uma subamostra em duplicata foi irradiada em forno micro-ondas (Figura 8 - A), para que houvesse morte da BMS, e a outra subamostra em duplicata permaneceu sem a irradiação. O tempo de irradiação foi de 2 minutos e 40 segundos, e foi calculado conforme descrito em Mendonça e Matos (2017). Após isso, adicionou-se 80 mL de sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ) e a amostra foi colocada para agitar por trinta minutos. Ao término da agitação, a amostra foi alocada na bancada, deixando-se ao menos 12 h, para o solo decantar totalmente (Figura 8 - B). Após, o extrato sobrenadante foi filtrado, com filtro de papel. A partir disso, o C-BMS e o N-BMS seguem o princípio de diferença entre as amostras não irradiada e irradiada, conforme descrito a seguir.



**Figura 8.** Amostras sendo irradiadas (A) em forno micro-ondas e decantando (B) para realizar análise de carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS) e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N-BMS). Foto: Autoria própria.

A determinação do carbono presente no extrato filtrado foi realizada de acordo com Tedesco *et al.* (1995) para tal, pipetou-se 10 mL do extrato em um erlenmeyer de 125 mL com auxílio de uma pipeta automática. Após, acrescentou-se 2 mL da solução de  $K_2Cr_2O_7$   $0,066 \text{ mol L}^{-1}$  e 10 mL de  $H_2SO_4$ , com seringas de vidro devidamente calibradas. Após a adição das soluções, esperava-se esfriar e, então, era adicionado 50 mL de água destilada, como pode-se observar na Figura 9.



**Figura 9.** Amostras para determinação de carbono da biomassa microbiana do solo, após a adição de  $K_2Cr_2O_7$ ,  $H_2SO_4$  e água destilada. Laboratório de Química do Solo da UFRGS, Porto Alegre – RS. Foto: Autoria própria.

As amostras foram tituladas, adicionando-se três gotas do indicador ferroin. O excesso de  $K_2Cr_2O_7$  foi titulado com sulfato ferroso amoniacal  $0,03 \text{ mol L}^{-1}$ . As amostras controle (“branco”) eram realizadas apenas com a solução de  $K_2SO_4$  (sem solo). O valor do carbono presente na biomassa microbiana foi calculado conforme a Equação 1:

$$C_{I,NI} = \frac{(Vb - Vam)(m. \text{ sulf. ferroso})(3)(1000)(\text{vol. extrator})}{(\text{vol. do extrato})(\text{peso do solo})} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:  $C_{I,NI}$  = amostra irradiada e não irradiada;  $Vb$  = volume do branco (mL);  $Vam$  = volume da amostra (mL);  $m. \text{ sulf. ferroso}$  = molaridade do sulfato ferroso; 3 = resultado da relação entre o número de mols de  $Cr_2O_7^-$  que reage com  $Fe^{2+}$  (1/6), multiplicado pelo número de mols de  $Cr_2O_7^-$  que reagem com o C (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12); 1000 = fator de conversão.

Após calcular o C da amostra irradiada e não irradiada pela equação acima, obteve-se o C-BMS segundo a equação 2:

$$C - BMS (\mu g g^{-1}) = \frac{(C_I - C_{NI})}{K_C} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:  $K_C = 0,33$  para o método de irradiação-extração de C-BMS.

A determinação do N-BMS, pipetou-se 20 mL do extrato filtrado, com auxílio de uma pipeta automática em um tubo de digestão de 100 mL. Adicionou-se 1 mL de  $H_2O_2$  30% e 2 mL de  $H_2SO_4$ , com seringa de vidro devidamente

calibradas, e 0,7 g de mistura de digestão, com um cachimbo calibrado para essa medida.

As amostras foram colocadas no bloco digestor e a temperatura do mesmo foi elevada inicialmente a 110°C. A temperatura foi levada aos poucos para evitar extravasamento, até que a solução diminuísse para cerca de 5 mL. Após, aumentou-se a temperatura do bloco digestor para 250°C e em seguida para 350-375°C. Após o clareamento da solução (que adquiria uma coloração amarela-esverdeada) manteve-se essa temperatura por 2 horas (Figura 10).



**Figura 10.** Amostras para determinação de nitrogênio da biomassa microbiana do solo, no bloco digestor. Laboratório de Química do Solo da UFRGS, Porto Alegre-RS. Foto: Autoria própria.

Ao retirar os tubos do bloco de digestão, deixava-se esfriar e adicionava-se 5 mL de água destilada e, posteriormente, agitava-se a amostra em agitador vortex. Então, o tubo era conectado ao destilador de nitrogênio, adicionando-se 10 mL de NaOH 10 mol L<sup>-1</sup> pelo funil do destilador. Então, era destilado cerca de 35 mL em 5 mL do indicador ácido bórico. Posteriormente, essa solução foi titulada com HCl 0,005 mol L<sup>-1</sup>. As amostras controle (“branco”) eram realizadas apenas com a solução de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sem solo).

O N-BMS foi calculado conforme as Equações 3, 4 e 5:

$$N_1 (\mu g. L^{-1}) = \frac{(V_{am} - V_b) \cdot [H^+] \cdot 14}{volume (L)}$$

Onde:  $V_{am}$ = volume de HCl gasto na titulação a amostra;  $V_b$ = volume de HCl gasto na titulação do branco;  $[H^+]$ = concentração real do ácido clorídrico; 14= peso equivalente do nitrogênio.

$$N_{I,N_I} (\mu g g^{-1}) = \frac{N_I \cdot (\text{volume do extrator (L)}) \cdot 1000}{\text{peso da amostra (g)}} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que 1000 é fator de conversão de unidade de medida.

$$N - BMS (\mu g g^{-1}) = \frac{(N_I - N_{N_I})}{K_n} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que  $K_n = 0,54$  para o método de irradiação- extração do N-BMS.

A relação C:N da biomassa microbiana do solo (C:N-BMS) é uma razão matemática entre o C-BMS e o N-BMS.

### 3.4.2 Respiração basal

A RBS foi determinada pela avaliação do fluxo de  $CO_2$ , (Silva, Azevedo e De-Polli., 2007), com algumas adaptações. Pesou-se 50 g de solo em duplicata, que foram acondicionadas em frascos de vidro com capacidade de 1 L. Após isso, adicionou-se um frasco de 100 mL dentro do vidro, contendo 10 mL de NaOH 1 mol  $L^{-1}$ . O vidro foi vedado hermeticamente, para que não houvesse troca de  $CO_2$  entre o vidro e o meio externo. Alguns vidros contendo apenas o NaOH 1 mol  $L^{-1}$  (sem solo) foram igualmente fechados para serem a amostra controle (“branco”), como pode-se observar na Figura 11.



**Figura 11.** Vidros hermeticamente fechados e prontos para a incubação a fim de determinar o fluxo de  $CO_2$ . Laboratório de Carbono da UFRGS, Porto Alegre-RS. Foto: Autoria própria.

Após, as amostras foram incubadas em ambiente isento de luminosidade (estufa BOD) e com temperatura controlada de  $27 \pm 1^\circ\text{C}$ . Após 72h, o vidro contendo NaOH era retirado, e rapidamente adicionava-se 5 mL de  $\text{BaCl}_2$  10%, para precipitação do  $\text{CO}_2$ . Para a titulação, foi adicionado três gotas do indicador fenolftaleína 1% e a titulação foi realizada com HCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  até que a solução passasse de rosa para incolor.

A quantidade de  $\text{CO}_2$  liberada pela respiração microbiana foi obtida através da Equação 6:

$$\text{Fluxo de } \text{CO}_2 \text{ (mg de C - } \text{CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}) = \frac{(V_b - V_a) \cdot M \cdot 6 \cdot 1000}{T \cdot P_s} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:  $V_b$  (mL)= volume de ácido clorídrico utilizado na titulação controle;  $V_a$  (mL)= volume de HCl utilizado na titulação da amostra;  $M$ = molaridade exata do HCl;  $P_s$  (g)= Massa de solo seco e  $T$ = tempo de incubação da amostra em horas.

### 3.4.3 Carbono orgânico total

O COT do solo foi analisado pelo Laboratório de Análise de Solo da UFLA, através do método Walkley e Black (1934), onde o resultado foi entregue em teor de MOS e para obter o COT foi usado o fator 1,724 de divisão.

### 3.4.4 Quociente metabólico e microbiano

O  $q\text{CO}_2$  foi utilizado como uma medida de eficiência do solo, sendo um sensível indicador de estresse quando o C-BMS é afetado. Ele foi calculado pela razão entre o fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo, como pode-se observar na Equação 7:

$$q\text{CO}_2 \text{ (mgC - } \text{CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ BMS - C} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{\text{Fluxo de } \text{CO}_2 \text{ (mgC - } \text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ solo)}}{\text{C - BMS (mgC} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ solo)} \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Equação 7})$$

O  $q\text{MIC}$  foi calculado matematicamente pela razão entre C-BMS e COT do solo, conforme a Equação 8:

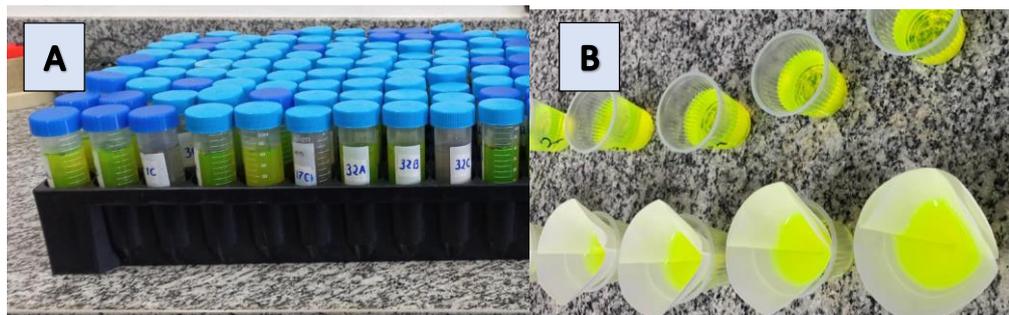
$$q\text{MIC (\%)} = \frac{\text{C - BMS } (\mu\text{g g}^{-1})/1000}{\text{COT (g kg}^{-1})} * 100 \quad \text{Equação 8}$$

### 3.4.5 Análises enzimáticas

Foi analisado a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida e FDA. Essas análises foram realizadas em parceria com a Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Minas Gerais, conforme as metodologias descritas a seguir.

#### 3.4.5.1 Hidrólise de diacetato de fluoresceína

A FDA foi analisado seguindo a metodologia proposta por Diack (1997). Para isso, pesou-se 2 g de solo em um tubo falcon de 50 mL (Figura 12 – A), onde foi adicionado 40 mL da solução tampão com a fluoresceína e foi alocado em uma incubadora, a 35° C por 24 h. Após esse período de incubação, adicionou-se 2 mL de acetona para interromper a reação química. O solo foi centrifugado 3840 RPM, força de 1652 g, por cinco minutos. Após esse processo, foi filtrado o sobrenadante da amostra com papel de filtro Whatman n° 42 (Figura 12 - B), e mensurado em espectrofotômetro (UV12 PHOX UV/VIS) com comprimento de onda de 490 nm. A amostra controle (“branco”) foi realizada seguindo o mesmo procedimento, entretanto, sem a adição do substrato. Quando o valor da amostra lida foi maior que o valor obtido da leitura do último ponto da curva, a amostra era diluída em água destilada.



**Figura 12.** Análise de hidrólise de FDA, amostras após sair da incubação (A) e sendo filtradas em papel de filtro Whatman n° 42 (B), para posteriormente serem lidas em espectrofotômetro em 490 nm. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.

### 3.4.5.2 $\beta$ -glicosidase

A metodologia utilizada foi a proposta por Eivazi e Tabatabai (1988). Para tal, foi pesado 1 g de solo em tubo falcon de 100 mL e adicionado 4 mL do MUB (pH 6,0), juntamente com 1 mL da solução do substrato *p*-nitrofenil- $\beta$ -D-glucopiranosídeo (PNG). Agitou-se brevemente, de forma manual o tubo falcon, que foi alocado em uma incubadora, por 1 hora a 37°C. A amostra controle (“branco”) foi feita de maneira igual, entretanto, sem a adição do substrato da enzima.

Após a incubação, adicionou-se 1 mL de  $\text{CaCl}_2$  e 4 mL do tampão THAM (pH 12,0). Agitou-se de forma manual por cerca de 5 segundos, então, a solução foi filtrada com papel filtro Whatman n° 42. Realizou-se a leitura da amostra em espectrofotômetro (UV12 PHOX UV/VIS), com comprimento de onda de 410 nm. Quando o valor da amostra lida foi maior que o valor obtido na leitura do último ponto da curva, a amostra era diluída em água destilada.

Calculou-se o conteúdo de PNF pela diferença de densidade optica (DO) entre a amostra e o controle, plotando um gráfico obtido da curva padrão contendo a concentração de 0, 10, 20, 30, 40 e 50  $\mu\text{g}$  de PNF (Figura 13), e foi considerado o peso do solo seco, conforme as Equações 9 e 10:

$$p - \text{nitrofenol } (\mu\text{g g solo seco}^{-1}\text{h}^{-1}) = \frac{C \cdot v}{pss \cdot psu \cdot t} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: C -concentração obtida pela curva (mg PNF); v - volume total da suspensão do solo (10 mL); pss - peso de 1,0 g de solo seco; psu - peso do solo úmido utilizado (usado o fator de correção da umidade do solo); t – tempo de incubação (1 hora).

$$p - \text{nitrofenol } (\mu\text{g g}^{-1}\text{solo seco}^{-1}) = (v.a) - (v.c) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: v.a: valor da amostra e v.c: valor da amostra controle (branco)



**Figura 13.** Solução contendo a concentração de 0, 10, 20, 30, 40 e 50  $\mu\text{g}$  de *p*-nitrofenil (PNF) para fazer a curva padrão que posteriormente foi usada para a equação no cálculo de atividade enzimática da  $\beta$ -glicosidase. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.

