

Universidade Federal de Pelotas – UFPel
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



DISSERTAÇÃO

Indicadores químicos e biológicos de qualidade de solo em agroecossistemas familiares sob diferentes usos e manejos: convencional e agroecológico

Julhana Pereira Figueiredo

Pelotas, 2024

Julhana Pereira Figueiredo

Indicadores químicos e biológicos de qualidade de solo em agroecossistemas familiares sob diferentes usos e manejos: convencional e agroecológico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Prof^a Dr^a Lizete Stumpf

Coorientadores: Prof. Dr Ezequiel César Carvalho Miola

Prof. Dr Eduardo Guatimosim

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

F476i Figueiredo, Julhana Pereira

Indicadores químicos e biológicos de qualidade de solo em agroecossistemas familiares sob diferentes usos e manejos [recurso eletrônico] : convencional e agroecológico / Julhana Pereira Figueiredo ; Lizete Stumpf, orientadora ; Ezequiel César Carvalho Miola, Eduardo Guatimosim, coorientadores. — Pelotas, 2024.

61 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Indicadores de qualidade de solo. 2. Tecnologia BioAS. 3. IQSFERTBIO. 4. Modelo de quatro quadrantes. I. Stumpf, Lizete, orient. II. Miola, Ezequiel César Carvalho, coorient. III. Guatimosim, Eduardo, coorient. IV. Título.

CDD 630.2745

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Julhana Pereira Figueiredo

Indicadores químicos e biológicos de qualidade de solo em agroecossistemas familiares sob diferentes usos e manejos: convencional e agroecológico

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data de defesa: 28/02/2024

Banca examinadora:

Professora Lizete Stumpf (Orientadora)

Doutora em Ciências/Solos - Universidade Federal de Pelotas

Pesquisadora Ieda de Carvalho Mendes

Doutora em Ciência do Solo - Oregon State University

Professora Maria Cândida Moitinho Nunes

Doutora em Ciência do Solo - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedicatória

Dedico essa conquista à minha madrinha Elisabete Schuster Figueiredo Hugo (in memoriam) e aos meus pais, Joel e Josiane, que apoiaram e incentivaram para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água e ao Departamento de Solos pela oportunidade de conduzir toda a minha pesquisa nas instalações da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas. Meu agradecimento abrange também toda a equipe do restaurante universitário pela oferta de alimentação saudável durante esse período.

Agradeço à CAPES por ter me concedido a bolsa social.

À minha orientadora, Lizete Stumpf, expresso minha sincera gratidão pela amizade e incentivo nos últimos dois anos. Aos coorientadores, agradeço pelos direcionamentos.

Às famílias agricultoras, quero agradecer por gentilmente cederem suas áreas produtivas para que este estudo ocorresse.

Finalmente, gostaria de direcionar meus agradecimentos à EMBRAPA CERRADOS, em especial à Dra. Iêda de Carvalho Mendes e sua equipe, por proporcionarem as análises fundamentais para a obtenção do MIQS e pela parceria que se estendeu até a conclusão deste documento.

Mais uma vez, agradeço a todos que contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Epígrafe

“Lutar pela terra, lutar pelas plantas, lutar pela agricultura, porque se não vivermos dentro da agricultura, vamos acabar”.

Ana Primavesi.

Resumo

FIGUEIREDO, Julhana Pereira. **Indicadores químicos e biológicos de qualidade de solo em agroecossistemas familiares sob diferentes usos e manejos: convencional e agroecológico.** Orientadora: Lizete Stumpf. 2024. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Manejo e Conservação do solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Em São Lourenço do Sul, os agroecossistemas familiares refletem cenários característicos do interior do Rio Grande do Sul, abrangendo sistemas de produção convencional de soja, milho, feijão e fumo dividindo espaços com a produção de tubérculos e hortaliças. Por outro lado, também existem sistemas de produção em transição agroecológica com o cultivo de feijão e milho dividindo espaços com uma diversidade de hortaliças para a comercialização direta em feiras e distribuição para mercados locais e contratos estabelecidos com o governo. Nos sistemas de produção em transição agroecológica, os solos devem ser considerados como sistemas vivos, ou seja, os organismos do solo apresentam a capacidade de decompor a matéria orgânica, mobilizar nutrientes e disponibilizá-los para as plantas, indicando a qualidade biológica do solo. Dessa forma, o presente trabalho tem como hipótese que os usos do solo sob o manejo agroecológico, independente do período de transição, apresentam uma melhor qualidade biológica em relação aos usos do solo sob o manejo convencional. O objetivo principal desse estudo foi avaliar a qualidade química e biológica de solos sob os diferentes usos e manejos (convencional e agroecológico) em agroecossistemas familiares de São Lourenço do Sul. Para a realização das análises químicas e biológicas, foram coletadas amostras na camada de 0 – 0,10 m em quatro agroecossistemas, totalizando 48 amostras. Com o uso da tecnologia BioAS, foram apresentados os valores de atividade enzimática e os índices de qualidade de solos. Com os resultados apresentados neste estudo, foi possível concluir que os solos sob os diferentes usos e manejos foram quimicamente semelhantes. Contudo, a melhor atividade enzimática foi observada somente sob o manejo agroecológico do agroecossistema 3, principalmente sob o uso de HORTA. Isto refuta em parte nossa hipótese de que todos os usos do solo sob o manejo agroecológico de agroecossistemas familiares de São Lourenço do Sul, independente do período de transição, apresentariam uma melhor qualidade no manejo do solo em relação aos usos do solo sob manejo convencional. Nossa hipótese não foi confirmada no manejo agroecológico do agroecossistema 4.

Palavras-chave: indicadores de qualidade de solo, tecnologia BioAS, IQS_{FERTBIO}, modelo de quatro quadrantes.

Abstract

FIGUEIREDO, Julhana Pereira. **Chemical and biological indicators of soil quality in family agroecosystems under different uses and management: conventional and agroecological.** Advisor: Lizete Stumpf. 2024. 61f. Dissertation (Master's Degree in Sciences) - Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

In São Lourenço do Sul, family agroecosystems reflect scenarios characteristic of the interior of Rio Grande do Sul, encompassing conventional production systems of soybeans, corn, beans and tobacco sharing spaces with the production of tubers and vegetables. On the other hand, there are also production systems in agroecological transition with the cultivation of beans and corn sharing spaces with a diversity of vegetables for direct sale at fairs and distribution to local markets and contracts established with the government. In production systems undergoing agroecological transition, soils must be considered as living systems, that is, soil organisms have the ability to decompose organic matter, mobilize nutrients and make them available to plants, indicating the soil biological quality. Therefore, the present work hypothesizes that land uses under agroecological management, regardless of the transition period, present better biological quality in relation to land uses under conventional management. The main objective of this study was to evaluate the soil chemical and biological quality under different uses and management (conventional and agroecological) in family agroecosystems in São Lourenço do Sul. To carry out chemical and biological analyses, samples were collected in the 0 – 0.10 m layer in four agroecosystems, totaling 48 samples. Using BioAS technology, enzyme activity values and soil quality indices were presented. With the results presented in this study, it was possible to conclude that the soils under different uses and management were chemically similar. However, the best enzymatic activity was observed only under the agroecological management of agroecosystem 3, mainly under the use of vegetables. This partially refutes our hypothesis that all land uses under the agroecological management of family agroecosystems in São Lourenço do Sul, regardless of the transition period, would present a better quality of soil management in relation to land uses under conventional management. Our hypothesis was not confirmed in the agroecological management of agroecosystem 4.

Keywords: Soil quality indicators, bioAS technology, IQS_{FERTBIO}, four quadrant model.

Lista de Figuras

Figura 1	Usos de solos do agroecossistema 1, localizado no distrito de Faxinal em São Lourenço do Sul.....	28
Figura 2	Usos de solos do agroecossistema 2, localizado no distrito de Boqueirão em São Lourenço do Sul.....	29
Figura 3	Usos de solos do agroecossistema 3, localizado no distrito de Boa Vista em São Lourenço do Sul.....	31
Figura 4	Usos de solos do agroecossistema 4, localizado no distrito de Harmonia em São Lourenço do Sul.....	32
Figura 5	Amostras de solo no agroecossistema 1, agroecossistema 2, agroecossistema 3 e agroecossistema 4.....	33
Figura 6	Organismos da fauna do solo sob HORTA, LAVOURA e MATA e sob os manejos convencional e agroecológico, em quatro agroecossistemas familiares.....	48
Figura 7	Modelo de quatro quadrantes para o uso do solo com HORTA sob os manejos convencional e agroecológico em agroecossistemas familiares.....	52
Figura 8	Modelo de quatro quadrantes para o uso do solo com LAVOURA sob os manejos convencional e agroecológico em agroecossistemas familiares.....	53

Lista de Tabelas

Tabela 1	Teores de argila, areia e silte e a classe textural dos solos na camada de 0,00-0,10 m, em cada um dos agroecossistemas familiares.....	27
Tabela 2	Valores médios de pH em água e teores médios de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) de solos sob diferentes usos (HORTA, LAVOURA e MATA) e manejos (convencional e agroecológico) em quatro agroecossistemas familiares.....	37
Tabela 3	Valores médios de matéria orgânica (MO), atividade das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase, carbono da biomassa microbiana (CBM) e da respiração basal (RB) de solos sob diferentes usos (HORTA, LAVOURA e MATA) e manejos (convencional e agroecológico) em quatro agroecossistemas familiares.....	41
Tabela 4	Correlação de Pearson entre os atributos químicos e biológicos do solo sob o manejo agroecológico (HORTA e LAVOURA)	45
Tabela 5	Correlação de Pearson entre os atributos químicos e biológicos do solo sob o manejo convencional (Horta e Lavoura)	46
Tabela 6	IQS _{FERTBIO} e suas respectivas funções CICLAR, ARMAZENAR e SUPRIR nutrientes em solos sob diferentes usos (HORTA, LAVOURA) e manejos (convencional e agroecológico) em quatro agroecossistemas familiares.....	49

Sumário

1. Introdução	13
2. Revisão da literatura	16
2.1 Qualidade química e biológica do solo	16
2.2 Indicadores de qualidade química.....	18
2.3 Indicadores de qualidade biológica.....	19
2.4 Tecnologia BioAS, IQS _{FERTBIO} e modelo de quatro quadrantes.....	22
3. Material e métodos	27
3.1 Caracterização da área de estudo.....	27
3.1.1 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 1.....	28
3.1.2 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 2.....	29
3.1.3 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 3.....	30
3.1.4 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 4.....	31
3.2 Amostragem do solo e análises.....	32
3.3 Análise estatística.....	35
4. Resultados e Discussão	36
4.1 Atributos químicos e sua relação com a qualidade do manejo do solo.....	36
4.2 Atributos biológicos e sua relação com a qualidade do manejo do solo.....	40
4.3 Relações entre as Funções do solo (F1, F2 e F3) e a qualidade do manejo.....	47
5 Considerações finais	53
Referências Bibliográficas	55

1. Introdução

Nos últimos vinte anos, a avaliação da qualidade do solo emergiu como uma preocupação de destaque, antecipando-se a uma crescente valorização dessa prática à medida que nossa consciência sobre a necessidade de proteger o solo se aprofunda. A qualidade do solo é mensurada pela sua capacidade de operar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra, visando garantir a produtividade biológica, preservar a integridade ambiental e promover a saúde das plantas e animais (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

O grupo de pesquisa em bioindicadores de qualidade de solo da Embrapa Cerrados e Embrapa Agrobiologia dedicaram-se à seleção de bioindicadores robustos, que permitissem que o agricultor brasileiro pudesse monitorar a qualidade de seu solo, sabendo exatamente o que avaliar, porque avaliar, como avaliar, quando avaliar e, principalmente, como interpretar o que foi avaliado. Diante da ausência do componente biológico nas análises de rotina dos solos, a EMBRAPA Cerrados lançou em 2020 a Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS) para complementar as análises tradicionais de fertilidade (MENDES *et al.*, 2021).

A BioAS consiste na avaliação e interpretação da atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase associadas ao ciclo do carbono e do enxofre, respectivamente, como bioindicadoras de qualidade do solo, pois se relacionam direta ou indiretamente ao potencial produtivo e à sustentabilidade do uso do solo. Associadas à produtividade das culturas e a matéria orgânica do solo (MOS), as enzimas ajudam a avaliar a saúde dos solos, pois são interpretáveis, possuem baixa variação temporal, apresentam precisão, coerência, sensibilidade e simples determinação analítica e reprodutibilidade (LOPES *et al.*, 2013; 2018; MENDES *et al.*, 2018; 2019a; 2019b). O uso da BioAS resulta em índices calculados a partir dos resultados de análises enzimáticas e das análises tradicionais de fertilidade do solo. Isto é, a união do componente químico e biológico gera um IQS_{FERTBIO} (Índice de Qualidade do Solo “FERTBIO”), que agrega três importantes funções do solo: (F1) Potencial de ciclagem, que avalia a atividade biológica e os processos derivados dela como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da matéria orgânica do solo (MOS); (F2) Potencial de armazenamento, que quantifica o reservatório de nutrientes do solo, o qual está principalmente relacionado à textura, tipo de argila e ao conteúdo de MOS; e (F3) Potencial de suprimento, que avalia a qualidade do conteúdo

do reservatório do solo, como sua acidez e capacidade de disponibilizar os principais micronutrientes (MENDES *et al.*, 2023).

No Brasil, a agricultura familiar abrange 23% da área total dos estabelecimentos agropecuários, equivalente a 80,9 milhões de hectares (IBGE, 2017), empregando mais de 10 milhões de pessoas, representando 67% do total de ocupações na agropecuária e contribuindo com 40% da renda da população economicamente ativa (EMBRAPA, 2017). De modo geral, as unidades de produção familiar são administradas diretamente pela própria família, a qual trabalha de maneira direta, com ou sem o auxílio de terceiros. Estes estabelecimentos são, simultaneamente, unidades de produção e consumo, refletindo uma integração singular no contexto agrícola (REICHERT, 2012).

Em São Lourenço do Sul, as unidades de produção familiares refletem cenários característicos do interior do Rio Grande do Sul, abrangendo sistemas de produção convencional de soja, milho, feijão e fumo dividindo espaços com a produção de tubérculos e hortaliças. Por outro lado, também existem sistemas de produção em transição agroecológica com o cultivo de feijão e milho dividindo espaços com uma diversidade de hortaliças para a comercialização direta em feiras e distribuição para mercados locais e contratos estabelecidos com o governo (DE ALMEIDA *et al.*, 2019). A condução das propriedades familiares, caracterizada pelo uso de insumos locais, mão de obra própria e participação em circuitos curtos de comercialização, reflete uma abordagem alinhada aos princípios agroecológicos (ALTIERI, 1998). Contudo, o desafio para os produtores de hortaliças é adotar práticas de manejo ambientalmente sustentáveis que garantam a saúde do solo, elemento fundamental para o fornecimento de água e nutrientes às plantas. A sustentabilidade dessa atividade está diretamente relacionada à preservação da qualidade do solo, essencial tanto para atingir objetivos econômicos quanto para atender às demandas ambientais (LOPES & PEDROSO, 2017).

Nos sistemas de produção em transição agroecológica, os solos devem ser considerados como sistemas vivos, ou seja, os organismos do solo apresentam a capacidade de decompor a matéria orgânica, mobilizar nutrientes (minerais e orgânicos) e disponibilizá-los para as plantas, indicando a qualidade biológica do solo. Dessa forma, o presente trabalho tem como hipótese que os usos do solo sob o manejo agroecológico, independente do período de transição, apresentam melhor

qualidade biológica em relação aos usos do solo sob manejo convencional. O objetivo principal desse estudo foi avaliar a qualidade química e biológica de solos sob diferentes usos e manejos (convencional e agroecológico) em agroecossistemas familiares de São Lourenço do Sul - RS.

2. Revisão de literatura

2.1 Qualidade química e biológica do solo

Os conceitos contemporâneos relacionados à qualidade do solo (QS) e à sustentabilidade agrícola têm sido abordados de maneira mais ampla, incorporando a necessidade de aumentar a produtividade agrícola, conservar os recursos naturais e garantir a qualidade ambiental. Assim, a qualidade do solo é compreendida como a capacidade de operar dentro do ecossistema, respeitando suas limitações de uso, o que viabiliza a sustentabilidade biológica para plantas, animais e seres humanos (KARLEN *et al.*, 1997; KNOEPP *et al.*, 2000; CUNHA *et al.*, 2015).

