

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

Saúde do solo e nutrição de pomares de pêsego em Pelotas, RS

Gabriel Carlos Baeta Melo

Pelotas, 2026

Gabriel Carlos Baeta Melo

Saúde do solo e nutrição de pomares de pêssego em Pelotas, RS

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.

Orientador: Ezequiel Cesar Carvalho Miola

Coorientadora: Jakeline Rosa de Oliveira

Pelotas, 2026

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

M528s Melo, Gabriel Carlos Baeta

Saúde do solo e nutrição de pomares de pêssego em Pelotas, RS [recurso eletrônico] / Gabriel Carlos Baeta Melo ; Ezequiel Cesar Carvalho Miola, orientador ; Jakeline da Rosa Oliveira, coorientadora. — Pelotas, 2026.

81 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2026.

1. Atividade enzimática do solo. 2. Matéria orgânica do solo. 3. Nutrição foliar. 4. Bioindicadores de saúde do solo. 5. *Prunus persica*. I. Miola, Ezequiel Cesar Carvalho, orient. II. Oliveira, Jakeline da Rosa, coorient. III. Título.

CDD 631.417

Gabriel Carlos Baeta Melo

Saúde do solo e nutrição de pomares de pêssago em Pelotas, RS

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 da defesa: 03 de março de 2026.

Prof. Dr. Ezequiel Cesar Carvalho Miola (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Profa. Dra. Fabiane Machado Vezzani
Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Gilberto Nava
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo

MELO, Gabriel Carlos Baeta. **Saúde do solo e nutrição de pomares de pêssego em Pelotas, RS**. Orientador: Ezequiel Cesar Carvalho Miola. 2026. 81 f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

A diagnose da fertilidade do solo baseada exclusivamente em indicadores químicos estáticos frequentemente falha em capturar a funcionalidade de agroecossistemas em solos arenosos subtropicais, resultando em recomendações de adubação imprecisas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a saúde do solo e o estado nutricional de pomares de pessegueiro (*Prunus persica* L.) sob sistemas de manejo orgânico e convencional no município de Pelotas-RS, integrando indicadores físicos, químicos e biológicos. O estudo foi conduzido em oito pomares com históricos de uso e texturas contrastantes. A metodologia empregou a abordagem CASH (*Comprehensive Assessment of Soil Health*) integrada ao Modelo de Quatro Quadrantes (4QM), baseada na atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, além do fracionamento físico da matéria orgânica em particulada (MOP) e associada aos minerais (MAM). O estado nutricional das plantas foi avaliado com base nas principais metodologias utilizadas regionalmente e localmente. Os resultados demonstraram que a capacidade de acúmulo de carbono na fração estável (MAM) é governada pela reatividade mineral e fisicamente limitada pela textura do solo. Em pomares arenosos, a restrição na formação de pontes organominerais impôs uma dinâmica de ciclagem rápida, limitando a proteção física e tornando o sistema dependente da fração lábil (MOP) e do fluxo contínuo de exsudatos radiculares (manutenção de raízes vivas). A atividade enzimática, especialmente a da arilsulfatase, revelou-se um indicador sensível e precoce, capaz de detectar o efeito de usos anteriores diferenciar a funcionalidade de sistemas onde a química tradicional não apontou divergências. A diagnose foliar confirmou que pomares classificados como biologicamente saudáveis mantiveram a nutrição de Nitrogênio e Potássio adequada, mesmo em solos com baixos estoques totais. Isso valida a hipótese de que a alta atividade biológica compensa a menor fertilidade química estática através da ciclagem eficiente e da desestabilização contínua das frações orgânicas de ciclagem rápida. Conclui-se que a integração de bioindicadores enzimáticos e a compreensão da dinâmica sistêmica do carbono contribuem para superar as limitações da análise de solo convencional, constituindo uma ferramenta eficaz para o diagnóstico da saúde do solo e a racionalização do uso de insumos na fruticultura.

Palavras-chave: atividade enzimática do solo; matéria orgânica do solo; nutrição foliar; bioindicadores de saúde do solo; *Prunus persica*.

Abstract

MELO, Gabriel Carlos Baeta. **Soil health and nutrition of peach orchards in Pelotas, RS.** Advisor: Ezequiel Cesar Carvalho Miola. 2026. 81 f. Dissertation (Master's in Soil and Water Management and Conservation) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

Soil fertility diagnosis based exclusively on static chemical indicators often fails to capture agroecosystem functionality in subtropical sandy soils, resulting in inaccurate fertilizer recommendations. This study aimed to evaluate soil health and the nutritional status of peach orchards (*Prunus persica* L.) under organic and conventional management systems in the municipality of Pelotas-RS, integrating physical, chemical, and biological indicators. The study was conducted in eight orchards with contrasting land-use histories and textures. The methodology employed the CASH (Comprehensive Assessment of Soil Health) approach integrated with the Four Quadrant Model (4QM), based on the activity of beta-glucosidase and arylsulfatase enzymes, as well as the physical fractionation of soil organic matter into particulate (POM) and mineral-associated (MAOM) organic matter. Plant nutritional status was evaluated using the main methodologies employed regionally and locally. The results demonstrated that the carbon accumulation capacity of the stable fraction (MAOM) is governed by mineral reactivity and is physically limited by soil texture. In sandy orchards, the restriction in the formation of organomineral complexes imposed a rapid cycling dynamic, limiting physical protection and making the system dependent on the labile fraction (POM) and the continuous flux of root exudates (maintenance of living roots). Enzymatic activity, especially that of arylsulfatase, proved to be a sensitive and early indicator capable of detecting the legacy of previous land uses and differentiating the functionality of systems where traditional chemistry failed to show differences. Foliar diagnosis confirmed that orchards classified as biologically healthy maintained adequate Nitrogen and Potassium nutrition, even in soils with low total reserves. This validates the hypothesis that high biological activity compensates for lower static chemical fertility through efficient cycling and continuous destabilization of fast-cycling organic fractions. It is concluded that integrating enzymatic bioindicators and understanding systemic carbon dynamics contribute to overcoming the limitations of conventional soil analysis, constituting an effective tool for soil health diagnosis and the rationalization of input use in fruit production.

Keywords: soil enzymatic activity; soil organic matter; foliar nutrition; bioindicators of soil health; *Prunus persica*.

Lista de Figuras

Figura 1	Mapa da localização dos pomares no município de Pelotas – RS.	24
Figura 2	Mapa de classificação dos solos da área onde os pomares estão localizados.	25
Figura 3	Mapa da delimitação do perímetro dos pomares	26
Figura 4	Estoque de carbono orgânico total (COT) e distribuição das frações físicas na camada de 0-10 cm em diferentes pomares de pessegueiro.	47
Figura 5	Aspecto visual do solo de pomares de pêssego sob diferentes práticas de manejo (O: orgânico e C: convencional), histórico e idade, no município de Pelotas – RS.	49
Figura 6	Gráfico de dispersão entre Carbono Orgânico Total do Solo (COT) e Atividade Enzimática Específica Média (AEEM) de pomares de pêssego em Pelotas – RS.	51
Figura 7	Histórico visual de 18 anos (2004 à 2024) da cobertura do solo dos pomares C-2a e C-2b em Pelotas, RS.....	56
Figura 8	Distribuição de frequência das classes de suficiência nutricional adaptadas da CQFSRS/SC (2016), para as amostras de cada um dos oito pomares (n=25).	60
Figura 9	Concentração de macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no tecido folhar de pessegueiros em Pelotas, RS, e comparação de limites de interpretação.	61
Figura 10	Análise de componentes principais (PCA) de atributos do solo em pomares de pêssego sob manejo orgânico e convencional, classificados nos quatro quadrantes de saúde do solo.....	65
Figura 11	Matriz de correlação de Pearson das variáveis analisadas no solo de pomares de pêssego em pelotas RS.	68

Lista de tabelas

Tabela 1	Classificação granulométrica do solo e porcentagem das frações argila, silte e areia, em pomares de pêssego em Pelotas – RS.....	36
Tabela 2	Valores referentes à densidade e percentual de porosidade do solo em pomares de pêssego em Pelotas - RS.....	37
Tabela 3	Atributos químicos do solo em pomares de pêssego na região de Pelotas – RS.	39
Tabela 4	Índices microbiológicos em pomares de pessegueiro no município de Pelotas – RS.	44
Tabela 5	Carbono Orgânico Total (COT), Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MAM) em pomares de pêssego em Pelotas – RS.....	46
Tabela 6	Atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, Carbono orgânico total do solo (COT) e atividade enzimática específica da beta-glicosidase (S-BETA) e arilsulfatase (S-ARIL) e a atividade enzimática específica média (AEEM).....	50
Tabela 7	Concentração média dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no tecido foliar de pessegueiro (<i>Prunus persica</i>) sob sistemas de manejo orgânico e convencional no município de Pelotas-RS.	59

Sumário

1 Introdução.....	11
2 Revisão de literatura	14
2.1 Cultura do Pessegueiro e Práticas de Manejo	14
2.2 Degradação do Solo e a Importância da Conservação	16
2.3 Práticas de manejo e sistemas orgânicos e convencionais	17
2.4 Nutrição das Plantas e Qualidade do Solo	18
2.5 Indicadores de Qualidade do Solo	19
2.6 Diagnóstico da Qualidade Nutricional das Plantas	22
3 Materiais e Métodos	24
3.1 Área de Estudo.....	24
3.2 Caracterização do histórico de manejo dos pomares.....	25
3.3 Amostragem e análise de solo	29
3.3.1 Atributos físicos	29
3.3.2 Atributos químicos	30
3.3.3 Quocientes metabólico, microbiano e de mineralização	31
3.3.4 Atividade enzimática específica média (AEEM)	32
3.3.5 Avaliação da saúde do solo através da combinação CASH e 4QM	32
3.3.6 Estoques de carbono	33
3.4 Amostragem e análise de tecido foliar	34
3.5 Análise estatística dos dados	35
4 Resultados e discussão	35
4.1 Indicadores físicos da qualidade do solo.....	35
4.2 Indicadores químicos do solo	38
4.3 Indicadores microbiológicos do solo.....	42
4.4 Quocientes Metabólicos (qCO ₂ e qMic)	45

4.5 Estoque de carbono e frações da matéria orgânica do solo	46
4.6 Atividade enzimática e Diagnóstico de Saúde com CASH/4QM	50
4.7 Diagnóstico do estado nutricional do tecido foliar	58
4.8 Análise das Componentes Principais - PCA	64
4.9 Correlações entre atributos Químicos, Físicos e Biológicos	66
5 Considerações finais	69
Referências	70

1 Introdução

Atualmente, o Brasil é o 3º maior produtor de pêssego da América Latina, e ocupa a 16ª posição na produção mundial (FAOSTAT, 2024). Embora o pessegueiro seja a terceira frutífera temperada mais cultivada no território nacional e a segunda no mundo, a cultura enfrenta atualmente um declínio em regiões tradicionais. O estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de pêssego (*Prunus persica* L.) do Brasil (IBGE, 2024). Grande parte da produção gaúcha concentra-se na região sul, especialmente, nos municípios de Pelotas, Canguçu e Morro Redondo. Essa região é responsável por 30% da produção nacional de pêssego. Em Pelotas, a área destinada à produção dessa cultura é de aproximadamente 3.000 hectares, com rendimento médio de 6,03 t/h. No entanto, o setor enfrenta gargalos como a escassez de trabalhadores e margens de lucro reduzidas, o que desestimula a entrada de novos produtores e exige a busca por sistemas que conciliem alto rendimento, qualidade e saúde do pomar (Belarmino; Navarro-Pabsdorf, 2022).

A degradação do solo e da água, ocasionada pelo mau uso dos recursos naturais na produção de alimentos, é a principal responsável pela perda da biodiversidade em ecossistemas terrestres e aquáticos. A atividade agrícola responde por 30% das emissões de gases de efeito estufa e 80% do desmatamento. Atualmente, metade dos solos utilizados para a produção de alimentos apresenta degradação e, caso não sejam adotadas medidas de conservação, prevê-se a degradação contínua de 1,6 bilhões de hectares (UNCCD, 2022).

Considerando que a agricultura consome 70% da água doce e utiliza 40% do solo global, a conservação destes recursos depende da implementação de práticas de base ecológica (UNCCD, 2022). A adoção de manejos sustentáveis fundamentados na agroecologia é uma das principais vias para garantir a saúde do solo, a produtividade e a resiliência frente às mudanças climáticas (Olsson *et al.*, 2022).

Para facilitar a compreensão dos sistemas de produção, estes podem ser divididos em duas categorias: convencional e orgânico. O sistema convencional caracteriza-se pela dependência de insumos externos (fertilizantes sintéticos e agrotóxicos) e a priorização da produtividade a curto prazo. Já o sistema orgânico busca reduzir essa dependência, utilizando insumos de fontes orgânicas e adotando amplamente práticas conservacionistas (rotação de culturas, adubação verde,

cobertura do solo) para promover a saúde do solo (Seufert; Ramankutty; Foley, 2012). Na prática, porém, essa separação é complexa. O termo “agricultura conservacionista” abarca diversas vertentes (alternativa, biodinâmica, orgânica, natural, agroecológica) que se opõem ao modelo hegemônico da Revolução Verde (Lopes; Lopes, 2011). Essas práticas promovem benefícios globais, como sequestro de carbono, melhoria na fertilidade sistêmica e qualidade da água (Anghinoni; Vezzani, 2021; Palm *et al.*, 2014). Embora a agricultura de base ecológica seja mais rentável ao se considerar os custos ambientais, o sistema convencional ainda proporciona, em muitos casos, maior produtividade na colheita (De Ponti; Rijk; Van Ittersum, 2012). Portanto, compreender manejos que aliem conservação ambiental à alta produtividade é o grande desafio atual.

Nesse sentido, a transição para modelos conservacionistas exige pragmatismo. Revisões recentes destacam que a agroecologia, embora indispensável, foca primordialmente na dinâmica ecológico-agronômica e deve ser compreendida como uma etapa fundamental dentro do escopo maior da Agricultura Sustentável (Terán-Samaniego *et al.*, 2025). Para superar as limitações de escalabilidade da agroecologia isolada e garantir viabilidade econômica e segurança produtiva, é imperativo adotar uma abordagem sistêmica. A quantificação e validação da eficiência das práticas adotadas, através de dados técnicos consistentes, é o que viabiliza a adoção real desses manejos por pequenos e médios produtores.

Dentro dessa visão sistêmica, a base de qualquer transição bem-sucedida é a vitalidade edáfica. De acordo com Primavesi (2016), garantir a saúde do solo assegura plantas saudáveis e produtivas. De fato, a qualidade nutricional vegetal em sistemas de base ecológica pode ser superior, estando intimamente associada a indicadores como a atividade microbiológica e o teor de matéria orgânica (Das *et al.*, 2017; Reeve *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2018).

Nesse contexto, estudos comparativos na cultura do pêssego são fundamentais para impulsionar a persicultura regional com base em práticas que aliem qualidade ambiental e viabilidade econômica (Henriquez, 2020). A oferta de pêssegos orgânicos apresenta potencial de agregação de valor, mas a produção ao ar livre na região sul é considerada complexa, levando muitos produtores a substituírem os pomares por outras culturas mais rústicas ou rentáveis (Nava; Baricelo, 2024).

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a qualidade do solo e o estado nutricional de pomares de pessegueiro (*Prunus persica*) manejados em sistemas orgânicos e convencionais no município de Pelotas-RS. Os objetivos específicos foram: Diagnosticar a saúde do solo nos diferentes sistemas de manejo através de uma abordagem integrada que une os escores da metodologia CASH com a visualização gráfica do Modelo de Quatro Quadrantes (relacionando Carbono Orgânico Total e atividade enzimática); Classificar o estado nutricional dos pessegueiros utilizando a análise foliar de macronutrientes, comparando os resultados obtidos com os manuais de recomendação de adubação e calagem mais atuais e específicos para a região Sul do Brasil e literaturas locais de referência; Comparar os índices de saúde do solo obtidos (integração CASH/4QM) com os teores foliares de nutrientes, verificando se solos classificados como biologicamente saudáveis e ricos em matéria orgânica resultam efetivamente em plantas nutricionalmente equilibradas; Quantificar os estoques de Carbono Orgânico Total e suas frações (MAM e MOP), relacionando-os com a textura do solo para avaliar o potencial de saturação e a estabilidade do carbono armazenado em cada sistema de manejo.

As hipóteses do trabalho são: pomares sob manejo orgânico apresentam índices superiores na integração das abordagens CASH e modelo de quatro quadrantes em relação a pomares com manejo convencional, posicionando-se predominantemente nos quadrantes de "Alta Qualidade" (alto teor de carbono orgânico do solo e alta atividade biológica); a integração das abordagens CASH e modelo de quatro quadrantes demonstra que a atividade enzimática é mais sensível e precoce na detecção de mudanças na qualidade do solo e no potencial produtivo do que as análises químicas isoladas; a capacidade de armazenamento de Carbono Orgânico Total (COT) na fração estável (associada aos minerais - MAM) é limitada pela textura do solo, impedindo que pomares em solos arenosos atinjam os mesmos estoques de carbono estável que os argilosos, independentemente do tempo de manejo orgânico; existe correlação positiva entre a classificação de saúde do solo e o equilíbrio nutricional foliar dentro das faixas de suficiência adequadas (segundo manuais regionais).

2 Revisão de literatura

2.1 Cultura do Pessegueiro e Práticas de Manejo

No Rio Grande do Sul, o cultivo de drupáceas, como o pessegueiro, tem grande importância econômica e social. O estado é o maior produtor de pêssego, sendo Pelotas a região responsável pela maior produção dessa cultura (IBGE, 2024).

Essa concentração reflete o peso dessa atividade para a agricultura familiar e para as pequenas propriedades da região, que dependem dela para sustento e emprego. Embora a área cultivada seja expressiva, a produtividade no estado ainda é baixa em comparação com outras áreas produtivas do Brasil, que têm produtividade mais alta mesmo em áreas menores (Brunetto *et al.*, 2016). Isso evidencia o desafio claro que é aproveitar melhor o potencial produtivo dos pomares gaúchos.