### 3.4.5.3 Arilsulfatase

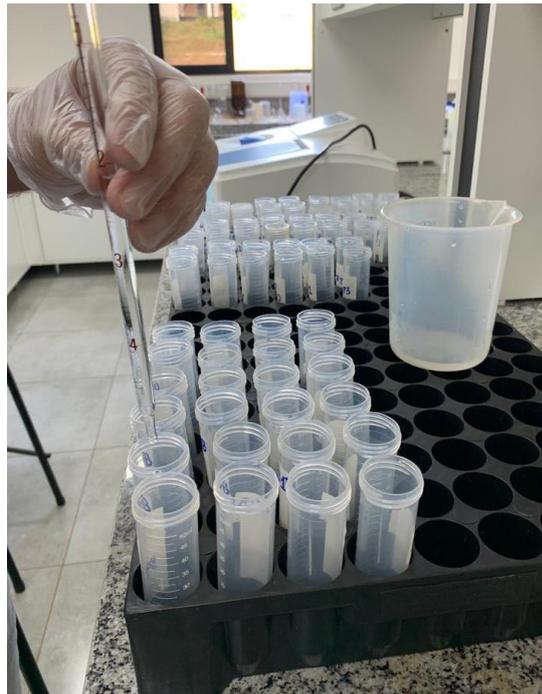
A atividade da enzima arilsulfatase foi calculada utilizando o procedimento descrito por Tabatabai e Bremner (1970). Para tal, pesou-se 1 g de solo em tubo falcon de 50 mL. Após isso, adicionou-se 4 mL do tampão acetato de sódio, agitou-se de forma manual por cerca de 5 segundos, o tubo falcon que foi incubado por 1 hora a 37°C. Após a incubação, adicionou-se 1 mL de  $\text{CaCl}_2$  (0,5M) e 4 mL de  $\text{NaOH}$  (0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ), Agitou-se de forma manual por cerca de 5 segundos, para paralisar a atividade da enzima. Em seguida, adicionou-se 1 mL da solução de p-nitrofenil sulfato de potássio, agitou-se para misturar a solução e foi filtrado a solução em filtro de papel Whatman nº 42 (Figura 14). A amostra controle (“branco”) foi feita de maneira igual, entretanto, sem a adição do substrato da enzima. A leitura da amostra e o cálculo realizado ocorreu de forma similar a da  $\beta$ -glicosidase (equação 9 e 10). Quando o valor da amostra lida foi maior que o valor obtido na leitura do último ponto da curva, a amostra era diluída em água destilada.



**Figura 14.** Amostras para análise de arilsulfatase, sendo filtradas em papel de filtro Whatman nº 42, para posteriormente serem lidas em espectrofotômetro em 410 nm. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.

#### 3.4.5.4 Fosfatase ácida

A atividade da fosfatase ácida foi realizada conforme a metodologia descrita por Dick; Breakwell; Turco (1996). Para isso, foi pesado 1 g de solo em um tubo falcon de 50 mL. Após isso, foi adicionado 4 mL da solução tampão (pH 6,5) e 1 mL de p-nitrofenil-fosfato (PNF  $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ) (Figura 15). Então, as amostras foram agitadas por 3 minutos na incubadora, que permaneceu a  $37^\circ \text{ C}$  por 1 hora. Após isso, a reação foi interrompida adicionando-se 1 mL de  $\text{CaCl}_2$  ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) e 4 mL de  $\text{NaOH}$  ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ), agitado a solução para homogeneizar a amostra e filtrada com papel de filtro Whatman n° 42. A leitura da amostra e o cálculo realizado ocorreu de forma similar a da  $\beta$ -glicosidase (Equação 9 e 10). Quando o valor da amostra lida foi maior que o valor obtido na leitura do último ponto da curva, a amostra era diluída em água destilada.



**Figura 15.** Reagente sendo adicionados em tubo falcon, contendo 1 g de solo para realizar análise de fosfatase ácida. Laboratório de Microbiologia e Bioquímica da UFLA, Lavras - MG. Foto: Autoria própria.

#### 3.4.6 Produtividade de biomassa de azevém e de soja

A produtividade total de forragem ( $t\ ha^{-1}$  de matéria seca) foi calculada através da biomassa total acumulada, nas parcelas sem a ação do pastejo ou através da soma da massa de forragem durante o período pastejado, considerando amostras com área de  $0,06m^2$  ( $0,25m \times 0,25m$ ). Nas parcelas com a ação do pastejo, as taxas diárias de acúmulo de forragem foram realizadas por meio de gaiolas de exclusão, e a diferença entre a matéria seca dos cortes no início e no fim de cada subperíodo ( $\sim 28$  dias), dividida pelo número de dias entre os cortes. Após o corte da massa de forragem rente ao solo, a amostra foi armazenada em saco de papel, devidamente identificado e levada a estufa de ar forçado a  $55^{\circ}C$  por 72h, para secagem, posteriormente foi pesada em balança eletrônica. Então, a produção de matéria seca foi calculada pelo somatório da massa inicial com a taxa de acúmulo em cada subperíodo, multiplicada pelo número de dias. Seguindo um protocolo padrão descrito por Farias *et al.* (2020).

A produtividade de soja ( $t\ ha^{-1}$  de grão) foi mensurada na maturidade plena dos grãos (R8) através de quatro sub amostras representativas por parcela, de um metro linear cada. Após a coleta as amostras destinadas a estimativa de rendimento foram trilhadas para posterior pesagem dos grãos, a produção deu-se pela massa de grãos do metro linear. Foi corrigindo o fator de correção para obter a umidade ajustada a 13%.

## **CAPÍTULO IV – Variação temporal dos bioindicadores de qualidade do solo em função da época de reposição de fósforo e potássio e do pastejo hibernal em sucessão soja-azevém no subtropical brasileiro**

### **4.1. Introdução**

O fato de que os microrganismos são os responsáveis diretos pelo funcionamento do solo, atuando nos principais processos ecossistêmicos, justifica não só a importância, mas também a necessidade da inclusão de bioindicadores nas avaliações de qualidade do solo (MENDES; SOUSA; JUNIOR, 2015). Principalmente por serem sensíveis a mudanças de manejo, onde manejos conservacionistas, como a ILP e o SPD, quando bem manejados, tendem a aumentar os bioindicadores de qualidade de solo nos sistemas produtivos (ARAÚJO *et al.*, 2013; CARVALHO *et al.*, 2010; NOVAK *et al.*, 2018).

A ação do pastejo hibernal e as plantas de cobertura de solo podem potencializar as produções primárias, por estimular a atividade microbiana do solo, que realiza a ciclagem de nutrientes, reduzindo a demanda por fertilizantes externos. A aplicação de fertilizantes altera a qualidade e a quantidade de resíduos vegetais sobre o solo, e culturalmente, a adubação destes sistemas conservacionistas, é realizada na fase lavoura, negligenciando a adubação na fase pastagem (ASSIS *et al.*, 2003; ASSMANN *et al.*, 2003).

Entretanto, pressupõe-se que uma pastagem adubada, aliada à ação do pastejo hibernal, aumenta a massa de raízes em resposta ao perfilhamento vegetal (ANGHINONI *et al.*, 2013), resultando em aumento de liberação de exsudatos radiculares, que naturalmente já varia conforme a espécie implantada e o estágio fenológico da plantas (MONTEIRO *et al.*, 2012).

A fase de maior taxa de crescimento vegetativo, tende a resultar em aumento da liberação de exsudatos (REDIN *et al.*, 2016), devido à maior taxa de C fotoassimilado neste momento, onde cerca de 50% deste é utilizado para o crescimento das raízes ou liberado para o solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006b). Esses fatores, combinados com as condições meteorológicas, podem modificar a diversidade e a funcionalidade dos bioindicadores (COSTA *et al.*, 2014).

Assim sendo, avaliações em um único momento podem não representar a qualidade do solo pelo viés microbiológico. Para Aon *et al.* (2001), uma das dificuldades nesta avaliação, é a multiplicidade de processos biológicos e físico-químicos e sua variação no espaço e no tempo. Para suprir essa dificuldade, Wakelin *et al.* (2009) constatou que deveria se realizar um ano completo de amostragem, a fim de determinar se a estrutura da comunidade biótica são inerentemente cíclica.

Baseado nisso, acredita-se que a maior qualidade do solo, avaliada pelos bioindicadores, é encontrada onde se realiza reposição de nutrientes na pastagem, em conjunto com a ação do pastejo em relação à reposição de nutrientes na lavoura e sem a ação do pastejo hibernal. Buscando entender a variação microbiológica no tempo, supõem-se que a atividade dos bioindicadores varia conforme o momento de avaliação, sendo que, entre a metade do ciclo da pastagem hibernal e a floração da soja encontra-se a maior atividade dos bioindicadores. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica temporal em um ano agrícola e a influência de diferentes épocas de reposição de P e K e da ação do pastejo hibernal nos bioindicadores de qualidade do solo em sistema de sucessão soja-azevém no subtropical brasileiro.

## **4.2 Material e métodos**

### **4.2.1 Local, clima e solo**

As informações gerais referentes ao local, clima e solo do experimento utilizado foram descritas no Item 3.1. Adicionalmente, a análise de caracterização química e textural do solo no ano de avaliação se encontram na Tabela 4.

**Tabela 4.** Caracterização química e textural do solo, na camada de 0-10 cm, realizada antes do ano avaliado, em maio de 2021. Eldorado do Sul-RS.

Propriedade do solo	Valor	Interpretação <sup>(5)</sup>
P <sup>(1)</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	42	Alto (Entre 30,1 – 60,0 mg de P dm <sup>-3</sup> )
K <sup>(1)</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	77	Médio (Entre 61 – 90 mg de K dm <sup>-3</sup> )
pH <sup>(2)</sup> (H <sub>2</sub> O)	5,4	-
COT <sup>(3)</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	15	Médio (14,4 – 29,0 g kg <sup>-1</sup> )
Argila <sup>(4)</sup> (%)	16	Classe textural 4 (<20% de argila)
Silte <sup>(4)</sup> (%)	26	-
Areia <sup>(4)</sup> (%)	58	-

<sup>(1)</sup>Fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1).<sup>(2)</sup>pH em água (v/v, 1:1), <sup>(3)</sup>Carbono orgânico total (Walkley – Black).<sup>(4)</sup> Partículas <0,002 mm (argila), 0,002 – 0,05mm (silte) e >0,05 mm (areia), <sup>(5)</sup> Interpretação conforme CQFS RS/SC (2016).

#### 4.2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental está descrito no Item 3.2. Entretanto, dos três fatores, neste estudo foram utilizados apenas dois, sendo eles: época de reposição de P e K (reposição na pastagem ou reposição na lavoura) e ação do pastejo (com pastejo ou sem pastejo).

#### 4.2.3 Coletas de solo e análises laboratoriais

As avaliações foram realizadas no ano agrícola 2021/2022, em cinco momentos distintos de avaliações (Figura 4), buscando-se acompanhar um ano agrícola em diferentes fases, sendo elas: 1º momento de avaliação – início da fase pastagem (após a entrada dos animais na área); 2º momento de avaliação – metade do ciclo da fase pastagem; 3º momento de avaliação – transição entre a fase pastagem e fase lavoura (após saída dos animais/dessecação da pastagem e antes do plantio da soja); 4º momento de avaliação – floração da soja; 5º momento de avaliação – após colheita da soja.

As condições meteorológicas, referentes a cada momento de avaliação, foram obtidas da estação meteorológica da UFRGS-EEA, e se encontram na Figura 2. E a forma que as coletas e as análises foram realizadas estão descritas no Item 3.3.

#### 4.2.4 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas através da interface *R Studio* 4.2.0. Como foi acompanhado diferentes momentos de um ano agrícola, foi incorporado a análise temporal no modelo estatístico. Sendo assim, os efeitos fixos analisados foram: momento de avaliação, época de reposição de P e K e ação do pastejo, e o bloco foi utilizado como efeito aleatório.

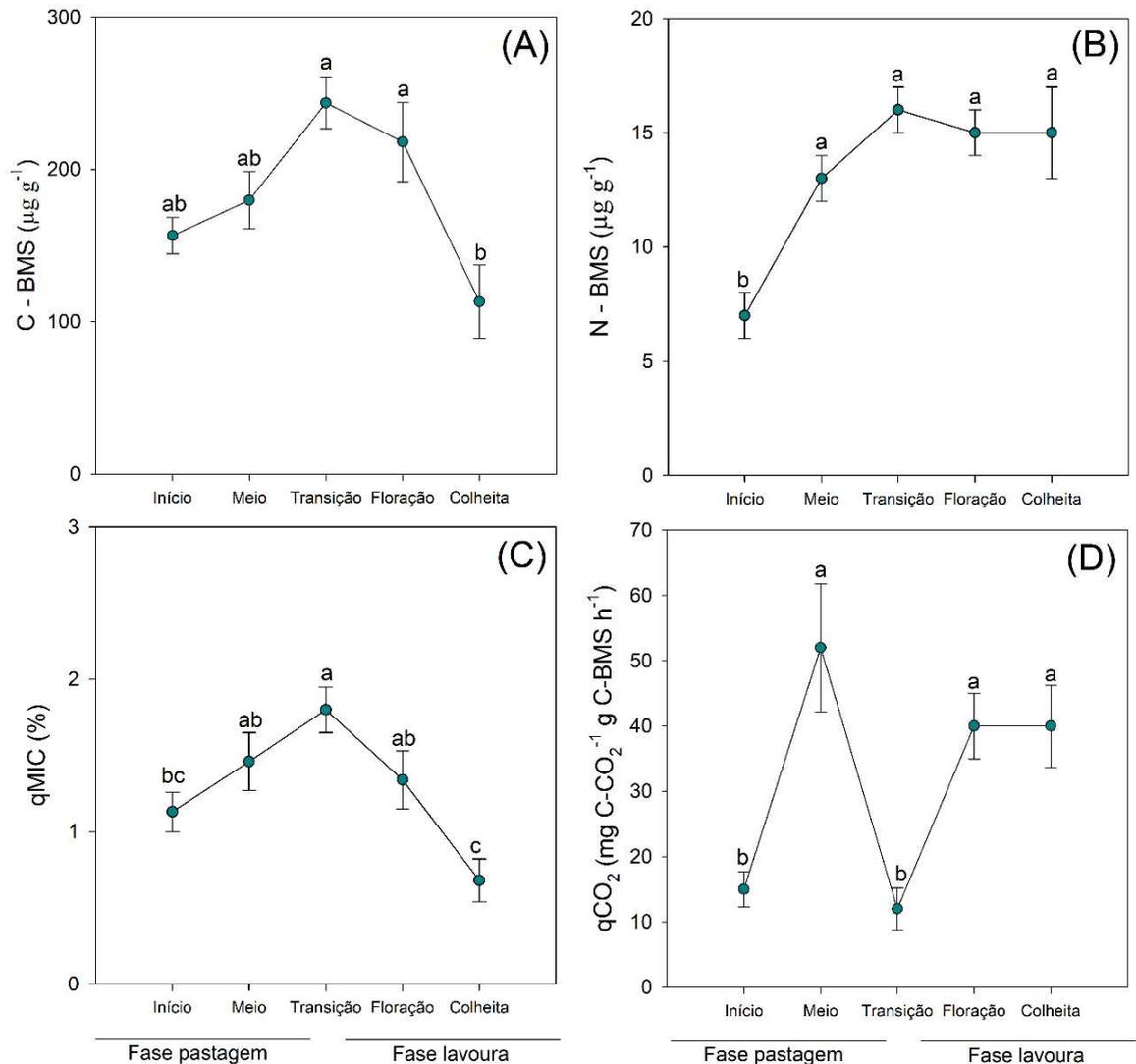
Os resultados foram verificados quanto à normalidade com o teste de Shapiro-Wilk e a homocedasticidade de variância foi verificada pelo teste de Bartlett, ambos com nível de significância de  $p \leq 0,05$ . Quando fora da normalidade, a variável foi transformada através de cálculos logaritmos, pelo pacote “*guerrero*” ou “*loglik*”. Aceitou-se  $p \leq 0,10$  na análise de variância (ANOVA) devido ao grau de liberdade 4, oriundo da interação tripla dos fatores: momentos de avaliação x época de reposição de P e K x ação do pastejo, onde segundo (PERECIN; FILHO, 2008) poderia admitir até  $p = 0,185$ . Quando significativo, as diferenças entre médias foram avaliadas com o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

### 4.3 Resultados e Discussão

O C-BMS, N-BMS,  $qCO_2$  e o qMIC, apresentaram seus valores alterados conforme o momento de avaliação (Figura 16). Para o C-BMS (Figura 16A), menores teores foram observados na colheita da soja e maiores teores foram observados na transição da fase pastagem e lavoura e na floração da soja. O início e o meio da fase pastagem apresentaram teores intermediários (Figura 17A). Diferentemente do N-BMS (Figura 16B), onde o menor teor foi observado no início da fase pastagem, comparado aos demais momentos.