Doran e Parkin (1994) definem a qualidade do solo como a capacidade específica de um tipo de solo desempenhar funções relacionadas à sustentação da atividade, produtividade, diversidade biológica, manutenção da qualidade ambiental, saúde de plantas e animais, e suporte a estruturas socioeconômicas e habitacionais. A discussão sobre QS intensificou-se nos anos 1990, evidenciando a preocupação da comunidade científica com a degradação dos recursos naturais, sustentabilidade agrícola e a regeneração do solo nesse contexto (VEZZANI, 2009; CASALINHO *et al.*, 2018).

No âmbito da qualidade química do solo, Primavesi (2021) define fertilidade como a capacidade do solo de fornecer nutrientes essenciais para as plantas e água em quantidades adequadas, sem substâncias tóxicas. Mäder *et al.* (2002) ampliam essa perspectiva, enfatizando que um solo fértil vai além do fornecimento de nutrientes, sustentando uma comunidade biótica diversificada e ativa. Contudo, muitas vezes, a fertilidade do solo é operacionalizada de maneira predominantemente química e parcialmente física, limitando-se ao fornecimento de nutrientes e água (CUNHA *et al.*, 2015).

Em contraposição a essa limitação, Anghinoni e Vezzani (2021) propõem uma visão sistêmica em relação à fertilidade do solo, concebendo-o como uma entidade moldada pelas interações dinâmicas entre seus componentes, enriquecida pelo fluxo de energia e matéria desencadeado pelas plantas. Nesse sentido, a vitalidade biológica, a produtividade e a capacidade de fornecer serviços ambientais e ecossistêmicos, como o armazenamento de água, a ciclagem de nutrientes, a degradação de agrotóxicos e sequestro de carbono representam características fundamentais para considerar um solo “saudável” (MENDES *et al.*, 2021). Portanto, a

adoção de práticas agrícolas de base ecológica que visem explorar ao máximo as interações sinérgicas e complementares entre as culturas e animais, melhorando os processos e a complexidade do solo, torna-se fundamental para manter a função produtiva em benefício da agricultura (ALTIERI & NICHOLLS, 2003; MALEZIEUX, 2012).

Gliessman (2008) destaca que a transição para práticas agroecológicas resulta em mudanças significativas na ecologia do agroecossistema. Com isso, uma variedade de processos e relações é transformada, começando pelos aspectos da estrutura básica do solo, seu conteúdo de matéria orgânica, diversidade e atividade da biota do solo. Posteriormente, as mudanças também ocorrem na atividade e nas relações entre plantas, insetos benéficos e populações de insetos prejudiciais ao agroecossistema, bem como no equilíbrio entre esses elementos. Por fim, a dinâmica e ciclagem de nutrientes, a eficiência do uso de energia e a produtividade geral do sistema são transformadas.

Neste contexto, entende-se por transição, o conjunto de ações, práticas e respostas inovadoras pelo qual um dado sistema passa de uma situação à outra, alterando todo o regime sociotécnico relacionado aos sistemas agroalimentares (CHANG *et al.*, 2017). Este processo, muitas vezes ocorre de maneira gradual e multifatorial, impulsionada por ações tanto internas quanto externas ao sistema, dando margem para diferentes práticas, etapas e caminhos de se fazer a transição, razão pela qual alguns autores defendem o termo “transições agroecológicas” a fim de dar valor a diferentes realidades presentes nos territórios (HAVERROTH, 2016; MAGRINI *et al.*, 2019).

Com esse entendimento, é considerável que a qualidade do solo proporcione uma avaliação abrangente das condições sob as quais um solo é submetido a um manejo específico (Sarmiento *et al.*, 2018). A relevância da utilização de indicadores está intrinsecamente ligada à exposição da funcionalidade do solo, evidenciando as deficiências nas áreas analisadas e orientando de maneira estratégica para a implementação de práticas de recuperação do solo (CAVALCANTE *et al.*, 2020). Assim, para alcançar uma avaliação robusta da condição da capacidade funcional do solo em diferentes manejos, torna-se necessário considerar atributos químicos e biológicos, visando à obtenção da fertilidade sistêmica e, conseqüentemente, a saúde do solo (ANGHINONI & VEZZANI; MENDES *et al.*, 2021).

2.2 Indicadores de qualidade química (pH em água, fósforo, potássio, cálcio e magnésio)

A avaliação da fertilidade do solo envolve a utilização de diversos atributos químicos como indicadores de qualidade. O pH, a matéria orgânica e a capacidade de troca de cátions são elementos fundamentais para essa avaliação. Esses indicadores não apenas influenciam o potencial de contaminação do solo, mas também desempenham um papel essencial no crescimento das plantas. As condições químicas do solo afetam as relações solo-planta, a qualidade da água, o poder tampão, a disponibilidade de nutrientes e água, e também impactam a mobilidade de contaminantes (PRIMAVESI, 2021).

O pH do solo exerce influência considerável nas comunidades microbianas, na solubilidade dos minerais e na disponibilidade de nutrientes (COTTA, 2016). O aumento do pH em direção à neutralidade contribui para a estabilidade dos agregados e o incremento do volume de macroporos. Em ambientes ácidos, observam-se o desenvolvimento de fungos acidófilos, resultando na redução da componente bacteriana, e a ausência de organismos como minhocas, responsáveis pela homogeneização e revolvimento do solo (PRIMAVESI, 2018).

O fósforo (P) desempenha funções específicas no metabolismo das plantas, contribuindo significativamente para a transferência de energia celular, respiração, fotossíntese, formação de ácidos nucleicos, além de integrar a estrutura de coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídios (DECKER, 2019). O P é um elemento fundamental para a vida vegetal, e a decomposição dos fosfatos minerais está intimamente vinculada a processos bioquímicos. Essa atividade é conduzida principalmente pelos microrganismos do solo, que produzem ácidos capazes de dissolver os fosfatos ou convertê-los em formas orgânicas, tornando-os disponíveis para as plantas. Dada à escassez natural desse elemento, compostos de fósforo são incorporados ao solo por meio de resíduos de plantas, animais e adubos provenientes de rochas fosfatadas (PRIMAVESI, 2021).

O potássio (K) é fundamental para a sustentação da vida vegetal. Em situações de deficiência, sua correção é realizada por meio da aplicação no solo de sais hidrossolúveis, principalmente sob a forma de sulfato e cloreto, ou ainda na forma de compostos orgânicos (PRIMAVESI, 2018). Conforme enfatizado por Waksman

(2012), a presença de K no solo, disponível para as plantas, está intrinsecamente ligada à atividade microbiana, responsável por transformar os sais minerais e aumentar a disponibilidade desse elemento. Entretanto, a concentração de potássio disponível é regulada por diversos fatores, incluindo sua concentração total, a umidade do solo, o complexo de troca do solo, o pH, a quantidade de húmus presente e a atividade dos microorganismos (PRIMAVESI, 2018).

O cálcio (Ca) destaca-se como um macronutriente de importância vital para todas as plantas, desempenhando um papel fundamental na composição das espécies e na produtividade dos ecossistemas terrestres. Sua presença é relevante para mitigar a toxicidade de outros metais em níveis normalmente inofensivos, sendo especialmente significativa em solos excessivamente ácidos, onde a deficiência de cálcio frequentemente coincide com a toxicidade de alumínio (Al) ou manganês (Mn). A distribuição do cálcio no solo ocorre predominantemente em três compartimentos que alimentam a solução do solo, conforme descrito por Brady & Weil (2013), são eles: os minerais contendo cálcio, o cálcio complexado com húmus do solo e o cálcio retido como cátion trocável nos colóides das argilas e do húmus. Essa distribuição diversificada destaca a complexidade da dinâmica do cálcio no solo, evidenciando sua interação com os diversos componentes do ambiente edáfico e sua influência vital nas condições propícias para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

De acordo com Brady & Weil (2013), a principal fonte de Mg disponível às plantas, na maioria dos solos, é o compartimento do Mg trocável no complexo argila-húmus. Com a remoção pelas plantas e a lixiviação, o compartimento de Mg facilmente trocável é realimentado por Mg intemperizado de minerais. Em alguns solos, o reabastecimento também ocorre a partir do compartimento de Mg, lentamente disponível, da estrutura de algumas argilas 2:1. Quantidades variáveis de Mg são disponibilizadas pela decomposição de resíduos vegetais e matéria orgânica do solo (PRIMAVESI, 2021).

2.3 Indicadores de qualidade biológica (COT, Enzimas, CBM, RB e mesofauna)

Diversos indicadores biológicos têm sido utilizados para investigar a natureza e as características dos solos. Essa abordagem está estritamente ligada ao reconhecimento da importância da biologia do solo na compreensão do funcionamento dos ecossistemas, o que requer a integração de diferentes indicadores

para avaliar a qualidade do solo. Indicadores biológicos, como a biomassa microbiana e a respiração basal, assim como indicadores bioquímicos, como atividade enzimática, têm se tornado objetos de avaliação da qualidade dos solos. Correlações significativas surgiram entre esses indicadores e o teor de matéria orgânica do solo e a disponibilidade de nutrientes, destacando a importância da biologia no funcionamento do solo (ANGHINONI & VEZZANI, 2021; CHAER *et al.*, 2023).

A matéria orgânica possui uma diversidade de substâncias nutritivas, categorizadas em dois grupos: substâncias orgânicas não humificadas, provenientes de fontes vegetais ou animais, e substâncias orgânicas específicas denominadas húmus. Conforme destacado por Primavesi (2018), as substâncias húmicas favorecem a retenção de umidade e promovem a formação de uma estrutura benéfica ao solo (condicionadores). Por outro lado, as substâncias não humificadas representam uma significativa fonte de nutrientes para plantas e microorganismos, decompondo-se mais rapidamente em solos tropicais e de maneira mais lenta em solos temperados. Do ponto de vista químico, a MO possui locais ativos carregados eletricamente que retêm nutrientes, tornando-os mais acessíveis às plantas. Enquanto do ponto de vista biológico, a elevação dos teores de matéria orgânica do solo está diretamente associada à fonte de alimento e energia para os microorganismos do solo (PINHEIRO, 2018).

A fauna do solo, com um diâmetro corporal variando entre 100µm e > 2mm, engloba uma diversidade de organismos, incluindo ácaros, colêmbolos, miriápodes, aracnídeos, diversas ordens de insetos, alguns oligoquetos e crustáceos. A maioria dos espécimes da mesofauna, junto a muitos da macrofauna, desempenha um papel fundamental na melhoria do solo, exercendo controle sobre suas populações e contribuindo indiretamente para a decomposição da matéria orgânica ao fragmentar o material vegetal em decomposição, especialmente na mobilização de nutrientes por meio de enzimas e no aprimoramento da estrutura através da ativação da microvida (PRIMAVESI, 2021).

As análises da densidade e diversidade da mesofauna podem ser um excelente mecanismo para o levantamento do histórico de um determinado local, alvo de avaliação. Muitos destes organismos vivem em poucos metros quadrados de solo, que os tornam excelentes representantes das condições locais (RIEFF, 2014). No estudo conduzido por Almeida *et al.* (2017), foi realizada uma análise abrangente da

ocorrência e diversidade da fauna edáfica em sete diferentes tipos de uso do solo. Os resultados indicaram que sistemas que incorporam constantemente resíduos orgânicos, como a cama de aves, propicia uma maior abundância de organismos edáficos.

O carbono da biomassa microbiana (CBM) é essencial na fração de carbono lábil do solo e desempenha função importante na dinâmica do carbono orgânico, a qual serve como um indicador de mudanças na estabilização do carbono do solo e na dinâmica dos nutrientes após as práticas de manejo (FERREIRA *et al.*, 2007). O CBM é um indicador muito sensível em relação aos ciclos de energia e transferência de nutrientes, o que reflete pequenas alterações na matéria orgânica do solo antes mesmo das mudanças de carbono total. Entretanto, determinações do CBM não fornecem indicações sobre os níveis de atividade das populações microbianas do solo, ou seja, podem ocorrer situações em que os solos apresentem elevadas quantidades de biomassa inativa e vice-versa (MENDES *et al.*, 2019).

Outro indicador amplamente utilizado é a respiração basal (RB), que se origina da mineralização da matéria orgânica e é estimada com base na emissão de dióxido de carbono ou na absorção de oxigênio (CREAMER *et al.*, 2014). A RB é dependente do estado fisiológico das células e reflete a atividade geral ou energia gasta pelos microrganismos do solo. Pode apresentar uma flutuação natural, pois é influenciada por fatores ambientais, como umidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes (MENDES *et al.*, 2019).

Por outro lado, o potencial das análises da atividade das enzimas como indicadores de qualidade de solo, especialmente Arilsulfatase (ARIL) e β -glicosidase (GLI), tem sido verificado no Cerrado e no Sul do País (MENDES *et al.*, 2019a). No solo, as enzimas participam como catalizadoras das reações metabólicas intracelulares, que ocorrem nos seres vivos. Além disso, as enzimas extracelulares desempenham papel fundamental em várias reações que resultam na decomposição de resíduos orgânicos (ligninases, celulasas, proteases, glucosidases, galactosidases), ciclagem de nutrientes (fosfatases, amidases, urease, sulfatase), formação da matéria orgânica do solo (MOS) e da estrutura do solo (MENDES *et al.*, 2019a).

Todas as reações bioquímicas envolvidas nos processos de ciclagem de nutrientes mediados pelos microrganismos, raízes das plantas e animais do solo, são

catalisadas por enzimas, que são proteínas com alto poder de ativação específica (TABATABAI, 1994). A arilsulfatase, por exemplo, hidrolisa ésteres de sulfato e é uma enzima essencial para a mineralização de enxofre orgânico do solo. Por esse motivo, é utilizada com frequência como um indicador de fertilidade do solo (BOURANIS *et al.*, 2019). Enquanto a β -glicosidase realiza a hidrólise limite da celulose e tem como produto final a glicose, importante fonte de carbono (C) para os microorganismos (BALOTA *et al.*, 2013). Esta enzima tem papel importante nos solos porque está envolvida na hidrólise e biodegradação de vários resíduos orgânicos nos agroecossistemas.

Em 2003, foi pioneiramente avaliada a biomassa e atividade microbiana bem como o papel das enzimas β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase em solos sob vegetação nativa e cultivado com hortaliças através do sistema orgânico e convencional, em três localidades do Distrito Federal – DF. O estudo constatou que as propriedades microbiológicas foram indicadores sensíveis às alterações ocorridas no solo através dos sistemas de manejo. Isto é, o carbono da biomassa microbiana e a atividade da arilsulfatase foram os indicadores microbiológicos mais sensíveis para diferenciar sistemas de manejo orgânico e convencional quanto à qualidade do solo (BERTUCCINI, 2003; MENDES *et al.*, 2019).

Mendes *et al.* (2021) também avaliaram a atividade enzimática em áreas de plantio direto sob diferentes sucessões: soja/pousio e soja/braquiária. Os resultados mostraram que a sucessão soja/braquiária incrementou em 4 e 8 vezes as atividades da β -glicosidase e da arilsulfatase, respectivamente em relação a sucessão soja/pousio. Portanto, embora as duas áreas apresentassem características químicas semelhantes, os resultados da atividade das enzimas mostraram que o componente biológico era completamente distinto. O solo biologicamente mais ativo, decorrente da inserção da braquiária no sistema de produção, foi também o mais produtivo. A pesquisa evidenciou a sensibilidade dos bioindicadores arilsulfatase e β -glicosidase para detectar mudanças nos sistemas de manejo, com diferenças bem mais acentuadas que as observadas nos teores de MOS.

2.4 Tecnologia BioAS, IQS_{FERTBIO} e Modelo de quatro quadrantes

Nos últimos 20 anos, o grupo de pesquisa em Bioindicadores de Qualidade de Solo da Embrapa Cerrados tem se dedicado à seleção de bioindicadores robustos para

permitir que agricultores brasileiros monitorem a saúde de seus solos (MENDES *et al.*, 2021). Experimentos de longa duração conduzidos por Lopes *et al.* (2013a, 2013b), em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, revelaram correlações positivas entre atributos microbiológicos, rendimento relativo de grãos (RRA) e matéria orgânica do solo, permitindo a definição de classes de suficiência para cada atributo. Essa categorização foi realizada por meio de análises de regressão, estabelecendo critérios com base no RRA e na MOS: $\leq 40\%$ para baixo, de 41% a 80% para moderado e $> 80\%$ para adequado. Pela primeira vez, foram estabelecidos níveis críticos para o carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal e atividade das enzimas β -glicosidase e celulase (ciclo do C), fosfatase ácida (ciclo do P) e arilsulfatase (ciclo do S) (MENDES *et al.*, 2015).