Ainda que o Rio Grande do Sul concentre a maior área cultivada de pessegueiro do Brasil, ainda falta alcançar produtividades competitivas. O manejo adequado, ajustado a partir do acompanhamento de análises de solo e tecido vegetal, é crucial para otimizar a absorção e uso dos nutrientes (Brunetto *et al.*, 2016). A importância econômica da cultura no estado reforça a necessidade de investir em pesquisas que adaptem essas práticas de manejo ao solo e clima regionais, elevando o potencial produtivo dos pomares de pessegueiro (Brunetto *et al.*, 2016).

Ao olhar para o manejo da fertilidade dos solos, as necessidades das culturas anuais e das frutíferas perenes são bem distintas. Plantas anuais, como as de grãos, completam seu ciclo em uma estação, então demandam uma quantidade alta de nutrientes em pouco tempo, especialmente nas camadas mais superficiais do solo, onde concentram suas raízes. Por isso, o manejo dessas culturas envolve doses altas de fertilizantes aplicados diretamente na superfície, para serem absorvidos rapidamente (Brunetto *et al.*, 2016).

Já as frutíferas, como o pessegueiro, seguem um ciclo bem diferente, já que são perenes e mantêm um ciclo anual de produção. Elas têm raízes que alcançam camadas mais profundas do solo e absorvem nutrientes de forma mais gradual ao longo do ano. Essas plantas acumulam nutrientes, como o nitrogênio, nas raízes e nos ramos durante períodos de menor atividade, e redistribuem esses nutrientes internamente para os ramos e frutos na estação de crescimento (Brunetto *et al.*, 2016; Kliwer; Cook, 1974; Millard; Grelet, 2010). Também é importante considerar as variedades de pêssego existentes e mais recomendadas para cada tipo de região,

pois cada uma possui peculiaridades quanto a desempenho em diferentes condições e diferenças na dinâmica de absorção e uso de nutrientes (Menegatti; Souza; Bianchi, 2021), o que consequente influencia na concentração nutricional da parte aérea das plantas (Reighard *et al.*, 2013).

As drupáceas são altamente dependentes de teores equilibrados de N para obter uma produção satisfatória. No caso de sistemas que utilizam práticas de manejo convencionais, o suprimento de N geralmente é realizado através de adubação mineral. A aplicação de N mineral no solo é capaz de aumentar o teor nutricional da parte aérea de pessegueiros, tanto na folha como nos frutos (Barreto *et al.*, 2020; Brunetto *et al.*, 2007). A matéria orgânica é uma das principais fontes de N orgânico para as culturas, e o aumento da matéria orgânica através da aplicação de composto orgânico como fertilizante também é capaz de alterar a qualidade nutricional de frutos em pessegueiros (Melo *et al.*, 2016).

Apesar de aumentar a produtividade do pêssego, a aplicação de composto pode ser sucedida por perdas significativas de N por conta da falta de manejos voltados para o equilíbrio da relação C/N do solo nessa cultura (Sete *et al.*, 2015). A baixa relação C/N do composto orgânico, assim como é a característica de compostos nitrogenados, em conjunto com condições ambientais favoráveis, pode fazer com que o N seja mineralizado rapidamente pelos microrganismos do solo, aumentando as perdas de N para a atmosfera através da sua volatilização em forma de amônia (Boaretto *et al.*, 2013; Lorensini *et al.*, 2017).

De acordo com Betemps *et al.* (2020), as normas nutricionais regionais atualmente utilizadas são baseadas em ensaios de campo que podem não refletir as condições específicas de cada pomar, portanto há necessidade de atualizar e personalizar essas normas com base em dados mais recentes e específicos. A recomendação de N para as culturas de pêssego ainda é um desafio, dada a grande quantidade de variáveis envolvidas no processo referentes a características genéticas e interações com fatores ambientais (Navroski *et al.*, 2023).

Navroski *et al.* (2020) também afirmam que são necessários estudos de calibração para parâmetros de análise de qualidade nutricional para a cultura do pêssego na região de Pelotas, pois os valores extrapolados para padronizar o ótimo da região sul (RS e SC) podem não estar adequados para representar a heterogeneidade existente nos pomares de cada local. Cabe ressaltar que vários

solos da região sul são arenosos, e pode ser que a capacidade de armazenar matéria orgânica, uma das principais fontes de N, seja prejudicada, fazendo com que a falta desse elemento associado à matéria orgânica seja um fator limitante para a produtividade do pêssego (Navroski *et al.*, 2020; Rombola *et al.*, 2012).

Práticas de manejo conservacionistas, como a utilização de plantas de cobertura, ainda que não sejam amplamente utilizadas, podem interferir diretamente de modo positivo no desenvolvimento de pessegueiros. Em alguns casos, o efeito sobre a cultura pode ser variável e dependente da espécie utilizada, podendo ser observados tanto resultados positivos, negativos, ou até mesmo a não interferência significativa sobre o desenvolvimento e qualidade das plantas de pêssego (Basso *et al.*, 2013; Paula *et al.*, 2016; Rufato *et al.*, 2007). De maneira geral, o uso de práticas de manejo de base ecológica é altamente recomendado para melhorar a qualidade do cultivo de pêssego, principalmente na região de Pelotas, onde o incentivo a adoção de práticas agroecológicas na persicultura são estimuladas junto a produtores da agricultura familiar (Mayer *et al.*, 2016a,b).

2.2 Degradação do Solo e a Importância da Conservação

Dentre as principais causas da perda da qualidade do solo, podem ser citados os processos de erosão, compactação, e a perda de matéria orgânica. Estes processos reduzem a fertilidade do solo, comprometem sua estrutura e capacidade de retenção de água, e acabam por diminuir a produtividade agrícola (Brunetto *et al.*, 2016). A degradação do solo é prejudicial para a agricultura, pois afeta negativamente a capacidade das plantas de absorver nutrientes e água, tornando a sua sobrevivência mais difícil. Além disso, a degradação do solo está relacionada com o aumento da emissão de gases de efeito estufa e diminuição da qualidade das águas superficiais e subterrâneas (UNCCD, 2022).

Portanto, a conservação do solo é fundamental para manter a produtividade agrícola a longo prazo e para preservar os serviços ecossistêmicos que sustentam a vida humana e a biodiversidade. Práticas conservacionistas promovem a saúde do solo, aumentam sua resiliência às mudanças climáticas e reduzem a necessidade de insumos externos (Olsson *et al.*, 2022).

A conservação do solo e da água é essencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e da degradação ambiental. A agricultura contribui

significativamente para a emissão de gases de efeito estufa e para a degradação dos solos, tornando urgente a adoção de práticas de manejo que promovam a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais (Palm *et al.*, 2014).

2.3 Práticas de manejo e sistemas orgânicos e convencionais

Os sistemas convencionais de manejo são caracterizados pelo uso intensivo de insumos químicos, como fertilizantes sintéticos e pesticidas, visando uma alta produtividade a curto prazo. Esse sistema prioriza a eficiência imediata da produção, muitas vezes em detrimento da saúde do solo e da sustentabilidade ambiental (Seufert; Ramankutty; Foley, 2012).

Em contraponto, sistemas conservacionistas envolvem práticas como a rotação de culturas, a adubação verde e a redução do uso de insumos externos. Essas práticas visam melhorar a saúde do solo, aumentar sua fertilidade natural e promover a sustentabilidade a longo prazo, reduzindo a dependência de insumos químicos e minimizando os impactos ambientais (Lopes; Lopes, 2011).

Cada sistema tem suas vantagens e limitações. Dentre as limitações em sistemas de produção orgânicos, está a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias que possam ser empregadas na transição do sistema convencional para os sistemas orgânicos (Yu *et al.*, 2018). Sistemas convencionais podem oferecer alta produtividade imediata, mas apresentam limitações em termos de sustentabilidade e impacto ambiental negativo. Em contraste, sistemas conservacionistas promovem a sustentabilidade e a saúde do solo, mas podem ter desafios relacionados à produtividade e ao manejo necessário para manter a eficiência (Anghinoni; Vezzani, 2021).

Nesse contexto de transição, o debate científico contemporâneo exige uma análise pragmática sobre o alcance das práticas de base ecológica. Conforme destacam Terán-Samaniego *et al.* (2025), embora o conceito de agroecologia seja uma abordagem fundamental para direcionar a agricultura rumo à resiliência ambiental, ele atua predominantemente nas esferas agronômica e ecológica. Por apresentar limitações operacionais quanto à sua escalabilidade plena e resolução de problemas estruturais amplos, a agroecologia deve ser compreendida como uma etapa (ou ferramenta) dentro de um paradigma mais abrangente: a Agricultura Sustentável. A Agricultura Sustentável, dotada de uma abordagem sistêmica

multiescalar, é mais bem equipada para lidar com os impactos das mudanças climáticas e a segurança alimentar global, pois integra diversas disciplinas, atores sociais e viabilidade econômica (Terán-Samaniego *et al.*, 2025).

Portanto, especialmente em contextos dominados pela agricultura familiar e de pequenos a médios produtores, como o polo persicutor de Pelotas (Mayer *et al.*, 2016b, 2016a), a adoção da agroecologia não deve focar apenas na substituição isolada de insumos. A transição agroecológica eficaz requer a integração de políticas e estratégias que privilegiem práticas coerentes com a escala, a viabilidade e a segurança produtiva, permitindo que os sistemas agrícolas avancem efetivamente para a sustentabilidade (Terán-Samaniego *et al.*, 2025).

Enquanto sistemas convencionais tendem a degradar a qualidade do solo e da água devido ao uso intensivo de químicos e à falta de práticas de conservação, sistemas conservacionistas melhoram a qualidade do solo e da água através da promoção da biodiversidade do solo, aumento da matéria orgânica e redução da erosão (Das *et al.*, 2017).

Desta forma, a tendência é que a adoção de práticas conservacionistas traga múltiplos benefícios, incluindo o sequestro de carbono, a melhoria na qualidade e fertilidade do solo, a melhor retenção de água e a qualidade das bacias hidrográficas. Essas práticas também contribuem para a resiliência dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas (Reeve *et al.*, 2016).

2.4 Nutrição das Plantas e Qualidade do Solo

A qualidade do solo está diretamente ligada à nutrição das plantas, influenciando a disponibilidade e a absorção de nutrientes essenciais. Solos saudáveis, ricos em matéria orgânica e com alta atividade microbiana, proporcionam um ambiente ideal para o crescimento das plantas, resultando em melhor composição nutricional e maior produtividade (Yu *et al.*, 2018).

De acordo com Li *et al.* (2015), há uma relação significativa entre a qualidade do solo e a qualidade nutricional das folhas no cultivo de pummelo 'Guanximiyou' (*Citrus grandis* Osbeck). Especificamente, foram observadas correlações entre os nutrientes minerais nas folhas e as propriedades do solo, como pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e teor de matéria orgânica.

O estudo também destacou que a acidificação do solo afetou a disponibilidade

e a absorção de nutrientes minerais, levando a um desequilíbrio severo nos nutrientes do solo e das folhas, o que, por sua vez, prejudicou a qualidade dos frutos, como a granulação dos sacos de suco. A pesquisa concluiu que a condição nutricional das folhas está intimamente ligada à qualidade do solo, e que a gestão adequada do solo é crucial para a produção de frutas de alta qualidade.

Solos bem manejados não apenas suportam um crescimento vigoroso das plantas, mas também melhoram a composição nutricional dos frutos. A presença adequada de macro e micronutrientes no solo assegura que as plantas desenvolvam frutos de alta qualidade nutricional, beneficiando a saúde humana e a economia agrícola (Seufert; Ramankutty; Foley, 2012).

Assim sendo, um solo com teor adequado de matéria orgânica é crucial para a retenção de nutrientes e a melhoria da estrutura do solo. Além disso, a atividade microbiana também é um indicador desejável de se ter em níveis equilibrados, pois o metabolismo microbiano está associado à promoção da ciclagem de nutrientes, tornando-os mais disponíveis para as plantas. Essas interações biológicas são fundamentais para a manutenção da fertilidade do solo e para a saúde das plantas (Das *et al.*, 2017; Reeve *et al.*, 2016).

2.5 Indicadores de Qualidade do Solo

A saúde do solo, definida como a capacidade contínua do solo de funcionar como um ecossistema vital, enfrenta desafios únicos em sistemas de fruticultura perene. Avaliar a saúde do solo requer a utilização de indicadores físicos, químicos e biológicos. Esses indicadores fornecem uma visão abrangente das condições do solo, ajudando a identificar áreas que necessitam de intervenção e a monitorar a eficácia das práticas de manejo adotadas (Bünemann *et al.*, 2018).

Diferentemente das culturas anuais, onde o ciclo de produção é curto e o revolvimento do solo é frequente, os pomares operam sob ciclos longos com intervenções de baixa frequência e sistemas radiculares profundos e estáveis. Huang *et al.* (2025), destacam que os solos de pomares são propensos a uma “degradação oculta”, ou seja, um declínio gradual na fertilidade e na função ecológica microbiana que pode ocorrer mesmo enquanto os rendimentos superficiais são mantidos via insumos externos. Além disso, a falta de rotação de culturas e a acumulação de pesticidas ou metais pesados criam pressões específicas que as metodologias

tradicionais, desenhadas para grãos (Ex.: milho e soja), muitas vezes falham em capturar. Portanto, a avaliação da saúde do solo em pomares exige ferramentas que não apenas mensurem estoques químicos, mas que capturem a dinâmica biológica e a funcionalidade do sistema a longo prazo.

Globalmente, duas das estruturas mais utilizadas para quantificação da saúde do solo são o *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) e o *Comprehensive Assessment of Soil Health* (CASH). O SMAF opera selecionando indicadores baseados em objetivos de manejo e funções do solo, interpretando-os através de curvas de pontuação não lineares (Cherubin *et al.*, 2016). Já o CASH, desenvolvido pela Universidade de Cornell, utiliza funções de distribuição normal cumulativa para padronizar indicadores físicos, químicos e biológicos em uma pontuação de 0 a 100 (Hu *et al.*, 2025; Huang *et al.*, 2025).

Embora ambas as ferramentas tenham se mostrado eficazes em diferenciar práticas de manejo, elas apresentam limitações críticas para a fruticultura. Huang *et al.* (2025) alertam que índices como o CASH precisam de códigos de cultura específicos para árvores frutíferas. A aplicação de curvas calibradas para culturas anuais em sistemas perenes pode gerar diagnósticos imprecisos, pois não considera a demanda nutricional faseada e a dinâmica de carbono distinta das árvores. Os autores também chamam atenção para o fato de que ao compararem SMAF e CASH em diversos usos da terra, descobriram que os escores finais de ambos os métodos são fortemente impulsionados pelos indicadores biológicos ($r=0,87$), sugerindo que uma avaliação focada na biologia pode ser tão eficiente quanto, porém mais econômica e prática, do que medir dezenas de indicadores físicos e químicos.

No Brasil, a avaliação da saúde do solo em sistemas intensivos (como horticultura e fruticultura) enfrenta o desafio adicional da calibração. Métodos tradicionais tentam calibrar a qualidade do solo em função da produtividade (rendimento) da cultura. No entanto, Carneiro *et al.* (2024) argumentam que, em sistemas de frutas e vegetais, a produtividade é altamente variável devido a fatores não edáficos (como poda, clima e pragas), tornando difícil usar o rendimento como o para calibrar indicadores de saúde do solo. Embora frameworks internacionais como o CASH sejam amplamente reconhecidos, (Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2024) alertam para as limitações de sua aplicação direta em solos do Brasil, devido às diferenças edafoclimáticas e mineralógicas que influenciam o funcionamento do solo.

Para superar isso, o uso de curvas de Distribuição Normal Cumulativa (CND), a base estatística do CASH, permite criar padrões de referência a partir da própria população de dados regionais, dispensando a necessidade de dados de produtividade externos. Essa abordagem tem sido validada em solos tropicais brasileiros, mostrando-se capaz de gerar scores sensíveis às práticas de manejo locais.

Diante das limitações expostas, a integração da lógica do CASH com o Modelo de 4 Quadrantes (4QM), focada em indicadores enzimáticos, surge como a alternativa mais promissora para pomares de pessegueiro. Esta abordagem foi aplicada com sucesso por Carneiro et al. (2024) no Distrito Federal. O método seleciona indicadores de alta sensibilidade: Carbono Orgânico Total (COT), beta-glicosidase (ciclo do C) e arilsulfatase (ciclo do S). A arilsulfatase, em particular, demonstrou ser mais precisa na separação de sistemas de manejo do que a beta-glicosidase isolada, confirmando seu potencial como indicador.

Para corrigir as distorções apontadas por (Hu et al., 2025) e eliminar o efeito de confusão da textura do solo, utiliza-se a Atividade Enzimática Específica Média (ASEA), normalizando a atividade enzimática pela quantidade de carbono orgânico. Carneiro et al. (2024) demonstraram que, ao usar a ASEA, a influência da textura do solo torna-se insignificante, permitindo a comparação direta entre diferentes pomares.

Por fim, o modelo de quatro quadrantes (4QM) permite categorizar os solos em estados funcionais, ou seja, "Saudável" (Alto Carbono/Alta Atividade), "Em Degradação/Adoecendo" (Alto Carbono/Baixa Atividade), "Não Saudável" (Baixo Carbono/Baixa Atividade) e "Em Recuperação" (Baixo Carbono/Alta Atividade) (Mendes et al., 2023).

Portanto, a aplicação conjunta da metodologia de cálculo de scores do CASH (via CND) com a interpretação ecológica do 4QM oferece uma ferramenta robusta, prática e economicamente viável. Ela preenche a lacuna de códigos para frutífera mencionada por Huang et al. (2025) ao criar referências locais, e foca na biologia do solo como o principal indicador de saúde, conforme validado por Hu et al. (2025), permitindo uma avaliação eficiente da sustentabilidade dos pomares de pessegueiro.