O qMIC (Figura 16D), foi superior na transição da fase pastagem e lavoura, comparado ao início da fase pastagem e na colheita da soja, sendo que a metade da fase pastagem e a floração da soja apresentaram valores intermediários. Já o  $qCO_2$  (Figura 16D) foi menor no início da fase pastagem e na transição entre a fase pastagem e lavoura, comparado a metade da fase pastagem, floração e colheita da soja, mostrando que a BMS passa por condições de estresse de forma cíclica em um ano agrícola, e que mensurar o

$qCO_2$  em um único momento pode não indicar o estado real de equilíbrio de um sistema produtivo (quando há menor  $qCO_2$ ).



**Figura 16.** Carbono da biomassa microbiana (C-BMS) (A), nitrogênio da biomassa microbiana (N-BMS) (B), quociente microbiano (qMIC) (C) e quociente metabólico ( $qCO_2$ ) (D) de um Plintossolo, na camada de 0-10 cm, em diferentes momentos de avaliação, independentemente da época de reposição de P e K (na lavoura ou na pastagem) e do pastejo hibernal (com ou sem), em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e as barras indicam o erro padrão da média.

Apesar de não haver diferença estatística, pode-se observar aumento da curva do C-BMS (Figura 16A) na fase pastagem, demonstrando aumento da BMS, que é responsável por imobilizar temporariamente nutrientes como o N, P,

e S, podendo evitar que sejam perdidos por lixiviação, volatilização, erosão, escoamento entre outros. Posteriormente percebe-se uma diminuição do C-BMS entre a floração e a colheita da soja, indicando morte da BMS e com isso, acredita-se que os nutrientes possam ser mineralizados, ficando disponíveis para a soja durante a fase reprodutiva, onde para Pires *et al.* (2022), é nos estádios R5 e R7 que ocorre o maior acúmulo de nutrientes na planta.

A BMS é um componente importante do N potencialmente mineralizável (PEREZ *et al.*, 2005), e o baixo N-BMS (Figura 16B) no início da fase pastagem, comparado aos demais momentos avaliados, pode ser um indicativo de alta taxa de mineralização em resposta à adubação nitrogenada realizada sobre o resíduo da soja. Nos demais momentos avaliados, apesar de serem estatisticamente superiores ao início da fase pastagem, o N-BMS não passou de  $16 \mu\text{g g}^{-1}$ , valor inferior ao encontrado por Vargas e Scholles (1998) de 23 e  $49 \mu\text{g g}^{-1}$  de N-BMS, na camada de 0-5 cm e 5-15 cm, respectivamente (coleta realizada em novembro), e por Sobucki (2020), que encontrou  $50 \mu\text{g g}^{-1}$  de N-BMS na profundidade de 0-10 cm (coleta realizada janeiro na floração do milho), ambos os autores encontraram esses teores em SPD, na EEA-UFRGS em Eldorado do Sul, o baixo N-BMS pode indicar baixa reserva de N, através da ineficiência na imobilização temporária de N pela BMS, nesta área (SOUZA, 2005).

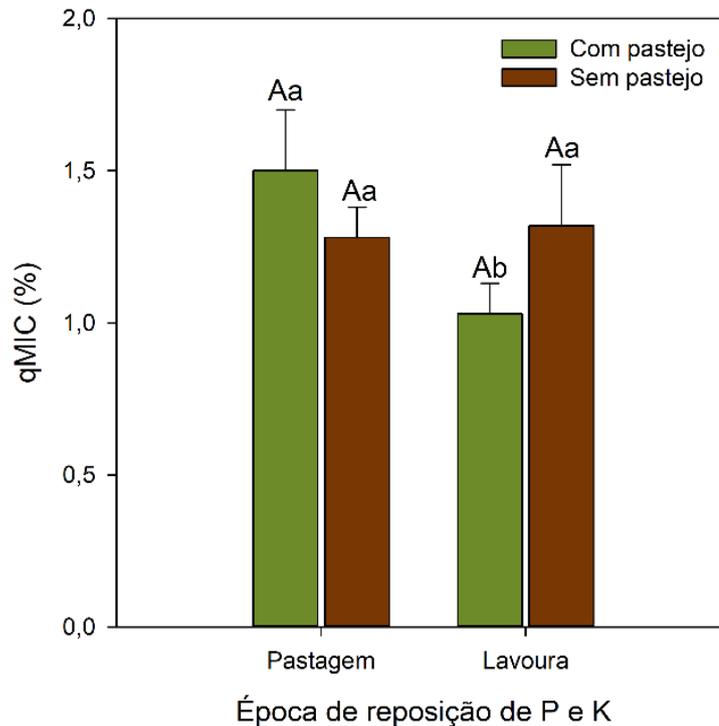
No início da fase pastagem, apesar do baixo teor de C-BMS (Figura 16A), e qMIC (Figura 16C), nota-se também, baixo qCO<sub>2</sub> (Figura 16D), indicando que neste momento a BMS possuía substratos em quantidade suficiente para realizar suas atividades ecossistêmicas de maneira eficaz, mas sem incorporar grande quantidade de C no tecido microbiano. O baixo qCO<sub>2</sub> no início da fase pastagem, pode ser em resposta as mudanças nas condições do solo após um período de baixa atividade microbiana (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007) oriundo do atraso na emergência do azevém, devido à baixa precipitação (4,6 mm) em abril de 2021 (quando ocorreu a semeadura), inferior à média de precipitação para o mês de abril (55 mm) desde 2017 (EEA, 2023).

Em pesquisa realizada por Souza *et al.* (2010) em um Latossolo Vermelho distroférico em sistema ILP no RS, avaliou-se o C-BMS em vários momentos do ciclo da pastagem, e encontrou resultados que corroboram parcialmente aos encontrados neste trabalho, no início da fase pastagem, não

havendo diferença estatística em coletas caracterizando o início da fase, em maio e julho, aumentando o C-BMS em coleta realizada em setembro, entretanto, os pesquisadores constataram diminuição no C-BMS no final da pastagem, em novembro, contrastando ao resultado encontrado neste trabalho.

O C-BMS (Figura 16A) superior na transição entre a fase pastagem e a fase lavoura e na floração da soja, comparado aos demais períodos, pode ter sido influenciado tanto pelo processo de senescência do azevém (10 dias após a dessecação – Figura 7), bem como, pela temperatura mais elevada nestes meses do ano (novembro/2021 e fevereiro/2022, respectivamente) (Figura 5), propiciando a decomposição do material remanescente, e resultando em aumento da BMS (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006b). Além do alto C-BMS, foi encontrado baixo  $qCO_2$ , e alto  $qMIC$  neste momento, indicando eficiência na decomposição da biomassa do azevém em senescência, utilizando de seus compostos orgânicos de modo eficaz, ou seja, incorporando C nos tecidos microbianos (alto  $qMIC$ ) e não perdendo-o via  $CO_2$  (baixo  $qCO_2$ ) (CUNHA *et al.*, 2011).

Além da diferença estatística entre os momentos de avaliação, o  $qMIC$  também apresentou interação entre as épocas de reposição de P e K e a ação do pastejo (Figura 17), onde a reposição de P e K na fase pastagem, juntamente com a ação do pastejo, aumentou o  $qMIC$  do solo. Cunha *et al.* (2011) constataram que valores menores de  $qMIC$  podem ser reflexo da acidez do solo ou de fatores como limitação de nutrientes, ou mesmo a qualidade da MOS aportada em relação à das plantas de cobertura.



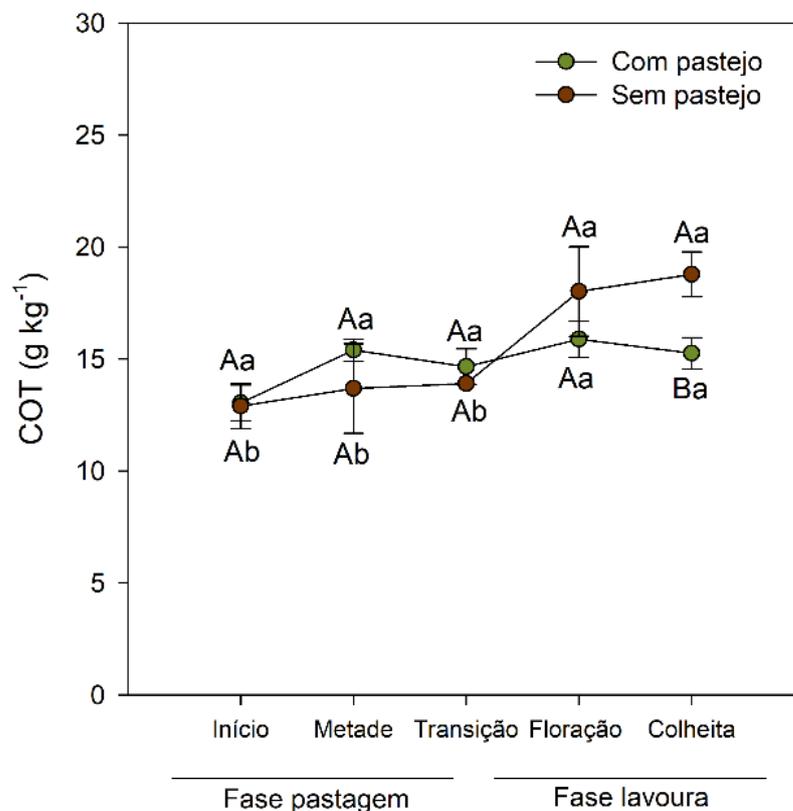
**Figura 17.** Influência da época de reposição de P e K e ação do pastejo hibernal no qMIC do solo, em um Plintossolo cultivado com sucessão soja-azevém em SPD consolidado, considerando a camada de 0-10 cm. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pela mesma letra em maiúscula não diferem estatisticamente entre a ação do pastejo dentro de cada época de reposição de P e K, e médias seguidas pela mesma letra em minúscula não diferem estatisticamente para ação do pastejo entre as épocas de reposição de P e K, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras indicam o erro padrão da média.

Logo, o alto qMIC onde houve a reposição de P e K na pastagem mantidas com a ação do pastejo (Figura 17) indica maior eficiência na utilização do C, que é incorporado ao tecido microbiano, permanecendo no sistema. Isso porque uma pastagem adequadamente adubada produz maior massa vegetal (104 % a mais do que as parcelas que receberam reposição de P e K na lavoura com ação do pastejo hibernal, neste mesmo estudo) deixando resíduos orgânicos (fitomassa, raízes, rizodeposição entre outros) em maior quantidade e qualidade sobre o solo. Além de que, ao adicionar a ação do animal, há maior massa de raízes (SOUZA *et al.*, 2010) aumentando a rizosfera, favorecendo a BMS e a capacidade de a mesma utilizar os compostos de forma mais eficaz.

O COT diferiu estatisticamente aos momentos de avaliação e à ação do pastejo (Figura 18). As parcelas manejadas com a ação do pastejo não variaram o COT entre os momentos de avaliação, diferente das parcelas manejadas sem a ação do pastejo, que apresentaram 30% de aumento no teor

de COT entre a transição da fase pastagem para a fase lavoura e da fase lavoura para a floração, permanecendo alto na colheita da soja.

A ação do pastejo tende a diminuir a relação C:N do resíduo do azevém, devido à utilização do C contido no material orgânico pelos microrganismos. Com isso, aumenta-se a velocidade de decomposição dos resíduos (DUBEUX *et al.*, 2006; RAPOSO, 2013), diferente da área sem a ação do pastejo, onde, possivelmente a decomposição do azevém foi mais lenta, o que pode ter resultado em pequenos fragmentos de C não decomposto durante a análise laboratorial.



**Figura 18.** COT do solo, de um Plintossolo, na camada de 0-10 cm. Interação entre momentos de avaliação (início e metade da fase pastagem, transição entre a fase pastagem e lavoura, floração da soja e após a colheita da soja) e ação do pastejo hibernal (com e sem), em sucessão soja-avevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra em minúscula não diferem para momentos de avaliação e maiúsculo não diferem estatisticamente para a ação do pastejo pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e as barras indicam o erro padrão da média.

Assmann *et al.* (2015) encontrou em sistema de ILP no RS, com soja no verão e aveia + azevém no inverno que o solo permanece mais tempo coberto

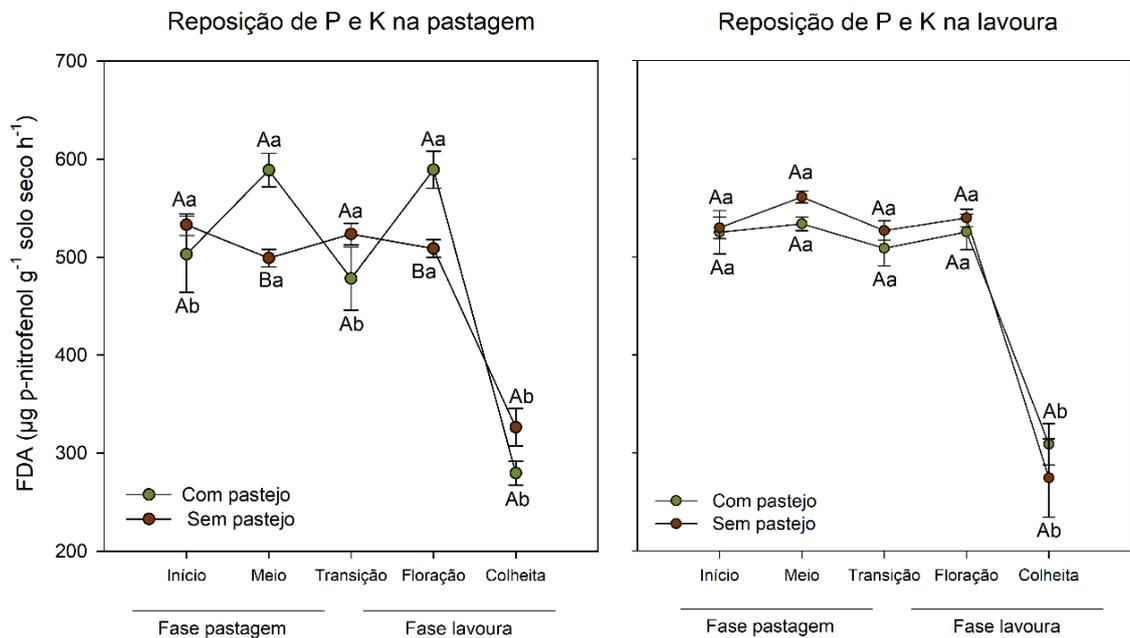
em áreas não pastejada (tempo de meia vida de 138 dias), enquanto o tempo de meia vida da pastagem submetida a pastejo moderado (20 cm de altura) é de 82 dias e do esterco 151 dias. Isso porque o resíduo resultante do pastejo decompõe-se mais facilmente em função da constante rebrota e maior presença de folhas, colmos e perfilhos jovens, ao contrário do que ocorre em parcelas sem pastejo (ANGHINONI *et al.*, 2011), que contém maiores teores de lignina e menores teores de N e açúcar solúveis em sua composição vegetal, tardando sua decomposição (SANAULLAH *et al.*, 2010).