Determinados parâmetros microbiológicos são essenciais em um conjunto mínimo de atributos para avaliar a qualidade do solo, a padronização das profundidades e épocas de amostragem, tanto para microbiologia quanto para fertilidade química, somado a uniformização do pré-tratamento das amostras de solo, tornaria a adoção por parte dos agricultores significativamente mais acessível e atrativa (MENDES *et al.*, 2015). A tradicional amostra de solo para análise em laboratório dava o retorno apenas dos aspectos químicos (componentes de acidez, macro e micronutrientes) e alguns aspectos físicos (em grande parte, determinações dos teores de argila, silte e areia) do solo. Nesse sentido, emergiu o conceito $FERT_{BIO}$ de amostragem de solo como resultados de estudos relacionados à atividade das enzimas e a secagem de amostras de solo ao ar (LOPES *et al.*, 2018).

O conceito $FERT_{BIO}$ incluiu as análises tradicionais, o cálculo do desempenho de três funções essenciais do solo relativas a nutrientes, que consistem na função ciclar (F1); função armazenar (F2) e função suprir (F3). Este cálculo foi baseado no modelo conceitual proposto por Karlen & Stott (1994), em que funções produtivas e/ou ambientais são atribuídas ao solo (MENDES *et al.*, 2021). A função ciclar nutrientes é a base para o cálculo do $IQS_{BIOLÓGICO}$ (Índice de Qualidade Biológica do Solo), sendo as outras duas funções utilizadas no cálculo do $IQS_{QUÍMICO}$ (Índice de Qualidade Química do Solo). Por sua vez, esses dois índices são aplicados no cálculo do $IQS_{FERT_{BIO}}$ (Índice de Qualidade do Solo “ $FERT_{BIO}$ ”), que expressa a qualidade química e biológica do solo em um único índice (MENDES *et al.*, 2021).

Os estudos supracitados resultaram na BioAS, uma tecnologia de bioanálise de solo lançada em 2020, que utiliza duas enzimas como indicadores de qualidade para diagnosticar a saúde do solo (MENDES *et al.*, 2021). A utilização das enzimas Arilsulfatase (Aril) e da β -glicosidase (GLI) na BioAS corrobora para a avaliação de aspectos abalizados do funcionamento biológico do solo. Elas estão associadas aos ciclos do enxofre e do carbono e estão relacionadas, direta ou indiretamente, ao potencial produtivo e à sustentabilidade do uso do solo. Valores elevados de atividade enzimática, por exemplo, indicam sistemas de produção e/ou práticas de manejo do solo adequadas e sustentáveis. Ao contrário, valores baixos servem de alerta para uma reavaliação do sistema de produção na direção da adoção de boas práticas de manejo (MENDES *et al.*, 2019a).

Com o uso da tecnologia BioAS, um laudo denominado Módulo da Interpretação da Qualidade do Solo – MIQS é gerado e a interpretação desses indicadores biológicos foi desenvolvida a partir de algoritmos baseados em análises de regressão, considerando o nível de atividade enzimática, tipo e textura do solo, rendimento de grãos e MOS (MENDES *et al.*, 2021). No MIQS são apresentados os valores de atividade enzimática, os índices de qualidade de solos (IQS_{BIOLOGICO}, IQS_{QUIMICO} e IQS_{FERTBIO}) e os escores das funções ciclagem de nutrientes (F1), armazenamento de nutrientes (F2) e suprimento de nutrientes. Tanto os índices quanto as funções recebem notas que variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o aspecto da qualidade do solo associado. Essas notas são também representadas em um padrão cromático “semafórico”, onde laranja ou vermelho, indicam valores inadequados (0 a 0,20; 0,21 a 0,40), amarelo, valores intermediários (0,41 a 0,60) e verde claro ou verde escuro significam valores adequados (0,61 a 0,80; 0,81 a 1,0).

A F1 tem como objetivo estimar o desempenho da atividade biológica e os processos dela derivados direta ou indiretamente, como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da matéria orgânica do solo (MOS). O desempenho dessa função foi acessado pela atividade da β -glicosidase e arilsulfatase com base em estudos anteriores (LOPES *et al.*, 2013; MENDES *et al.*, 2019a; 2019b). O F2 visa quantificar o tamanho do “reservatório” de nutrientes do solo, que está relacionado principalmente à textura, qualidade das argilas e teor e qualidade da MOS. Esta função foi acessada por carbono orgânico do solo (COT) e medições potenciais de capacidade de troca catiônica (CTC). Por fim, F3 avalia a qualidade do conteúdo do

“reservatório” de nutrientes do solo, envolvendo tanto aspectos relacionados à acidez do solo quanto à capacidade do solo em fornecer vários dos principais macronutrientes. Esta função foi acessada por indicadores de disponibilidade de nutrientes (cátions básicos, P disponível, soma de bases e saturação por bases), bem como indicadores de acidez do solo (pH, acidez trocável (Al^{3+}) e acidez titulável em pH 7,0 ($H + Al$)) (MENDES *et al.*, 2021).

Outra funcionalidade atribuída à tecnologia BioAS foi o Modelo de Quatro Quadrantes, proposto por Chaer *et al.* (2023), concebido para avaliar as tendências de carbono no solo (perda, ganho ou estabilidade) em uma área específica, com base na relação entre o carbono orgânico do solo (COT) e a atividade média das enzimas GLI e Aril por unidade de COS (atividade enzimática específica média – AEM). Esse método se fundamenta em quatro premissas essenciais para compreender as tendências de ganho ou perda de carbono no solo.

A primeira premissa destaca a maior sensibilidade das enzimas GLI e Aril às variações no tipo de uso do solo ou a mudanças no sistema de manejo, comparadas ao COS. A segunda premissa aponta para uma correlação na direção das mudanças na atividade de GLI, Aril e no COT, embora as enzimas, devido à sua alta sensibilidade como bioindicadores, apresentem uma resposta mais rápida. A terceira premissa destaca que áreas sujeitas às mesmas práticas de uso e manejo do solo ao longo de um período prolongado atingem um equilíbrio entre a atividade das enzimas GLI e Aril, e o COT. Por fim, a quarta premissa ressalta que, em virtude da sensibilidade das enzimas, áreas que experimentam mudanças recentes e substanciais nas práticas de manejo agrícola podem manifestar um desacoplamento do equilíbrio entre a atividade enzimática e o COT, indicando uma resposta mais imediata e específica a alterações no ambiente do solo.

O quadrante 1 (Q1) representa solos de alta qualidade, saudáveis e com elevados níveis de AEM e COT, resultado da adoção de boas práticas de manejo (BPM) ao longo do tempo. Contudo, a introdução de práticas de manejo inadequadas pode rapidamente reduzir a AEM, deslocando o solo de Q1 para Q2. Persistindo as práticas inadequadas, o COT diminui, alcançando um estado de equilíbrio inferior em Q3, caracterizado por baixa qualidade. Solos de baixa qualidade podem ser recuperados com práticas de manejo conservacionistas, levando a uma transição para o quadrante 4 (Q4, alta atividade enzimática/baixo COT). Em longo prazo, o COT atinge um novo

patamar, compatível com a atividade enzimática anterior, levando o solo ao estado de equilíbrio de alta qualidade em Q1.

De acordo com Mendes *et al.* (2023) um estudo abrangente utilizando um conjunto de dados de amostragem de solos provenientes de cinco fazendas comerciais situadas na região do Cerrado revelou que as áreas sob integração lavoura-pecuária, com práticas de plantio direto desde 2015 e pastagem de braquiária onde animais pastam, foram classificadas em Q1. Esse quadrante indica solos com níveis elevados e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (alto COT/alto AEM). Por outro lado, as amostras provenientes de áreas recentemente convertidas para agricultura (10 anos) e sob sistema intensivo de produção de soja/algodão, sem culturas de cobertura, foram posicionadas em Q2. Neste quadrante, os solos têm baixa atividade biológica e propensão à perda de carbono orgânico (alto COS/baixo AEM). Com exceção de uma amostra localizada na interseção entre Q3 e Q4, as demais foram categorizadas em Q3, indicando predominantemente solos com níveis baixos e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (baixo COT/baixo AEM). Por fim, as últimas amostras, representativas de fazendas em que soja e milho são plantados em sucessão com uma mistura de braquiária e sorgos foram classificados em Q4. Esse quadrante sugere solos com alta atividade biológica e propensão ao ganho de carbono orgânico (baixo COT/alto AEM).

3 Material e métodos

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em solos de quatro agroecossistemas familiares sob diferentes usos, denominados de HORTA (cultivados com hortaliças) e LAVOURA (cultivados com grãos/mandioca). Dois agroecossistemas estão sob manejo convencional (denominados agroecossistemas 1 e 2) e os outros dois estão sob o manejo agroecológico (denominados agroecossistemas 3 e 4). Em cada um dos agroecossistemas utilizou-se uma área de mata como um solo referência. Todas as áreas estão localizadas no município de São Lourenço do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, nos distritos de Faxinal, Boqueirão, Boa Vista e Harmonia, respectivamente.

O clima da região é do tipo Cfa, com verão quente, apresentando temperaturas médias anuais entre 16 e 18°C e precipitação anual entre 1.300 e 1.600 milímetros (ALVARES *et al.*, 2013). Os solos da região são classificados como Argissolos, conforme Santos *et al.* (2018). Os teores de argila, areia e silte e a classe textural dos solos na camada de 0,00-0,10 m, em cada um dos agroecossistemas, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores de argila, areia e silte e classe textural dos solos na camada de 0,00-0,10 m, em cada um dos agroecossistemas familiares.

Usos do solo	Argila	Areia g kg ⁻¹	Silte	Classe Textural
----- HORTA -----				
Agroecossistema 1	15,5	68,7	15,8	Franco arenosa
Agroecossistema 2	19,2	67,1	13,7	Franco arenosa
Agroecossistema 3	22,4	56,9	20,7	Franco argilo arenosa
Agroecossistema 4	14,9	67,8	17,3	Franco arenosa
----- LAVOURA -----				
Agroecossistema 1	16,1	68,3	15,6	Franco arenosa
Agroecossistema 2	23,0	64,5	12,5	Franco argilo arenosa
Agroecossistema 3	28,0	56,2	15,8	Franco argilo arenoso
Agroecossistema 4	23,0	60,4	16,6	Franco argilo arenosa
----- MATA -----				
Agroecossistema 1	16,7	67,1	16,2	Franco arenosa
Agroecossistema 2	11,1	77,0	11,9	Franco arenosa
Agroecossistema 3	21,7	57,9	20,4	Franco argilo arenoso
Agroecossistema 4	21,7	61,9	16,4	Franco argilo arenosa

Em cada um dos agroecossistemas foi realizado um questionário aberto elaborado pela autora para entendimento do histórico de uso e manejo do solo em cada uma das áreas produtivas (Anexo A).

3.1.1 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 1 (síntese baseada no questionário aberto)

O agroecossistema 1 está localizado entre as coordenadas geográficas $31^{\circ}10'53.8''\text{S}$ e $52^{\circ}24'44.6''\text{W}$ e a sua área total abrange 10 hectares. As áreas agrícolas objeto de estudo estão distribuídas da seguinte forma: 3 hectares destinados ao cultivo de hortaliças e 2,5 hectares dedicados ao cultivo de grãos. A área de mata abrange 5 hectares (Figura 1).

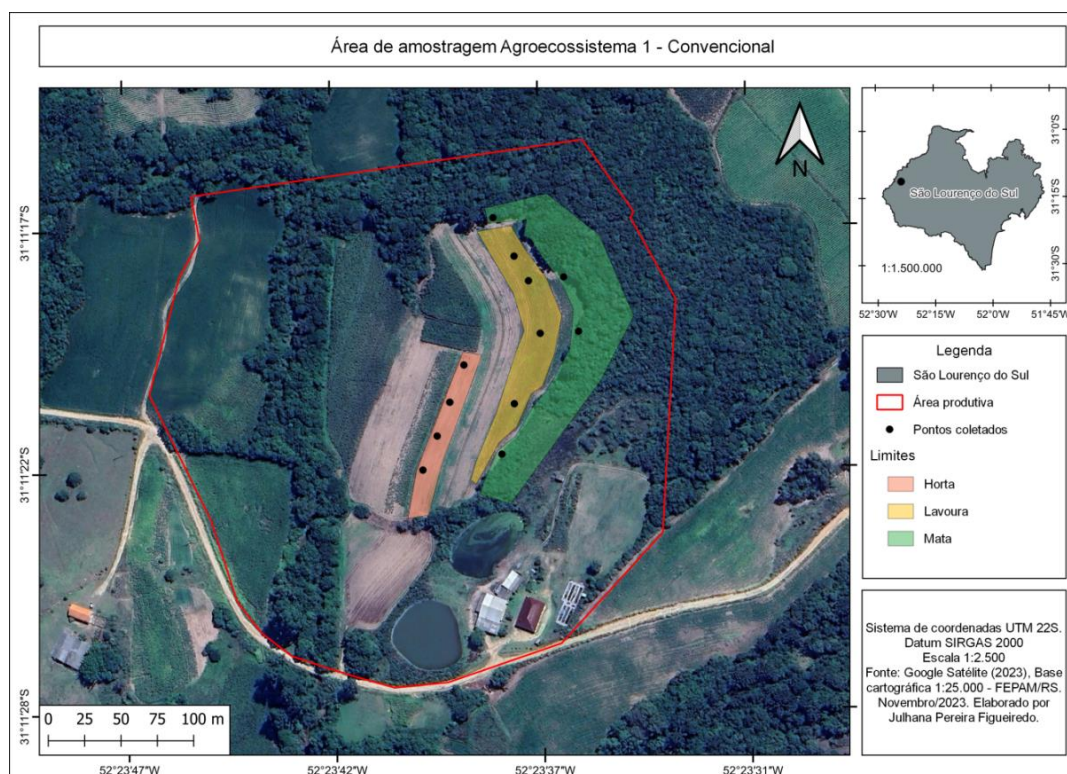


Figura 1 - Usos de solos do agroecossistema 1, localizado no distrito de Faxinal em São Lourenço do Sul.

Ao longo dos quatro anos de uso do solo, na área de HORTA foram cultivadas as seguintes hortaliças: alface, beterraba, brócolis, cenoura, couve, couve-flor, melão, melancia, tomate, pimentão e pepino para conserva. Na área de LAVOURA, foram plantados anualmente abóbora, feijão e milho doce. O manejo adotado neste agroecossistema é o convencional, isto é, baseia-se na utilização de adubação

química (NPK de diferentes formulações) e insumos químicos de caráter curativo (agrotóxicos para o controle de insetos não desejáveis e doenças). Apesar disso, o manejo incorpora práticas ecológicas, como o uso de esterco de aves, rotação de culturas e calagem, integrando-as ao revolvimento anual do solo. De acordo com o manejo adotado, esse agroecossistema foi denominado de “Convencional 1” para ambos os usos do solo.

3.1.2 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 2 (síntese baseada no questionário aberto)

O agroecossistema 2 está localizado entre as coordenadas geográficas $31^{\circ}17'58.0''\text{S}$ e $52^{\circ}08'19.0''\text{W}$ e a sua área total abrange 15 hectares. As áreas agrícolas objeto de estudo estão distribuídas da seguinte forma: 0,5 hectares destinados ao cultivo de hortaliças e 10 hectares dedicados ao cultivo de grãos. A área de mata abrange 2 hectares (Figura 2).