Além disso, a seleção dos indicadores beta-glicosidase, arilsulfatase e Carbono Orgânico Total segue os critérios de sensibilidade e praticidade propostos por (Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2024), alinhando-se às iniciativas nacionais de bioanálise de solo (BioAS).

2.6 Diagnóstico da Qualidade Nutricional das Plantas

Estudos indicam que solos saudáveis, com alta matéria orgânica e boa atividade microbiana, estão associados a plantas com maior teor de nutrientes essenciais, como vitaminas e minerais. Isso se traduz em frutos de melhor qualidade nutricional (Yu *et al.*, 2018). Sistemas orgânicos, ao promoverem o aumento na matéria orgânica e da atividade biológica do solo, resultam em maior disponibilidade de nutrientes, melhorando a qualidade dos frutos (Reeve *et al.*, 2016). Práticas conservacionistas, como a rotação de culturas, uso de plantas de cobertura e a adubação verde, potencializam essa composição nutricional, valorizando os produtos agrícolas (Das *et al.*, 2017).

Na cultura do pessegueiro, a diagnose foliar constitui a principal ferramenta para monitorar o estado nutricional e orientar a adubação. No Sul do Brasil, a interpretação dessas análises baseia-se majoritariamente nas faixas de suficiência estabelecidas pelo "Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina" (CQFS - RS/SC, 2016). No entanto, a aplicação generalista destas normas regionais tem revelado inconsistências práticas, especialmente na região de Pelotas, RS. Produtores locais frequentemente observam pomares altamente produtivos cujos teores foliares, notadamente de nitrogênio, são classificados como "deficientes" pelos critérios oficiais.

Evidências dessa discrepância foram documentadas por Navroski *et al.* (2020), que ao avaliarem 65 pomares na região de Pelotas, RS, classificaram 93,6% das amostras como tendo N "abaixo do normal" ou "insuficiente" segundo o manual de 2016, embora a região mantenha sua relevância produtiva. Esse descompasso sugere que as faixas de referência oficiais podem estar superestimadas para as condições edafoclimáticas locais e para as cultivares modernas, falhando em capturar as especificidades da região. Tal cenário reforça a discussão proposta por Betemps *et al.* (2020) que sugerem uma diagnose local, baseada na comparação com vizinhos de sucesso, para corrigir distorções onde normas estaduais falham em identificar fatores limitantes.

Para superar essas limitações, estudos recentes propuseram a revisão dos níveis críticos para a fruticultura sul-brasileira. Hindersmann *et al.* (2026) utilizando a Regressão Quantílica Segmentada Bayesiana (BSQR) em um banco de dados das cultivares "PS 10711" e "Maciel" (esta última predominante em Pelotas, RS),

confirmaram que os valores de referência do manual de 2016 estão descalibrados. O estudo propôs uma nova Faixa de Suficiência para N de 28 a 33 g kg⁻¹, intervalo significativamente inferior ao preconizado pelo CQFS-RS/SC (2016) de 33 a 45 g kg⁻¹, confirmando que o manual atual induz à superestimação da necessidade de adubação nitrogenada. Inversamente, para o potássio, encontraram níveis críticos (23,5 g kg⁻¹) superiores aos do manual (14 a 20 g kg⁻¹), indicando que as recomendações oficiais podem estar subestimando a demanda por este nutriente essencial para a qualidade do fruto. Além disso, estabeleceram valores inéditos de referência para o enxofre em pessegueiro (0,70 a 1,00 g kg⁻¹).

Além da calibração dos níveis, a própria metodologia de interpretação carece de evolução. Conforme destacado por Brunetto *et al.* (2026), a premissa de que normas nutricionais de manuais estaduais sejam universalmente aplicáveis é um mito, visto que a variabilidade edafoclimática impõe níveis críticos dependentes do ambiente. Brunetto *et al.* (2026) explicam ainda que a análise foliar tradicional opera em um espaço composicional fechado, onde a alteração de um nutriente afeta a interpretação dos demais. Para corrigir isso, métodos como a Diagnose da Composição Nutricional (CND), fundamentada na transformação *centered log-ratio* (clr), permitem avaliar o equilíbrio global do sistema, capturando interações complexas que a interpretação univariada falha em detectar.

A fronteira do conhecimento aponta, portanto, para a integração de dados sistêmicos. Moura-Bueno *et al.* (2026) demonstraram que a predição precisa de produtividade depende da utilização de algoritmos de Machine Learning (como Random Forest) que processem simultaneamente dados nutricionais, climáticos e biométricos. O estudo concluiu que o modelo mais robusto elencou as "horas de frio" como a variável de maior importância relativa, seguida pelos teores foliares de K e N. Isso va lida a abordagem de que a diagnose nutricional isolada tem baixa capacidade preditiva e que a precisão depende da integração de dados climáticos, algo que os métodos convencionais estáticos não contemplam.

Diante da necessidade de atualização das faixas do manual de 2016 para a realidade de Pelotas, RS e da disponibilidade de novas ferramentas computacionais, esta dissertação adota uma abordagem baseada em algoritmos e dados locais. A utilização das novas referências propostas por Hindersmann *et al.* (2026) e a visão sistêmica defendida por Moura-Bueno *et al.* (2026) permitirão uma interpretação mais

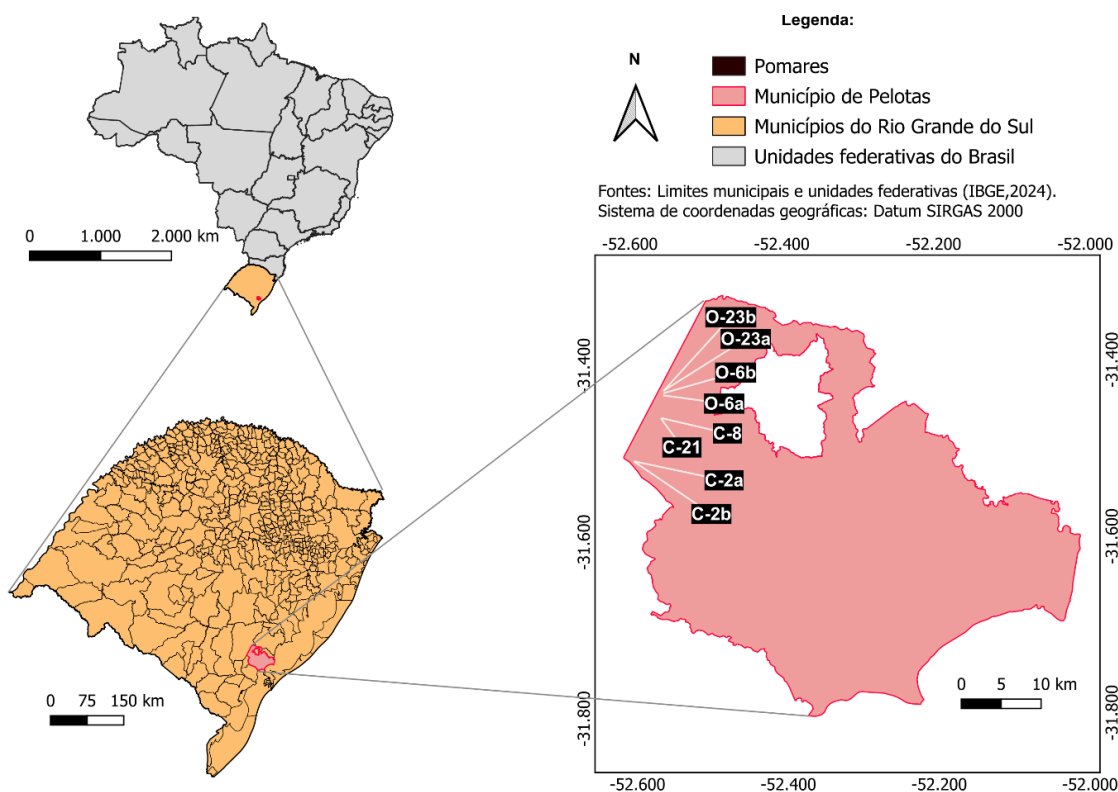
assertiva do estado nutricional dos pomares, corrigindo distorções históricas no manejo de Nitrogênio e Potássio e consolidando a transição para uma fruticultura de precisão.

3 Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado no município de Pelotas (RS), em 8 pomares de produção de pêssego, entre a safra de 2024 e 2025 (Figura1). De acordo com a classificação Köppen, o clima da região é do tipo úmido subtropical (Cfa), característico por ter verões quentes e invernos rigorosos (Alvares *et al.*, 2013).

Figura 1: Mapa da localização dos pomares no município de Pelotas – RS.



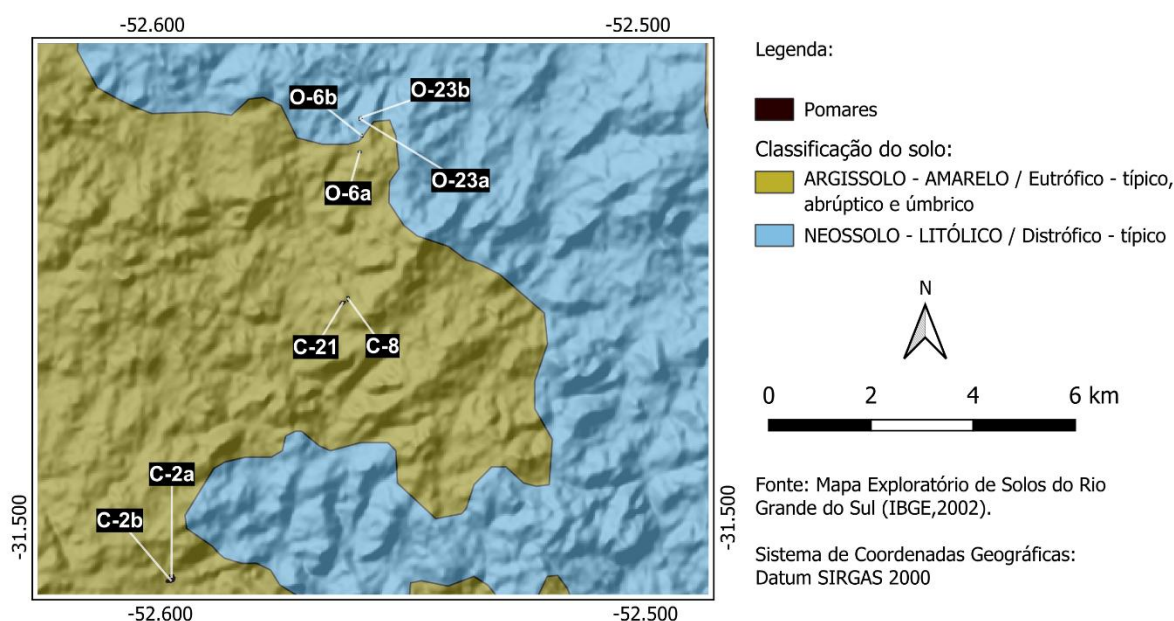
Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os critérios para a seleção dos pomares foram: localização (Pelotas); tipo de manejo adotado (orgânico ou convencional); pomares no período fenológico recomendado para a coleta de tecido foliar (CQFS - RS/SC, 2016); disponibilidade da propriedade em receber a pesquisa e as visitas para as coletas. Os nomes dos pomares estudados são representados pelo tipo de manejo: “O” (orgânico) ou “C”

(convencional), a idade do pomar em anos, e as letras “a” ou “b” para diferenciar pomares com o mesmo tipo de manejo e idade.

De acordo com o mapa de solos do Rio Grande do Sul (IBGE, 2002) os pomares estão localizados em áreas onde são classificados como Argissolos Amarelos ou Neossolos Litólicos (Figura 2), conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2025).

Figura 2: Mapa de classificação dos solos da área onde os pomares estão localizados.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

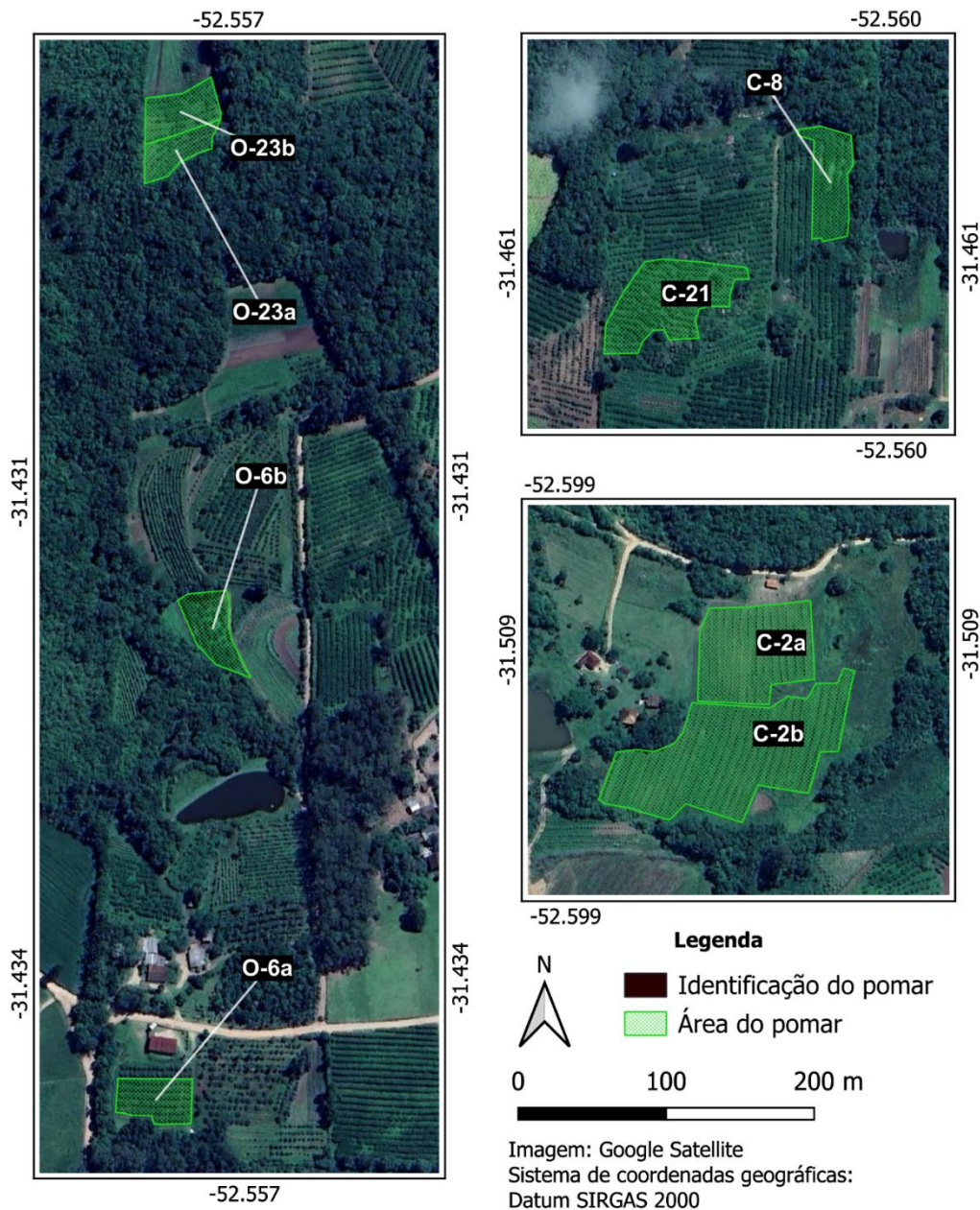
A escolha dos pomares convencionais foi intermediada pela assistência técnica da EMATER. Quanto aos pomares orgânicos, foi encontrada apenas uma propriedade agrícola que faz o cultivo orgânico de pêssego em escala comercial no município de Pelotas e possuíam 4 pomares orgânicos (O-6a, O-6b, O-23a, O-23b). Os pomares convencionais são 4, sendo 2 em propriedade distinta: C-21 e C-8; C-2a e C-2b (Figura 3).

3.2 Caracterização do histórico de manejo dos pomares

A fim de caracterizar o tipo de manejo adotado em cada um dos pomares ao longo do tempo, foi realizado um questionário junto aos agricultores a fim de identificar informações importantes para a compreensão da saúde do solo e das plantas. Dentre as informações adquiridas estão: o histórico de uso do solo, ano de implantação do pomar, cultivar, porta-enxerto, práticas de adubação e preparo do solo, manejo de

plantas espontâneas, entre outras. A sistematização completa referente a cada pomar está exibida no Quadro 1.

Figura 3: Mapa da delimitação do perímetro dos pomares



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Foram utilizadas imagens de satélite via Google Earth para auxiliar na visualização do histórico de uso da terra anteriormente à implantação dos pomares. O cálculo da declividade foi realizado no QGIS, através da sobreposição dos polígonos com o mapa de elevação digital do terreno, usando a ferramenta de algoritmo “Estatísticas zonais”.