Mesmo não havendo diferença estatística, é importante observar a ausência de variação do COT nas parcelas com a ação do pastejo, demonstrando que em um curto espaço de tempo o sistema pode estar menos suscetível a perdas de C, que inclusive, fica armazenado do tecido microbiano (comprovada pelo maior qMIC, Figura 16C). A maior permanência do COT no sistema pastejado, pode ser complementado pelo trabalho de Da Silva *et al.* (2011) que constatou que o sistema ILP a longo tempo, é capaz de reter o C em frações mais recalcitrantes (principalmente substâncias húmicas), que possuem maior permanência no solo. Entretanto, para entender melhor a variação do COT neste sistema, deveria ser estudado as frações do C, sobretudo considerando mais que um ano agrícola.

Entre a ação do pastejo, foi observada diferença estatística somente na colheita da soja, onde pode-se observar 23% a mais de COT onde o manejo foi sem a ação do pastejo, comparada às parcelas com a ação do pastejo. Isso contradiz os resultados obtidos por alguns autores, que constataram maior teor de COT em áreas com ILP comparada ao SPD (GAZOLLA *et al.*, 2015; LOSS *et al.*, 2011), inclusive, encontrando acúmulo de COT em curto prazo (cerca de 120 dias) em ILP sobre solo sem restrição de fertilidade (LUDKIEWICZ *et al.*, 2017). Entretanto, vale observar que a maioria dos autores concluíram isso baseando-se em uma única coleta de solo, e neste caso, só se observou diferença estatística para a ação do pastejo, na colheita da soja, que pode ter sido influenciado por maior quantidade de fragmentos ainda não decomposto, onde não houve a ação do pastejo.

Para a FDA, foi encontrada uma interação tripla entre os fatores: momento de avaliação x ação do pastejo x época de reposição de P e K. Para melhor entendimento, foi isolado o fator época de reposição de P e K, como

pode-se observar na Figura 19. Quando a reposição de P e K foi realizada na pastagem, as parcelas manejadas com ação do pastejo apresentaram maior FDA em dois momentos: no meio da fase pastagem e na floração da soja. Já no manejo sem a ação do pastejo, a FDA possui atividade constante do início da fase pastagem até a floração da soja, caindo atividade na colheita da soja. Não houve sempre diferença estatística para a ação do pastejo, entretanto, quando houve, as parcelas manejadas com a ação do pastejo apresentaram maior FDA (Figura 19).



**Figura 19.** FDA do solo, interação entre os fatores: momento de e ação do pastejo para cada época de reposição de P e K, em um Plintossolo cultivado em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra em minúscula não diferem para momento de avaliação, dentro de cada pastejo, e médias seguidas pela mesma letra em maiúsculo não diferem estatisticamente para a ação do pastejo, dentro de cada momento de avaliação, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras indicam o erro padrão da média.

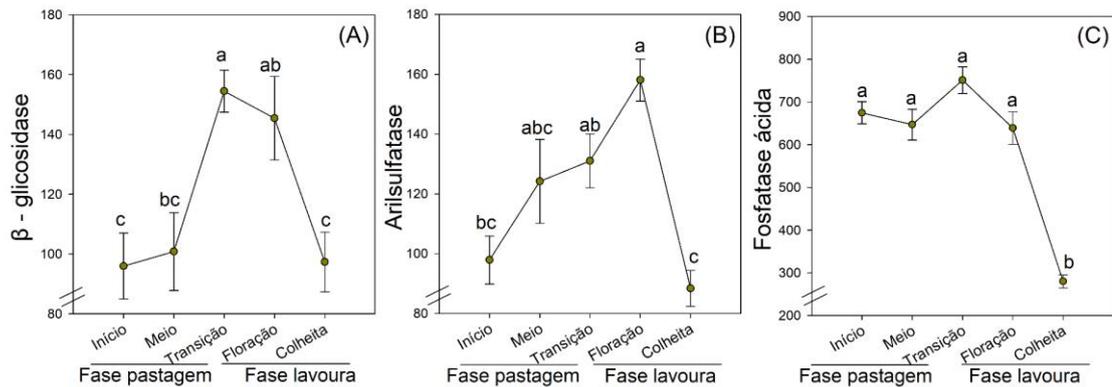
No meio da fase pastagem, a alta atividade da FDA nas parcelas mantidas com a ação do pastejo, pode ser em resposta ao máximo crescimento vegetativo, onde Simões *et al.* (2023) na mesma área de estudo, no inverno de 2020, encontrou a taxa de acúmulo de forragem equivalente a  $89 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  de matéria seca (MS) na metade do ciclo da pastagem (agosto), superior ao início (julho) e ao final da fase pastagem (outubro) ( $23,3$  e  $22,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  de MS, respectivamente). Isso porque a ação do pastejo estimula o crescimento da

massa de raiz (SOUZA *et al.*, 2010) e, conseqüentemente, a produção de exsudatos, resultando em maior atividade enzimática.

A maior FDA na floração da soja indica uma alta atividade hidrolítica específica das proteases, lipases e esterases (BATISTA *et al.*, 2008), que são biocatalizadores no solo, atuando na decomposição do material vegetal senescente e conseqüentemente, possibilitando a liberação de nutriente em um momento importante para determinar o potencial produtivo da soja. Provavelmente, a alta FDA está ligada à decomposição do azevém, que por ter recebido ação do pastejo hibernar, possui maior qualidade e uma decomposição mais rápida, como visto anteriormente (ASSMANN *et al.*, 2015; SANAULLAH *et al.*, 2010).

Importante destacar, que quando a reposição de P e K é realizada na lavoura, a FDA não apresenta diferença estatística para a ação do pastejo, apontando os benefícios de se adubar a pastagem e mantê-la com a ação do pastejo no aspecto microbiológico. Constatou-se diferença estatística somente para o momento de avaliação, onde observa-se que a FDA é inferior na colheita da soja, comparado aos demais momentos de avaliação. A baixa FDA após a colheita da soja, ocorreu em ambas as épocas de reposição de P e K, e este decréscimo pode ser devido ao menor BMS neste momento (indicada pelo menor C-BMS na Figura 16A), que é o principal produtor das enzimas no solo.

A atividade da  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e da fosfatase ácida do solo também apresentaram sensibilidade ao momento de avaliação (Figura 20). A  $\beta$ -glicosidase teve uma maior atividade na transição entre a fase pastagem e a fase lavoura e na floração da soja, comparado ao início e o meio da fase pastagem e a colheita da soja (Figura 20A). Avaliações no meio da fase pastagem e na floração da soja não diferiram estatisticamente entre si.



**Figura 20.** Atividade enzimática do solo:  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase-ácida ( $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$ ), de um Plintossolo, na camada de 0-10 cm, em diferentes momentos de avaliação. Independentemente da época de reposição de P e K (na lavoura ou na pastagem) e do pastejo hibernal (com ou sem), em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e as barras indicam o erro padrão da média.

A maior atividade da arilsulfatase (Figura 20B), foi encontrada na floração da soja, comparada ao início da fase pastagem e a colheita da soja. A metade do ciclo da pastagem e a transição entre a fase pastagem e a fase lavoura, apresentaram valores intermediários. Já a fosfatase ácida (Figura 20C), não teve diferença estatística do início da fase pastagem até a floração da soja, mas sua atividade caiu consideravelmente após a colheita da soja.

O aumento da atividade da  $\beta$ -glicosidase na transição entre a fase pastagem e a fase lavoura indica a presença de resíduos orgânicos resultante do azevém em processo de senescência, além de raízes e da própria rizodeposição, que continua até a floração da soja. Em estudo realizado por Prieto *et al.* (2011), houve diminuição da atividade da  $\beta$ -glicosidase em resposta à diminuição da cobertura vegetal de gramíneas perenes, e isso ajuda a entender a relação entre a cobertura vegetal e a atividade da  $\beta$ -glicosidase, bem como, o motivo da maior atividade em momentos que haviam maior quantidade de azevém remanescente no sistema.

Esse material em decomposição, também é o motivo da alta atividade da arilsulfatase na floração da soja, pois a mesma está ligada ao ciclo do S, e historicamente nenhum dos fertilizantes utilizados na área continha S na composição, logo, necessitando da arilsulfatase para mineralizar o S orgânico da MOS, tornando-o disponível para as plantas através da utilização dos ésteres

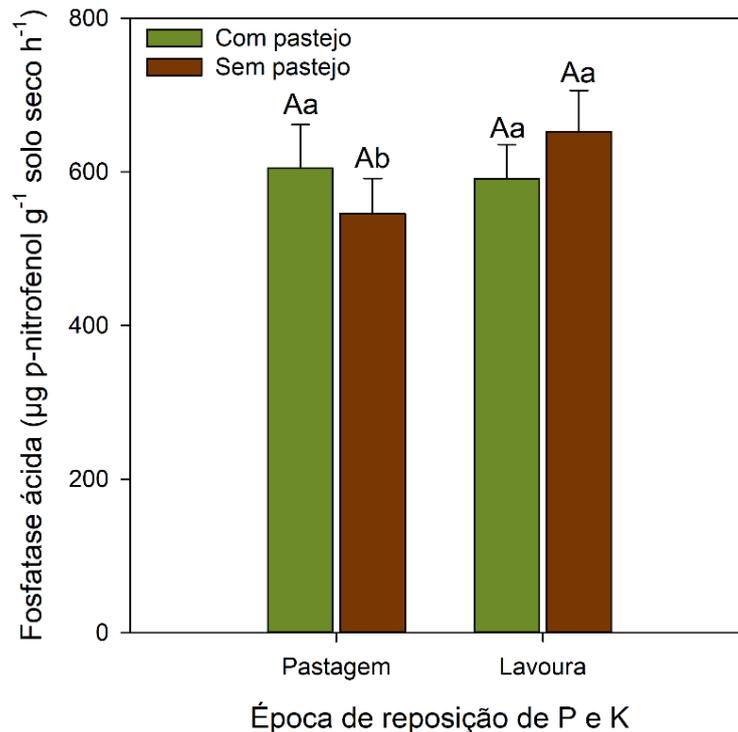
de sulfato contido no material orgânico do solo (DAVID; MITCHELL; NAKA, 1982; PINTO; NAHAS, 2002) disponibilizando a planta durante sua floração.

Além de que, a alta atividade da  $\beta$ -glicosidase e da arilsulfatase durante a época de florescimento da soja da soja (Figura 20-A e B) indicam o processo de mineralização, onde os nutrientes são acessados em suas formas orgânicas pelas enzimas, e transformado para formas inorgânicas, sendo disponibilizados as plantas em um momento de alto requerimento nutricional para a cultura da soja.

Já a alta atividade da fosfatase ácida desde o início da fase pastagem até a floração da soja, indica que está ocorrendo mineralização do P, sendo disponibilizado para as plantas. Nesta mesma área, Assis *et al.* (2022) encontrou valores de P lábil de cerca de 100 mg kg<sup>-1</sup> na camada de 0-10 cm do solo, no ano de 2017 (início do experimento), consequência de um histórico de adubação fosfatada exagerada nesta mesma área. Este valor é superior ao P disponível encontrado no inverno do ano agrícola de 2021 (Tabela 2). Por se tratar de um solo arenoso, possivelmente o P adicionado ao longo dos anos vem se acumulando na forma orgânica (RHEINHEIMER; ANGHINONI; CONTE, 2000) justificando a alta atividade da fosfatase durante a maior parte dos momentos avaliados, devido a necessidade da fosfatase para solubilizar o P orgânico e o disponibiliza-lo às plantas.

Observa-se que as quatro enzimas analisadas (Figura 19A e B, e figura 20 A, B e C) apresentaram atividade baixa após a colheita da soja. Esse resultado corrobora ao baixo C-BMS neste momento (Figura 16-A). Segundo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006b), as enzimas extracelulares são produzidas principalmente pela biomassa microbiana do solo confirmando os resultados obtidos no presente estudo.

Além da sensibilidade aos momentos de avaliação, a fosfatase ácida apresentou interação entre as épocas de reposição de P e K e a ação do pastejo (Figura 21). As parcelas que foram mantidas sem a ação do pastejo tiveram menor atividade quando a reposição de P e K foi realizada na pastagem, comparado às parcelas que receberam a reposição de P e K na lavoura.

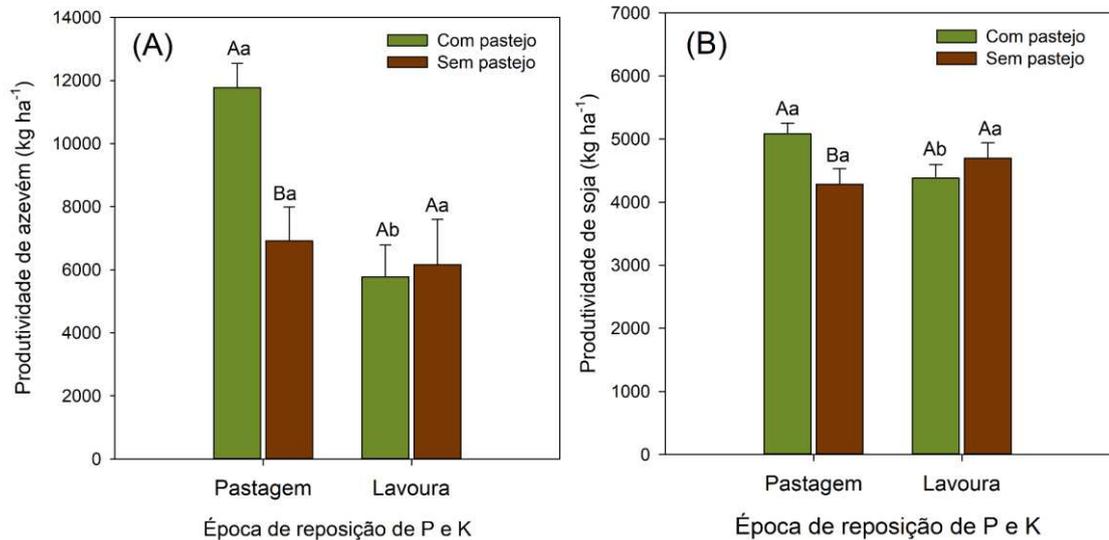


**Figura 21.** Interação entre época de reposição de P e K e ação do pastejo na fosfatase ácida do solo, na camada de 0-10 cm de um Plintossolo cultivado em sucessão soja-azevém, em SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente para a ação do pastejo dentro de cada época de reposição de P e K, e médias seguidas pela mesma letra em minúsculo não diferem estatisticamente para ação do pastejo entre as épocas de reposição de P e K, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) as barras indicam o erro padrão da média.