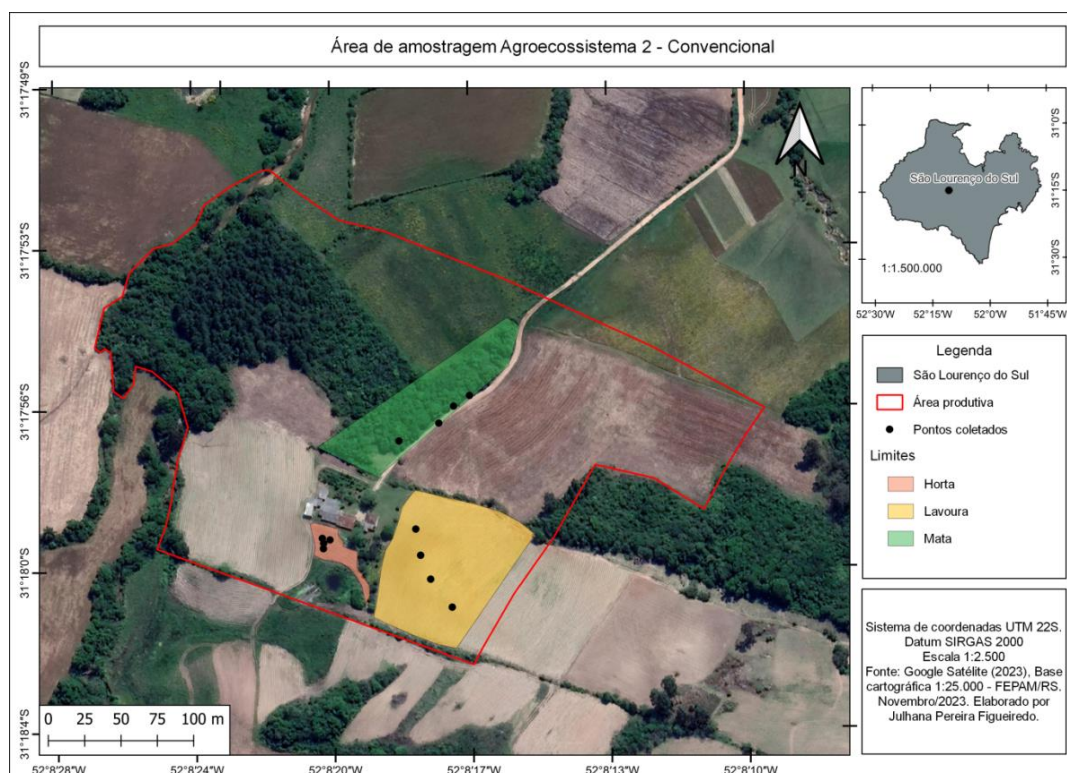


Figura 2 - Usos de solos do agroecossistema 2, localizado no distrito de Boqueirão em São Lourenço do Sul.

Em dez anos de uso do solo, na área de HORTA foram cultivadas as seguintes hortaliças: alface, beterraba, brócolis, cenoura, couve, couve-flor, repolho e temperos.

Na área de LAVOURA, a qual é utilizada em torno de quinze anos, foram plantados anualmente o milho e/ou fumo (verão) e aveia (no inverno). O manejo adotado neste agroecossistema também foi o convencional, isto é, baseia-se na utilização de adubação química (NPK de diferentes formulações e adubo organomineral) e insumos químicos de caráter curativo. Além disso, práticas ecológicas, como o uso de esterco de aves, rotação de culturas e calagem também são adotadas. O revolvimento anual do solo é utilizado em ambos os usos. De acordo com o manejo adotado, esse agroecossistema foi denominado de “Convencional 2” para ambos os usos do solo.

3.1.3 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 3 (síntese baseada no questionário aberto)

O agroecossistema 3 está localizado entre as coordenadas geográficas 31°14'48”S e 52°10'28”W e a sua área total abrange 7,5 hectares. As áreas agrícolas objeto de estudo estão distribuídas da seguinte forma: 300 m² destinados ao cultivo de hortaliças e 700 m² dedicados ao cultivo de grãos. A área de mata abrange 1 hectare (Figura 3).

Desde a aquisição da propriedade, há seis anos, dedicou-se três anos ao pousio, em ambas as áreas agrícolas, uma vez que os antigos proprietários cultivavam fumo, batata inglesa e soja. Nos últimos três anos, a área destinada para a HORTA foi cultivada com as seguintes hortaliças: alface, beterraba, cenoura, couve-flor, rúcula e temperos. Na área de LAVOURA, foram cultivados anualmente o feijão e milho. O manejo adotado neste agroecossistema é o agroecológico, isto é, baseia-se na aplicação somente de esterco de aves e não há uso de agrotóxicos. Nestas áreas há sempre a prática de rotação de culturas e entre os cultivos de verão (tanto na área de HORTA como de LAVOURA), utiliza-se o feijão tremoço como cobertura de inverno. De acordo com o histórico de produção, nunca foi aplicado calcário em ambas as áreas agrícolas avaliadas, e a cada três meses (ao final do cultivo das hortaliças), realiza-se a aplicação de esterco de aves (peru e galinha). O revolvimento do solo é feito anualmente em ambas as áreas cultivadas. De acordo com o manejo adotado, esse agroecossistema foi denominado de “Agroecológico 3” para ambos os usos do solo.

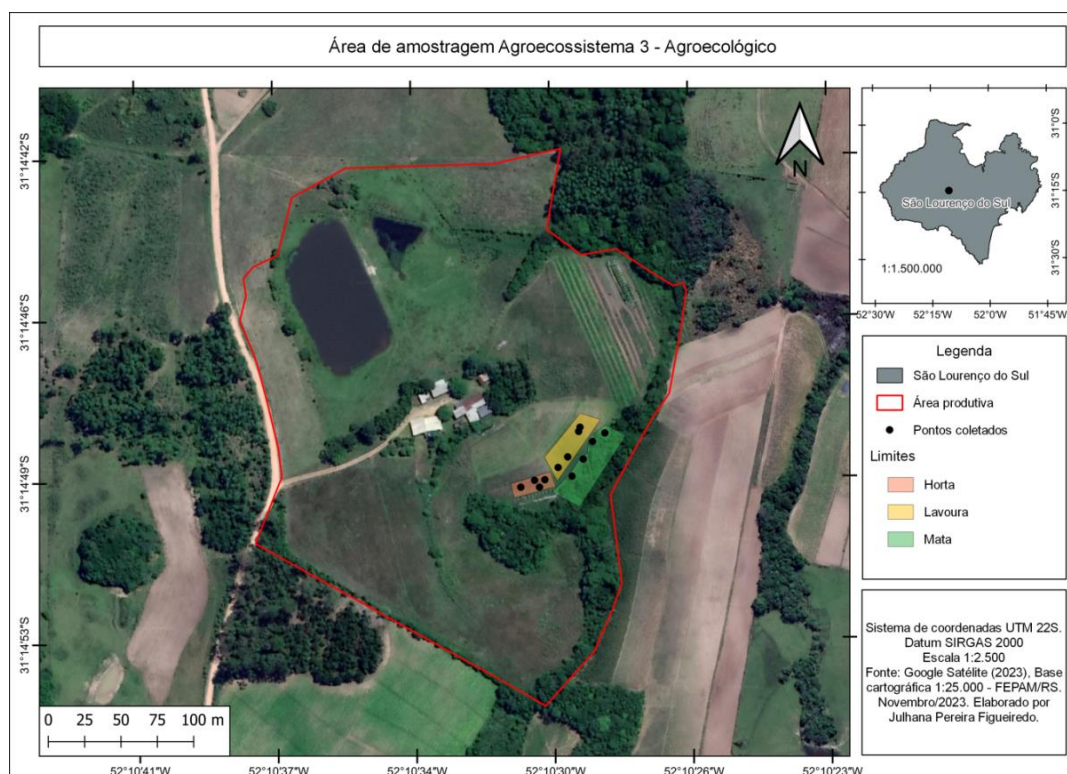


Figura 3 - Usos de solos do agroecossistema 3, localizado no distrito de Boa Vista em São Lourenço do Sul.

3.1.4 Uso atual e histórico de manejo do agroecossistema 4 (síntese baseada no questionário aberto)

O agroecossistema 4 está localizado entre as coordenadas geográficas $31^{\circ}15'18.2''S$ e $52^{\circ}17'52.8''W$ e a sua área total abrange 29 hectares. As áreas agrícolas objeto de estudo estão distribuídas da seguinte forma: 0,5 hectares voltados ao cultivo de hortaliças e 0,5 hectares dedicados à lavoura. A área de mata abrange 6 hectares (Figura 4).

Nos últimos dez anos de uso do solo, a área destinada para HORTA foi cultivada com as seguintes hortaliças: abóbora, batata, brócolis, couve, couve-flor, morango, melão, melancia, tomate, pimentão e diversas espécies de Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC). Na área de LAVOURA, a qual é utilizada há sete anos, é plantado anualmente mandioca. O manejo adotado neste agroecossistema também é o agroecológico, isto é, baseia-se na aplicação de adubação orgânica e no uso de insumos biológicos, tanto de caráter preventivo quanto curativo (controle de insetos não desejáveis e doenças). Diversos esterco, provenientes de aves e bovinos, pós de rochas e calcário, são utilizados, assim como os microrganismos eficientes (EM), que são empregados como inoculantes para estimular a microbiota do solo. O

revolvimento do solo também é realizado em ambas as áreas. De acordo com o manejo adotado, esse agroecossistema foi denominado de “Agroecológico 4” para ambos os usos do solo.

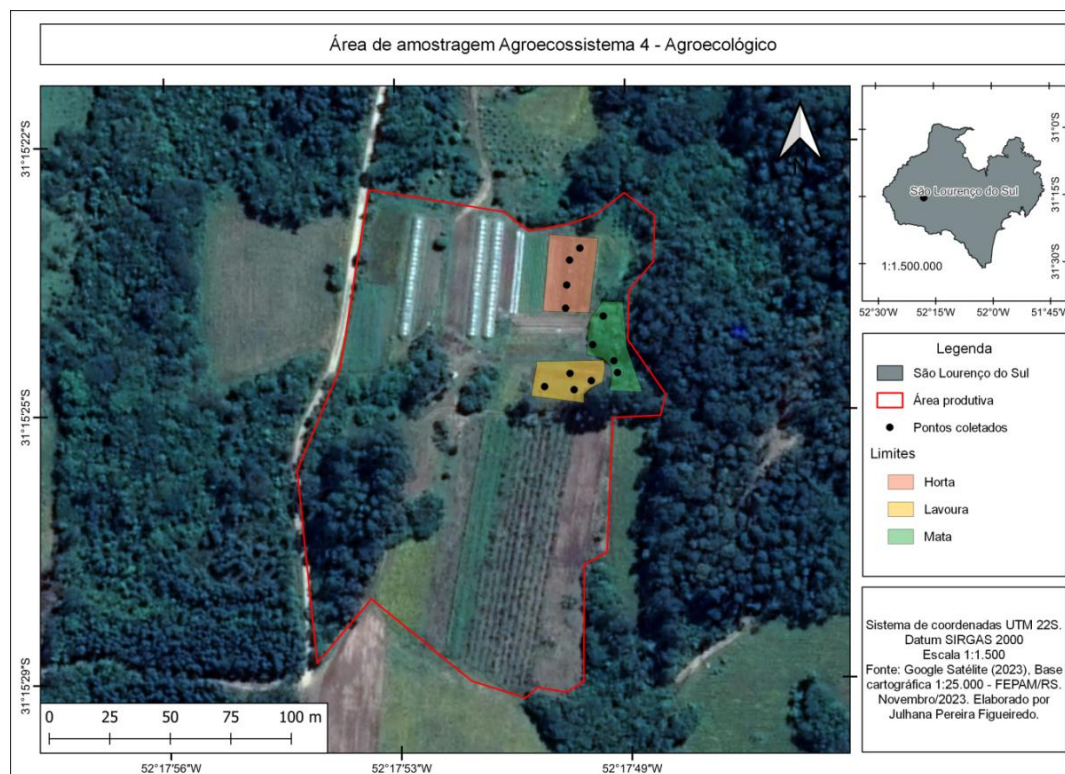


Figura 4 - Usos de solos do agroecossistema 4, localizado no distrito de Harmonia em São Lourenço do Sul.

3.2 Amostragem do solo e análises

Em 23 de março de 2023, realizou-se a coleta de amostras de solo na camada de 0,00-0,10 m, em cada um dos agroecossistemas supracitados, tanto nas áreas agrícolas (HORTA e LAVOURA) quanto nas áreas sob o solo referência (MATA). Em cada uma das áreas foram coletadas quatro amostras de solo com estrutura não preservada (Figura 5), com o objetivo de determinar o pH do solo, os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), carbono orgânico total (COT), a atividade das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase, e o teor de carbono da biomassa microbiana (CBM) e a respiração basal (RB).

Os parâmetros de fertilidade do solo foram analisados no Laboratório de Química do Departamento de Solo da UFPel seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017). O pH do solo foi determinado em água na relação 1:1 (solo:água) e os teores de Ca e Mg trocáveis foram extraídos com $KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$ e determinados no

espectrofotômetro de absorção atômica. Os teores de K e P disponíveis foram estimados pelo método Mehlich⁻¹ e analisado por fotometria de chama. Os valores de pH e os teores de nutrientes foram interpretados de acordo com o Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).



Figura 5 - Amostras de solo no agroecossistema 1 (a), agroecossistema 2 (b), agroecossistema 3 (c) e agroecossistema 4 (d).

O teor de COT do solo foi avaliado pelo método de Walkley-Black, que envolve uma etapa de oxidação com dicromato de potássio e subsequente titulação com sulfato ferroso amoniacal. Os valores de COT foram multiplicados por 1,724 para a obtenção do teor de matéria orgânica do solo, visando a sua interpretação de acordo com o Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).

As amostras destinadas às análises da atividade enzimática da β -Glicosidase e Arilsulfatase foram secas ao ar em temperatura ambiente por duas semanas,

trituras e peneiradas em malha de 2 mm, conforme o protocolo estabelecido por Mendes *et al.* (2019a). Em seguida, as amostras foram devidamente acondicionadas em embalagens zip lock e encaminhadas para o Laboratório de Microbiologia do Solo da EMBRAPA CERRADOS. Um $IQS_{FERTBIO}$, que expressa à qualidade química e biológica do solo, foi gerado para cada um dos usos do solo, independente do manejo utilizado. De acordo Mendes *et al.* (2021), este índice, indica se a qualidade biológica e química de um solo está Muito Baixa ($IQS_{FERTBIO}$ de 0 a 0,20); Baixa ($IQS_{FERTBIO}$ de 0,21 a 0,40); Média ($IQS_{FERTBIO}$ de 0,41 a 0,60); Alta ($IQS_{FERTBIO}$ de 0,61 a 0,80) e Muito Alta ($IQS_{FERTBIO}$ de 0,81 a 1,00). A base de cálculo do $IQS_{FERTBIO}$ deriva do IQS biológico (derivado da função CICLAR nutrientes, isto é, considera a atividade das enzimas β -Glicosidase e Arilsulfatase) e do IQS químico (derivado das funções ARMAZENAR (considera o teor de MO e a CTC potencial) e SUPRIR nutrientes (considera a Acidez [pH,Al,H+Al, m%], o suprimento de bases [Ca, Mg, K e V%] e suprimento de P).

O cálculo da atividade enzimática específica média (AEEM) foi realizado para cada um dos usos do solo, a fim de normalizar a atividade das enzimas em função do teor de COT. Assim, o valor da atividade de cada enzima (β -Glicosidase e Arilsulfatase) foi dividido pelo COT, resultando na atividade específica da β -Glicosidase (AE-GLI) e da Arilsulfatase (AE-ARIL), respectivamente. Em seguida, com base na média de AE-GLI e AE-ARIL, foi calculada a AEEM (CHAER *et al.*, 2023).

O modelo de quatro quadrantes foi aplicado para cada um dos usos do solo (HORTA, LAVOURA e MATA), utilizando os limites de COT de $15,5 \text{ g kg}^{-1}$ e AEEM de $4,3 \text{ g PMP kg}^{-1} \text{ COT h}^{-1}$, estipulados por Chaer *et al.* (2023). Os pontos de corte supracitados, utilizados no modelo de quatro quadrantes, foram obtidos a partir de experimentos em áreas de grãos cultivados em Latossolos no bioma Cerrado (CHAER *et al.*, 2023). Esses mesmos pontos de corte foram utilizados neste estudo visando testar a aplicabilidade do modelo de quatro quadrantes para outros usos de solo em outros biomas. O modelo de quatro quadrantes indica se os manejos agrícolas estão deixando os solos “saudáveis” (Alta atividade enzimática e Alto COT), “adoecidos” (Baixa atividade enzimática e Alto COT, contudo com tendência de perda de COT), “doentes” (Baixa atividade enzimática e Baixo COT) e em “recuperação” (Alta atividade enzimática e Baixo COT, contudo, em tendência de ganho de COT) (MENDES *et al.*, 2023).