Quadro 1: Histórico de uso do solo, e caracterização das áreas e dos manejos adotados nos pomares de pêssgo em Pelotas, RS

(continua)

Pomar	Variedade enxerto/ porta enxerto	Area (m²)	Relevo e histórico de uso	Idade do pomar	Preparo da área de implantação do pomar	Manejo pós implantação	Manejo das entrelinhas	
O-6a	Esmeralda/ Capdebosq	1397	Declividade de 5%. Silvicultura de eucalipto (até 2013). Vegetação espontânea, roçada em 2015 e 2016. (2013 a 2018).	6 anos (2018)	Subsolagem, calagem, gradagem, levantamento de canteiros. Espaçamento 4 m x 5 m. Adubação com cama de aviário (7kg por planta aproximadamente)	Cama de aviário, 7 kg por planta (julho/agosto). 0,5kg de calcário dolomítico por planta quando necessário. ¹ Monitoramento da mosca das frutas (<i>Anastrepha fraterculus</i> Wied.) através de armadilhas. Aplicação de leite diluído em água (10/1) e solução de hipoclorito nas folhas. Irrigação eventualmente no verão, quando havia água no açude. Não foi irrigado em 2024/25	Como adubação de inverno foi plantada aveia preta (<i>Avena strigosa</i> Schreb.). Quando plantas apresentaram clorose anormal, foi realizado o plantio de ervilhaca peluda (<i>Vicia villosa</i> Roth), caso contrário, foi mantida a vegetação com o próprio banco de sementes. Roçadas no final de março, com trator nas entrelinhas e roçadeira nas linhas.	
O-6b	Chimarrita/ Capdebosq	1406	Declividade de 11%. Capoeira manejada com queimadas (até 1993). Primeiro pomar de pêssgo em 1994. Adição de aguapé (40 carretas por ano) para fertilizar a terra (de 1994 a 1996). Plantio (<i>Mucuna pruriens</i> (L.) DC) e aveia preta (<i>Avena strigosa</i> Schreb.) a partir de 1996). Substituição do pomar antigo (2018)		Subsolagem, calagem, gradagem, levantamento de canteiros. Espaçamento 4 m x 4 m linha. Adubação com de cama de aviário (7kg por planta aproximadamente)			
O-23a	Pialo/ Capdebosq	1019	Declividade de 20,8%. Lavoura de hortaliças, com terraceamento para diminuir a erosão (de 1993 a 2002).	23 anos (2002)				
O-23b	Granada/ Capdebosq	1396						

(conclusão)

Pomar	Variedade enxerto/ porta enxerto	Area (m²)	Relevo e Histórico de uso	Idade do pomar	Preparo da área de implantação do pomar	Manejo pós implantação	Manejo das entrelinhas
C-21	Maciel/ Aldrighi	3683	Declividade de 11,8%. Terreno com muito afloramento rochoso e superfície irregular. Capoeira, vegetação nativa (até 2004)	21 anos (2004)	Subsolagem e levantamento de canteiro, sem calagem. Espaçamento 1,5 m x 4,5 m. Adubação com NPK 13-13-13. Correção do pH com calcário dolomítico, dois anos após implementação do pomar.	Adubação foliar com potássio (K-44), cálcio e boro. NPK 13-13-13, e após 2010, 16-16-16. Calagem com calcário dolomítico em 2006 e em 2014. Adição de cloreto de potássio no solo. Controle de doenças com fungicida e inseticida. Irrigação durante o verão, em semanas mais secas.	Plantio de aveia ² em abril e corte após formação de sementes. Roçada, na entrelinha com trator e na linha com roçadeira manual. Antes da adubação, em agosto, foi realizada dessecação com herbicida nas linhas.
C-8	Santa Áurea/ diversos	1894	Declividade de 8,6%. Lavoura de hortaliças (2004-2012). Vegetação nativa até (2012-2017).	8 anos (2017)	Subsolagem, correção da acidez com calcário dolomítico, gradagem, levantamento de canteiros. Espaçamento 2,5 m x 4,5 m.	Adubação foliar de potássio (K-44), cálcio e boro. NPK 16-16-16 (agosto/setembro). Calagem apenas na implantação. Controle de doenças com fungicida e inseticida. Sem irrigação.	
C-2a	Citriño/ diversos	4604	Declividade de 7,8%. Lavoura de milho e pasto para alimentação animal (até 2023).	2 anos (2023)	Subsolagem, aplicação de calcário granulado, nova subsolagem, gradagem, levantamento dos canteiros. Adubação com N-P-K. Espaçamento 2 m x 5 m.	NPK 13-13-13, em julho e setembro. Calagem com calcário granulado (7,5 t/ha ¹) em 2024. Controle de doenças com fungicida e inseticida. Sem irrigação.	Supressão das espontâneas através de dessecação com herbicida. Não foi realizado plantio de nenhuma espécie para cobertura.
C-2b		9107	Declividade de 7,8%. Pomar de pêssego (1999 a 2017). Vegetação nativa (2018 até 2023)				

Fonte: Elaborada pelo autor (2024). ¹ última aplicação de calcário em 2016 nos pomares O-23, em 2022 no pomar O-6a e apenas na implantação no pomar O-6b; ² plantio de aveia desde 2010 no pomar C-21, e no C-8 desde o início.

3.3 Amostragem e análise de solo

As coletas de amostras de solo foram realizadas entre março e abril de 2024. Foram coletadas 40 amostras de solo deformadas e 200 amostras indeformadas. Em cada pomar, foram selecionadas aleatoriamente 5 plantas dentre as 25 que foram marcadas na coleta de tecido foliar. Ao redor de cada planta, foram cavadas 4 trincheiras (uma em cada direção abaixo da projeção da copa) com uma pá de corte, e em cada trincheira foi coletada 1 amostra simples na profundidade de 0,00 m a 0,10 m. Com o auxílio de régua e faca, foi realizada a toaleta e então a amostra foi misturada em um balde com as demais para formar uma amostra composta homogênea por planta.

A coleta foi realizada na profundidade de 0,00m a 0,10m, pois conforme Petry *et al.* (2016) é onde se concentra a maior densidade de raízes finas absorventes e a maior atividade biológica do pessegueiro.

As amostras deformadas homogeneizadas foram acondicionadas em sacos plásticos fechados para preservar a umidade e armazenadas em geladeira à aproximadamente 5 ° C por 3 dias, até serem peneiradas em malha de 2mm. Parte do solo peneirado foi reservado ainda úmido para análises microbiológicas de Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) e Respiração Basal do Solo (RBS). O restante do solo foi seco e armazenado como Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) para a determinação da granulometria, atributos químicos e atividade enzimática.

Em cada uma das trincheiras foi coletada 1 amostra indeformada de solo, totalizando 4 repetições por ponto de amostragem (planta). As amostras foram coletadas em anel volumétrico (diâmetro 47 mm x altura 49 mm), centralizado na profundidade de 0,05 m para contemplar a profundidade intermediária (0,025 a 0,075 m) da camada de 0,00 a 0,10 m. As amostras indeformadas foram envoltas em papel alumínio e acondicionadas em sacos plásticos para se manterem estáveis até o momento das análises.

3.3.1 Atributos físicos

As análises dos atributos físicos foram realizadas conforme descrito em Teixeira *et al.* (2017). Através das amostras indeformadas foram determinadas a densidade do solo (Ds) e as porcentagens de porosidade total (Pt), macroporosidade

(Ma) e microporosidade (Mi). Uma alíquota da TFSA foi utilizada para a determinação da granulometria pelo método do densímetro com escala de Bouyoucos.

Com base nas proporções das frações areia, silte e argila, os solos foram enquadrados em classes texturais de acordo com o triângulo textural (Santos *et al.*, 2025).

3.3.2 Atributos químicos

O Carbono Orgânico do Total (COT) foi determinado a partir do método Walkley-Black adaptado (Matos *et al.*, 2017), com moagem do solo em almofariz de ágata e aquecimento da amostra em tubos de digestão de 50 mL, com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), durante 30 minutos em bloco digestor pré-aquecido a 170 °C. A titulação foi realizada com solução de Sulfato Ferroso Amoniacal à 0,10 mol L⁻¹, preparado com Sal de Mohr ($(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$), por ser mais estável à oxidação pelo ar do que o Sulfato de Ferro ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$).

Foi realizado o fracionamento granulométrico da matéria orgânica nas frações em Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MAM). O fracionamento ocorreu por agitação do solo durante 15 horas com Hexametáfosfato de Sódio (NaP_3)₆ 5 g L⁻¹ e peneiramento da solução com malha de 0,053 mm, separando o elutriado (MAM) da fração retida na peneira (MOP). Ambas as frações foram secas em estufa a 70 °C, durante até 3 dias, depois pesadas e moídas em almofariz de ágata. A MOP foi analisada da mesma forma que o COT, e a MAM foi deduzida a partir da diferença entre COT e MOP (Matos; Mendonça, 2017). O teor de matéria orgânica em porcentagem foi calculado a partir da multiplicação do valor do COT por 1,724, que é o fator de correção, assumindo que o carbono participa de 58% da composição da matéria orgânica do solo (MOS) o COT.

A análise dos atributos químicos foi realizada conforme Tedesco (1995). A extração de P e K foi realizada com solução extratora Melich-1. Para a determinação do P foi utilizado o espectrofotômetro. A determinação de K⁺ e Na²⁺ foi realizada em fotômetro de chama. Os íons Ca²⁺, Mg²⁺ e Mn²⁺ foram determinados por fotômetro de absorção; e o Al³⁺ por titulação com hidróxido de sódio (NaOH). Os valores de pH foram aferidos com pHmetro, sendo a acidez ativa medida em água, e a acidez potencial em solução tampão TSM.

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) foi calculada pela soma dos íons Ca^{2+} , K^+ , Na^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} e Al^{3+} , expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de solo. A saturação por bases (V %) foi calculada através da soma das bases dividida pelo valor da CTC e multiplicado por 100 para ser expresso em porcentagem. Os nutrientes do solo foram interpretados através do manual de adubação e calagem (CQFS - RS/SC, 2016), de acordo com a quantidade de argila e a CTC potencial do solo.

3.3.3 Quocientes metabólico, microbiano e de mineralização

A determinação do Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) foi realizada conforme descrito por Silva; Azevedo; De-Polli (2007a), com a adaptação de fazer a análise em duplicatas para viabilizar o trabalho de acordo com a capacidade produtiva do Laboratório de Microbiologia do Solo da UFPel. A determinação do CBM baseia-se no rompimento das células microbianas (por fumigação com clorofórmio) para liberar o carbono celular, calculando-se a diferença entre o carbono extraído dessa amostra fumigada e o de uma amostra não fumigada.

A Respiração Basal do Solo (RB) foi determinada a partir do procedimento descrito em Silva; Azevedo; De-Polli (2007b) com adaptações. A atividade metabólica dos microrganismos é medida através da captura e quantificação do carbono emitido na forma de CO_2 pela respiração microbiana. A molaridade do ácido clorídrico (HCl) usado na titulação foi modificada de 0,5 M para 1 M. O volume de hidróxido de sódio (NaOH) foi de 20 mL. O NaOH foi colocado em copos plásticos de 80 mL, em suportes de arame de aço, dentro de vidros de 600 mL fechados hermeticamente com vedação interna de borracha.

A partir dos valores de RB e CBM obtidos, foi calculado o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), que é o carbono emitido como CO_2 por unidade de carbono microbiano em determinado intervalo de tempo. O cálculo é realizado através da equação 1:

$$q\text{CO}_2 \text{ (mg C - CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM h}^{-1}) = \left(\frac{\text{RB (mg C - CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1})}{\text{CBM (mg C kg}^{-1} \text{ solo)}} \right) \times 1000 \quad (1)$$

O quociente microbiano ($q\text{MIC}$) que representa a relação entre CBM e COT foi calculada através da equação 2:

$$q\text{MIC (\%)} = \left(\frac{\text{CBM (mg C kg}^{-1} \text{ solo)}}{\text{COT (mg kg}^{-1} \text{ solo)}} \right) \times 100 \quad (2)$$

O quociente de mineralização (qM) que demonstra a porcentagem do carbono total do solo que foi mineralizada pelos microrganismos durante o tempo de incubação (28 dias) conforme a equação 3:

$$qM (\%) = \left(\frac{C-CO_2 \text{ acumulada (mg kg}^{-1} \text{ solo)}}{COT \text{ (mg kg}^{-1} \text{ solo)}} \right) \times 100 \quad (3)$$

3.3.4 Atividade enzimática específica média (AEEM)

A atividade enzimática foi determinada através da análise das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, pelo método descrito por Tabatabai (1994). Cada amostra foi analisada através de duas repetições e um controle. A quantificação da atividade das enzimas foi realizada pela coloração do p-nitrofenol liberado pelas enzimas durante 1 hora de incubação a 37 °C. A leitura das amostras foi realizada em espectrofotômetro e o resultado expresso em µg p-nitrofenol g⁻¹ de solo⁻¹ hora⁻¹.

Foi calculada a atividade enzimática específica média (AEEM) através da normalização entre valores de atividade enzimática e COT. A atividade de cada enzima foi dividida pela quantidade de carbono, resultando na atividade específica (S) da beta-glicosidase (S-BETA) e da arilsulfatase (S-ARIL) (CHAER et al. 2023). O cálculo foi realizado através das equações abaixo:

$$S - ARIL = \frac{ARIL (\mu g \text{ p-nitrofenol } h^{-1})}{COT (g \text{ kg}^{-1})} \quad (4)$$

$$S - BETA = \frac{BETA (\mu g \text{ p-nitrofenol } h^{-1})}{COT (g \text{ kg}^{-1})} \quad (5)$$

$$AEEM (g \text{ p-nitrofenol } kg^{-1} \text{ COT } h^{-1}) = \frac{S-ARIL + S-BETA}{2} \quad (6)$$

$$AEEM (g \text{ PNF } kg^{-1} \text{ COT } h^{-1}) = \left(\frac{Aril (\mu g \text{ PNF } h^{-1}) + Beta (\mu g \text{ PNF } h^{-1})}{COT (g \text{ kg}^{-1})} \right) \div 2 \quad (7)$$

3.3.5 Avaliação da saúde do solo através da combinação CASH e 4QM

Diante da inexistência de dados sistematizados sobre a produtividade dos pomares de pessegueiro avaliados, adotou-se uma abordagem baseada em

indicadores de saúde do solo. Inicialmente, procedeu-se à elaboração de histogramas de frequência para o Carbono Orgânico Total (COT) e para a Atividade Enzimática Específica Média (AEEM), conforme realizado por Moebius-Clune *et al.* (2016).

Utilizando a média e o desvio padrão do conjunto de dados, foi realizada a distribuição normal cumulativa (CND), a fim de transformar os valores absolutos em funções de pontuação (scores) padronizados em uma escala de 0 a 100. Com base em Chaer *et al.* (2023), foi definido o score 50 como o nível crítico, ou seja, valores inferiores a 50 sugerem que o agroecossistema está comprometido, tanto sob a ótica da funcionalidade edáfica quanto da viabilidade econômica.

Para a interpretação integrada, foi utilizada a representação gráfica de quatro quadrantes, plotando a AEEM no eixo X e o COT no eixo Y. As linhas de corte baseadas na abordagem CASH foram utilizadas para dividir o gráfico de dispersão AEEM vs. COT em quatro situações: os Quadrantes 1 (Alto COT/Alta AEEM) e 3 (Baixo COT/Baixa AEEM) representam estados estáveis de alta e baixa qualidade (solos saudáveis vs. não saudáveis), respectivamente. Já os quadrantes mistos indicam transição: o Quadrante 2 (Baixa AEEM/Alto COT) sinaliza degradação biológica (perda de C), enquanto o Quadrante 4 (Alta AEEM/Baixo COT) aponta para processos regenerativos (ganho de C).

3.3.6 Estoques de carbono

O cálculo dos estoques de Carbono Orgânico Total (Cstock) foi realizado convertendo-se os teores de concentração (g kg^{-1}) para quantidade por unidade de área (Mg ha^{-1}), seguindo a metodologia descrita por (Fernandes; Fernandes, 2009), baseada na expressão proposta por Veldkamp (1994). Utilizou-se a equação 8:

$$C_{stock} = (COT \times Ds \times e) \div 10 \quad (8)$$

Sendo que Cstock= estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha^{-1}); COT= teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg^{-1}) Ds = densidade do solo da profundidade (kg dm^{-3}); e = espessura da camada considerada (cm). A incorporação da densidade do solo (Ds) neste cálculo é imprescindível para corrigir distorções, uma vez que, conforme ressaltam os autores, a simples comparação de concentrações pode levar a interpretações equivocadas, visto que diferentes históricos de manejo alteram a estrutura física e a massa de solo por volume avaliado.

3.4 Amostragem e análise de tecido foliar

As coletas das folhas foram realizadas em dezembro de 2024, entre a 13^a e 15^a semana após o florescimento pleno ou 2 semanas antes da colheita, de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) (CQFS - RS/SC, 2016). Em cada pomar, foram selecionadas aleatoriamente 25 plantas para serem amostradas. Em cada planta, foram coletadas 8 folhas, sendo um par em cada direção da projeção da copa, na porção mediana dos ramos do ano. As plantas amostradas foram marcadas com fitas para possibilitar a identificação posteriormente. As folhas coletadas foram armazenadas em sacos de papel e levadas ao Departamento de Solos da UFPEL.

O preparo das amostras de tecido foliar foi realizado conforme Tedesco (1995). As folhas foram higienizadas com água destilada, a umidade excessiva foi retirada com papel toalha e posteriormente as folhas foram secas ao ar e acondicionadas novamente em sacos de papel para serem secas na estufa a 65 °C até atingir peso constante. Foi utilizado um moinho de facas do tipo Willey para triturar as amostras secas até passarem na malha de 1 mm. As amostras secas e moídas foram armazenadas em sacos plásticos zip-lock, acondicionados dentro de sacos de papel.

A determinação dos macronutrientes do tecido foliar foi realizada conforme Tedesco (1995). As amostras digeridas foram armazenadas em coletores universais de plástico com capacidade de 80 mL e as alíquotas foram retiradas para a determinação de N, P, K, Ca e Mg. O N foi determinado através do N total, extraído em destilador pelo método Kjeldalh, enquanto o P foi determinado por espectrofotometria, o K por fotometria de chama e Ca e Mg por espectrofotometria de absorção.

A avaliação nutricional das plantas foi realizada com base na comparação dos valores encontrados para cada macronutriente com os valores recomendados pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS - RS/SC, 2016). Cada uma das 25 amostras por pomar foi classificada dentro de alguma das faixas de suficiência: Insuficiente, Abaixo do normal, Normal, Acima do normal, Excessivo. Também foram utilizados valores de referência locais, calibrados com pomares do sudeste e nordeste do RS, incluindo Pelotas (Betemps *et al.*, 2020; Hindersmann *et al.*, 2026).