Conte *et al.* (2002) encontrou alta correlação entre a atividade da fosfatase ácida com o P orgânico do solo ( $r=0,93$ ) e com o COT ( $r=0,97$ ), e não encontrou relação com a adição de fertilizante fosfatados do solo. Então, a menor atividade da fosfatase ácida quando a reposição de P e K é na pastagem, é o difícil acesso ao P orgânico, que pode ser em decorrência da decomposição mais lenta do azevém não pastejado (maior relação C:N), em comparação com a soja, pois materiais compostos com maior proporção de celulose são decompostos três vezes mais rápidos que materiais compostos com maior proporção de lignina, e partes lenhosas ricas em taninos (Larcher, 2000), interferindo na liberação de P.

A resposta produtiva das plantas no ano avaliado encontra-se na Figura 22. Tanto a produtividade de azevém quanto de soja obtiveram respostas

produtivas positivas quando a reposição de P e K foi realizada na pastagem mantida com a ação do pastejo, comparada à reposição de P e K na lavoura mantida com a ação do pastejo hibernal.



**Figura 22.** Interação entre época de reposição de P e K e ação do pastejo na produtividade do azevém (A) e da soja (B) submetidos a diferentes épocas de reposição de P e K (na pastagem ou na lavoura) e ação do pastejo (com e sem), em Eldorado do Sul - RS. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente para a ação do pastejo dentro de cada época de reposição de P e K e médias seguida pela mesma letra em minúsculo não difere estatisticamente para ação do pastejo entre as épocas de reposição de P e K pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) as barras indicam o erro padrão da média.

Observa-se que ao analisar os bioindicadores de qualidade do solo, nem sempre a época de reposição de P e K e a ação do pastejo mostraram diferença estatística. Porém, quando houve, geralmente as parcelas que recebiam reposição de P e K na pastagem e foram submetidas à ação do pastejo, mostravam maior atividade dos bioindicadores (Figuras 17,18, e 19). Isso mostra que a ciclagem biológica entre as fases do sistema produtivo é mais eficaz quando a reposição de P e K é realizada na pastagem mantida com a ação do pastejo, resultando em maior produtividade, tanto do azevém como da soja.

É importante ressaltar que, apesar do atual protocolo experimental ter iniciado em 2017, esta área vem sendo manejada com princípios conservacionistas (SPD e ILP) pelo menos desde 2003, em um antigo protocolo experimental, onde mais detalhes do manejo realizado pode ser encontrado em

Neto *et al.* (2013) e Arnuti (2018). E possivelmente, esse solo já havia qualidade biológica, pelo histórico de manejos, fazendo com que os bioindicadores sejam menos sensíveis a alterações entre as época de reposição de P e K e ação do pastejo, pois são considerados uma via de memória do manejo do solo (MENDES; SOUSA; JUNIOR, 2015).

#### **4.4 Conclusões**

Os bioindicadores de qualidade de solo, não se mostraram muito sensíveis às diferentes épocas de reposição de P e K e ação do pastejo hibernal, possivelmente pelo histórico de manejo conservacionista do solo (desde 2003), empregado nesta área. Entretanto, quando houve sensibilidade nos bioindicadores, observa-se resposta positiva a reposição de P e K na pastagem e a presença da ação do pastejo. A produtividade de azevém e de soja, foi superior onde a reposição de P e K foi realizada na pastagem e mantido com a ação do pastejo hibernal.

Os bioindicadores de qualidade do solo apresentaram sensibilidade aos diferentes momentos de avaliação, sendo que na transição entre a fase pastagem e a fase lavoura (soja) ocorreu maior atividade microbiana (alta C-BMS, qMIC, baixo qCO<sub>2</sub>, além de índices médios a alto da atividade enzimática). Constata-se também a dinâmica dos bioindicadores avaliados em mineralizar nutrientes para a cultura da soja (independentemente da época de reposição de P e K), sendo que na floração da soja pode-se observar a diminuição do C-BMS (indicando mineralização), e elevada atividade enzimática.

## **CAPÍTULO V – Influência da microbiologia do solo na manutenção da produtividade após dois anos sem adubação em solo com altos teores de P e K e manejado com pastejo hiberna**

### **5.1 Introdução**

O solo é a memória do manejo, e o grau de revolvimento, juntamente com a qualidade e quantidade dos resíduos vegetais que são aportados, fazem com que todo o sistema de manejo deixe sua assinatura biológica (MENDES *et al.*, 2019). Logo, manejos conservacionistas aliados à correta adubação, visam melhorar a fração biológica do solo, tornando-o mais resiliente em suportar condições adversas, realizando a manutenção das produtividades primárias.

Segundo o código internacional de conduta para o uso e o manejo de fertilizantes da FAO (2019), o uso adequado de fertilizantes pode melhorar os serviços ecossistêmicos do solo, que contribuem direta e indiretamente para 95% da produção mundial de alimento, pois, a correta utilização dos nutrientes favorece a produção de biomassa e contribui para aumentar a MOS e a saúde dos solos. Mas em geral, no Brasil, as adubações são feitas sem considerar o efeito residual dos fertilizantes, bem como as modificações que podem causar no sistema solo-planta-animal-atmosfera e a influência de um nutriente ou elemento tóxico sobre outros fatores (ASSMANN *et al.*, 2018).

Alguns dos elementos químicos essenciais às plantas, comumente adicionados via fertilizantes, quando em excesso no solo, podem causar impactos ambientais (CQFS - RS/SC, 2016), afetando a produtividade, onde o nível do impacto produtivo dependerá da resiliência do solo (SMITH *et al.*, 2022). A resiliência do solo, pelo viés biológico, indica a capacidade da comunidade de organismos do

solo retomar seu estado original, taxonômico e funcional, após um impacto ambiental, seja este causado por um evento natural ou por atividades relacionadas ao manejo dos solos (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

É possível mensurar se um solo está biologicamente ativo através de atributos, como o C-BMS, e seus quocientes (microbiano e metabólico), e atividade enzimática do solo (SANTOS; MAIA, 2013) além do N-BMS e relação C:N-BMS que participam da ciclagem biológica de nutrientes. Segundo Mendes (2016), um dos principais atributo é o acúmulo de atividade enzimática extracelular, que é uma das vias de formação da memória do solo, pois está relacionada à formação de complexos com a MOS e com a fração argila.

Neste sentido, acredita-se que um solo biologicamente ativo é capaz de manter as produtividades primárias mesmo após dois anos consecutivos com ausência de adubação (NPK) em solo com histórico de altos níveis de adubação de P e K, e manejos conservacionistas (ILP e SDP), sobretudo quando se tem a ação do pastejo hibernal. Baseado nisso, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de um solo biologicamente ativo, na manutenção da produtividade primária (pastagem e lavoura) após dois anos consecutivos sem adição de fertilizantes em sistema, mantido ou não com a ação do pastejo hibernal.

## **5.2 Material e métodos**

### **5.2.1 Local, clima e solo**

As informações referentes ao local, clima e solo da área experimental estão descritas no item 3.1, e as condições climáticas referentes ao ano de avaliação encontram-se na Figura 5.

Como o presente estudo visa entender a resiliência do solo pelo viés biológico, resultante da memória do manejo do solo, vale ressaltar o histórico de manejo do experimento, que foi abordado brevemente no item 3.1. Onde anteriormente à instalação da atual configuração do experimento, entre 2003 e 2017, a área foi conduzida em um experimento de longa duração, onde toda área era mantida com a ação do pastejo, e objetivava avaliar duas intensidades de pastejo no cultivo hibernal de azevém por ovinos (2,5 e 5 vezes o potencial de forragem ingerida pelos animais) e dois métodos de pastejo (rotativo e contínuo)

e, na fase lavoura, era avaliado dois diferentes sistemas de produção de grãos (monocultivo de soja e rotação de culturas com soja e milho), mais detalhes sobre o antigo protocolo pode ser encontrado em Neto *et al.* (2013) e Arnuti (2018).

### 5.2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental está detalhado no item 3.2. Entretanto, dos três fatores explicados, neste estudo serão abordados dois deles, sendo: adubação com NPK (presença de adubação e ausência de adubação desde 2020) e ação do pastejo (com pastejo e sem pastejo). Lembrando que, o efeito da adubação (presença da adubação do protocolo e ausência da adubação desde 2020) foi avaliado através de parcelas subdivididas dispostas no centro de cada parcela, contendo 16 m<sup>2</sup> cada, e que para este estudo, foi utilizada a reposição de P e K na fase lavoura.

A caracterização química do início do protocolo experimental (2017), e do ano que se parou de adubar com NPK nas subparcelas (2020), estão presentes na Tabela 5.

**Tabela 5.** Caracterização química do solo, do início do protocolo experimental (2017), e do ano que foi alocado as subparcelas mantidas na ausência de adubação (2020) – em Plintossolo Argilúvico Distrófico típico em Eldorado do Sul-RS.

Camada de solo (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	COT <sup>1</sup> g kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>2</sup>	Mg <sup>2</sup>	Al <sup>2</sup>	H + Al <sup>3</sup>	P <sup>4*</sup> --mg dm <sup>-3</sup> --	K <sup>4*</sup>	Saturação da CTC	
									Bases	Al
-----2017-----										
0 – 10	3,9	12,7	1,1	0,6	1,6	10,2	95	77	16	46
10 – 20	4,0	6,4	0,9	0,4	1,6	8,9	46	68	14	52
-----2020-----										
0 – 10	4,5	9,0	2,2	0,5	0,7	5,1	56	96	37	19
10 – 20	4,4	7,2	1,5	0,3	1,1	5,4	46	82	27	35

(<sup>1</sup>) <sup>1</sup>Carbono orgânico total (Walkley-Black); <sup>2</sup> Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); <sup>3</sup>Acidez potencial estimada pelo índice SMP; <sup>4</sup>Fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1). \* O teor crítico de P e K é 30 e 90 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, de acordo com a CQFS RS/SC (2016).

### 5.2.3 Fases do sistema produtivo

Os manejos realizados em cada fase do sistema produtivos estão descritos no item 3.2. Para o presente estudo, foi utilizada somente as parcelas que receberam a reposição de P e K na cultura da lavoura (soja).

### 5.2.4 Coletas de solo e análises realizadas

As coletas de solo foram realizadas no final de cada ciclo das culturas, onde a fase pastagem foi representada pela coleta realizada em 28/11/2021, após a saída dos animais e dessecação do azevém, e a fase lavoura foi representada pela coleta realizada em 07/05/2022, após a colheita da soja. As avaliações microbiológicas foram realizadas por meio de coletas de solo, que estão devidamente descritas no item 3.3, e os métodos de análises estão explicados no item 3.4 do presente trabalho.

### 5.2.5. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas através da interface R studio 4.2.0, usando a função de modelo linear misto (lmer). Os resultados foram verificados quanto à normalidade com o teste de Shapiro-Wilk e a homocedasticidade de variância foi verificada pelo teste de Bartlett, ambos com nível de significância de  $p \leq 0,05$ , quando fora da normalidade, a variável foi transformada através de transformação logaritmo pelo pacote “*guerrero*”. Aceitou-se  $p \leq 0,05$  na análise de variância (ANOVA).

Como foi acompanhado diferentes momentos de um ano agrícola, foi incorporado a análise temporal no modelo estatístico, sendo assim, os efeitos fixos analisados foram: fases do sistema produtivo, adubação e ação do pastejo. Para cada uma das variáveis foi testado o efeito aleatório a ser bloqueado, sendo eles: “bloco”, “potreiro” e “fases do sistema produtivo|potreiro” segundo descrito por Pinheiro e Bates (2000), para o critério de escolha de qual efeito aleatório iria ser usado para cada variável, foi analisado a variância dos efeitos aleatórios (descartando-se variâncias nulas) e a anova entre os três modelos testados.

### 5.3 Resultados e discussão

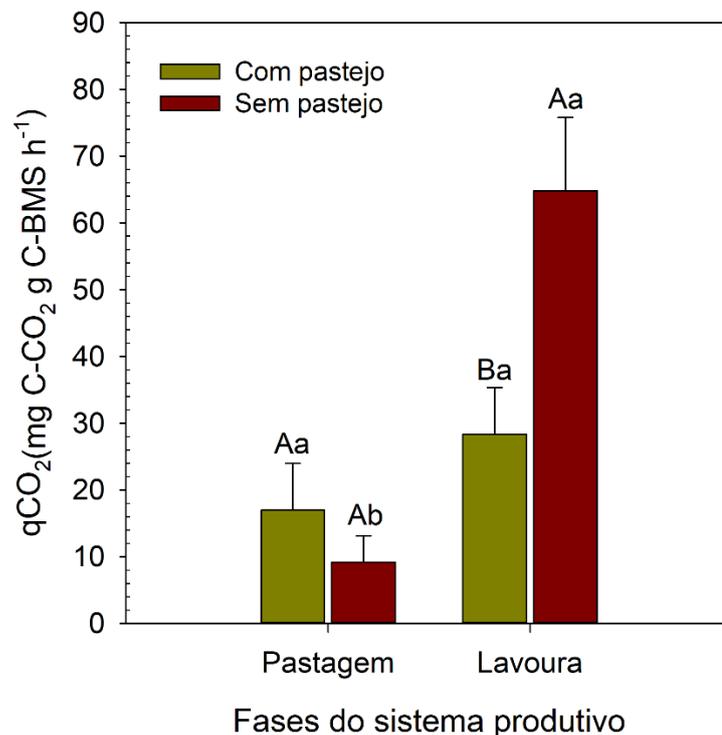
O C-BMS, N-BMS, relação C:N-BMS e o qMIC não apresentaram diferença estatística para a adubação (presença ou ausência), ação do pastejo (com ou sem pastejo) e fase do sistema produtivo (pastagem ou lavoura), como pode-se observar na Tabela 6. A falta de diferença estatística nos atributos microbiológicos, mesmo após dois anos consecutivos na ausência de adubação, indica que o solo estava biologicamente ativo, e que está utilizando de todos os recursos microbiológicos para realizar suas atividades ecossistêmicas, como a ciclagem de nutrientes, degradação da MOS, entre outras, não sendo prontamente afetado pela ausência de adubação e possivelmente mantendo as produções primárias.