Os teores de CBM e a respiração basal do solo (RB) foram determinados em amostras de solo que ficaram preservadas a 4°C até o momento da análise. Para a análise do CBM, 40 g de solo úmido foram pesados em duplicatas. Uma das repetições foi irradiada em forno de micro-ondas, seguindo a metodologia proposta por Ferreira *et al.* (1999). Tanto nas amostras irradiadas quanto naquelas não-irradiadas, foi adicionado 50 mL de sulfato de potássio (K_2SO_4) 0,5 M, seguidas de uma agitação de 100 rpm durante 30 minutos e uma centrifugação de 10 minutos. Após, em uma alíquota de 25 mL do sobrenadante foi adicionado 5 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) 1,25 molc L⁻¹ e 10 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Por fim as amostras foram tituladas com sulfato ferroso ($FeSO_4$) 0,25 molc L⁻¹. A avaliação da RB seguiu a metodologia de Anderson e Domsch (1978), no qual foram adicionados em 100 g de solo fresco, 20 mL de NaOH 0,1 molc L⁻¹. Após 21 dias, a solução foi titulada com HCl 1 molc L⁻¹.

Para a identificação da mesofauna, 4 amostras de solo foram coletadas na camada de 0,00-0,10 m de cada solo em diferentes usos (HORTA, LAVOURA e MATA), utilizando cilindros de aço com cerca de 567 cm³, totalizando 48 amostras. No laboratório de Biologia do Departamento de Solos da UFPel, as amostras foram submetidas ao método do Funil Extrator de Tullgren (Bachelier, 1978), que foram cuidadosamente dispostas em peneiras com malha de 2 mm posicionadas na parte superior de funis individuais. Em seguida, lâmpadas de 40 watts foram acesas sob as amostras de solo por um período de 48 horas. A ação conjunta da luz e do calor induz a fuga dos organismos, que são capturados pelo copo coletor contendo álcool 70 %, instalado na base dos funis. A quantificação e classificação dos organismos da mesofauna foram realizadas de acordo com a metodologia proposta por Gallo *et al.* (1988).

3.3 Análise estatística

As médias e o desvio padrão de cada uma das variáveis de solo foram apresentados para cada uso do solo (HORTA, LAVOURA). Essas foram comparadas com o solo referência (MATA) de cada agroecossistema, utilizando diferenças percentuais (positivas ou negativas). A relação entre as variáveis químicas e biológicas para cada manejo (convencional e agroecológico) foi avaliada pela correlação de Pearson ($p < 0,05$).

4 Resultados e Discussão

4.1 Atributos químicos e sua relação com a qualidade do manejo do solo

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos atributos químicos do solo sob diferentes usos agrícolas em agroecossistemas manejados de forma convencional e agroecológica. Nas áreas de HORTA observou-se que em nenhum dos agroecossistemas o valor de pH do solo atingiu o valor de referência recomendado para as hortaliças (6,0), de acordo com o CQFS – RS/SC (2016). É importante destacar que nas áreas sob manejo convencional (1 e 2) os valores de pH foram muito próximos a 5,0. Por outro lado, os agroecossistemas agroecológicos (3 e 4) apresentaram valores que variaram de 5,5 a 7,3. Da mesma forma como observado para as áreas de HORTA, os solos sob LAVOURA, cultivados com feijão (convencional 1) e milho (convencional 2) apresentaram valores abaixo do recomendado para o cultivo de grãos (6,0) (Tabela 2).

Os baixos valores de pH observados nos agroecossistemas 1 e 2 (convencionais) sob HORTA e LAVOURA, e no agroecossistema 4 (agroecológico) sob HORTA indicam que a calagem utilizada pelos agricultores, relatados no item 4.1, já não produz mais os efeitos benéficos ao solo. De acordo com Primavesi (2021), valores baixos de pH no solo podem contribuir para que o alumínio presente se torne trocável, podendo causar plasmólise nas células radiculares e promover a desidratação das plantas de interesse.

Na área sob manejo agroecológico 4, a área de LAVOURA (sob o cultivo de mandioca), o solo com um pH de 4,9 (Tabela 2), não se mostra um problema, considerando que a mandioca é uma cultura tolerante a acidez do solo, portanto, sem pH de referência (CQFS – RS/SC, 2016). No agroecossistema 3 (agroecológico), tanto sob o uso de HORTA como de LAVOURA, não há relato de uso de calagem na área por pelo menos 6 anos (item 4.1). Contudo, os valores de pH estão muito próximos de 6 (5,7 na área de LAVOURA) ou superiores a 7 (7,3 na área de HORTA) (Tabela 2), o que indica uma adição excessiva de adubação orgânica (esterços), adotada há 3 anos. Embora o uso de esterços de aves (peru e galinha) seja utilizado em ambas as áreas, especificamente na área de HORTA, esta é realizada a cada três meses, ao final do cultivo das hortaliças (item 4.1).

Tabela 2 - Valores médios de pH em água e teores médios de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) de solos sob diferentes usos (HORTA, LAVOURA e MATA) e manejos (convencional e agroecológico) em quatro agroecossistemas familiares.

Uso	Manejo	pH em água	Ca	Mg	K	P
			cmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³	
Horta	Convencional 1	4,8 ± 0,08	3,97 ± 0,85	1,30 ± 0,15	144,9 ± 15,7	63,2 ± 5,50
	Δ Ref *	-9,81%	-19,50%	-59,30%	38,80%	512%
	Convencional 2	5,1 ± 0,43	5,53 ± 0,8	2,77 ± 0,49	128,4 ± 18,6	91,7 ± 5,48
	Δ Ref **	-8,97%	45,90%	27,38%	82,50%	794%
	Agroecológico 3	7,3 ± 0,10	9,82 ± 0,9	8,88 ± 0,69	273 ± 50,7	186 ± 29,52
	Δ Ref ***	22,36%	34,10%	92,20%	63,90%	230%
	Agroecológico 4	5,5 ± 0,18	4,96 ± 0,4	1,48 ± 0,29	148,5 ± 32,4	52,5 ± 6,72
	Δ Ref ****	6,25%	5,10%	-47,64%	18,30%	812%
Lavoura	Convencional 1	5,1 ± 0,10	3,12 ± 0,8	0,82 ± 0,26	175,0 ± 25,2	67,7 ± 6,13
	Δ Ref *	-4,67%	-36,70%	-74,16%	67,70%	555%
	Convencional 2	5,1 ± 0,13	3,25 ± 0,5	1,77 ± 0,42	124,5 ± 23,5	84 ± 9,78
	Δ Ref **	-8,97%	-14,20%	-18,46%	77%	719%
	Agroecológico 3	5,7 ± 0,13	7,27 ± 1,2	4,5 ± 0,72	138,3 ± 22,4	48,5 ± 9,37
	Δ Ref ***	-4,64%	-0,66%	-2,60%	-17,10%	-14%
	Agroecológico 4	4,9 ± 0,10	3,37 ± 0,6	1,69 ± 0,45	150,4 ± 6,2	59,5 ± 11,44
	Δ Ref ****	-5,77%	-28,50%	-40,33%	19,80%	933%
Mata	Convencional 1*	5,4	4,93	3,18	104,3	10,3
	Convencional 2**	5,6	3,79	2,17	70,4	10,3
	Agroecológico 3***	5,9	7,32	4,62	166,9	56,4
	Agroecológico 4****	5,2	4,72	2,83	125,5	5,8

*Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema convencional 1.

** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema convencional 2.

*** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema agroecológico 3.

**** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do Agroecossistema agroecológico 4.

Cantú *et al.* (2019) também observaram que o uso de esterco contribui para o incremento de matéria orgânica no solo e, com o passar dos anos, podem aumentar os níveis de pH. Rocha *et al.* (2022) observaram resultados semelhantes, com sistemas sob manejo agroecológico apresentando pH mais alto. Isso foi atribuído ao uso do insumo Yoorin (fertilizante fosfatado que contém fósforo, cálcio, magnésio, silício e micronutrientes) e à incorporação de compostos orgânicos no solo, indicando uma influência positiva dessas práticas na modificação dos atributos químicos do solo. Santiago *et al.* (2018) observaram que a dinâmica do pH na área agroecológica é associada com a água de irrigação e maiores aportes de resíduos orgânicos que

contribuíram para elevar o pH ao longo do tempo. Da mesma forma que a acidez é preocupante para o desenvolvimento das plantas, a alcalinidade também traz sérios problemas, pois o excesso de cátions pode reduzir as colheitas devido à imobilidade do fósforo e micronutrientes (PRIMAVESI, 2021).

Em relação ao solo (MATA), o pH dos solos sob o uso de HORTA, nos manejos convencionais, foi quase 10 % inferior nos agroecossistemas 1 (-9,81 %) e 2 (-8,97 %), enquanto que sob o uso de LAVOURA os valores foram 4,64 % a 8,97 % inferiores, independente do manejo adotado (convencional ou agroecológico). Por outro lado, o solo sob o uso de HORTA nos manejos agroecológicos (agroecossistemas 3 e 4) apresentou valores de pH superiores (22,36 % no agroecossistema 3 e 6,25 % para o agroecossistema 4) ao solo de MATA (Tabela 2).

Em relação aos teores de Ca e Mg dos solos sob uso de HORTA observou-se que, no manejo convencional 1, os teores foram classificados como médio e alto respectivamente (2-4 e $>1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ respectivamente), enquanto que no manejo convencional 2 e nos manejos agroecológicos 3 e 4, os teores foram classificados como altos (>4 e $>1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ respectivamente), de acordo com o CQFS – RS/SC (2016). Da mesma forma como observado para as áreas de HORTA, os solos de LAVOURA sob manejo convencional 1 e 2 e agroecológico 4, apresentaram teores médios para Ca, enquanto que no agroecossistema 3 (agroecológico), este teor foi alto. Para o Mg todos os teores foram altos, exceto no agroecossistema 1 (convencional), que apresentou um teor médio (Tabela 2).

Os teores médios e altos de Ca e Mg, mesmo em condições de pH inferiores a 6 na maioria dos agroecossistemas possivelmente advém do uso da adubação orgânica associada a rotação de culturas, práticas adotadas em todos os usos e manejos do solo, conforme exposto no item 4.1. Em estudo sobre indicadores de qualidade de solo em sistemas agroecológicos no Cerrado Mineiro, Rocha *et al.* (2022) também identificaram maiores teores de Ca e Mg em áreas de produção agroecológica em comparação com as áreas de pasto. Esses resultados possivelmente decorreram da incorporação de matéria orgânica e da diversidade de espécies nas áreas de cultivo. Nesse contexto, o estudo de Melo *et al.* (2024) corroboram com essa perspectiva ao sugerirem que a adubação orgânica com esterco eleva os cátions básicos nos agroecossistemas, promovendo condições mais propícias para a mineralização da matéria orgânica devido à maior atividade microbiana. Esses resultados estão

alinhados aos do presente estudo, uma vez que a adubação orgânica é uma prática anual, atrelada a rotação de culturas, em todos os agroecossistemas.

Importante, contudo, chamar a atenção aos valores muito elevados de Ca e Mg no solo sob HORTA (9,82 e 8,88 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ respectivamente) e LAVOURA (7,27 e 4,50 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ respectivamente), ambos sob o manejo agroecológico, evidenciando um excessivo uso de esterco de aves (peru e galinha) nestas áreas.

Quando comparados com o solo MATA, a área de HORTA do agroecossistema 1 (convencional) apresentou teores inferiores de Ca (-19,50 %) e Mg (-59,30 %). Já nos agroecossistemas 2, 3 e 4 (convencional e agroecológicos, respectivamente), os valores de Ca foram 45,90 %, 34,10 % e 5,10 % superiores ao solo de referência. Em relação aos teores de Mg, o agroecossistema 2 (convencional) e agroecossistema 3 (agroecológico) foram 27,38% e 92,20% superiores ao solo referência (MATA), enquanto que o agroecossistema 4 (agroecológico) foi 47,64 % inferior. Nas áreas de LAVOURA se observou que os teores de Ca e Mg foram inferiores ao solo referência, variando respectivamente de -36,74 % (convencional 1) a -0,66 % (agroecológico 3) e -2,60 % (agroecológico 3) a -74,16 % (convencional 1) (Tabela 2).

Na tabela 2 também se observa que os teores de K, nas áreas de HORTA, variaram de alto (convencional 2 e agroecológico 4) a muito alto (convencional 1 e agroecológico 3), enquanto que os teores de P variaram de alto (agroecológico 4) a muito alto (convencional 1 e 2 e agroecológico 3). Em relação ao uso do solo de LAVOURA, independente do manejo adotado (convencional ou agroecológico), os teores de K foram altos e os de P foram muito altos de acordo com o CQFS – RS/SC (2016). Claramente, evidencia-se um excessivo uso de adubação química e orgânica nas áreas sob manejo convencional, bem como um excesso de uso de esterco nas áreas sob manejo agroecológico, corroborando com os estudos de Santiago *et al.* (2018) que também encontraram valores altos de P em solos sob produção agroecológica e convencional devido ao uso continuado de fontes orgânicas e/ou químicas. Segundo Brady & Weil (2013), quando as fontes solúveis de P são adicionadas ao solo, por meio de adubos minerais e esterco, elas podem ser fixadas e a repetição dessa prática por muitos anos pode saturar a capacidade de fixação de P e elevar o nível de P disponível no solo até o ponto em que pode se transformar em uma fonte de poluição ambiental. Em relação ao K, apesar deste elemento não causar problemas ambientais quando sai do sistema do solo (não é tóxico e nem causa

eutrofização em sistemas aquáticas), o seu excesso modifica o equilíbrio dinâmico (homeostase) da planta, alterando sua tolerância à seca e a ataques de insetos impactando diretamente na trofobiose e, conseqüentemente, podendo resultar em perdas de produtividade (PRIMAVESI, 2021).

Em comparação com o solo de MATA, a maioria dos agroecossistemas apresentou níveis elevados de K e P. Nas áreas destinadas à HORTA, os solos registraram aumentos que variaram de 18,30 % a 82,50 % para o K e de 230 % a 812 % para o P. No caso dos solos utilizados para LAVOURA, os teores de K foram 19,80 % a 77 % superiores, enquanto os de P aumentaram de 555 % a 933 %, exceto quando submetidos ao manejo agroecológico 3 que apresentou um teor 17,10 % inferior ao solo da MATA (Tabela 2).

4.2 Atributos biológicos e sua relação com a qualidade do manejo do solo

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos atributos biológicos do solo sob diferentes usos agrícolas em agroecossistemas manejados de forma convencional e agroecológica. De acordo com o manual de adubação e calagem para os solos do RS e SC (CQFS/RS – 2016), tanto os solos sob o uso de LAVOURA, independente do manejo adotado, como os solos sob o uso de HORTA nos agroecossistemas 1 e 2 (convencionais) e no agroecossistema 4 (agroecológico) apresentaram os teores de MO baixos (<2,5 %). Somente no agroecossistema 3 (HORTA), o teor de MO foi considerado médio (2,6-5 %).

Apesar de todas as áreas utilizarem como prática a rotação de culturas e o uso de adubação orgânica (mesmo aquelas sob manejo convencional, conforme consta no item 4.1), o nível médio de MO no agroecossistema 3 (3 %), possivelmente é decorrência do uso do feijão tremoço como cobertura vegetal entre os cultivos de verão (tanto na área de HORTA como de LAVOURA). Mesmo a área de LAVOURA deste agroecossistema apresentou um teor de MO muito próximo ao médio (2,4 %). Associado a esta prática, o pouco tempo de uso do solo após um período de 3 anos de pousio de ambas as áreas (item 4.1) pode ter auxiliado nestes maiores de teores de MO. De acordo com Santos & Camargo (1999), a rotação de culturas, a cobertura vegetal e a maior permanência dos resíduos sobre o solo, seriam as condições de manejo que conduziriam à preservação da MO, à qualidade do solo e à sustentabilidade da produção agrícola.

Tabela 3 - Valores médios de matéria orgânica (MO), atividade das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase, carbono da biomassa microbiana (CBM) e da respiração basal (RB) de solos sob diferentes usos (HORTA, LAVOURA e MATA) e manejos (convencional e agroecológico) em quatro agroecossistemas familiares.