3.5 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo os resultados expressos pela média aritmética seguida do desvio padrão, a fim de caracterizar a variabilidade existente dentro de cada pomar. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Variáveis que não atendem aos pressupostos de normalidade foram transformadas em logaritmo natural (ln) ou submetidas à análise não paramétrica. A comparação entre os pomares foi realizada pela Análise de Variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey, ou pelo teste de Kruskal-Wallis, ambos a 5% de probabilidade de erro.

Foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) para avaliar a estrutura multivariada dos dados, permitindo visualizar a correlação entre os indicadores de qualidade do solo e o agrupamento dos pomares em função dos sistemas de manejo (orgânico e convencional) e classificação no modelo de 4 quadrantes.

Para avaliar o grau de associação entre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, foi realizada a Análise de Correlação de Pearson. A significância dos coeficientes de correlação foi verificada pelo teste t de Student, considerando-se os níveis de probabilidade de erro de 5% (*), 1% (**) e 0,1% (***). Todas as análises estatísticas foram realizadas no RStudio.

4 Resultados e discussão

4.1 Indicadores físicos da qualidade do solo

A distribuição das frações granulométricas (areia, silte e argila) e a classificação textural dos solos dos oito pomares avaliados são apresentadas na Tabela 1. A análise de variância indicou diferenças significativas ($p < 0,05$) para todas as frações texturais entre os agroecossistemas, confirmando a heterogeneidade das áreas de estudo. A fração areia foi o constituinte predominante em todos os solos, variando de 55,0% a 75,1%. O pomar O-6a destacou-se com o maior teor de areia (75,1%), diferindo significativamente de todos os demais pomares. Em contrapartida, o pomar O-23a apresentou o menor valor para esta fração (55%), não diferindo do pomar vizinho (O-23b) nem dos demais pomares manejados em sistema convencional. Os pomares com teor de areia superior ou igual a 63% (O-6a, O-6b, C-8 e C-2a) tendem à classe Franco-Arenosa. Já os pomares com teores de argila superiores a 19-20% (O-23a, O-

23b, C-21 e C-2b) enquadram-se predominantemente na classe Franco-Argilo-Arenosa.

Quanto à densidade e porosidade do solo (Tabela 2), os pomares C-8 e O-6a apresentaram, respectivamente, a maior e a menor porosidade total do solo dentre os pomares estudados.

Tabela 1: Classificação granulométrica do solo e porcentagem das frações argila, silte e areia, em pomares de pêssego em Pelotas – RS.

Pomar	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
O-6a	75.08 ± 1.20	11.82 ± 1.18	13.11 ± 0.02	Franco arenosa
O-6b	65.99 ± 3.61	17.67 ± 3.07	16.33 ± 2.86	Franco arenosa
O-23a	55.00 ± 3.16	20.46 ± 3.32	24.54 ± 2.22	Franco argilo arenosa
O-23b	57.43 ± 3.74	22.96 ± 2.08	19.60 ± 2.30	Franco argilo arenosa
C-21	57.25 ± 6.64	19.96 ± 2.60	22.79 ± 4.97	Franco argilo arenosa
C-8	63.01 ± 4.83	17.31 ± 2.69	19.67 ± 2.99	Franco argilo arenosa
C-2a	63.03 ± 1.60	18.80 ± 0.94	18.17 ± 1.76	Franco arenosa
C-2b	58.03 ± 6.66	16.80 ± 2.38	25.17 ± 7.68	Franco argilo arenosa
CV (%)	19.0	13.3	7.1	

Nota: Valores representam a média ± desvio padrão (n=5). Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A densidade do solo (Ds) variou significativamente entre os pomares ($p < 0,001$), comportando-se como um indicador sensível às diferenças de manejo e textura. O pomar C-8 diferenciou-se de todos os demais, apresentando a menor densidade ($1,13 \text{ g cm}^{-3}$) e, conseqüentemente, a melhor qualidade estrutural (Tabela 2). Em contrapartida, os pomares O-6a, O-6b, O-23b, C-21 e C-2b formaram um grupo com valores de densidade mais elevados (variando de $1,32$ a $1,47 \text{ g cm}^{-3}$), o que indica maior compactação do solo. O pomar O-6a apresentou o maior valor absoluto de densidade ($1,47 \text{ g cm}^{-3}$), o que pode ser atribuído à sua natureza predominantemente arenosa (75%), que favorece um arranjo mais denso das partículas. Ainda que a densidade alta seja relativamente normal e que solos muito

arenosos não sejam suscetíveis a problemas por compactação, eles podem sofrer com desagregação, o que sugere a adoção de práticas de manejo adequadas (Reichert; Reinert; Braida, 2003).

Tabela 2: Valores referentes à densidade e percentual de porosidade do solo em pomares de pêssego em Pelotas - RS

Pomar	DS (g cm ³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
O-6a	1.47 ± 0.05	23.45 ± 1.10	21.30 ± 2.82	44.75 ± 2.79
O-6b	1.36 ± 0.08	22.02 ± 2.91	27.41 ± 5.15	49.43 ± 3.04
O-23a	1.27 ± 0.04	22.72 ± 0.92	32.20 ± 2.47	54.93 ± 2.77
O-23b	1.34 ± 0.15	22.02 ± 2.43	31.63 ± 2.42	53.65 ± 0.62
C-21	1.34 ± 0.06	19.81 ± 3.42	30.32 ± 3.62	50.13 ± 2.80
C-8	1.13 ± 0.13	32.91 ± 5.60	26.08 ± 2.34	58.98 ± 4.83
C-2a	1.26 ± 0.07	22.76 ± 1.47	24.26 ± 2.24	47.02 ± 2.72
C-2b	1.32 ± 0.08	21.32 ± 3.95	25.57 ± 3.32	46.89 ± 5.82
<i>p</i>	***	***	***	***
CV (%)	6.8	13.3	11.6	6.9

Nota: DS: densidade do solo; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; Pt: porosidade total. Valores representam a média ± desvio padrão (*n*=5). Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A distribuição do sistema poroso corroborou os resultados de densidade. A macroporosidade (Ma), essencial para a aeração e drenagem, foi significativamente superior no pomar C-8 (32,9%), sendo este o único a diferir significativamente dos demais agroecossistemas. Todos os outros sete pomares não diferiram entre si para este atributo, apresentando valores de macroporosidade variando entre 19,8% e 23,4%. Apesar de inferiores ao pomar C-8, ressalta-se que todas as demais áreas mantiveram a macroporosidade acima do nível crítico de 10%, considerado limitante para a saúde edáfica em solos cultivados (Håkansson; Lipiec, 2000).

A porosidade total (Pt) seguiu uma tendência inversa à densidade. O pomar C-8 registrou o maior volume total de poros (59%), diferindo significativamente dos pomares O-6a, C-2a e C-2b. Devido à sua alta densidade e textura arenosa, o pomar O-6a apresentou a menor porosidade total (44,7%) e a menor microporosidade (21,3%) entre as áreas avaliadas, o que sugere uma menor capacidade de retenção de água neste solo em comparação aos pomares mais argilosos, como por exemplo o O-23a (Mi = 32,2%).

Os teores de argila indicados para o cultivo do pessegueiro estão entre 20 e 35%, e solos com partículas minerais muito finas dificultam a drenagem e o manejo do solo, a não ser que sejam profundos e bem estruturados, o que pode evitar o acúmulo de água (Herter; Carvalho, 2022).

4.2 Indicadores químicos do solo

Ao avaliar os atributos químicos do solo, observa-se uma ampla variabilidade na fertilidade entre os pomares, refletindo o histórico de manejo adotado em cada área (Tabela 3).

Os teores de MOS variaram de 2,36% (C-2a) a 6,76% (O-23b). Nesse estudo, observa-se uma relação direta entre a MOS e CTC, indicando que a matéria orgânica é a principal responsável pelas cargas negativas do solo. Esse fato é especialmente importante para solos arenosos, pois a pouca quantidade de argila exige aporte de MOS para garantir a fertilidade e estoque nutricional no solo. O baixo percentual de MOS nos pomares C-2a e C-2b agrava sua condição química, reduzindo a capacidade do solo de reter nutrientes e resistir a variações de pH.

O manejo das entrelinhas demonstrou ser uma prática de manejo eficaz para aumentar consideravelmente a saúde do solo ao longo do tempo. Tanto pomares orgânicos como convencionais que fizeram o uso dessa prática, se beneficiaram com o incremento de MOS e todas as vantagens que ela traz à fertilidade edáfica. Segundo Nunes (2024), o uso de aveia como cobertura de inverno aumenta as chances de colonização micorrízica em pomares de pêssgo. Rufato *et al.* (2007) constataram que o uso de aveia preta (*Avena strigosa*) e o consorcio com outras espécies de cobertura verde, até mesmo junto com vegetação espontânea, é capaz de incrementar o desenvolvimento de plantas de pessegueiro.

Tabela 3: Atributos químicos do solo em pomares de pêssgo na região de Pelotas – RS.

Pomar	pH _{H2O}	MOS %	P ----- (mg dm ⁻³) -----	K	Na	Mn	Ca ²⁺ ----- (cmol _c dm ⁻³) -----	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	CTC _E	SB (%)	V
O-6a	6.37 ± 0.11	2.68 ± 0.69	61.41 ± 12.30	132.00 ± 22.65	10.04 ± 1.99	12.82 ± 4.20	5.01 ± 1.06	1.56 ± 0.19	0	1.87 ± 0.21	8.88 ± 1.38	6.94 ± 1.21	78.12 ± 2.50
O-6b	6.54 ± 0.21	4.94 ± 0.62	107.17 ± 69.02	167.54 ± 36.93	29.12 ± 18.17	3.93 ± 1.39	10.22 ± 1.03	3.31 ± 0.33	0	1.65 ± 0.50	15.76 ± 1.35	14.08 ± 1.09	89.50 ± 2.65
O-23a	6.23 ± 0.23	6.18 ± 1.23	141.17 ± 93.24	213.02 ± 41.46	34.92 ± 30.46	2.92 ± 0.92	11.51 ± 1.00	4.12 ± 0.52	0	2.52 ± 0.57	16.96 ± 4.79	14.44 ± 4.80	83.62 ± 6.90
O-23b	6.24 ± 0.16	6.76 ± 1.17	170.43 ± 55.54	178.40 ± 41.57	42.64 ± 53.95	5.16 ± 2.03	10.90 ± 1.48	3.84 ± 0.60	0	2.29 ± 0.40	17.70 ± 1.85	15.38 ± 1.95	86.78 ± 2.78
C-21	5.81 ± 0.24	4.46 ± 1.24	42.15 ± 24.91	282.16 ± 137.63	16.88 ± 4.36	4.48 ± 0.61	4.10 ± 0.79	1.42 ± 0.32	0.28 ± 0.07	2.95 ± 0.66	9.28 ± 1.60	6.30 ± 1.14	68.10 ± 4.42
C-8	6.36 ± 0.30	5.46 ± 2.55	211.44 ± 34.75	302.96 ± 67.77	67.96 ± 47.61	1.09 ± 0.74	8.23 ± 2.21	2.75 ± 0.98	0.20 ± 0.04	2.39 ± 0.75	14.46 ± 3.41	12.04 ± 3.36	82.76 ± 6.68
C-2a	4.87 ± 0.58	2.36 ± 0.33	140.40 ± 28.40	153.74 ± 33.31	12.20 ± 1.07	4.89 ± 5.40	2.42 ± 1.03	0.79 ± 0.50	0.86 ± 0.38	4.18 ± 1.15	7.86 ± 1.00	3.66 ± 1.47	45.98 ± 17.02
C-2b	5.44 ± 0.47	2.62 ± 0.62	55.68 ± 9.95	127.68 ± 33.33	26.26 ± 30.49	1.22 ± 1.11	2.99 ± 1.44	1.34 ± 0.90	0.46 ± 0.23	2.72 ± 1.10	7.50 ± 1.99	4.78 ± 2.47	61.32 ± 16.87
CV (%)	5.4	27.9	42.4	32.0	101.3	57.9	19.1	25.2	-	28.5	20.2	25.9	12.6

Nota: pH em água (pH_{H2O}), matéria orgânica do solo (MOS), fósforo extraído por melich-1 (P), potássio (K), sódio (Na), manganês (Mn), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), acidez potencial (H+ Al), CTC efetiva (CTC_E), soma de bases (SB) e saturação por bases (V). Valores representam a média ± desvio padrão (n=5). Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Considerando o pH 6,0 como referência para a cultura do pêssego, a acidez do solo ficou acima do valor recomendado nos pomares C-21 (pH 5,8), C-2b (pH 5,4) e C-2a (pH 4,8), sendo os dois últimos pomares os únicos que diferiram significativamente dos demais pomares estudados nesse trabalho.

De acordo com Nava *et al.* (2025), a melhor oportunidade que o produtor tem para corrigir a acidez do solo, é fazendo a incorporação do calcário no momento da implantação do pomar. O pomar C-21 foi o único sem correção de acidez na implantação do pomar, sendo corrigido apenas 2 anos após o plantio. Mesmo sendo antigo e possuindo bastante matéria orgânica, seu pH ainda está abaixo de 6. Ainda assim, o manejo com aveia nas entrelinhas ao longo de 10 anos foi capaz de conferir bastante matéria orgânica para o pomar.

De acordo com Rozane; Brunetto; Natale (2017), a aplicação de calcário superficial deve ser preferencialmente com maior superfície de contato, e consequentemente maior poder de neutralização da acidez do solo. A quantidade máxima e suficiente recomendada para a aplicação de calcário, por ano, é de 5 T ha⁻¹ (Nava *et al.*, 2025). Essa recomendação contrasta com o histórico dos pomares C-2a e C-2b, cuja quantidade de calcário aplicada foi de 7,5 T ha⁻¹, um ano antes da coleta de solo, e ainda assim a acidez do solo não foi corrigida. Isso pode estar relacionado à granulometria do calcário utilizado na correção, que vai contra as recomendações de adubação e calagem mais atualizadas para o pessegueiro na região de Pelotas, RS.

Em experimento realizado por Du Toit; Swanepoel; Hardie (2022), tanto em solos arenosos quanto em solos de textura franca, o calcário em pó demonstrou maior eficiência na correção do pH. Os autores observaram que, mesmo após um ano da aplicação, os grânulos de calcário permaneceram intactos, com o aumento do pH restrito às zonas adjacentes ao grânulo. Consequentemente, a forma granulada não promoveu a alteração da acidez do solo de maneira tão homogênea e consistente quanto a forma em pó.

Em contraste aos resultados de baixa eficiência em correção de acidez total, Esper Neto *et al.* (2020) observaram que o calcário granulado comum se igualou significativamente à sua versão em pó no aumento de produtividade da soja. Contudo, é crucial notar que este resultado foi obtido em um Latossolo Vermelho Eutroférico sob sistema de plantio direto consolidado, onde o pH inicial já se encontrava em níveis

adequados (pH 6,0 e V% 61,2%). Além disso, a aplicação foi realizada de forma localizada no sulco de semeadura em dose muito baixa (16 kg ha⁻¹), funcionando primordialmente como fornecimento nutricional de Ca e Mg localizado, e não como corretivo de acidez em larga escala.

De acordo com estudo realizado por Lollato; Edwards; Zhang (2013), o calcário granulado, ainda que tenha aumentado a quantidade de Ca no solo, não foi capaz de aumentar o pH nem de neutralizar o Al³⁺. Cassol; Zanão Júnior (2018) também constataram que em comparação com o calcário granulado, o calcário em pó se demonstrou mais eficiente para elevar a produtividade da soja.

Quanto aos macronutrientes, a maioria dos pomares apresentou teores de P e K classificados como "Muito Alto" pelas normas regionais (CQFS - RS/SC, 2016). Os teores de K nos pomares C-21 e C-8 foram classificados como "Muito Alto", enquanto os demais ficaram como "Alto". Em relação ao P, todos os pomares ficaram acima do limite considerado muito alto, especialmente os pomares O-23a e C-8, com limites quase 4 vezes acima do considerado muito alto conforme suas respectivas quantidades de argila no solo. Quanto ao Ca, apenas os pomares C-2a e C-2b apresentaram níveis médios. Os demais apresentaram valores considerados altos e desejáveis. O Mg apresentou nível médio apenas no C-2a, e os demais foram classificados como alto. Os teores de Ca e Mg foram inferiores nos pomares C-2a e C-2b. Consequentemente, esses pomares apresentam os menores valores de pH dentre os pomares estudados, abaixo do recomendado para o pessegueiro (pH 6), com pH em água de 4,87 e 5,44, respectivamente. O pomar C-2a destaca-se negativamente pela presença de níveis tóxicos de alumínio e uma saturação por bases de apenas 45,98%, evidenciando a necessidade imediata de correção para elevar a disponibilidade de Ca e Mg e neutralizar o efeito fito tóxico do Al.

O nível de Mn no O-6a foi muito alto. O-6b, O-23a, O-23b, O5 e O7 ficaram médios. C-8 e C-2b ficaram baixo. A alta disponibilidade de Mn no solo do O-6a pode estar relacionada ao histórico de uso do solo, que era utilizado para o cultivo de eucalipto (Quadro 1). O Mn é o micronutriente mais absorvido e exportado pela cultura, sendo prioritária a sua reposição através da adubação (Costa; Tonini; Schwengber, 2008). Cabe ressaltar que, de acordo com De Oliveira *et al.* (2024) o *Eucalyptus tereticornis* Smith apresenta capacidade de bioacumular Mn nos vacúolos do tecido foliar. Isso indica que a deposição da biomassa folhar do eucalipto pode ter contribuído

para aumentar a quantidade de Mn na camada 0 - 0,10 m. Conforme Vergutz *et al.* (2010) logo após 3 anos da implantação de um cultivo de eucalipto, em solos argilosos, a camada de 0 - 0,10 m pode apresentar perdas de 44% do estoque de carbono, e mesmo depois de 10 anos, apenas 66,51% do estoque é reestabelecido. Isso indica que o impacto do eucalipto sobre o carbono do solo, sobretudo em solos arenosos, pode ter um impacto ainda mais negativo por conta da fragilidade de quanto à capacidade de preservar o carbono.