**Tabela 6.** Influência da presença e ausência de adubação por dois anos consecutivos, ação do pastejo e fases do sistema produtivo no C-BMS, N-BMS, C:N-BMS e qMIC no ano agrícola 2020/2021. Eldorado do Sul-RS.

	C-BMS	N-BMS	C:N - BMS	qMIC	COT
	-----µg g <sup>-1</sup> -----			%	g kg <sup>-1</sup>
Adubação					
Ausência	227,5 ± 34 <sup>ns</sup>	16,1 ± 1 <sup>ns</sup>	13,9 ± 3 <sup>ns</sup>	1,4 ± 0 <sup>ns</sup>	14,6 ± 0 <sup>ns</sup>
Presença	199,7 ± 22	15,6 ± 1	12,4 ± 2	1,3 ± 0	15,8 ± 1
Ação do pastejo					
Com pastejo	244,0 ± 29 <sup>ns</sup>	15,8 ± 1 <sup>ns</sup>	13,0 ± 2 <sup>ns</sup>	1,5 ± 0 <sup>ns</sup>	14,9 ± 0 <sup>ns</sup>
Sem pastejo	184,8 ± 26	15,9 ± 2	13,4 ± 2	1,2 ± 0	15,6 ± 1
Fases do sistema produtivo					
Pastagem	221,8 ± 22 <sup>ns</sup>	16,6 ± 1 <sup>ns</sup>	14,1 ± 2 <sup>ns</sup>	1,6 ± 0 <sup>ns</sup>	14,0 ± 1*
Lavoura	201,2 ± 38	14,8 ± 1	12,0 ± 3	1,0 ± 0	16,6 ± 1

Já o COT apresentou diferença estatística para as fases do sistema produtivo, sendo maior na fase lavoura comparado à fase pastagem ( $p=0,001$ ), o que pode ser devido as frações não decompostas de material vegetal, inclusive do azevém, que por possuir alta relação C:N, de cerca de 36 (CALEGARI *et al.*, 2023) demora mais para ser decomposto, além de que, a produção de massa seca do azevém permanece no solo e é sobretudo decomposto na fase lavoura. Ou seja, essa análise pode ter sido influenciada por fragmentos de material vegetal ainda não decompostos, uma vez que foi avaliado apenas a camada superficial do solo (0-10 cm).

O  $qCO_2$  apresentou interação entre as fases do sistema produtivo e a ação do pastejo ( $p=0,03$ ), sendo superior na fase lavoura nas parcelas mantidas sem a ação do pastejo (Figura 23) comparado tanto a fase pastagem como as parcelas mantidas com a ação do pastejo na fase lavoura, mostrando uma situação de estresse microbiano do solo neste caso.



**Figura 23.** Interação entre fases do sistema produtivo (pastagem lavoura) e ação do pastejo hibernal (com ou sem), no  $qCO_2$  do solo, em um Plintossolo na camada de 0-10 cm, cultivado em sucessão soja-azevém com SPD consolidado. Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas da mesma letra em minúscula, não diferiram para a ação do pastejo nas diferentes fases do sistema produtivo e médias seguidas pela mesma letra em maiúsculo não diferem estatisticamente para a ação do pastejo pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ) e as barras indicam o erro padrão da média.

A ausência do pastejo tende a manter a relação C:N da pastagem alta, demorando mais tempo para ser decomposta pelos microrganismos, comparando à pastagem pastejada (ASSMANN *et al.*, 2015), que por possuir compostos mais lábeis (devido ao constante rebrote), é mais facilmente acessada pela BMS. Ou seja, onde não houve ação do pastejo hibernal, na fase lavoura a BMS possuíam um material mais lignificado e de baixa qualidade para decompor, causando estresse microbiano.

Segundo Anderson e Domsch (1993), quanto mais elevado for o  $qCO_2$ , maior tende a ser o gasto de energia para manutenção da atividade

microbiana, ou seja, neste momento provavelmente estava havendo perda de C do solo para atmosfera via respiração microbiana ( $\text{CO}_2$ ), indicando uma situação de estresse para os microrganismos. Além de que o menor  $q\text{CO}_2$  nas parcelas que receberam a ação do pastejo hibernal, indiferente da fase do sistema produtivo, indica a maior eficiência microbiológica nos sistemas pastejados.

A arilsulfatase e a fosfatase ácida apresentaram diferença significativa para a adubação ( $p=0,03$  e  $p=0,01$  respectivamente), onde em ambos os casos, as parcelas que estão a dois anos consecutivos na ausência de adubação (NPK) diminuíram a atividade destas enzimas no solo (Tabela 7). Todas as enzimas apresentaram diferença estatística para as fases do sistema produtivo, ficando superior na fase pastagem, comparada à fase lavoura.

**Tabela 7.** Influência da presença e ausência de adubação por dois anos consecutivos, ação do pastejo e fases do sistema produtivo na atividade enzimática do solo (FDA,  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida) no ano agrícola 2020/2021. Eldorado do Sul-RS.

Tratamentos	FDA ----- $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$	$\beta$ -glicosidase $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$	Arilsulfatase $\text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$	Fosfatase ácida -----
----- Adubação -----				
Ausência	423 $\pm$ 31 <sup>ns</sup>	116,2 $\pm$ 10 <sup>ns</sup>	100,1 $\pm$ 10*	474,8 $\pm$ 70*
Presença	404,8 $\pm$ 36	134,2 $\pm$ 14	113,0 $\pm$ 9	520,5 $\pm$ 70
----- Ação do pastejo -----				
Com pastejo	406,3 $\pm$ 31 <sup>ns</sup>	124,7 $\pm$ 10 <sup>ns</sup>	113,6 $\pm$ 11 <sup>ns</sup>	463,4 $\pm$ 65 <sup>ns</sup>
Sem pastejo	422,0 $\pm$ 36	126,6 $\pm$ 15	99,4 $\pm$ 7	537,2 $\pm$ 74
----- Fases do sistema produtivo -----				
Pastagem	412,6 $\pm$ 9*	153,9 $\pm$ 12*	127,8 $\pm$ 9*	706,5 $\pm$ 31*
Lavoura	306,1 $\pm$ 17	94,6 $\pm$ 5	84,0 $\pm$ 4	271,9 $\pm$ 17

\*Diferença estatística pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ) para cada fator na mesma coluna.

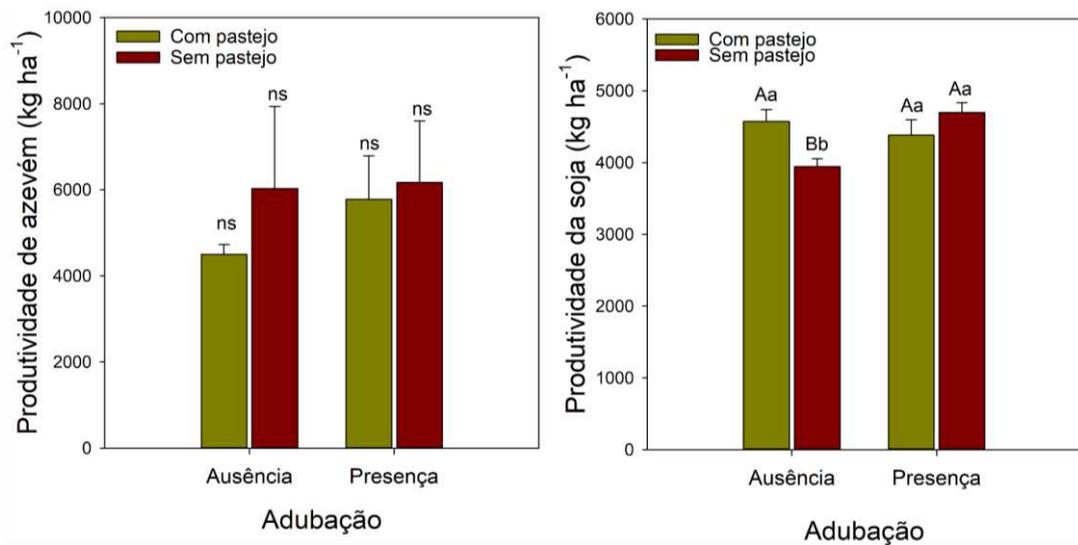
A maior atividade da arilsulfatase nas áreas com presença de adubação pode estar associada à necessidade da planta, uma vez que os ânions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  competem entre si pelos mesmos sítios de adsorção nos coloides de solo (MATSUOKA; MENDES; LOUREIRO, 2003). Logo, o P adicionado faz com que o S não fique retido nas partículas coloidais, indo para a solução do solo e sendo perdido por meio do processo de lixiviação, sobretudo na camada superficial, logo, a ausência do S faz com que a BMS estimule a produção da arilsulfatase.

Além disso, essa enzima está ligada com a qualidade do solo, indicando que após dois anos na ausência de adubação, a fração biológica deste solo pode estar começando a ser prejudicada.

A alta atividade da fosfatase ácida nas parcelas mantidas com a presença de adubação pode ser explicada pela maior extensão de raízes, em resposta a adubação fosfatada, onde MA *et al.* (2021) descobriram que manchas de solo ricas em P podem induzir a secreção de fosfatase ácida, indicando que mesmo com a aplicação de fertilizantes minerais, tem-se a imobilização do P orgânico do solo pela rizosfera. Segundo os autores, nutrientes como N e P, estimulam significativamente a extensão radicular, além de que, o P orgânico e o P inorgânico coexistem no solo, e as plantas podem não distinguir claramente a fonte de P, usando da necessidade de crescimento/desenvolvimento para determinar a quantidade de fosfatase ácida a ser secretada.

A maior atividade da FDA ( $p=0,00$ ),  $\beta$ -glicosidase ( $p=0,00$ ), arilsulfatase ( $p=0,01$ ) e fosfatase ácida ( $p=0,0005$ ) no final da fase pastagem comparado ao final da fase lavoura (Tabela 7) pode ser devido a quantidade de resíduos orgânicos nesta fase do sistema produtivo, que estimula a BMS a produzir enzimas, responsáveis por catalisar processos como a decomposição destes resíduos. Além de que, de forma indireta a maior atividade enzimática pode ser estimulada pela maior temperatura no final da fase pastagem ( $>25^{\circ}\text{C}$ ) comparada ao final da fase lavoura ( $<20^{\circ}\text{C}$ ) (Figura 6). Sousa *et al.* (2020), estudando a atividade de algumas enzimas, dentre elas a  $\beta$ -glicosidase e a fosfatase-ácida no solo, encontrou forte correlação positiva (0,94 e 0,68, respectivamente) entre a atividade enzimática e a temperatura atmosférica.

A resposta produtiva do azevém e da soja submetidos à ausência de adubação e à ação do pastejo encontra-se na Figura 24. A cultura do azevém não diferiu estatisticamente para a adubação e para a ação do pastejo; entretanto, a soja mostrou diferença produtiva ( $p=0,02$ ), onde as parcelas mantidas sob ausência de adubação por dois anos consecutivos somente perderam produtividade quando a área foi mantida sem a ação do pastejo.



**Figura 24.** Interação entre adubação (presença e ausência desde 2020) e ação do pastejo hibernal (com e sem) na produtividade do azevém e da soja em Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente dentro do fator adubação, e médias seguidas pela mesma letra em minúsculo não difere estatisticamente para ação do pastejo pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) as barras indicam o erro padrão da média.

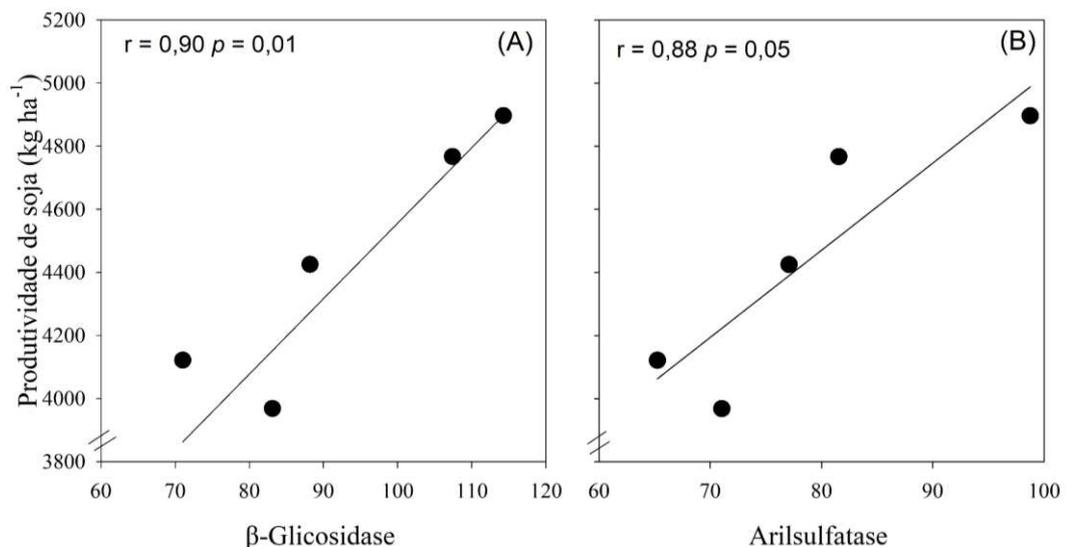
Após dois anos consecutivos na ausência de adubação (NPK), observa-se que a soja perdeu produtividade somente nas parcelas manejadas sem a ação do pastejo, mas ainda assim, produziu cerca de 4.500 kg ha<sup>-1</sup> de soja, ficando acima da média de produção do RS para a mesma safra, que foi de 1.433 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2021/22). Isso mostra a atividade biológica do solo, em resposta aos longos anos de manejo conservacionista (desde 2003), bem como, as altas doses de fertilizantes minerais utilizados até o início do atual protocolo, nutrientes estes que podem ter sido armazenados em formas orgânicas, e estarem sendo acessadas pela microbiologia e disponibilizados às plantas.

Entretanto, apesar da produção em condições adversas, a perda de produtividade de soja na ausência de adubação onde não houve ação do pastejo hibernal, aponta que o sistema está entrando em desequilíbrio, em comparação as parcelas que receberam a ação do pastejo hibernal. Com isso, percebe-se que a ação do pastejo (considerando o manejo correto de pasto e capacidade animal) estimula a microbiota do solo na ciclagem de nutrientes, mantendo o potencial produtivo da soja mesmo onde não houve adubação. Podendo ser uma estratégia financeira para produtores rurais que possuem solos com altos níveis de nutrientes (além do acréscimo produtivo da carne animal).

A capacidade de um solo biologicamente ativo acessar os recursos disponíveis, através da memória de manejo, possivelmente ocorre de forma finita, ou seja, tende a esgotar com o tempo, refletindo em queda de produtividade onde não houve ação do pastejo hibernal. Além de que, os resultados sugerem que a ação do pastejo hibernal favorece a manutenção da atividade microbiológica do solo, aumentando a resiliência e permitindo a manutenção da produtividade por um período de tempo maior.