Uso	Manejo	MO %	β -glicosidase $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$	Arilsulfatase	CBM $\text{mg C kg}^{-1} \text{ solo}$	RB $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$
Horta	Convencional 1	1,2 \pm 0,8	40,1 \pm 5,6	18,8 \pm 5,5	112,3 \pm 74,8	0,39 \pm 0,31
	Δ Ref *	-47,60%	-69,80%	-96,50%	-35,95%	-52,80%
	Convencional 2	1,7 \pm 1,7	74,7 \pm 15,3	71,2 \pm 20,5	74,0 \pm 27,28	0,83 \pm 0,38
	Δ Ref **	-19,20%	-35,90%	-82,60%	26,86%	-0,31%
	Agroecológico 3	3,0 \pm 1,0	188,8 \pm 11,1	212,3 \pm 21,0	130,8 \pm 131,3	1,68 \pm 0,35
	Δ Ref ***	-3,70%	-11,70%	-27,30%	3,98%	147,19%
	Agroecológico 4	0,9 \pm 0,5	47,0 \pm 3,3	26,9 \pm 3,8	128,8 \pm 27,16	0,47 \pm 0,22
	Δ Ref ****	-75,30%	-68,70%	-86,20%	-10,05%	-70,16%
Lavoura	Convencional 1	1,3 \pm 0,8	71,2 \pm 4,7	29,6 \pm 4,8	236,5 \pm 102,2	0,66 \pm 0,30
	Δ Ref *	-40,10%	-46,50%	-94,50%	34,90%	-18,95%
	Convencional 2	1,2 \pm 1,3	103,7 \pm 17,1	24,1 \pm 6,8	64,1 \pm 47,94	0,17 \pm 0,07
	Δ Ref **	-43,30%	-10,90%	-94,10%	9,95%	-79,46%
	Agroecológico 3	2,4 \pm 1,1	121,6 \pm 12,1	121,5 \pm 14,1	294,2 \pm 143,0	0,36 \pm 0,21
	Δ Ref ***	-23,50%	-43,10%	-58,40%	133,78%	-46,45%
	Agroecológico 4	1,5 \pm 0,7	63,8 \pm 11,6	25,8 \pm 10,9	101,7 \pm 47,84	0,44 \pm 0,35
	Δ Ref ****	-59,20%	-57,50%	-86,80%	-28,96%	-72,33%
Mata	Convencional 1*	2,2	133	542,8	175,35	0,81
	Convencional 2**	2,1	116,5	408,4	58,35	0,83
	Agroecológico 3***	3,1	213,8	292,1	125,88	0,68
	Agroecológico 4****	3,6	150,1	194,8	143,23	1,58

*Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema convencional 1.

** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema convencional 2.

*** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema agroecológico 3.

**** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do Agroecossistema agroecológico 4.

Teores de MO considerados baixos indicam decomposição da MO pelo uso do revolvimento do solo. Diante do exposto, mesmo que os agroecossistemas 1 e 2 (convencional) e 4 (agroecológico), utilizem a rotação de culturas e a adubação orgânica, possivelmente o não uso de cobertura vegetal entre os cultivos de verão (que é a prática adotada no agroecossistema 3), dificulta a formação da MO nestes solos franco arenosos (Tabela 1). Além disso, a quebra dos agregados por práticas convencionais de preparo do solo (aração e gradagem) diminuem a proteção física da

MO, acelerando sua mineralização devido à maior exposição aos microrganismos (MELO *et al.*, 2024).

Em relação aos teores de MO dos solos de MATA de cada agroecossistema, observa-se que nos solos sob o uso de HORTA os teores foram 47,60 % e 19,20 % inferiores nos manejos convencionais 1 e 2, respectivamente. Por outro lado, nos manejos agroecológicos, os teores de MO foram de 3,70 % e 75,30 % inferiores nos agroecossistema 3 e 4 respectivamente. Da mesma forma, nos solos sob LAVOURA verificou-se teores de MO inferiores aos solos sob MATA (-23,50 % a -59,20 %), independente do manejo adotado (Tabela 3). Os maiores teores de MO das áreas de MATA eram esperadas, pois este atributo é oriundo da adição contínua e diversa de resíduos vegetais sem qualquer ação antrópica que possa acelerar a sua decomposição. Diferenças no nível de MO do solo também foram encontrados por Costa *et al.* (2019) onde as áreas de mata e de agrofloresta apresentaram maior teor de MO (3,4 e 4,0 %, respectivamente) em relação a áreas de cultivo agrícola (3,2 % de MO).

O solo sob o uso de HORTA no manejo agroecológico 3, o qual apresentou o maior teor de MO (3 %), também apresentou a maior atividade enzimática da β -glicosidase ($188,8 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e da Arilsulfatase ($212,3 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$). Nos demais agroecossistemas, a atividade da β -glicosidase e Arilsulfatase foi respectivamente, em ordem decrescente, de 74,7 e de 71,2 $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 2 (1,7 % MO), de 47 e 26,9 $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo agroecológico 4 (0,9 % MO) e 40,1 e 18,8 $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 1 (1,2 % MO) (Tabela 3). Por fim, o comportamento das enzimas também foi acompanhado pela RB, isto é, o maior valor foi observado sob o manejo agroecológico 3 ($1,68 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), decrescendo no manejo convencional 2 ($0,83 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), no manejo agroecológico 4 ($0,47 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e no manejo convencional 1 ($0,39 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$). Embora, a CBM tenha apresentado o maior teor no manejo agroecológico 3 ($130 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ solo}$), convergindo também com a maior atividade enzimática e teor de MO do solo, nos demais agroecossistemas este atributo não acompanhou o desempenho das enzimas. Por exemplo, em ordem decrescente, os teores de CBM foram de $128 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ solo}$ no manejo agroecológico 4, $112,32 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ solo}$ no manejo convencional 1 e $74,02 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ solo}$ no manejo convencional 2 (Tabela 3).

Assim como observado nas áreas de HORTA, o solo destinado à LAVOURA sob o manejo agroecológico 3 também apresentou o maior teor de MO (2,4 %), e a maior atividade enzimática da β -glicosidase ($121,6 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e da Arilsulfatase ($121,5 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$). Nos demais agroecossistemas, contudo, as atividades das enzimas divergiram. Isto é, enquanto que a atividade da β -glicosidase foi, em ordem decrescente, de $103,7 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 2 (1,2 % MO), de $71,2 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 1 (1,3 % MO) e $63,8 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo agroecológico 4 (1,5 % MO), a atividade da Arilsulfatase foi, em ordem decrescente, de $29,6 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 1, de $25,8 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo agroecológico 4 e $24,1 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 2. Por fim, o comportamento da CBM acompanhou o da enzima Arilsulfatase, com o maior teor observado também sob o manejo agroecológico 3 ($294,24 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), decrescendo para $236,54 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 1, de $101,75 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo agroecológico 4 e $64,16 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no manejo convencional 2. A RB não acompanhou nenhum padrão anteriormente descrito (Tabela 3).

De acordo com Mendes *et al.* (2018), a RB é um bioindicador fortemente influenciado por adições recentes de material carbonado ao solo enquanto que a CBM é a fração viva da MO. Por outro lado, a atividade enzimática total reflete tanto a atividade enzimática dos organismos vivos (fração viva da MO) como das enzimas abiônicas (enzimas associadas à fração não viva, que se acumulam no solo, adsorvidas em partículas de argila e na matéria orgânica). Nesse sentido, ao considerarmos o comportamento dos atributos biológicos sob o manejo agroecológico (independente do uso do solo), observamos uma correlação significativa positiva entre a MO e a β -glicosidase ($r=0,96$), a Arilsulfatase ($r=0,95$) e a RB ($r=0,59$). A atividade de ambas as enzimas também se correlacionou significativamente com a RB ($r=0,73$ e $r=0,71$ respectivamente) (Tabela 4). Comportamento similar foi observado no manejo convencional, já que a MO também apresentou uma correlação significativa positiva com a β -glicosidase ($r=0,71$), a Arilsulfatase ($r=0,77$) e a RB ($r=0,56$). Contudo, somente a Arilsulfatase se correlacionou significativamente com a RB ($r=0,56$) (Tabela 5). Esse resultado evidencia que em ambos os manejos, a biomassa vegetal viva (principalmente no agroecossistema 3) ou a adição de esterco (utilizado

em todos os agroecossistemas), repetidamente incorporados ao solo (conforme descrição do item 4.1), pode ter forte influência na dinâmica biológica dessas áreas.

Nas áreas agrícolas, independente do manejo adotado, a atividade da enzima β -Glicosidase foi, em geral, superior que a da Arilsulfatase. Contudo, nas áreas de MATA este comportamento foi inverso, isto é, a atividade da Arilsulfatase foi muito maior do que a β -Glicosidase (Tabela 3), evidenciando que um ambiente com possível maior diversidade de plantas, animais e microrganismos favorecem a liberação desta enzima, a qual controla a mineralização do enxofre provenientes de fontes orgânicas (SOBUCKI *et al.*, 2021).

Ao comparar as diferenças de cada uso do solo em relação à MATA, se observa que a β -Glicosidase e a Arilsulfatase tiveram suas atividades diminuídas em todos os agroecossistemas, independente do manejo adotado. Contudo, vale destacar novamente, que o solo sob a HORTA e manejo agroecológico (agroecossistema 3), essas diferenças foram bem menores (-11,70 % para a β -Glicosidase e -27,30 % para a Arilsulfatase) (Tabela 3). Conforme mencionado anteriormente, a prática de cobertura vegetal do solo (com feijão tremoço) antes da implantação das hortaliças, associada ao uso de esterco de aves e a adoção do policultivo (manejo constatado na entrevista com o produtor e no momento da coleta das amostras), parece ter atuado positivamente na atividade da β -Glicosidase e da Arilsulfatase. Rocha *et al.* (2022) também constataram uma maior atividade da enzima β -glicosidase em solo sob manejo agroecológico quando comparado ao solo sob pasto, possivelmente devido a maior quantidade de resíduos vegetais depositados no solo, provenientes da diversidade de vegetação e as práticas de reciclagem de biomassa utilizada pelos agricultores. Entre áreas de plantio direto com e sem cobertura e sistema de plantio direto de hortaliças (SPDH), Pawlowski (2022), observou diferenças na atividade da enzima β -glicosidase, destacando que a maior atividade foi observada no SPDH com cobertura ($163,1 \mu\text{g p-nitrofenol g solo}^{-1} \text{ h}^{-1}$) em relação ao SPDH sem adição de palhada ($125,7 \mu\text{g p-nitrofenol g solo}^{-1} \text{ h}^{-1}$) devido à sensibilidade desta enzima ao efeito conjugado do tipo de manejo e presença de cobertura vegetal sobre o solo. Carlos *et al.* (2021) e Sobucki *et al.* (2021) enfatizam a sensibilidade destas enzimas às perturbações ambientais em manejos conduzidos a longo prazo (22 anos) e curto prazo (2 anos), tornando β -glicosidase e a Arilsulfatase os indicadores-chave no monitoramento da qualidade biológica dos solos.

Tabela 4 - Correlação de Pearson entre os atributos químicos e biológicos do solo sob o manejo agroecológico (HORTA e LAVOURA).

	Ca	Mg	K	P	MO	Beta	Aril	CBM	RB	Ácaros	Colêmbolos	Abundância	IQS _{FERTBIO}
pH	0,89	0,93	0,79	0,89	0,76	0,87	0,90	-0,03	0,87	0,73	0,08	0,60	0,84
Ca		0,89	0,57	0,67	0,83	0,87	0,91	0,12	0,64	0,74	0,25	0,70	0,92
Mg			0,76	0,87	0,90	0,97	0,95	0,06	0,82	0,65	0,11	0,56	0,90
K				0,91	0,55	0,70	0,64	0,01	0,81	0,53	0,14	0,49	0,61
P					0,66	0,80	0,76	-0,17	0,92	0,62	-0,09	0,42	0,67
MO						0,96	0,95	0,15	0,59	0,60	0,25	0,60	0,90
Beta							0,98	0,09	0,73	0,66	0,19	0,61	0,92
Aril								0,07	0,71	0,67	0,20	0,62	0,94
CBM									-0,07	-0,09	0,59	0,29	0,32
RB										0,65	-0,03	0,47	0,66
Ácaros											0,07	0,80	0,59
Colêmbolos												0,65	0,36
Abundância													0,65

Coeficiente de correlação em negrito significa uma correlação significativa ($p < 0,05$)

Tabela 5 - Correlação de Pearson entre os atributos químicos e biológicos do solo sob o manejo convencional (Horta e Lavoura).

	Ca	Mg	K	P	MO	Beta	Aril	CBM	RB	Ácaros	Colêmbolos	Abundância	IQS _{FERTBIO}
pH	0,21	0,31	-0,09	0,23	0,18	0,40	0,29	0,09	0,36	0,44	-0,23	0,23	0,19
Ca		0,77	-0,16	0,37	0,57	0,21	0,48	-0,18	0,38	0,27	-0,14	0,07	0,44
Mg			-0,31	0,58	0,56	0,47	0,68	-0,33	0,34	0,06	-0,28	-0,17	0,27
K				-0,47	0,14	0,16	-0,04	0,71	0,01	-0,44	-0,19	-0,44	0,44
P					0,33	0,21	0,36	-0,51	0,16	0,14	-0,48	-0,17	-0,13
MO						0,71	0,77	0,16	0,56	-0,02	-0,22	-0,15	0,72
Beta							0,67	0,32	0,49	-0,01	-0,31	-0,17	0,45
Aril								-0,04	0,56	-0,01	-0,27	-0,16	0,64
CBM									0,34	-0,38	0,27	-0,12	0,54
RB										0,11	0,11	0,17	0,69
Ácaros											-0,01	0,81	-0,23
Colêmbolos												0,57	0,01
Abundância													-0,18

Coeficiente de correlação em negrito significa uma correlação significativa ($p < 0,05$)

A CBM foi um atributo biológico que não apresentou correlação significativa com a MO e a atividade das enzimas, independente do manejo do solo adotado (Tabelas 4 e 5). Ao comparar os usos agrícolas em relação à MATA, a CBM dos solos sob a HORTA apresentou comportamento diverso. Isto é, sob o manejo convencional 1 e agroecológico 4 os valores foram 35,95 % e 10,05 % inferiores, respectivamente, enquanto que no manejo convencional 2 e agroecológico 3 os valores foram 26,85 % e 3,98 % superiores, respectivamente. Para os solos sob o uso de LAVOURA, todos os manejos, exceto o agroecológico 4, apresentaram um teor de CBM superior ao da MATA (Tabela 3). De acordo com Bertuccini (2003) o uso de adubos orgânicos pode influenciar na CBM, tornando-os até superiores em áreas de cultivos orgânicos em relação às áreas de mata. Maiores valores de CBM em solos sob manejo agroecológico comparados com área de pasto também foram encontrados por Rocha *et al.* (2022).

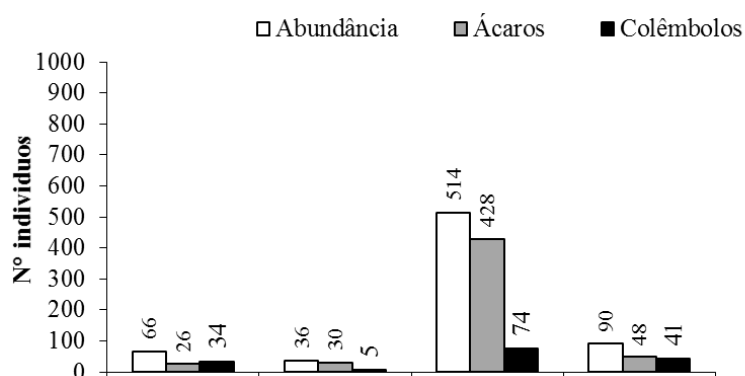
Por fim, no solo sob MATA os valores de RB foram todos superiores em relação as áreas agrícolas, independentemente do uso do solo e do manejo adotado, com exceção do agroecossistema 3 (agroecológico) sob HORTA, que apresentou uma RB superior (147,19 %) (Tabela 3).