Por outro lado, Vezzani; Tedesco; Barros (2001) perceberam que quando o eucalipto é plantado em consorcio com acácia negra, são notados efeitos benéficos em relação ao teor de N do solo e na planta, reduzindo custos ambientais com adubação nitrogenada. Isso demonstra a importância da diversidade no sistema para criar arranjos favoráveis de acordo com o objetivo do manejo da área.

Contudo, a caracterização química revela apenas a condição estática de fertilidade. A alta disponibilidade de Mn no O-6a, por exemplo, é um legado químico, mas para entender se esse solo está funcional, é necessário integrar a dinâmica biológica, o que será visto a seguir.

4.3 Indicadores microbiológicos do solo

Os dados referentes à microbiologia do solo estão expostos na Tabela 4. Inicialmente, cabe destacar que as condições de umidade e temperatura do solo diferiram significativamente entre os momentos de coleta. Nos pomares orgânicos (coletados em 07/03/25), a temperatura média foi elevada (27,2 °C) e a precipitação acumulada na semana anterior foi de apenas 0,6 mm. A umidade gravimétrica (Ug) do solo no dia da coleta variou de 5,92% a 17,57%. Em contraste, nos pomares convencionais (coletados em 04/04/25), a temperatura foi mais amena (21,3 °C) e a precipitação acumulada alcançou 60,6 mm, garantindo maior umidade no momento da amostragem. A umidade gravimétrica (Ug) do solo no dia da coleta variou de 14,42 a 29,54%.

Essa disparidade hídrica pode ter afeto diretamente a dinâmica microbiológica no pomar orgânico O-6a. Este pomar tende a apresentar a menor retenção de umidade em função da sua textura arenosa (75% de areia e apenas 13,1% de argila) e baixo teor de Carbono Orgânico Total (COT). A ausência de argila e de matéria

orgânica limita a formação de microporos (responsáveis pela retenção de água), resultando em uma porosidade dominada por macroporos.

A Respiração Basal (RBS), parâmetro que mensura o fluxo de CO₂ pela atividade metabólica, refletiu a condição de umidade. Os picos de respiração ocorreram nos pomares convencionais C-8 e C-21, superando os valores dos sistemas orgânicos. A literatura indica que a RBS possui relação direta com a umidade, ou seja, solos secos tendem a emitir menos CO₂ devido à latência microbiana (Matsunaga; Rodrigues; Rodrigues, 2018; Silva; Azevedo; De-Polli, 2007b). Isso explicaria o comportamento do pomar O-6a, que, por não ter tido a umidade corrigida em laboratório, apresentou baixa atividade respiratória.

Por outro lado, o Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) foi superior nos pomares orgânicos, com destaque para o pomar O-6a, que exibiu o maior valor de CBM. Esse resultado contrapõe a possibilidade de a baixa respiração ter sido consequência de falta de umidade do solo. Segundo Silva; Azevedo; De-Polli (2007a) quando o solo está mais seco, a determinação da biomassa microbiana é subestimada pela dificuldade do rompimento da parede celular dos microrganismos. Esse acúmulo de carbono na biomassa, mesmo sob baixa respiração, sugere uma comunidade microbiana abundante, porém em estado de baixa atividade metabólica devido ao estresse hídrico. Além disso, a faixa de pH deste pomar pode ter favorecido o estabelecimento de microrganismos específicos. Em momentos de falta de água, a microbiota investe energia em manutenção celular e produz enzimas de estresse, mas reduz a respiração geral para não gastar carbono. Isso explica o alto qMic (muita vida) com baixo qCO₂ (pouca atividade) encontrado no solo diante das condições que esse estudo foi conduzido (Daunoras; Kačergius; Gudiukaitė, 2024; Qu *et al.*, 2023). Outra possibilidade de explicação para a baixa respiração é a estabilização.

Em contrapartida, o pomar convencional C-2b, mesmo possuindo estoques de COT semelhantes ao pomar O-6a, apresentou valores inferiores de CBM, o que pode estar associado à limitação imposta por sua faixa de pH significativamente mais baixa (pH 5,4). A acidez elevada desnatura proteínas extracelulares ou reduz a disponibilidade de substratos orgânicos, conforme observado por Hu *et al.* (2025). Segundo He *et al.* (2020), em condições de seca, a relação entre CBM e COT tende a aumentar. Isso ocorre porque o estresse hídrico seleciona uma comunidade dominada por fungos.

Tabela 4: Índices microbiológicos em pomares de pessegueiro no município de Pelotas – RS.

Pomar	CBM (mg C _{mic} kg ⁻¹ solo)	RBS (mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹)	qCO ₂ (mg C-CO ₂ g ⁻¹ C _{mic} h ⁻¹)	qMic (%)	qMin (%)
O-6a	722.86 ± 23.83	1.03 ± 0.60	1.43 ± 0.84	5.06 ± 1.78	1.21 ± 0.85
O-6b	681.77 ± 77.40	2.26 ± 0.44	3.35 ± 0.79	2.44 ± 0.57	1.34 ± 0.28
O-23a	697.20 ± 58.75	3.11 ± 1.13	4.61 ± 2.22	2.05 ± 0.38	1.52 ± 0.63
O-23b	679.00 ± 26.81	2.74 ± 0.54	4.02 ± 0.65	1.77 ± 0.29	1.19 ± 0.30
C-21	491.49 ± 97.35	3.84 ± 0.64	7.87 ± 0.82	1.95 ± 0.38	2.58 ± 0.42
C-8	563.96 ± 203.29	4.07 ± 1.44	7.27 ± 1.47	1.86± ± 0.19	2.24 ± 0.48
C-2a	567.40 ± 111.88	2.38 ± 0.58	4.20 ± 0.68	4.20 ± 0.62	2.91 ± 0.43
C-2b	463.45 ± 46.99	1.53 ± 0.44	3.29 ± 0.76	3.20 ± 0.68	1.70 ± 0.30
CV%	16.0	30.5	25.5	27.4	27.1

Nota: Carbono orgânico total (COT), Matéria orgânica particulada (MOP), Matéria orgânica associada aos minerais (MAM), Carbono da biomassa microbiana (CBM), Respiração basal (RB), Quociente metabólico (qCO₂), Quociente microbiano (qMIC) e Quociente de mineralização (qMin). Valores representam a média ± desvio padrão (n=5). Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os fungos possuem uma capacidade muito maior de conservar carbono na sua estrutura celular (biomassa) do que as bactérias, que têm alta taxa de *turnover* (morrem e respiram rápido). Os autores ainda explicam que, sob baixos potenciais hídricos, os microrganismos acionam respostas de estresse para evitar a morte, entrando em dormência ou focando em osmorregulação.

Embora Qu *et al.* (2023) mostrem que a seca geralmente reduz a atividade enzimática global, eles destacam que enquanto a maioria das enzimas cai drasticamente, as enzimas ligadas à celulose podem apresentar respostas neutras ou até positivas. Isso sugere que, na falta de carbono solúvel (que para de chegar por falta de água), os microrganismos (especialmente fungos) tentam manter a produção de enzimas do ciclo do carbono para degradar materiais mais complexos. Portanto, o alto valor de CBM em contraste com o baixo valor de RBS, pode sugerir que a comunidade microbiana está presente, mas menos ativa pelas condições de umidade do solo.

4.4 Quocientes Metabólicos (qCO₂ e qMic)

A relação entre respiração e biomassa (qCO₂) confirmou os padrões de estresse e eficiência. O pomar O-6a apresentou o menor valor de qCO₂, corroborando a hipótese de que a falta de água induziu uma baixa taxa respiratória em uma comunidade microbiana extensa (biomassa inativa/dormência). Já os pomares convencionais C-21 e C-8 apresentaram valores de qCO₂ elevados, indicando alta perda de carbono via respiração por unidade de biomassa, o que sugere um ambiente de maior estresse ou menor eficiência metabólica. Quanto ao Quociente Microbiano (qMic), a eficiência de conversão do carbono orgânico em biomassa microbiana foi notavelmente superior nos pomares O-6a (5,06%) e C-2a (4,20%). O comportamento do O-6a (com alto qMic em solo arenoso e com pouco carbono) reflete a dinâmica acelerada destes solos. Isso pode ser explicado devido à baixa proteção física exercida pelas argilas (menor formação de complexos organominerais), o que torna a MOS altamente acessível. Nesse cenário, o carbono disponível é rapidamente colonizado e incorporado pela microbiota, indicando um sistema de ciclagem rápida, porém com menor capacidade de armazenamento de carbono a longo prazo.

Em síntese, os pomares manejados em sistemas convencionais C-2a e C-21 apresentaram maiores taxas de perda de carbono específica. Os pomares manejados

em sistemas orgânicos, representados pelo O-6a e O-23b, tenderam a uma maior conservação do C na biomassa, embora a análise do O-6a deva ser ponderada pelas restrições hídricas e texturais específicas daquele solo.

4.5 Estoque de carbono e frações da matéria orgânica do solo

Os estoques de carbono orgânico total (COT) e a distribuição de suas frações físicas (MOP e MAM) revelaram a interação complexa entre a textura do solo, o histórico de manejo e a posição na paisagem (Tabela 5 e Figura 4). Conforme a teoria da "Capacidade Mineral Teórica", revisada por Georgiou *et al.* (2025), a capacidade de um solo armazenar carbono estável é finita e determinada pela quantidade de superfícies reativas (argila e silte) disponíveis para formar complexos organominerais.

Tabela 5: Carbono Orgânico Total (COT), Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MAM) em pomares de pêssogo em Pelotas – RS.

Pomar	COT	MOP	MAM
	----- (g kg ⁻¹) -----		
O-6a	15.41 ± 4.09	6.00 ± 0.96	9.46 ± 3.76
O-6b	28.59 ± 3.61	8.90 ± 2.14	19.99 ± 2.60
O-23a	34.76 ± 5.73	8.14 ± 1.16	27.11 ± 4.96
O-23b	39.26 ± 6.70	11.37 ± 3.10	27.86 ± 6.20
C-21	26.03 ± 7.00	7.07 ± 2.18	18.65 ± 5.75
C-8	31.49 ± 14.93	15.00 ± 8.47	16.50 ± 5.99
C-2a	13.53 ± 1.94	5.65 ± 1.33	8.01 ± 1.08
C-2b	15.11 ± 3.88	3.42 ± 0.85	11.82 ± 2.95
CV%	27.6	42.2	25.9

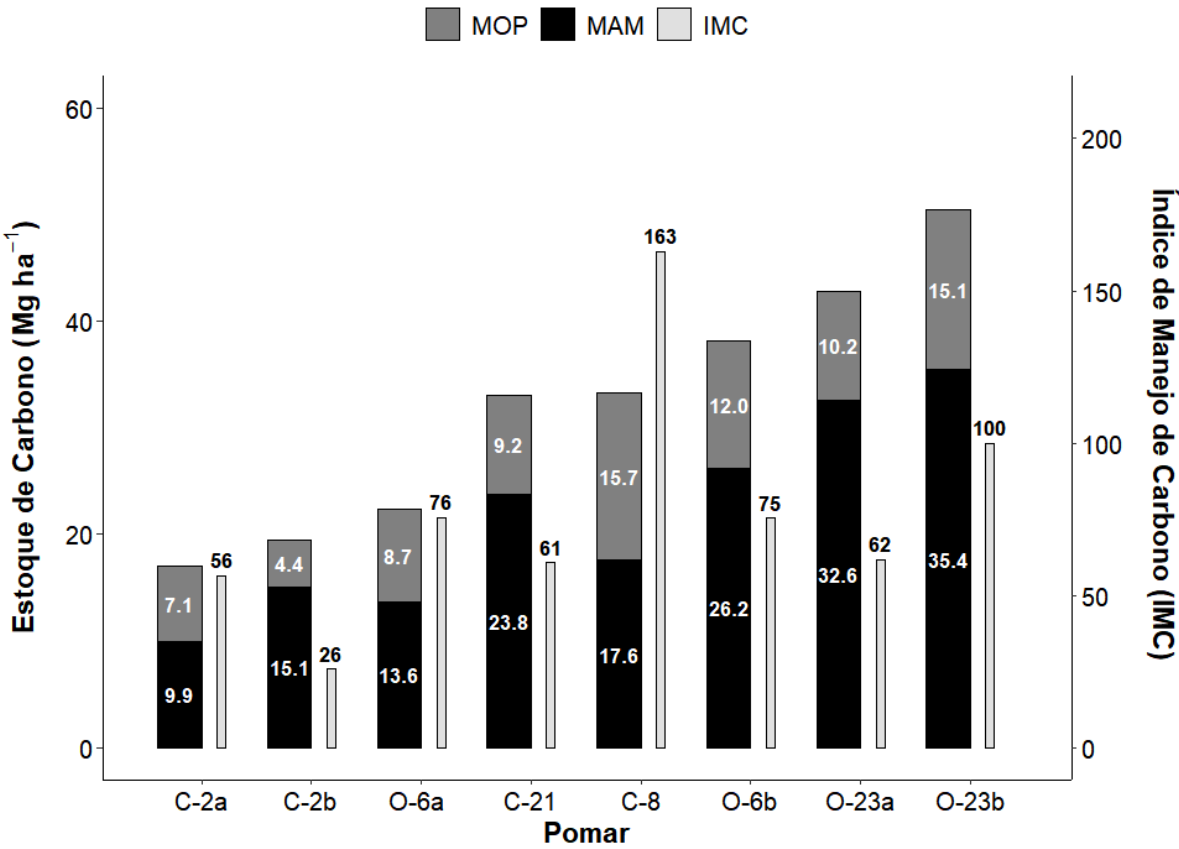
Nota: Valores representam a média ± desvio padrão (n=5). CV% = Cociente de variação entre os pomares. Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

O excesso de carbono introduzido pelo manejo orgânico, ao não encontrar superfícies minerais livres para estabilização, acumulou-se preferencialmente como MOP ou biomassa microbiana. Portanto, a dificuldade de incremento da fração estável neste pomar não reflete uma falha de manejo, mas uma limitação textural intrínseca.

Em nítido contraste, o pomar C-2b, de textura mais fina, apresentou a menor proporção de MOP (22,3%) e forte predominância de carbono associado aos minerais (MAM = 77,7%). Isso indica a formação de um estoque de carbono protegido e recalcitrante, conferindo maior resiliência ao sistema edáfico.

A discrepância na capacidade de sequestro de carbono entre pomares argilosos (O-23a, C-2b) e arenosos (O-6a) evidencia que o impacto biológico no solo é fortemente modulado pela matriz mineral. Segundo Liang; Stark; Waring, (2023), a direção do balanço de carbono, ou seja, se o solo atuará como dreno ou fonte, é governada pela reatividade mineral frente aos exsudatos radiculares. Em solos argilosos, os compostos orgânicos encontram ampla superfície para a formação de pontes catiônicas, resultando em estabilização (Shabtai *et al.*, 2023).

Figura 4: Estoque de carbono orgânico total (COT) e distribuição das frações físicas na camada de 0-10 cm em diferentes pomares de pessegueiro.



Nota: as barras representam o estoque total médio de carbono (Mg há⁻¹) por pomar ($n=5$), constituídos pela soma dos estoques presentes na Matéria Orgânica Particulada (MOP) e na Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MAM). Ao lado direito das barras de estoque de carbono, está representado o valor do Índice de Manejo de Carbono (IMC) referente à cada pomar.

Contudo, a clássica dicotomia que define a MOP como a fração lábil e a MAM como o reservatório inerte de longo prazo vem sendo reavaliada. Revisões recentes, como a de Jilling *et al.* (2025), revelam que a MAM abriga uma subfração de "ciclagem rápida" que atua como um estoque regulador altamente dinâmico. No pomar O-6a, a predominância da fração areia impede a proteção físico-química robusta. Neste ambiente, a escassa MAM formada encontra-se em zonas de ligação mais fracas, sendo ativamente desestabilizada por exsudatos radiculares e microrganismos para a rápida liberação de nutrientes. Portanto, o sistema é confinado a uma ciclagem veloz, onde o solo não apenas falha em estocar carbono a longo prazo, mas utiliza sua fração mineral e particulada com alta rotatividade para sustentar a demanda nutricional da planta.

Essa dinâmica de ciclagem rápida e constante reflete diretamente o histórico de manejo vegetal. O pomar C-8 destacou-se por apresentar um alto estoque absoluto de carbono ($34,4 \text{ Mg ha}^{-1}$), impulsionado pelo maior percentual de MOP (47,2%) do estudo. Este acúmulo está intrinsecamente ligado ao seu histórico de pousio prévio e ao cultivo sistemático de aveia nas entrelinhas. O incremento substancial de matéria orgânica nestes pomares transcende o mero aporte de fitomassa na superfície. Evidências apontam que os aportes radiculares (biomassa de raízes finas e exsudatos) são os precursores mais eficientes da matéria orgânica do solo, superando largamente a contribuição da serapilheira (Feng *et al.*, 2024).

O fluxo contínuo de carbono lábil injetado pelo sistema radicular vivo atua como o motor central da formação e desestabilização do carbono (Chari; Taylor, 2022). Logo, a manutenção de raízes ativas nas entrelinhas é uma estratégia ecofisiológica indispensável não apenas para a proteção contra erosão, mas para a construção da fertilidade em subsuperfície, ainda que esse estoque permaneça funcionalmente instável e dependente de aportes contínuos.

A posição na paisagem também exerceu influência sobre a dinâmica do carbono, evidente nos pomares O-23a e O-23b, situados em declividade acentuada (20,8%), superior ao limite de segurança de 12% indicado para pomares de pêssego (CARVALHO *et al.*, 2022). Apesar do manejo orgânico de 23 anos ter evitado erosões severas, observou-se maior estoque de COT no pomar O-23b (cota inferior). Esse gradiente sugere o transporte lento e a deposição cumulativa de sedimentos ricos em

matéria orgânica da parte alta para a baixa ao longo de duas décadas. Quimicamente, a matéria orgânica acumulada demonstrou papel crucial na mitigação da acidez.