Para avaliar quanto tempo a manutenção da produtividade do azevém e da soja com a ação do pastejo hibernal é mantida na ausência de adubação, seria ideal a avaliação dos anos agrícolas subsequentes. Vale ressaltar também, que esse resultado aponta uma estratégia de manejo de adubação em solos com fertilidade construída e manejos conservacionistas consolidados, mostrando a capacidade microbiológica na manutenção da produtividade, e possibilitando o entendimento que, em condições específicas de fertilidade de solo, pode-se produzir mesmo sem adicionar fertilizantes minerais, sobretudo em anos com aumento dos preços dos insumos.

Independente da adubação (presença ou ausência) a produtividade das parcelas mantidas sem a ação do pastejo hibernal, podem ser explicadas pela memória do solo, comprovada pela correlação de Pearson (Figura 25), para as enzimas  $\beta$ -glicosidase ( $R=0,90$ ) e arilsulfatase ( $R=0,88$ ).

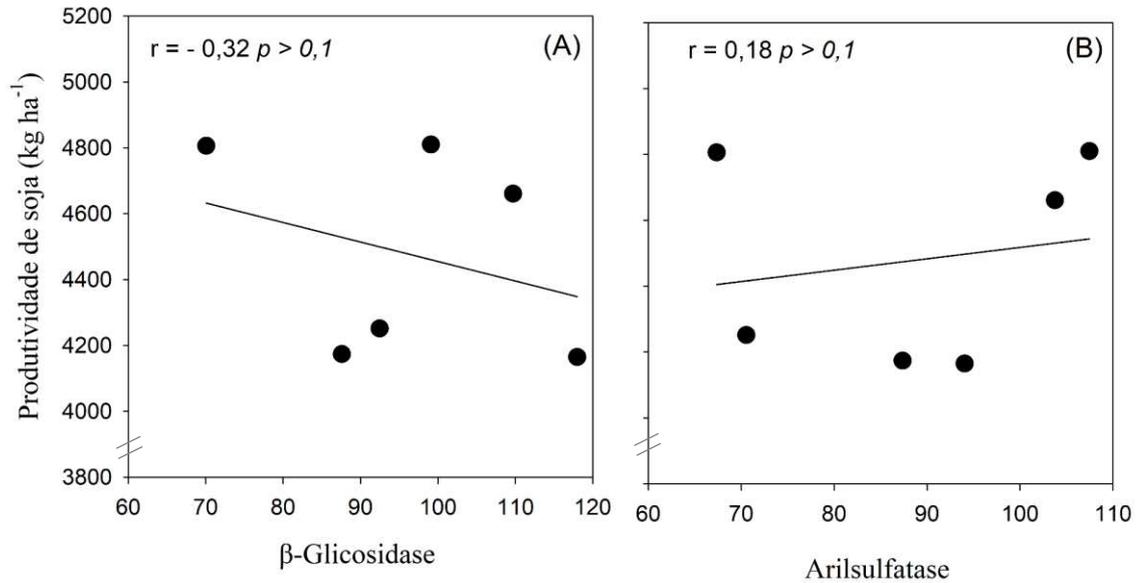


**Figura 25.** Correlação de Pearson entre a produtividade da soja (kg ha<sup>-1</sup>) e a atividade da  $\beta$ -glicosidase (A) e arilsulfatase (B) em  $\mu$ g p-nitrofenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup> nas parcelas sem a ação do pastejo hibernal, em um Plintossolo cultivado em sucessão soja-avevém com SPD consolidado, na camada de 0-10 cm. Eldorado do Sul-RS.

Tanto a  $\beta$ -glicosidase como a arilsulfatase são sensíveis para detectar mudanças no solo, atuam diretamente na ciclagem de nutrientes, e não são diretamente influenciadas por adição de fertilizantes e corretivos de acidez (MENDES *et al.*, 2020). A relação entre a atividade destas enzimas com a produtividade, mostra que esse solo possui qualidade biológica, onde a  $\beta$ -glicosidase está relacionada com 90% e a arilsulfatase 88% da produtividade da soja, onde não houve ação do pastejo hiberna. Isso mostra a capacidade enzimática de acessar a memória do solo, mantendo a produtividade em condições adversas, como a estiagem que assolou o RS, prejudicando a safra 2021/2022, como descrito no relatório de estiagem, publicado pelo governo estadual (SEAPDR, 2022).

Ademais, as parcelas manejadas sem a ação do pastejo desde 2017, podem ainda ter reflexo dos anos pastejados (entre 2003 e 2017) do antigo protocolo experimental, como citado anteriormente. Ou seja, a atividade da  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase podem estarem mantendo a produtividade de soja do sistema em questão através da “memória do solo” (MENDES *et al.*, 2019). Além disso, presume-se que a perda de produtividade na ausência da adubação onde não houve ação do pastejo hiberna (Figura 24) poderia ter sido maior se não fosse a atividade da  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase (Figura 25), para tal afirmação, necessitaria um estudo mais complexo nesta área.

Já as parcelas mantidas com a ação do pastejo, não apresentam correlação significativa (Figura 26) entre a produtividade e a atividade da  $\beta$ -glicosidase ( $r = -0,32$ ) e arilsulfatase ( $r = 0,18$ ). Possivelmente, a correlação não foi encontrada nas parcelas com pastejo hiberna devido à complexidade que a ação do pastejo agrega ao solo, onde vários outros processos microbiológicos (além dos abordados neste trabalho) e não microbiológicos, podem estar mantendo os níveis altos de produtividade neste sistema (Figura 24), provendo incremento na atividade microbiológica, e conseqüentemente aumentando os serviços ecossistêmicos do solo. Além de que, não se encontra facilmente correlações e regressões na literatura, que avaliam a atividade da  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase com a produtividade em ambientes com pecuária.



**Figura 26.** Correlação de Pearson entre a produtividade da soja (kg ha<sup>-1</sup>) e a atividade da β-glicosidase (A) e arilsulfatase (B) em μg p-nitrofenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup> nas parcelas manejadas com a ação do pastejo hibernal, em um Plintossolo Argiluvico cultivado em sucessão soja-avevém com SPD consolidado, na camada de 0-10 cm. Eldorado do Sul-RS.

A fim de entender melhor a complexidade que a ação do pastejo hibernal traz ao sistema e a variação espacial da atividade microbiológica, em decorrência dos resíduos orgânicos, sugere-se estudos futuros e mais detalhados, buscando-se entender as vias de manutenção da produtividade. Além de que, novos estudos complementando os resultados deste trabalho, podem auxiliar em uma calibração futura da atividade enzimática para solos com altos teores de areia no bioma Pampa, de forma complementar a tecnologia BioAS tornando-a prática para os produtores do subtropico brasileiro tanto em ambientes agrícolas como em sistemas com pecuária.

#### 5.4 Conclusões

Conclui-se que um solo biologicamente ativo mantém o C-BMS, N-BMS, relação C:N-BMS, qMIC, qCO<sub>2</sub>, FDA e β-glicosidase, mesmo submetido à ausência de adubação, onde somente a arilsulfatase e a fosfatase ácida mostram-se sensíveis à ausência da adubação.

A produtividade do avevém não foi influenciada pela ausência da adubação e a ação do pastejo. Entretanto, a ação do pastejo hibernal manteve

a produtividade de soja mesmo após dois anos consecutivos na ausência de adubação.

Onde não houve a ação do pastejo hiberna (indiferente da presença ou ausência da adubação) a produtividade foi fortemente relacionada com a atividade da  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase, indicando a qualidade do solo pelo viés microbiológico.

## **CAPÍTULO VI - Conclusões Gerais**

Os bioindicadores de qualidade de solo são sensíveis a variação temporal dentro de um ano agrícola, ou seja, avaliações microbiológicas baseadas em uma única amostragem podem não mostrar a real qualidade microbiológica de uma determinada área/sistema produtivo. De forma semelhante e inesperada, o COT também sofreu alterações em um curto espaço de tempo, inclusive sendo afetado pela ação do pastejo hibernal.

A época de reposição de P e K e a ação do pastejo, de forma geral, não modificaram quantitativa e qualitativamente os bioindicadores de qualidade de solo, o que pode ser em decorrência ao histórico de manejo conservacionista desta área. Inclusive essa atividade microbiológica do solo pode ter sido responsável pela manutenção da produtividade de azevém e soja, mesmo após dois anos consecutivos na ausência de adubação mineral, sobretudo, quando o solo recebeu influência do pastejo hibernal.

A atividade da  $\beta$ -glicosidade e da arilsulfatase se mostraram intimamente relacionadas com a produtividade de soja, onde não houve ação do pastejo hibernal. Já onde houve ação do pastejo hibernal, houve manutenção da produtividade, entretanto, não relacionada com a atividade da  $\beta$ -glicosidade e da arilsulfatase, demonstrando que o bom manejo do pastejo agrega uma complexidade maior ao sistema produtivo.

## PERSPECTIVAS FUTURAS DE PESQUISA

Pensando em aprimorar e avançar os conhecimentos na dinâmica dos bioindicadores de qualidade de solo no subtropical brasileiro, tanto em áreas agrícolas como em áreas de pecuária (sistema integrado de produção agropecuária), sugere-se os seguintes aprofundamentos e/ou estudos:

a) Avaliar os anos agrícolas subsequentes, visando entender se a variação temporal dos bioindicadores de qualidade de solo é semelhante dentro da mesma área em diferentes anos agrícolas, bem como, monitorar detalhadamente as condições climáticas para entender a influência sobre a comunidade e atividade microbiana.

b) Realizar análise de fracionamento do COT, a fim de entender sua alteração em um curto espaço de tempo.

c) Quantificações futuras nesta área e em outras, buscando encontrar uma calibração para as enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase em solos arenosos do subtropical brasileiro, tornando-a prática para os agricultores da região, seguindo os princípios da BioAS.

d) Avançar os estudos microbianos em áreas que recebem ação do pastejo hibernar, buscando entender a complexidade que o pastejo agrega nos sistemas produtivos.

e) Monitorar a qualidade biológica do solo, testando a influência da ausência de adubação em mais de um ano agrícola em áreas com fertilidade construída e/ou com altos níveis e nutrientes, buscando-se entender por quantas safras a atividade microbiana consegue realizar a manutenção da produtividade através de seus serviços ecossistêmicos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, V. M. C. *et al.* **Solubilização de potássio presente em minerais por microrganismos e efeitos no desenvolvimento de culturas agrícolas.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 21 p. (Documentos, 264).
- ANDERSON, T. H.; 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**, Braunschweig, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ANDREOLLA, V. R. M. *et al.* Pastejo e adubação nitrogenada sobre os atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 6, p. 1019–1031, 2015.
- ANGHINONI, I. *et al.* Ciclagem de nutrientes em integração lavoura-pecuária. **Synergismus scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 6, n. 1, [p. 1-8], 2011.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. *In*: ARAÚJO, A.; ALVES, B. J. (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: 2013. p. 325–338.
- ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic soil fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 45, [art.] e0210090, [p. 1–18], 2021.
- ANTONIO, A. *et al.* Integração lavoura-pecuária : intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1925–1933, 2009.
- AON, M. A. *et al.* Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, San Diego, v. 18, n. 3, p. 239–254, 2001.
- ARAÚJO, A. S. F. *et al.* Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 66, p. 175–181, 2013.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.
- ARAÚJO, D. *et al.* Avaliação da atividade microbiana baseada na produção de C-CO<sub>2</sub> em uma área de caatinga no cariri paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 221–230, 2008.
- ARNUTI, F. **Ciclagem e balanço de nutrientes em sistema integrado de produção agrícola e pecuária com ovinos.** 2018. 160 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ARNUTI, F. et al **Sheep dung composition and phosphorus and potassium release affected by grazing intensity and pasture development stage in an integrated crop-livestock system.** *Agronomy, Basel*, v. 10, n. 8, p. 2-14, 2020.

ASSIS, É. P. M. *et al.* Efeito da aplicação de nitrogênio na atividade microbiana e na decomposição da palhada de sorgo em solo de cerrado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 33, n. 2, p. 107–112, 2003.

ASSIS, J. *et al.* Phosphorus lability in a subtropical Acrisol under long-term integrated crop-livestock system: impacts of grazing management and cropping system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 46, [art.] e0220066, [p. 1–14], 2022.

ASSMANN, J. M. **Estoque de carbono e nitrogênio no solo e ciclagem de nutrientes em sistema de integração soja-bovinos de corte em plantio direto de longa duração.** 2013. 151 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ASSMANN, J. M. *et al.* Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 10, p. 967–978, 2015.

ASSMANN, T. S. *et al.* Adubação de sistemas e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária. *In*: SOUZA, E. D. *et al.* (ed.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil.** Tubarão, SC: Copiart, 2018. p. 123–144.

ASSMANN, T. S. *et al.* Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 1.; ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, 4., 2017, Cascavel. **Palestras: intensificação com sustentabilidade.** Pato Branco: UTFPR, 2017. p. 67–84. Disponível em: <http://www.pb.utfpr.edu.br/coagr/eventos>. Acesso em: 24. out. 2022

ASSMANN, T. S. *et al.* Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 675–683, 2003.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTÍNEZ, G. B. Contribuições dos Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) para uma agricultura de baixa emissão de carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 6, p. 1163–1175, 2011.

BALD, D. R. Q. *et al.* Microbiota do solo : a diversidade invisível e a sua importância. **Revista Bio Diverso**, Porto Alegre, v. 1, p. 101–131, 2021.

- BALOTA, E. L. *et al.* Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 641–649, 1998.
- BARTH NETO, A. *et al.* Perfilhamento em pastagens de azevém em sucessão a soja ou milho, sob diferentes métodos e intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 3, p. 329–338, 2013.
- BATISTA, Q. R. *et al.* Bioqualidade de área degradada pela extração de argila, revegetada com *Eucalyptus spp.* e sabiá. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 1, p. 169–178, 2008.
- BESEN, M. *et al.* Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. **Scientia Agropecuaria**, Trujillo, v. 9, n. 3, p. 429–439, 2018.
- BITTENCOURT, K. S. Q. Q. *et al.* Nitrogênio da biomassa microbiana em argissolo vermelho amarelo sob mata de cerrado, área de cultivo de grãos e pastagem natural de redenção - Pará. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, v. 1, n. 45, p. 187–203, 2006.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 14, n. 4, p. 319–329, 1982.
- BRUM, M. D. S. *et al.* Black oat and ryegrass inoculated with *Azospirillum brasilense* in crop-livestock system. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 34, n. 2, p. 276–286, 2021.
- CAMPBELL, C. A. *et al.* Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Canadian Journal of soil science**, Ottawa, v. 376, p. 363–376, 1991.
- CAPRISTO, D. P. *et al.* Microbiological and structural quality of oxisol under pasture renewal systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 51, [art.] e68006, [p. 1–8], 2021.
- CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221 p.
- CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 147–157, 2009.
- CARVALHO, J. L. N. *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 277–289, 2010.
- CERRI, C. C. *et al.* Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 20, n. 2, p. 248–254, 2004.