Nas Tabelas 4 e 5, se observa que somente sob o manejo agroecológico a CBM apresentou uma correlação positiva significativa com a população de colêmbolos ($r=0,59$), possivelmente decorrente de uma relação de predação entre estes indivíduos ou pelo maior teor de MO (FERNANDEZ *et al.*, 2023), apresentado principalmente pelo agroecossistema 3, em ambos os usos (Tabela 3). Importante destacar que, dentro da classe dos colêmbolos, houve a prevalência da ordem Poduromorpha no solo sob a HORTA (49,51 %) e na LAVOURA (87,14 %). De acordo com Coulibaly *et al.* (2019), os colêmbolos apresentam diferenças em seus comportamentos, e se destacam pela complexidade das interações ecológicas no ambiente edáfico. Nesse sentido, os indivíduos da ordem Poduromorpha habitam preferencialmente o interior do solo e consomem substâncias mais resistentes e de forma lenta (ORGIAZZI *et al.*, 2016).

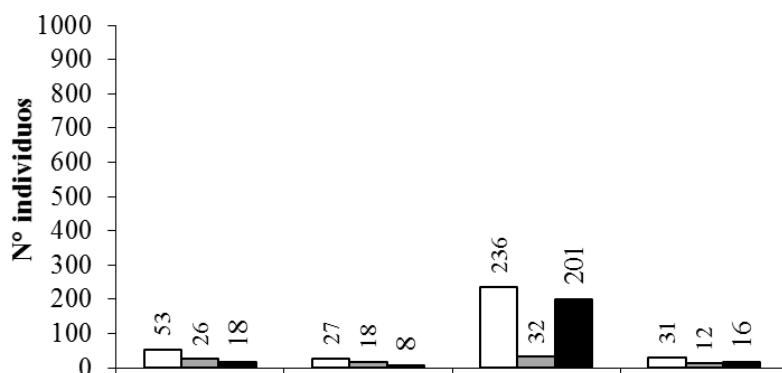
Os colêmbolos e os ácaros foram os organismos da fauna que predominaram nos diferentes manejos (convencional e agroecológico) e usos do solo (HORTA, LAVOURA e MATA). O uso do solo com HORTA sob o manejo agroecológico no agroecossistema 3 apresentou uma abundância total, uma população de ácaros e

colêmbolos superior à área de MATA (Figura 6 a,c). Resultados semelhantes foram encontrados por Rieff (2014) em solos sob o cultivo orgânico de citros que, por apresentaram um maior teor de material orgânico, favoreceu a população de ácaros e colêmbolos.

a)



b)



c)

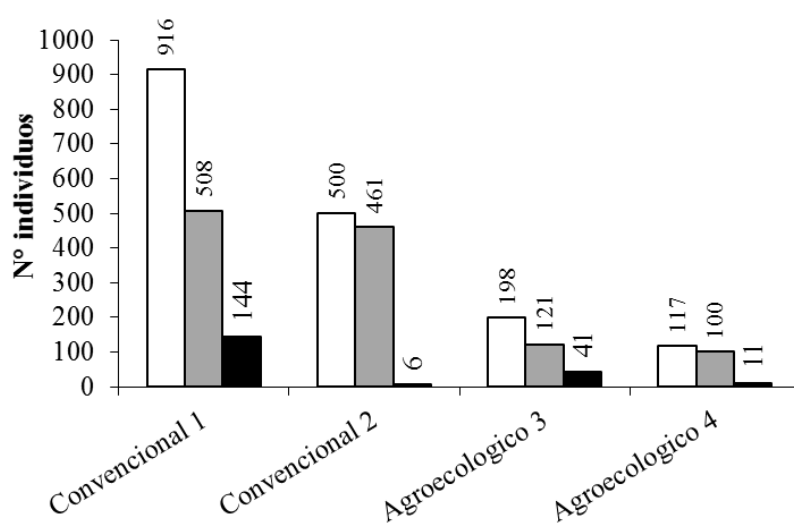


Figura 6 - Organismos da fauna do solo sob HORTA (a), LAVOURA (b) e MATA (c) e sob os manejos convencional e agroecológico, em quatro agroecossistemas familiares.

A população de ácaros foi afetada principalmente pelos atributos químicos do solo quando o manejo agroecológico foi adotado. Isto é, a população de ácaros se correlacionou positivamente com o pH ($r=0,73$), os teores de Ca ($r=0,74$), Mg ($r=0,65$), K ($r=0,53$) e P ($r=0,62$). Estes organismos também apresentaram correlação positiva com a MO ($r=0,60$) e as enzimas β -Glicosidase ($r=0,66$) e Arilsulfatase ($r=0,67$). Este comportamento não foi observado nos usos de solo sob o manejo convencional (Tabelas 4 e 5).

4.3 Relações entre as funções do solo (F1, F2 e F3) e a qualidade do manejo

Com base nos dados fornecidos pelo Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo (Mendes *et al.* 2020), na Tabela 4 são apresentados o IQS_{FERTBIO} e suas respectivas funções CICLAR (F1), ARMAZENAR (F2) e SUPRIR (F3) nutrientes. Nesse sentido, o solo sob o uso de HORTA e sob o manejo convencional apresentou um potencial de ciclagem médio e alto no agroecossistema 1 e 2, respectivamente, e um potencial de armazenamento e suprimento muito alto em ambos os agroecossistemas, culminando em um IQS_{FERTBIO} alto e muito alto (Tabela 6).

Tabela 6. IQS_{FERTBIO} e suas respectivas funções CICLAR, ARMAZENAR e SUPRIR nutrientes em solos sob diferentes usos (HORTA, LAVOURA) e manejos (convencional e agroecológico) em quatro agroecossistemas familiares.

Uso	Manejo	IQS FERTBIO	CICLAR Nutrientes	ARMAZENAR Nutrientes	SUPRIR Nutrientes
HORTA	Convencional 1	0,76	0,52	0,91	0,84
	Convencional 2	0,83	0,75	0,92	0,81
	Agroecológico 3	0,94	0,99	1,00	0,82
	Agroecológico 4	0,74	0,61	0,75	0,87
LAVOURA	Convencional 1	0,80	0,68	0,83	0,88
	Convencional 2	0,67	0,54	0,61	0,86
	Agroecológico 3	0,88	0,85	0,96	0,82
	Agroecológico 4	0,72	0,55	0,75	0,85
MATA	Convencional 1*	0,86	1,00	1,00	0,60
	Convencional 2**	0,88	0,99	0,99	0,64
	Agroecológico 3***	0,94	0,99	1,00	0,83
	Agroecológico 4****	0,85	0,98	1,00	0,56

*Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema convencional 1.

** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema convencional 2.

*** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do agroecossistema agroecológico 3.

**** Diferenças percentuais entre o uso do solo agrícola (horta ou lavoura) e o solo referência (mata) dentro do Agroecossistema agroecológico 4.

Quando o manejo avaliado é o agroecológico, o solo sob o uso de HORTA apresentou um potencial de ciclagem muito alto e médio no agroecossistema 3 e 4 respectivamente, e um potencial de armazenamento e suprimento muito alto em ambos os agroecossistemas, culminando também em um $IQS_{FERTBIO}$ muito alto e alto (Tabela 6). Contudo, o resultado das funções nos evidencia que o manejo adotado no agroecossistema 4 (agroecológico), após 10 anos de uso do solo, a atividade das enzimas β -glicosidase e a Arilsulfatase promoveu o mesmo potencial de ciclagem observada no solo sob o manejo convencional no agroecossistema 1 (sob este uso há 4 anos), e foi inferior ao manejo convencional no agroecossistema 2 (sob este uso há 10 anos).

Importante destacar que o manejo agroecológico adotado somente há 3 anos no agroecossistema 3 está promovendo, na área sob HORTA, uma elevada atividade biológica no solo. Isto é, a atividade da enzima Arilsulfatase foi em média 5,4 vezes maior quando comparada com os demais agroecossistemas familiares ($19+71+27/3=39$ em que $212/39=5,4$). Raciocínio semelhante se aplica para a β -glicosidase, em que o valor foi 3,5 vezes maior em relação a média os demais agroecossistemas familiares ($40+74+46/3=53$ em que $188/53=3,5$). Por fim, é neste uso e manejo do solo que a MO foi 2,6 vezes maior em relação aos demais agroecossistemas. Este resultado também evidencia que as enzimas foram atributos biológicos muito mais sensíveis que a MO para destacar o efeito positivo deste manejo no solo.

Nos solos de LAVOURA sob manejo convencional o agroecossistema 1 apresentou F1 alto, F2 e F3 muito alto, enquanto o agroecossistema 2 apresentou F1 médio, F2 alto e F3 muito alto. Em ambos os agroecossistemas o $IQS_{FERTBIO}$ foi classificado como alto. Quando se avalia o manejo agroecológico neste uso do solo, o agroecossistema 3 apresentou as funções F1, F2 e F3 muito alto, enquanto que o agroecossistema 4 as funções variaram de médio (F1), a alto (F2) e muito alto (F3). O $IQS_{FERTBIO}$ no agroecossistema 3 foi classificado como muito alto, enquanto que no agroecossistema 4 foi classificado como alto (Tabela 6).

O resultado das funções para este uso nos evidencia novamente que o manejo adotado no agroecossistema 4 (agroecológico), com cerca de 7 anos de uso do solo, a atividade das enzimas β -glicosidase e a Arilsulfatase promoveu o mesmo potencial de ciclagem observada no solo sob o manejo convencional no agroecossistema 2 (sob

este uso há 15 anos), e foi inferior ao manejo convencional no agroecossistema 1 (sob este uso há 4 anos). Neste uso, novamente, destaca-se que o manejo agroecológico adotado somente há 3 anos no agroecossistema 3 está promovendo, uma elevada atividade biológica no solo. Isto é, a atividade da enzima Arilsulfatase foi em média 4,6 vezes maior quando comparada com os demais agroecossistemas familiares ($29,6+24,1+25,8/3=26,5$ em que $121,5/26,5=4,6$). Raciocínio semelhante se aplica para a β -glicosidase, em que o valor foi 1,5 vezes maior em relação a média os demais agroecossistemas familiares ($71,2+103,7+63,8/3=79,5$ em que $121,6/79,5=1,5$). Por fim, é neste uso e manejo do solo que a MO foi 1,8 vezes maior em relação aos demais agroecossistemas. Este resultado também evidencia que as enzimas novamente foram atributos biológicos muito mais sensíveis que a MO para destacar o efeito positivo deste manejo no solo, principalmente a Arilsulfatase.

Com relação a pontuação média da função ciclagem de nutrientes, as áreas de HORTA e LAVOURA do agroecossistema 3 ficaram bem próximas ($F1 = 0,9$) ao solo de referência (MATA; $F1 = 1,00$). Já nos outros agroecossistemas, o potencial de ciclagem das áreas cultivadas (HORTA e LAVOURA) foi em média de 0,6. Ou seja, nos agroecossistemas 1 e 2 (convencional) e 4 (agroecológico), houve uma perda de 40% do potencial de ciclagem em comparação com a MATA (Tabela 6).

O potencial de armazenamento de nutrientes ($F2$) no agroecossistema 3 (agroecológico) foi o que mais se aproximou do $F2$ da MATA, tanto no uso sob HORTA (1,00) ou LAVOURA (0,96). Nos agroecossistemas convencionais 1 e 2, as perdas da função $F2$ foram mais acentuadas nas áreas de LAVOURA (0,83 e 0,61 respectivamente). Já no agroecossistema 4 (agroecológico), nas áreas de HORTA e LAVOURA houve uma redução de 25% em relação ao potencial de armazenamento de nutrientes (0,75), quando comparados com o solo de referência (Tabela 6). Por fim, no que se refere a função suprimento de nutrientes ($F3$), todas as áreas apresentaram valores idênticos. Nesse sentido, salienta-se a importância de avaliar o componente biológico, neste caso representado pelas duas enzimas. Embora os agroecossistemas tenham apresentado condições químicas semelhantes, as condições biológicas foram distintas.

Com base na plotagem das amostras de solos no modelo de quatro quadrantes, podem ser levantadas as seguintes observações:

- No agroecossistema 3, o solo sob uso de HORTA no manejo agroecológico (Agroecológico - 3) foi plotado em Q1 (Figura 7), indicando um solo saudável com níveis elevados de carbono do solo e de atividade biológica (alto COT/alta atividade das enzimas).
- Nos agroecossistemas 2 e 4, o solo sob uso de HORTA no manejo convencional (Convencional - 2) e agroecológico (Agroecológico - 4) respectivamente, foram plotadas no Q4 (Figura 7) indicando solos em recuperação. Isto é, com alta atividade biológica e tendência a ganho de carbono orgânico (baixo COT/alta atividade enzimática).
- O solo sob HORTA e manejo convencional no agroecossistema 1 (Convencional - 1) ficou plotada no Q3, considerado um solo doente com baixa atividade biológica (baixo COT/baixo atividade das enzimas). Entretanto, o fato de interseccionar o Q4 (Figura 7), indica que o manejo adotado pode estar promovendo uma melhoria na qualidade do solo.

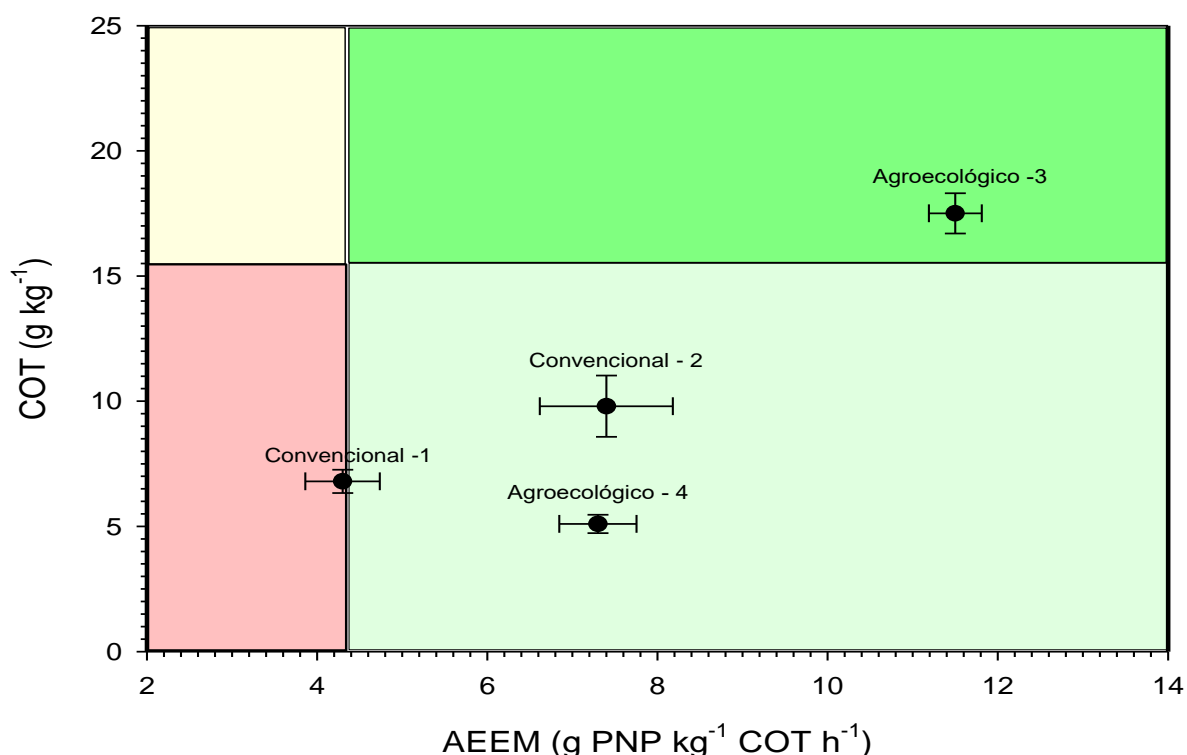


Figura 7- Modelo de quatro quadrantes para o uso do solo com HORTA sob os manejos convencional e agroecológico em agroecossistemas familiares.

- Em relação às áreas de LAVOURA, todos os solos, independente do manejo adotado, foram plotadas em Q4 (Figura 8) indicando solos em recuperação com alta atividade biológica e tendência a ganho de carbono orgânico (baixo COT/alta atividade enzimática).