Os dados acerca da estocagem de carbono nos solos demonstram que os pomares possuem diferenças significativas no teor de carbono e na textura, que podem ser notadas visualmente na cor dos solos analisados (Figura 5).

Figura 5: Aspecto visual do solo de pomares de pêssago sob diferentes práticas de manejo (O: orgânico e C: convencional), histórico e idade, no município de Pelotas – RS.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os pomares orgânicos, mesmo passados cinco anos da calagem, mantiveram a ausência de Al^{3+} , atestando o poder tampão do carbono na complexação do alumínio. Em contraposição, o pomar convencional C-21 (20 anos) apresentou menores teores de COT, menor pH e presença ativa de Al^{3+} , condição possivelmente agravada por calagens tardias.

Em suma, os dados indicam que a saúde edáfica não depende apenas da quantidade absoluta de carbono, mas de sua distribuição e dinâmica. Nos solos arenosos da região de Pelotas, RS, a fertilidade sistêmica depende de forma crítica da manutenção de raízes vivas e fitomassa. Dada a limitação de proteção mineral profunda, é o fluxo constante de carbono mediado pelas raízes que garante o suprimento nutricional rápido (via desestabilização da MAM lábil e MOP) e fornece a

energia vital para sustentar a atividade enzimática e microbiológica do agroecossistema.

4.6 Atividade enzimática e Diagnóstico de Saúde com CASH/4QM

A funcionalidade bioquímica dos solos, expressa pela atividade das enzimas beta-glicosidase (ciclo do Carbono) e arilsulfatase (ciclo do Enxofre), bem como sua eficiência por unidade de carbono orgânico do solo (AEEM - Atividade Enzimática Específica Média), são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase, Carbono orgânico total do solo (COT) e atividade enzimática específica da beta-glicosidase (S-BETA) e arilsulfatase (S-ARIL) e a atividade enzimática específica média (AEEM).

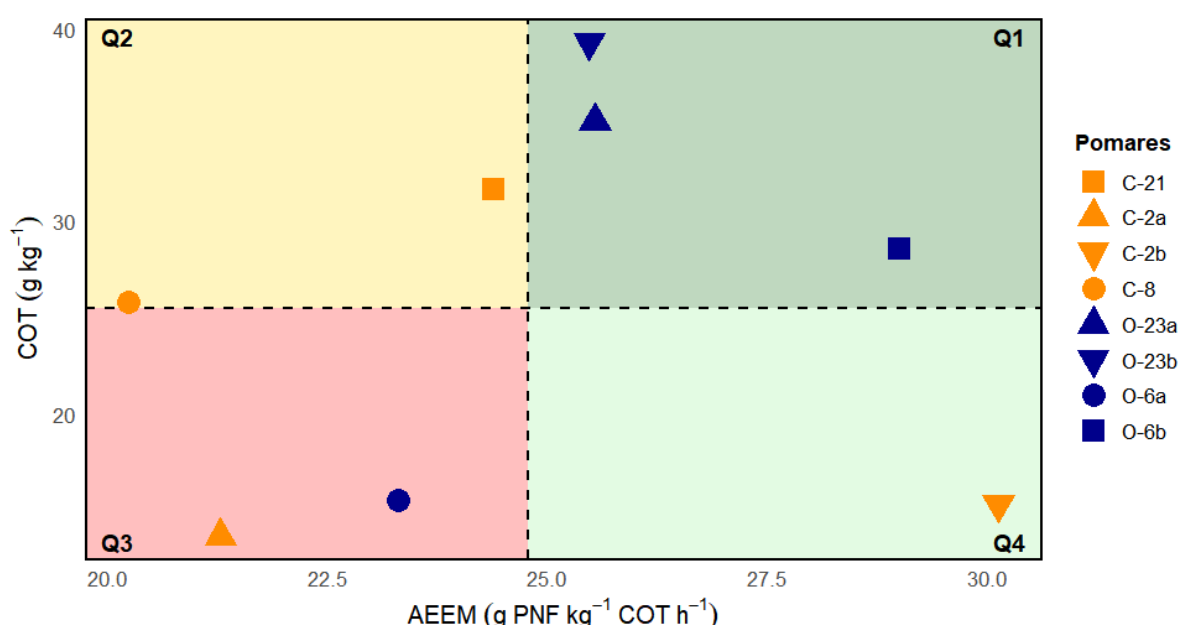
Pomar	arilsulfatase ($\mu\text{g de PNF g solo}^{-1} \text{ hora}^{-1}$)	beta-glicosidase	COT (g kg^{-1})	S-ARIL ($\text{g PNF kg}^{-1} \text{ COT h}^{-1}$)	S-BETA	AEEM
O-6a	501.20 ± 227.78	204.16 ± 25.89	15.41 ± 4.09	19,59	11,46	15,52
O-6b	1332.76 ± 190.63	311.87 ± 45.01	28.59 ± 3.61	41,59	10,35	25,97
O-23a	1505.09 ± 196.84	289.71 ± 79.98	34.76 ± 5.73	47,4	7,82	27,61
O-23b	1696.56 ± 285.80	302.59 ± 81.31	39.26 ± 6.70	45,17	6,01	25,59
C-21	835.44 ± 186.04	166.94 ± 21.24	26.03 ± 7.00	37,46	5,49	21,48
C-8	1268.39 ± 647.62	286.80 ± 124.79	31.49 ± 14.93	25	8,23	16,62
C-2a	477.00 ± 275.97	120.49 ± 27.52	13.53 ± 1.94	16	6,45	11,23
C-2b	752.16 ± 88.55	147.98 ± 41.56	15.11 ± 3.88	60,71	8,2	34,45
CV (%)	29.2	28.6	27.6			

Nota: Valores representam a média $\pm$ desvio padrão ($n=5$). Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A partir dos valores obtidos de Carbono Orgânico Total e da Atividade Enzimática Específica Média, foi realizada a distribuição normal cumulativa (CND) para possibilitar a elaboração do gráfico de dispersão dentro dos valores encontrados

nesse estudo. Feita a CND, foram geradas as equações a partir de linhas de tendência polinomiais de ordem 3, e a partir das equações foram calculados os valores equivalentes ao score 50. Desta forma, os valores encontrados para AEEM ($24,78 \text{ g PNF kg}^{-1} \text{ COT h}^{-1}$) e COT ($25,48 \text{ g kg}^{-1}$) foram utilizados como pontos de intersecção na divisão dos quatro quadrantes. Por fim, foi plotado um ponto por pomar, composto pela média dos valores das 5 amostras de solo analisadas em cada pomar (Figura 6).

Figura 6: Gráfico de dispersão entre Carbono Orgânico Total do Solo (COT) e Atividade Enzimática Específica Média (AEEM) de pomares de pêssgo em Pelotas – RS.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A aplicação do método CASH integrado ao 4QM cumpriu o objetivo de identificar solos mais ricos em atividade biológica e estoque de carbono, que são sinônimos de boa qualidade do solo.

O pomar O-6a e O-6b, foram implantados no mesmo ano, na mesma propriedade, sob o mesmo manejo, porém possuem divergência no histórico de uso (Quadro 1). Enquanto o pomar O-6a era uma mata de eucalipto por mais de 30 anos, o pomar O-6b foi um pomar de pêssgo, implantado em capoeira, com problemas de fertilidade do solo, ocasionando na demora de 6 anos para a produção do pêssgo. Porém, a adição massiva de matéria orgânica através de aguapés, manejo de cobertura e adubação verde ao longo do tempo e demais práticas inerentes ao sistema de cultivo orgânico, foram determinantes para a recuperação da qualidade do solo.

Dentro dessa perspectiva de recuperação do solo, os pomares orgânicos com 6 anos de implantação (O-6a e O-6b) corroboram para a percepção de que os 6 anos de manejo orgânico em solos arenosos com histórico de pouca fertilidade natural, não são suficientes para recuperar satisfatoriamente solos sob cultivo de pêssego. Porém, quando o pomar é implantado em um local com histórico de manejo que é capaz de aumentar o COT do solo, um pomar de 6 anos pode apresentar excelentes indicadores de qualidade do solo, principalmente em relação à MOS e atividade enzimática. Inclusive, o pomar O-6b foi aquele que obteve a maior atividade de beta-glicosidase, sugerindo que seu manejo tende a favorecer o ciclo do carbono do solo.

Ainda assim, mesmo que a baixa atividade da arilsulfatase no pomar O-6a indique que o histórico de manejo do solo não favoreceu a sua saúde, o teor de beta-glicosidase está semelhante aos pomares orgânicos mais antigos, sugerindo que o seu manejo mais recente possui potencial de melhorar a saúde do solo ao longo do tempo.

Quanto à sensibilidade da atividade da enzima arilsulfatase ao longo dos anos em solo cultivado com eucalipto, Lino *et al.* (2016) constataram que, enquanto outras enzimas (como fosfatase e urease) se recuperavam após 3 a 5 anos de plantio de eucalipto, a arilsulfatase foi impactada negativamente em todas as idades avaliadas quando comparada à floresta nativa. A redução da atividade da enzima arilsulfatase sugere um efeito negativo sobre os microrganismos específicos que produzem essa enzima, especialmente fungos que esterificam sulfato. Lino *et al.* (2016) sugerem que os exsudatos e efeitos alelopáticos do eucalipto podem reduzir populações fúngicas específicas associadas ao ciclo do enxofre. É importante notar que Nunes *et al.* (2025) encontraram maior atividade da enzima arilsulfatase em solos de eucalipto de 20 anos comparado a uma vegetação secundária. No entanto, eles explicam que isso estava diretamente ligado ao teor MOS, que era maior nessas áreas.

Outra relação importante é que o baixo valor de arilsulfatase encontrado no pomar O-6a, sugere que o ciclo do enxofre ainda está prejudicado, possivelmente devido à alelopatia residual do eucalipto ou porque a MOS acumulada pelo eucalipto não favoreceu os microrganismos produtores dessa enzima específica da mesma forma que os adubos orgânicos dos outros pomares. Além disso, Lino *et al.* (2016) notaram que a beta-glicosidase é uma das primeiras enzimas a se recuperar ou aumentar em plantios de eucalipto, diferenciando áreas plantadas de áreas nativas já

nos primeiros anos. Isso ocorre porque o eucalipto aporta resíduos vegetais que estimulam a produção dessa enzima para obter glicose como fonte de energia. O estudo de Xu *et al.* (2020a), também observou que a biomassa fúngica e a razão entre fungos e bactérias aumentam significativamente com a idade do plantio de eucalipto. Eles encontraram uma correlação positiva entre a atividade da enzima beta-glicosidase e a biomassa fúngica.

Porém, é importante notar que o efeito do monocultivo à longo prazo é prejudicial à saúde edáfica, conforme demonstrado por Xu *et al.* (2020b), plantios de eucalipto de rotação longa (mais de 15 anos) favorecem o domínio de fungos Basidiomycota, especializados na decomposição de lignina e celulose, mantendo alta a biomassa microbiana e as enzimas do ciclo do Carbono. No entanto, esses mesmos sistemas sofrem declínio na disponibilidade de nutrientes e na diversidade fúngica com o tempo, o que explica a baixa funcionalidade em outros ciclos enzimáticos, como a arilsulfatase (ciclo do enxofre), indicando um solo biologicamente ativo, porém funcionalmente desequilibrado pelo “efeito legado” do monocultivo (Nunes *et al.*, 2025).

A qualidade biológica dos pomares orgânicos (O-23a e O-23b) reflete um histórico consolidado de práticas conservacionistas. Henriquez *et al.* (2018), ao avaliarem estas áreas no décimo quinto ano de implantação, constataram que a abundância da mesofauna edáfica (ácaros e colêmbolos) assemelhava-se aos níveis encontrados em matas nativas. Tal resultado foi atribuído diretamente ao manejo da vegetação espontânea, à adubação verde e ao aporte de matéria orgânica via esterco de ave. Em contrapartida, o pomar convencional comparativo (com 21 anos), submetido ao uso contínuo de herbicidas, fertilização química e ausência de cobertura de solo, apresentou indicadores biológicos significativamente inferiores, evidenciando o impacto deletério do manejo convencional sobre a biodiversidade do solo a longo prazo.

Em outro estudo realizado em pomares de pêssego convencionais no município de Pelotas, RS, Paula *et al.* (2015) constatou que a presença de ácaros e colêmbolos também foi considerada baixa. Portanto, as práticas inerentes ao manejo convencional de pomares de pêssego podem não contribuir para um diagnóstico satisfatório de saúde do solo, quando os indicadores de qualidade do solo são analisados sistemicamente e consideram a significância do compartimento biológico.

A atividade da enzima arilsulfatase apresentou padrões de correlação distintos que elucidam sua dinâmica no solo. A forte correlação positiva com o teor de magnésio sugere que a atividade enzimática detectada está predominantemente associada à fração estabilizada no complexo organomineral. Cátions bivalentes como o Ca e Mg atuam na formação de pontes catiônicas, promovendo a estabilização de enzimas extracelulares em complexos húmicos e argilosos, protegendo-as da proteólise e permitindo seu acúmulo no solo ao longo do tempo (Shabtai *et al.*, 2023).

Ao analisar o índice de Atividade Enzimática Média (AEEM), destaca-se o pomar C-2b (34,45 g PNF kg⁻¹ COT h⁻¹) e os pomares orgânicos O-23a (27,61 g PNF kg⁻¹ COT h⁻¹) e O-6b (25,97 g PNF kg⁻¹ COT h⁻¹) como os sistemas de maior intensidade catalítica por unidade de carbono. Em contrapartida, o pomar C-2a apresentou o menor índice AEEM (11,23 g PNF kg⁻¹ COT h⁻¹), confirmando um estado de colapso funcional, onde tanto a quantidade de enzimas quanto a eficiência de sua produção são mínimas. Quanto à atividade específica da beta-glicosidase (S-BETA), a eficiência na degradação de celulose foi máxima no pomar O-6a. Este resultado indica uma alta demanda da microbiota por energia lábil, mesmo diante de um menor estoque de carbono. Inversamente, o pomar C-21 apresentou a menor eficiência específica para esta enzima.

Em relação à atividade específica da arilsulfatase (S-ARIL), o pomar C-2b, apesar de possuir baixo estoque de carbono, registrou a maior atividade específica de todo o estudo, superando em mais de 30% os melhores pomares orgânicos (O-23a e O-23b).

A atividade enzimática, especialmente a arilsulfatase, provou ser uma ferramenta sensível para identificar a "memória do solo" e diferenciar pomares adjacentes (C-2a e C-2b) que são idênticos em implantação, cultivar e manejo atual. A disparidade nos resultados biológicos foi elucidada pelo histórico de uso, visualizado através de imagens de satélite (Figura 7). Nessas imagens observa-se que a área do pomar C-2b (de alta atividade) já era estabelecida como pomar de pêssego. Já a área do pomar C-2a (de baixa atividade) passou por tentativas frustradas de cultivo de milho com safras improdutivas, sendo frequentemente utilizada como campo de pastagem para gado. Além do histórico de degradação, o pomar C-2a apresenta atualmente o maior teor de alumínio tóxico do estudo, o que ajuda a explicar seu colapso funcional.

A atividade enzimática da arilsulfatase nos pomares mais antigos é muito maior do que em pomares com pouca matéria orgânica ou de implantação recente, com o histórico de plantio de eucalipto. Isso mostra que o resultado positivo dos pomares O-23a e O-23b são resultado de um histórico de manejo de 23 anos. A análise dos dados revelou que os pomares orgânicos mais antigos deste estudo apresentaram uma saúde do solo classificada como excelente, situando-se predominantemente no Quadrante 1 (Alto Carbono e Alta Atividade Biológica) (Figura 6).

Estes resultados sugerem que tais áreas possuem um potencial de fertilidade e funcionalidade biológica comparável, ou até superior, ao que se esperaria de solos sob vegetação nativa recém-convertidos para a agricultura.

Essa observação desafia o paradigma tradicional de que a vegetação nativa representa o teto máximo de qualidade do solo. Embora florestas nativas sustentem excelentes propriedades físicas e biológicas, elas frequentemente apresentam limitações químicas intrínsecas, como alta acidez, que podem restringir o desenvolvimento inicial de culturas agrícolas exigentes. Recentemente, Hu *et al.* (2025) demonstraram, através das plataformas SMAF e CASH, que sistemas manejados, como pastagens produtivas, podem atingir índices globais de saúde do solo superiores aos de florestas decíduas e perenes. A superioridade dos sistemas manejados deve-se, em grande parte, à correção da acidez do solo e ao aporte de nutrientes, fatores que, quando combinados com a manutenção de raízes vivas e cobertura do solo, criam um ambiente edáfico quimicamente corrigido e biologicamente ativo.

Portanto, os pomares antigos deste estudo não apenas mimetizam os benefícios biológicos de uma floresta (alto aporte de carbono e ciclagem enzimática eficiente), mas superam as limitações naturais de pH típicas de solos nativos tropicais. Diferentemente de uma mata recém-desmatada, onde o pH ácido (frequentemente abaixo de 5,5) exigiria correções e tempo para reação, o solo destes pomares já se encontra em um estado aceitável para a maioria das culturas. Isso corrobora com a hipótese de que um agroecossistema bem manejado a longo prazo pode constituir uma referência de saúde do solo mais realista e agronomicamente desejável para a implantação de novos cultivos do que a própria vegetação nativa, unindo a funcionalidade biológica com a fertilidade química construída (Hu *et al.*, 2025).

Figura 7: Histórico visual de 18 anos (2004 à 2024) da cobertura do solo dos pomares C-2a e C-2b em Pelotas, RS.



Fonte: Imagens obtidas do Google Earth.