CHÁVEZ, L. F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1254–1261, 2011.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2021/2022: décimo segundo levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 9, n. 12, p. 1-88, set. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 2 fev. 2023.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fosfatase Ácida Após Aplicação De Fosfato Em Solo No Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 925–930, 2002.

COSTA, G. D. *et al.* Influência da adubação nos atributos microbiológicos do solo na produção de milho silagem. **Synergismus Scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 9, n. 1, [p. 1-5], 2014.

CQFS-RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016.

CUNHA, E. Q. *et al.* Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. II - Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 589–602, 2011.

CUNHA-SANTINO, M. B.; SCIESSERE, L.; BIANCHINI JÚNIOR, I. As atividades das enzimas na decomposição da matéria orgânica particulada em ambientes aquáticos continentais. **Oecologia Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 30–41, 2008.

DAVID, M. B.; MITCHELL, M. J.; NAKA, D. J. P. Organic and inorganic sulfur constituents of a forest soil and their relationship to microbial activity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 847–852, 1982.

DIACK, M. **Relationships between soil biological and chemical characteristics and surface soil structural properties for use in soil quality**. 1997. 221 f. Thesis (Doctoral of Philosophy) – Faculty of Purdue University, Ann Arbor, 1997.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. **Methods for Assessing Soil Quality**, Madison, v. 49, p. 247–271, 1996.

DUBEUX, J. C. B. *et al.* Litter decomposition and mineralization in bahiagrass pastures managed at different intensities. **Crop Science**, Madison, v. 46, n. 3, p. 1305–1310, 2006.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988.

EMBRAPA CERRADO. **FAQ – Perguntas e respostas sobre a tecnologia BioAS**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6047/bioas--tecnologia-de-bioanalise-de-solo->. Acesso em: 8 jan. 2023.

ETESAMI, H.; EMAMI, S.; ALIKHANI, H. A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects - a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Berlin, v. 17, n. 4, p. 897–911, 2017.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. Rome: FAO, 2015. 203 p.

FAO - ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. **Código Internacional de conducta para el uso y manejo de fertilizantes**. Roma: FAO, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca5253es/CA5253ES.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

FARIAS, G. D. *et al.* Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 40, n. 6, [art.] 39, 2020.

FERREIRA, E. A. B. *et al.* Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1625–1635, 2007.

FERREIRA, E. V. O. *et al.* Potassium cycling and balance and soybean yield in an integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 161–169, 2011.

FIALHO, C. M. T. *et al.* Weed interference in soybean crop affects soil microbial activity and biomass. **Plantas Daninha**, Viçosa, v. 38, [art.] e020221853, [p. 1–9], 2020.

FIALHO, J. S. *et al.* Indicadores da qualidade do solo em áreas sob vegetação natural e cultivo de bananeiras na Chapada do Apodi-CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, n. 3, p. 250–257, 2006.

GAMA-RODRIGUES, E. F. *et al.* Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 893–901, 2005.

GARCÍA, C. C. V. *et al.* The role of dung beetle species in nitrous oxide emission, ammonia volatilization, and nutrient cycling. **Scientific Reports**, London, v. 13, [art.] 3572, [p. 1–10], 2023.

GATIBONI, L. C. *et al.* Soil microbial biomass phosphorus and activity of acid phosphatases during decline of soil available phosphorus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 8, p. 1085–1091, 2008.

GAZOLLA, P. R. *et al.* Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693–704, 2015.

GONÇALVES, V. A. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob diferentes sistemas de plantio e sucessões de culturas. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 62, p. 1–8, 2019.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998.

JANEGITZ, M. C.; INOUE, B. S.; ROSOLEM, C. A. Formas de fósforo no solo após o cultivo de braquiária e tremoço branco. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, p. 1381–1386, 2013.

JANES-BASSETT, V. *et al.* A meta-analysis of phosphatase activity in agricultural settings in response to phosphorus deficiency. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 165, p. 108–537, 2022.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4–10, 1997.

KHAN, I.; AKHTAR, M. W. The biotechnological perspective of beta-glucosidases. **Nature Precedings**, Berlin, p. 1–8, 4 Oct. 2010.

KNUPP, A. M. *et al.* Indicadores de qualidade do solo em unidades piloto de produção integrada de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Anais**. [Brasília, DF]: MAPA, EMBRAPA, 2009.

LAMBAIS, M. R. *et al.* Diversidade microbiana nos solos: definindo novos paradigmas. **Tópicos de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 4, p. 43–84. 2005.

LANNA, A. C. *et al.* **Mitigação dos estresses abióticos na agricultura mediada pela interação de microrganismos e plantas**. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. (Documentos, 319).

LOPES, A. A. C. *et al.* Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

LOSS, A. *et al.* Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1269–1276, 2011.

- LUDKIEWICZ, M. G. Z. *et al.* Short-term dynamic of soil fertility from integrated crop-livestock systems in tropical savanna. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, Yucatán, v. 20, n. 2, p. 237–249, 2017.
- MA, X. *et al.* Spatiotemporal pattern of acid phosphatase activity in soils cultivated with maize sensing to phosphorus-rich patches. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, [art.] 650436, [p. 1–15], 2021.
- MARINHO JUNIOR, J. L. *et al.* Soil microbiological activity under different vegetation coverages in the cerrado biome of Tocantins state. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 1494–1511, 2021.
- MARQUES, T. C. L. L. S. M. *et al.* Evolvimento de dióxido de carbono e mineralização de nitrogênio em Latossolo Vermelho-Escuro com diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 3, p. 581–589, 2000.
- MARTINS, A. P. *et al.* Long-, medium- and short-term dynamics of soil acidity in an integrated crop–livestock system under different grazing intensities. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Basel, v. 104, n. 1, p. 67–77, 2016.
- MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 425–433, 2003.
- MELILLO, J. M. *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. **Science**, New York, v. 298, n. 5601, p. 2173–2176, 2002.
- MENDES, I. C. *et al.* Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. **Informações Agronômicas NPCT**, Piracicaba, n. 8, p. 1-11, dez. 2020.
- MENDES, I. C. O solo é a memória do manejo. *In*: FERTBIO, 2016, Goiânia. **Anais**. Viçosa, MG: SBCS, 2016.
- MENDES, I. D. C. *et al.* Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. *In*: SEVERIANO, E. C; MORAUES, M. F; PAULA, A. M (ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2019. v. 10, p. 1-64.
- MENDES, I. D. C.; REIS JÚNIOR, F. B. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos**: uma análise crítica. Planaltina, DF: Embrapa Cerrado, 2003. (Documentos, 85). p. 1-24.
- MENDES, I. D. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, p. 191–209, 2015.
- MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria orgânica do solo**: métodos de análises. Viçosa, MG: UFV, 2005.

- MOINET, G. Y. K. *et al.* Carbon for soils, not soils for carbon. **Global Change Biology**, Oxford, v. 29, n. 9, p. 2384-2398, 2023.
- MONTEIRO, F. P. *et al.* Exsudatos radiculares de plantas de cobertura no desenvolvimento de sclerotinia sclerotiorum. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 87–93, 2012.
- MORAES, A. *et al.* Avanços científicos em integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Synergismus scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 6, n. 2, p. 1–9, 2011.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, MG: Editora UFLA, 2006.
- MOTT, G.; LUCAS, H. L. The design, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. *In*: WAGNER, R. E. *et al.* (org.). **Proceedings of the 6th International Grassland Congress**: Pennsylvania State College, State College, Pa., August 17-23. Washington, D.C.: International Grassland Congress, 1952. p. 1380–1385.
- MOURA, J. A. *et al.* Respiração basal e relação de estratificação em solo cultivado com citros e tratado com resíduos orgânicos no estado do Sergipe. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 731–746, 2015.
- MUNIZ, L. C. *et al.* Soil biological attributes in pastures of different ages in a crop-livestock integrated system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1262–1268, 2011.
- NOVAK, E. *et al.* Variação temporal dos atributos microbiológicos do solo sob diferentes usos. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n. 3, p. 603–611, 2018.
- PANKHURST, B. M.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997.
- PERECIN, D.; CARGNELUTTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento interações de experimentos fatorais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n.1, p. 68–72, 2008.
- PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 567–573, 2004.
- PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo cultivado com soja, sob diferentes sistemas de manejo, nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 2, p. 137–144, 2005.

- PIAZZETTA, H. V. L. *et al.* Pastejo e nitrogênio sobre o crescimento de raízes na mistura de aveia preta e azevém. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, p. 2749–2766, 2014.
- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. New York: Springer, 2000. 538 p.
- PINTO, C. R. O.; NAHAS, E. Atividade e população microbiana envolvida nas transformações do enxofre em solos com diferentes vegetações. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 12, p. 1751–1756, 2002.
- PIRES, M. F. M. *et al.* Nutrient uptake by soybean plants in succession of cover crops in northeast of Brazil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 54, n. 7, p. 945–963, 2022.
- PRIETO, L. H. *et al.* Soil enzyme and microbial activities in a grazing ecosystem of Patagonian Monte, Argentina. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 3/4, p. 281–287, 2011.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 2002. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=DHo2zLdESkEC&lpq=PP1&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q=temperatura&f=false>. Acesso em: 5 fev. 2023
- RAPOSO, E. **Dinâmica de carbono e nitrogênio em pastos de capim-xaraés submetidos a diferentes resíduos pós-pastejo**. 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.
- REDIN, M. *et al.* Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio *In*: TIECHER, T. (org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 7–22.
- REIS JÚNIOR, F. B. D.; MENDES, I. D. C. **Biomassa microbiana do solo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. (Documentos, 205).
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 3, p. 589–597, 2000.
- RIBEIRO, R. H. *et al.* Grazing intensity and nitrogen fertilization effects on biomass and morphology of black oat roots in an integrated crop-livestock system. **Agronomiy Jurnal**, Madison, v. 115, n. 2, p. 512-525, 2022.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretária da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Rural. **Relatório estiagem nº 05/2022 – SEAPDR**. Porto Alegre: SEAPDR, 2022. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202204/04103728-relatorio-estiagem-05.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023.

RIOS, E. **Pastejo e adubação nitrogenada na qualidade biológica e estrutural em Latossolo Bruno sob sistema de integração lavoura-pecuária**. 2010. 124 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SANAULLAH, M. *et al.* How does plant leaf senescence of grassland species influence decomposition kinetics and litter compounds dynamics? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Basel, v. 88, n. 2, p. 159–171, 2010.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 2 dez. 2022.

SANTOS, V. M.; MAIA, L. C. Bioindicadores de qualidade do solo. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, Recife, v. 10, p. 195–223, 2013.

SILVA, C. F. *et al.* Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio vale do paraíba do sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1680–1689, 2012.

SILVA, D. M. *et al.* Indicadores microbiológicos de solo em pastagem com aplicação sucessiva de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1585–1594, 2015.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo ( $qCO_2$ )**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 34 p. (Comunicado técnico, 99).

SILVA, E. F. *et al.* Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1321–1331, 2011.

SILVA, J. M. *et al.* Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis, SC. **Anais do [...]**. Viçosa, MG: SBCS, 2013. v. 4, p. 132–135.

SILVA, M. O. *et al.* Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021.

SILVA, R. R. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 1585–1592, 2010.

SIMÕES, V. J. L. P. *et al.* Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 349, [art.] 108453, [p. 1–34], 2023.

SMITH, C. *et al.* Using soil sustainability and resilience concepts to support future land management practice: a case study of Mt Grand Station, Hāwea, New Zealand. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 3, [art.] 1808, 2022.

SOBUCKI, L. **Propriedades microbiológicas e índice de qualidade de um Argissolo subtropical submetido a sistemas de manejo**. 2020. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

SOUCHIE, E. L. *et al.* Solubilização de fosfatos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n.11, p. 1149–1152, 2005.

SOUSA, H. M. *et al.* Dynamics of soil microbiological attributes in integrated crop-livestock systems in the cerrado-amazonônia ecotone. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 1, p. 9–20, 2020.

SOUTO, P. C. *et al.* Comunidade microbiana e mesofauna edáficas em solo sob caatinga no semi-árido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 151–160, 2008.

SOUZA, E. D. *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidade de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 79–88, 2010.

SOUZA, E. D. *et al.* Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1273–1282, 2008.

SOUZA, I. M. Z. **Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo em áreas reflorestadas comparadas ao campo e mata nativa no planalto dos Campos Gerais, SC**. 2005. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2005.

TABATABAI, A. M. Soil enzymes. *In*: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; R., K. D. (org.). **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 778–835.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 34, p. 225–229, 1970.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

- TIECHER, T. *et al.* Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos á adubação sulfatada. **Solos e Nutrição de Plantas**, Campinas, v. 71, n. 4, p. 518–527, 2012.
- TORSVIK, V.; ØVREÅS, L. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. **Current Opinion in Microbiology**, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 240–245, 2002.
- TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. **Tópicos em Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 2, p. 195-276, 2002.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Estação Experimental Agronômica. **Dados meteorológicos da Estação Experimental Agronômica da UFRGS**: Anos de 2017 a 2022. Eldorado do Sul: UFRGS, EEA. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/index.php/eea-pesquisa>. Acesso em: 15 out. 2022.
- VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo sob diferentes sistemas de manejo, estimado por métodos de fumigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 411–417, 1998.
- VARGAS, L. K.; SELBACH, P. A.; SÁ, E. L. S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 1, p. 76–83, 2005.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 743–755, 2009.
- WAKELIN, S. A. *et al.* Pasture management clearly affects soil microbial community structure and N-cycling bacteria. **Pedobiologia**, Munich, v. 52, n. 4, p. 237–251, 2009.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.
- WILLIAMS, P. H.; HAYNES, R. J. Effect of sheep, deer and cattle dung on herbage production and soil nutrient content. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 50, n. 3, p. 263–271, 1995.
- WUTKE, E. B. *et al.* Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para uso *In*: LIMA FILHO, O. F. *et al.* (ed.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. 2. ed. rev. atual. Brasília, DF: Embrapa, 2023. v. 1, cap. 3, p. 57-176.

## RESUMO BIOGRÁFICO

Rafaela Dulcieli Daneluz Rintzel, filha de Nelson Rintzel e Odete Daneluz Rintzel, nascida em 19 de fevereiro de 1997, em Campo Erê, Santa Catarina. Realizou o ensino técnico concomitante ao segundo grau no Centro de Educação Profissionalizante de Campo Erê (CEDUP-CE), se formando como Técnica em Agropecuária em 2015. Neste mesmo ano, ingressou na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Pato Branco, onde trabalhou na iniciação científica e como monitora de química analítica durante o curso, bem como, realizou intercâmbio estudantil pelo Programa de Mobilidade Acadêmica Regional em Cursos Acreditados (MARCA), na faculdade de ciências agrárias-Universidade Nacional de Cuyo em Mendoza, Argentina, graduando-se como Engenheira-Agrônoma em fevereiro de 2021. Em março de 2021, ingressou no mestrado do PPG em Ciência do Solo da UFRGS, na área de Química e Fertilidade do Solo sob orientação da Prof. Amanda Posselt Martins, desenvolvendo o presente estudo.