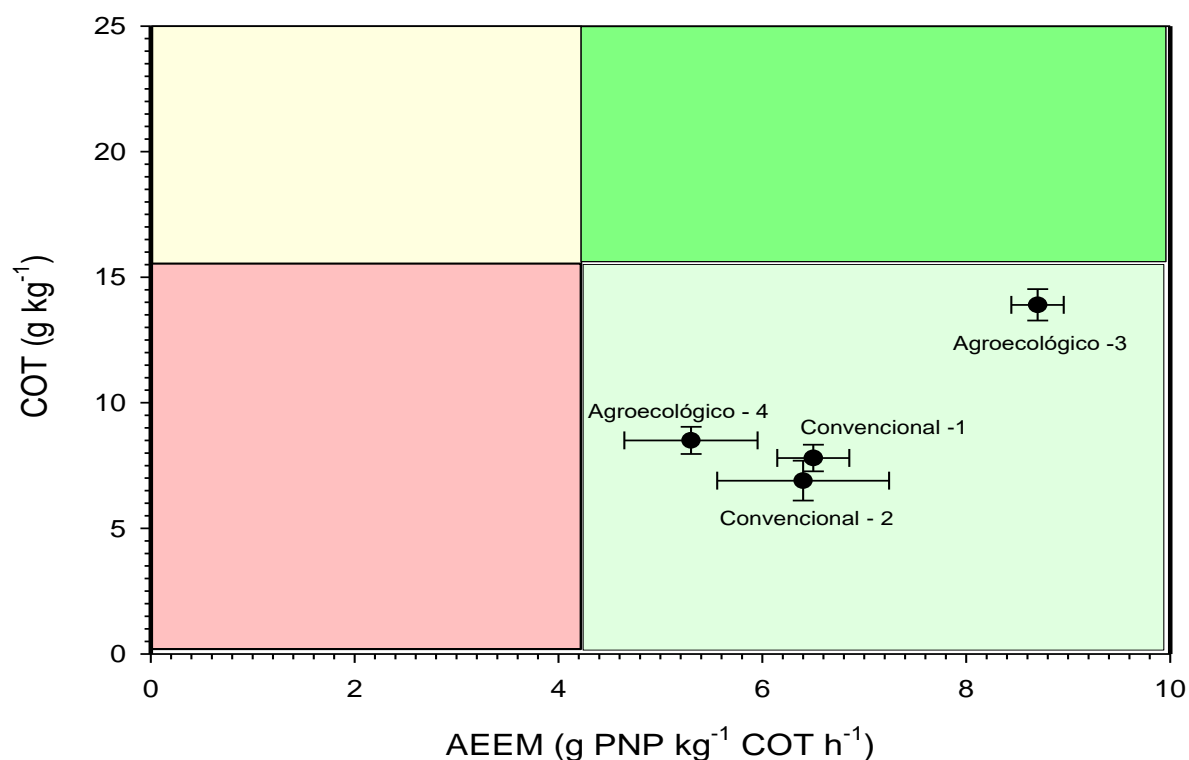


Figura 8 - Modelo de quatro quadrantes para o uso do solo com LAVOURA sob os manejos convencional e agroecológico em agroecossistemas familiares.

5. Considerações Finais

Com os resultados apresentados neste estudo, foi possível concluir que os solos sob os diferentes usos e manejos foram quimicamente semelhantes. Contudo, a melhor atividade enzimática foi observada somente sob o manejo agroecológico do agroecossistema 3, principalmente sob o uso de HORTA. Isto refuta em parte nossa hipótese de que todos os usos do solo sob o manejo agroecológico de agroecossistemas familiares de São Lourenço do Sul, independente do período de transição, apresentariam uma melhor qualidade no manejo do solo em relação aos usos do solo sob manejo convencional. Nossa hipótese não foi confirmada no manejo agroecológico do agroecossistema 4.

Em relação ao modelo quatro quadrantes, o agroecossistema 3 destaca-se novamente em relação a alta qualidade que apresenta, consequência do maior potencial de ciclagem (F1) e armazenamento (F2) de nutrientes. Isso indica que o agricultor neste solo pode manter as práticas de manejo utilizadas atualmente, pois estas manterão seu solo saudável. Nos demais agroecossistemas os agricultores necessitam promover melhorias no manejo do solo, visando o incremento da saúde do solo na mesma condição que o agroecossistema 3.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, H. S. *et al.* Ocorrência e diversidade da fauna edáfica sob diferentes sistemas de uso do solo. **Revista Brasileira de Tecnologia Agropecuária**, v.1, p.15-23, 2017.

ALTIERI, M. Agroecologia: **A dinâmica produtiva da agricultura sustentável**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Agroecologia: resgatando a agricultura orgânica a partir de um modelo industrial de produção e distribuição. **Ciência & ambiente**, v.27, p.141-152, 2003.

Alvares, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013 <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic Soil Fertility as product of system selforganization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p.e0210090 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210090>

BACHELIER, G. 1978. La faune des sols: son écologie et son action. Paris, ORSTOM. 391p.

BALOTA, E. L. *et al.* Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.8, p.221-278, 2013. <https://www.researchgate.net/publication/288482294>
Acesso em: 20 set. 2023.

BERTUCCINI, C. T. **Indicadores biológicos em áreas de cultivo orgânico e convencional no DF**. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical), Universidade Federal de Mato Grosso, 2003.

BOURANIS, D. L. *et al.* Impact of Elemental Sulfur on the Rhizospheric Bacteria of Durum Wheat Crop Cultivated on a Calcareous Soil. **Plants**, v.8, p.379, 2019. <https://doi.org/10.3390/plants8100379>.

BRADY, N.C.; WEIL, R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ª Edição. Editora Bookman, 2013. 286p.

CANTÚ, R. R. *et al.* Como o uso de adubos orgânicos pode ser uma alternativa no SPDH? In: **Sistema de plantio direto de hortaliças: método de transição para um novo modo de produção**/Organizadores: Jamil Abdalla Fayad, Valmerdar Arl, Jucinei José Comin, Álvaro Luiz Mafra, Darlan Rodrigo Marchesi. – 1.ed. – São Paulo: Expressão Popular, 2019.

CARLOS, F. S. *et al.* Long-term no-tillage system can increase enzymatic activity and maintain bacterial richness in paddy Fields. **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 2257-2268, 2021. <https://doi.org/10.1002/ldr.3896>

CASALINHO, H. D.; LIMA, A. C. R.: **Integração de conhecimentos na construção de uma metodologia para avaliação da qualidade do solo**. In: Solos e Agroecologia / Irene Maria Cardoso, Claudenir Favero, ed. Técnicos – Brasília, DF: Embrapa, 2018. (Coleção transição agroecológica; 4).

CAVALCANTE, W. F. *et al.* Enzymatic activity of caatinga biome with and without anthropic action. **Revista Caatinga**, v.33, p.142-150, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n116rc>

CHAER, G. M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001, 90 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. 2001.

CHAER, G. M. *et al.* Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v.183, p.104742, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>

CHANG, R. *et al.* Approaches for transitions towards sustainable development: status quo and challenges. **Sustainable development**, v.25, p.359-371, 2017. <https://doi.org/10.1002/sd.1661>

COSTA, H. S. *et al.* Indicadores químicos de qualidade de solos em diferentes coberturas vegetais e sistemas de manejo. **Revista Fitos**, v.13, p.42, 2019. <https://doi.org/10.17648/2446-4775.2019.759>

COTTA, S.R. O solo como ambiente para a vida microbiana. In: CARDOSO, E.J.B.N., ANDREOTE, F.D. **Microbiologia do Solo**. 2. ed. Piracicaba: Esalq, 2016. p. 1-221.

COULIBALY, S. F. M. *et al.* Functional assemblages of Collembola determine soil microbial communities and associated functions. **Frontiers in Environmental Science**, v.7, p.52, 2019. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00052>

CREAMER, R. E. *et al.* Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter? **Ecological indicators**, v.36, p.409-418, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.08.015>

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. Matéria Orgânica do Solo. *In*: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (org.) **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p.273-293.

DE ALMEIDA, E. W. *et al.* Potencial agroecológico de propriedades agrícolas familiares do município de São Lourenço do Sul, Rio Grande do Sul. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.14, p.546–553, 2019. <https://doi.org/10.18378/rvads.v14i4.6551>

DECKER, J. V. R., **Dinâmica do fósforo no solo e na cultura do milho (*Zea mays*) após a aplicação de condicionadores de solo como biochar e zeólitos**. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroecologia, Escola Superior Agrária de Bragança, Instituto Politécnico, Bragança. 2019.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. SSSAJ, Madison, v.35, 1994. p.3-22.

FERNANDEZ, M. B. D. G. *et al.* First assessment of soil mesofauna, microbiota, and humic substances associations in a minesoil revegetated with four grasses in Brazil: An 18-year field study. **European Journal of Soil Biology**, v.118, p.103533, 2023. <https://doi-org.ez66.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ejsobi.2023.103533>

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**, v.31, p.1625–1635, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600038>

GALLO, D. NAKANO, *et al.* **Manual de Entomologia Agrícola**, São Paulo. Ed. Agronômica Ceres, 1988, 649p.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 656 p.

HAVERROTH, C. **A transição agroecológica na agricultura familiar**. 1 ed. Curitiba: Appris, 2016. 227 p.

KARLEN, D.L., STOTT, D. E., **Uma estrutura para avaliação de indicadores físicos e químicos da qualidade do solo**. In: DORAN, J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.R., STEWART, B.A. (Ed). Definindo a qualidade do solo para um ambiente sustentável. Madison: Soil Science Society of America. p. 53-72. (Publicação especial, 35). 1994.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J. *et al.* Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society of American Journal**, v.61, p.4-10, 1997.

KNOEPP, J. D.; COLEMAN, D. C. *et al.* Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. **Forest Ecology and Management**, v.138, p.357-368, 2000

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**, v.77, p.461-472, 2013. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>

LOPES, A. A. C. *et al.* Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v.12, p.72-82, 2018. <https://doi-org.ez66.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.geodrs.2018.01.003>

MÄDER, P. *et al.* Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. **Science**, v.296, p.1694–1697, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1071148>

MAGRINI, M. B. *et al.* Agroecological transition from farms to Territorialized agri-food systems: Issues and Drivers. In: BERGEZ, J. E.; AUDOUIN, E.; THEROND, O. (Ed.). **Agroecological transitions: From theory to practice in local participatory design.** Cham: Springer, 2019. p. 69-98.

MALÉZIEUX, E. Designing cropping systems from nature. **Agronomy for sustainable development**, v. 2, p.15-29, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z>

MANUAL. **Adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul.: Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2016.

MENDES, C. I *et al.* **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo.** Circular Técnica 38 EMBRAPA, Planaltina, DF. 2018.

MENDES, C. I *et al.* Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.10, p.399- 462, 2019a.

MENDES, C. I *et al.* Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v.139, p.85-93, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>

MENDES, C. I. *et al.* Rotação de culturas, bioindicadores e saúde do solo. In: SILVA, P. A.; OLIVEIRA, L. C. (org.). **Rotação de Culturas, bioindicadores e saúde do solo.** 19. ed. Rondonópolis: Fundação MT, 2020.

MENDES, C. I *et al.* **Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021.

MENDES, C. I *et al.* **Fazendas de referência para a implementação do modelo de quatro quadrantes na avaliação de tendências do carbono do solo pela tecnologia BioAS.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2023.

MELO, D. M. A. De. *et al.* Soil Quality Indicators in Peasant Agroecosystems in Paraíba State, Brazil. **Tropical Conservation Science**, v.17, 2024. <https://doi.org.ez66.periodicos.capes.gov.br/10.1177/19400829231215492>

ORGIAZZI, A. *et al.* **Global Soil Biodiversity Atlas.** Luxembourg, 2015, ISBN 978-92-79-48168-0 (online).

PAWLOWSKI, Estefany. **Indicadores de Qualidade do Solo em Sistemas de Manejo para Produção de Hortaliças.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Fronteira Sul, 2022.

PINHEIRO, Sebastião. **Matéria orgânica do solo.** In: PINHEIRO, S. Agroecologia 7.0 :bombeiros agroecológicos (farinhas de rocha, biofertilizantes, biochar, agrohombopatia e siderófagos). Porto Alegre: Juquira Candiru Satyagraha, p.1-663. 2018.

PRIMAVESI, Ana. **A biocenose do solo na produção vegetal & deficiência minerais em culturas: nutrição e produção vegetal**. São Paulo: Expressão Popular, 2018.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo; agricultura em regiões tropicais**. Cotia, SP: Brasil Franchising, 2021.

REICHERT, Lírio José. Evaluation of organic potato production system in family farms: an application of MultiCriteria Decision-Aid Methodology (MCDA). 2012. 346p. Tesis (Doctoral Degree). **Post Graduation Program in Family Farm Production System**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul.

RIEFF, G. G. **Dinâmica dos ácaros e colêmbolos edáficos e seu potencial como bioindicadores da qualidade do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo**. 137 p. Porto Alegre (RS) Brasil. 2014.

ROCHA, A. F. B. *et al.* Indicadores de Qualidade do Solo em Sistemas Agroecológicos no Cerrado Mineiro. **Sociedade & Natureza**, v.34, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-62940>

SANTIAGO, F. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; PINHEIRO, M. R. A P. Índice de qualidade do solo em cultivo agroecológico e convencional no semiárido potiguar, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, p.97-105, 2018. <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i1.5333>

SANTIAGO, F. Dos S. *et al.* Atributos do solo em sistemas de cultivo irrigado agroecológico e convencional no Semiárido do Rio Grande do Norte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, p.176, 2018. <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i2.5335>

SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F. A. de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 1999.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SARMIENTO, E.; FANDINO, S.; GOMEZ, L. Indexes of soil quality. A systematic review. **ECOSISTEMAS**, v.27, p. 30-139, 2018.

SOBUCKI, L. *et al.* Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, p.e0210109, 2021. <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbc20210109>

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ª ed. 2008. p.10-183.

TABATABAI, M. A. **Soil enzymes**. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, J. S.; BOTTOMLEY, P. J.; BEZDICEK, D. F.; SMITH, S.; TABATABAI, A. M.; WOLLUM, A. W. (Ed.). **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174p. 1995.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de Métodos de Análise de Solos. 3ª edição Revista e Ampliada, Brasília: **Embrapa**, 2017. 573p.

TOLEDO, Víctor M. Modernidad y ecología. La nueva crisis planetaria. **Ecología Política**, 1992.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.743–755, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>

WAKSMAN, S. A. **O húmus**: origem, composição química, e importância na natureza. Nova Jersey: Universidade de Rutgers. 2012. 406 p.

Anexo A

Questionário aberto	
Nome do Agricultor:	
Tempo de produção agroecológica/convencional	
O que era cultivado antes do manejo atual?	
Tamanho da área destinada para a Mata:	
Tamanho da área destinada para a Lavoura:	
Tamanho da área destinada ao cultivo de hortaliças:	
Manejo do solo: () revolvimento () plantio direto	
1) Quando as culturas foram implantadas?	
2) Após a implantação das culturas, o solo ficou descoberto ou com cobertura vegetal morta?	
3) Houve rotação de culturas?	
4) Houve plantas de cobertura?	
6) Fez uso da compostagem como fonte de nutrientes? Se sim, que tipo de composto foi usado?	
7) Tipo de adubo utilizado durante o ciclo da (s) cultura (s):	
8) Coloca adubo fracionado ou de uma vez só?	
9) Quando coloca?	
10) Quanto coloca?	
11) Qual adubo?	
12) Quando foi feito a calagem?	
13) Como foi feito a calagem?	
14) Data da última análise de solo:	
15) Resultado da última análise de solo:	
16) Data da implantação das culturas no ciclo produtivo 2023/2024:	
17) Espécies anteriormente cultivadas:	
18) Quais culturas estavam sendo cultivadas no dia da coleta de solo:	
19) Origem do material propagativo (semente ou muda):	
20) Número de plantas e espaçamento (hortaliça/lavoura atual):	
21) Fase de desenvolvimento das plantas no dia da coleta de solos: () vegetativa () floração () frutificação () ponto de colheita () pós colheita	
22) Tipo de irrigação: () Gotejamento () Aspersão () Manual	
23) Origem da água:	
24) Frequência de irrigação: () uma vez por dia () duas vezes por dia () três vezes por semana	
25) Aspecto geral das plantas: () ótimo () bom () regular () ruim	
26) Método de controle: () preventivo () curativo	
27) Tipo de controle de plantas espontâneas: () manual () capina () outro	
28) Data da colheita:	
29) Parte colhida ou coletada: () raízes () ramos () folhas () flores () sementes	
30) Quantidade colhida (bruto): peso fresco (líquido): peso seco (do líquido):	
Considera que o solo da área de produção de hortaliças está saudável?	