A alta atividade enzimática observada nos pomares com maiores estoques de MAM (O-23b, O-23a, O-6b, C-21) não deve ser interpretada apenas como um indicador de decomposição, mas sim como o motor da estabilização do carbono, um processo descrito recentemente como a “bomba de carbono microbiano”. A maior parte do carbono estável no solo não é de origem vegetal direta, mas sim constituída por necromassa microbiana (Fan *et al.*, 2021; Whalen *et al.*, 2024). A atividade da beta-glicosidase, portanto, atua catalisando a conversão de resíduos vegetais em biomassa microbiana viva que, ao morrer, associa-se intimamente aos minerais do solo (Camenzind *et al.*, 2023). Desta forma, a correlação positiva encontrada neste estudo entre a atividade enzimática e a fração MAM confirma que a funcionalidade biológica é a via primária para a formação de estoques de carbono resilientes, transformando carbono lábil em formas protegidas pela matriz mineral.

Os pomares C-2a e C-2b são os mais recentes dentre os pomares estudados, cujo o uso da terra anterior era campo nativo, portanto, à curto prazo, o uso do calcário granulado para a correção de solo para a implantação de pomares, quando o solo tem pH baixo, pouca atividade enzimática, e pouca matéria orgânica, pode apresentar pouca eficiência. Ainda que os pomares C-2a e C-2b estejam em áreas adjacentes, foi constatada variação na textura do solo, e o pomar C-2b possui aproximadamente 5% menos areia e 5% a mais de argila em comparação ao C-2a. O C-2b também possui 3 vezes mais arilsulfatase do que o C-2a, mas quantidades semelhantes de beta-glicosidase.

Portanto a arilsulfatase pode indicar que apesar de o manejo da área dos pomares C-2a e C-2b ser o mesmo desde a implantação do pomar, a variação natural do solo independente do manejo, favorece mais a atividade biológica na área do C-2b do que no C-2a, visto que na escassez de matéria orgânica, a argila do solo exerce papel significativo enquanto sítios de ligação das enzimas. O alto teor de areia, em conjunto com a baixa quantidade de MOS do C-2a, pode ter prejudicado a retenção de água e possivelmente ter afetado negativamente a solubilização dos aglutinantes do calcário granulado, fator essencial para a sua liberação no solo. O C-2a foi o único pomar com teor de M.O < 2,5%, considerado “Insuficiente” de acordo com o CQFS (2016).

A hipótese de que pomares orgânicos ocupariam os quadrantes de alta qualidade foi parcialmente confirmada. Os pomares orgânicos antigos (O-23a, O-23b,

O-6b) situaram-se no Quadrante 1 ou próximos a ele (alta saúde). Contudo, o pomar O-6a (orgânico recente em área de eucalipto) ficou no Quadrante 4 (Em recuperação/Baixo Carbono), demonstrando que o manejo orgânico recente ainda está lutando contra o “efeito legado” do uso anterior. Isso valida a sensibilidade do modelo em não apenas classificar por rótulo (orgânico vs. convencional), mas pela funcionalidade real.

4.7 Diagnóstico do estado nutricional do tecido foliar

A concentração média dos teores de N, P, K, Ca e Mg no tecido foliar dos pessegueiros de cada pomar está na Tabela 7. A classificação do estado nutricional dos pessegueiros de acordo com CQFS - RS/SC (2016) está na Figura 8. A comparação entre os valores de referência mais antigos com os mais atuais, está na Figura 9.

A distribuição percentual das classes de suficiência aponta o N e o Ca como os elementos mais limitantes, enquanto que o P e K apresentaram níveis adequados ou superiores ao normal.

O N foi o nutriente mais crítico em todos os agroecossistemas avaliados. Nos pomares O-6, O-6b, O-23a, O-23b e C-8, 100% das amostras foram classificadas como “abaixo do normal”. A situação é ainda mais preocupante nos pomares C-2a e C-2b, onde houve ocorrência significativa da classe “Insuficiente” (aproximadamente 50% e 40% das amostras, respectivamente). O pomar C-21 foi o único a apresentar uma pequena parcela de amostras na faixa “Normal” (cerca de 25%), embora a predominância ainda tenha sido de níveis abaixo do ideal.

Inclusive, já é notado que a recomendação no N no manual está superestimada, e no trabalho de Betemps *et al.* (2020) é possível verificar que ao utilizar pomares do RS para calibrar o modelo de recomendação nutricional, os níveis de N considerados suficientes estão abaixo dos valores do manual. Já a calibração mais recente, realizada apenas com pomares localizados em Pelotas, da cultivar Maciel, foi capaz de tornar a recomendação ainda mais eficaz. Os valores de N determinados por Hindersmann *et al.* (2026) para a cultivar Maciel, cultivada em Pelotas, foram os mesmos valores encontrados nesse estudo para o pessegueiro da mesma cultivar.

Tanto para N como para K, os valores de faixa de suficiência foram os mesmos tanto para a cultivar PS como para a Maciel, porém, houve variação de recomendação entre cultivares para os outros nutrientes. A faixa de suficiência para K, encontrada por Hindersmann *et al.* (2026) também coincide com valores encontrados para o pomar C-21 desse estudo. Esse fato sugere que o método de calibração considerando cultivares e locais diferentes aparenta ser bem mais eficaz, e que o pomar está dentro dos limites desejáveis para esses dois macronutrientes.

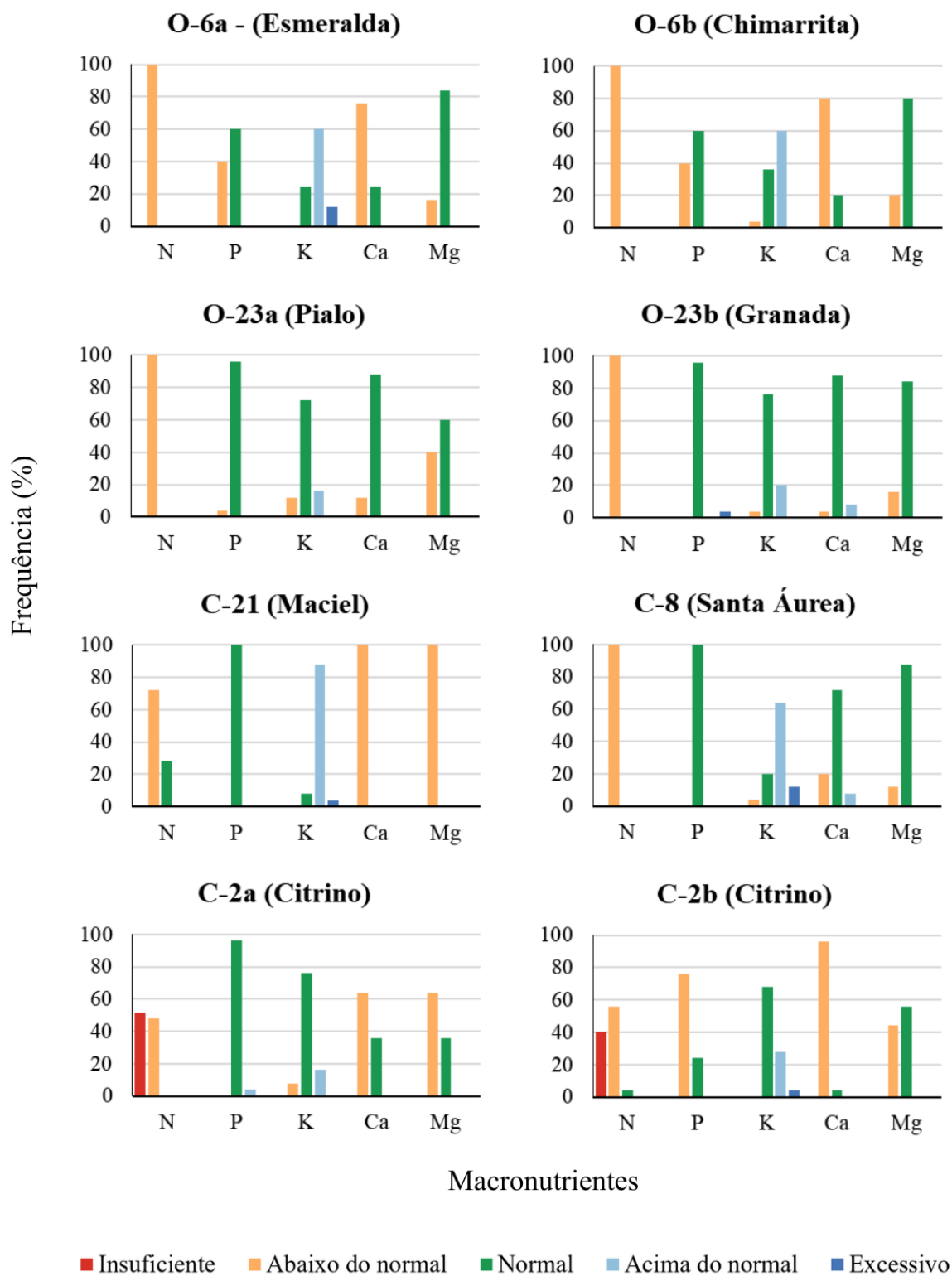
Já para os demais macronutrientes P, Ca e Mg, o pomar C-21 demonstra valores abaixo dos recomendados. Em contraste com o N, o P apresentou boa disponibilidade na maioria das áreas, com os pomares O-23a, O-23b, C-21, C-8 e C-2a apresentando mais de 90% das amostras na faixa "Normal". As exceções foram os pomares O-6a e O-6b, que mostraram uma distribuição mista, com cerca de 40% das amostras "Abaixo do normal", e o pomar C-2b, que se destacou negativamente com a maioria das amostras (aproximadamente 75%) abaixo do nível de suficiência.

Tabela 7: Concentração média de macronutrientes no tecido foliar de pessegueiro (*Prunus persica*) sob sistemas de manejo orgânico e convencional no município de Pelotas-RS.

Pomar (cultivar/porta-enxerto)	N	P	K	Ca	Mg
	----- (g kg ⁻¹) -----				
O-6a (Esmeralda/Capdeboscq)	25.43 ± 1.62	1.58 ± 0.12	23.7 ± 3.67	15.46 ± 2.36	5.33 ± 0.34
O-6b (Chimarrita/Capdeboscq)	25.88 ± 2.38	1.80 ± 0.19	20.90 ± 3.43	14.62 ± 2.95	5.50 ± 0.74
O-23a (Pialo/Capdeboscq)	24.37 ± 2.83	1.79 ± 0.16	17.70 ± 2.98	18.36 ± 1.65	5.28 ± 0.54
O-23b (Granada/Capdeboscq)	25.49 ± 2.57	2.09 ± 0.48	18.50 ± 2.70	21.92 ± 2.94	5.74 ± 0.67
C-21 (Maciel/Aldrighi)	30.60 ± 3.71	2.17 ± 0.29	22.70 ± 2.50	11.64 ± 1.85	4.32 ± 0.25
C-8 (Santa Áurea/*)	23.84 ± 2.78	2.23 ± 0.36	22.93 ± 4.68	20.03 ± 3.62	5.72 ± 0.53
C-2a (Citrino/*)	19.58 ± 2.89	2.33 ± 0.57	17.73 ± 2.71	15.53 ± 2.63	4.79 ± 0.51
C-2b (Citrino/*)	21.44 ± 4.66	1.42 ± 0.50	19.19 ± 3.98	12.78 ± 2.17	5.12 ± 0.65
CV (%)	12.41	19.15	16.67	15.93	10.57

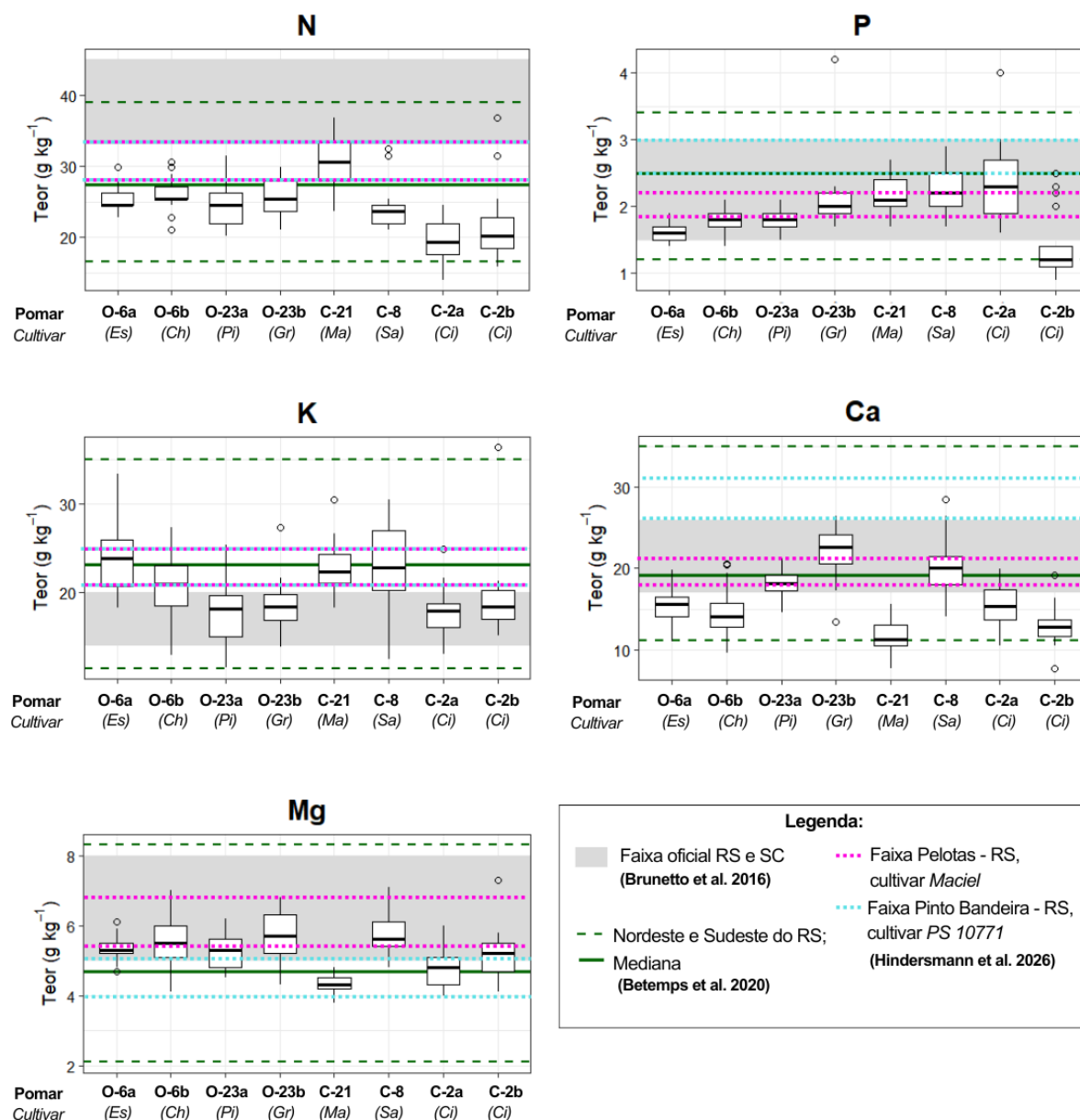
Nota: Valores representam a média ± desvio padrão (n=5). *= porta-enxerto desconhecido.
Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Figura 8:Distribuição de frequência das classes de suficiência nutricional adaptadas da CQFSRS/SC (2016), para as amostras de cada um dos oito pomares (n=25).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Figura 9: Concentração de macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no tecido folhar de pessegueiros em Pelotas, RS, e comparação de limites de interpretação.



Fonte: adaptação de Brunetto et al. (2016); Betemps et al. (2020) e Hindersmann et al. (2026).

Tanto para N como para K, os valores de faixa de suficiência foram os mesmos tanto para a cultivar PS como para a Maciel, porém, houve variação de recomendação entre cultivares para os outros nutrientes. A faixa de suficiência para K, encontrada por Hindersmann *et al.* (2026) também coincide com valores encontrados para o pomar C-21 desse estudo. Esse fato sugere que o método de calibração considerando cultivares e locais diferentes aparenta ser bem mais eficaz, e que o pomar está dentro dos limites desejáveis para esses dois macronutrientes.

Já para os demais macronutrientes P, Ca e Mg, o pomar C-21 demonstra valores abaixo dos recomendados. Em contraste com o N, o P apresentou boa disponibilidade na maioria das áreas, com os pomares O-23a, O-23b, C-21, C-8 e C-2a apresentando mais de 90% das amostras na faixa "Normal". As exceções foram os pomares O-6a e O-6b, que mostraram uma distribuição mista, com cerca de 40% das amostras "Abaixo do normal", e o pomar C-2b, que se destacou negativamente com a maioria das amostras (aproximadamente 75%) abaixo do nível de suficiência.

O K se caracterizou por uma tendência ao acúmulo. Embora a faixa "Normal" tenha sido expressiva em pomares como O-23b, C-2a e C-2b, foi observada uma frequência notável de amostras na classe "Acima do normal" em diversos locais. O destaque ocorreu no pomar C-21, onde quase 90% das amostras foram classificadas na faixa "Acima do normal", e nos pomares O-6a e C-8, onde essa classe representou a maioria das observações (aproximadamente 60%). O pomar O-6a chegou a registrar amostras na categoria "Excessivo".

Quanto ao Ca, os pomares O-23a, O-23b e C-8 apresentaram excelente estado nutricional, com predominância absoluta da classe "Normal". Em contrapartida, os pomares C-21 e C-2b apresentaram um cenário crítico de deficiência generalizada, com praticamente 100% das amostras "Abaixo do normal". Os pomares O-6a, O-6b e C-2a apresentaram situações intermediárias, mas com forte tendência a níveis baixos.

O Mg seguiu uma tendência similar ao Ca, porém menos severa. Enquanto O-23b, C-8 e O-6a mantiveram altos índices de normalidade, os pomares C-21 e C-2a apresentaram restrições, com o pomar C-21 novamente demonstrando 100% das amostras abaixo do nível normal.

Os dados indicam que o manejo da adubação nitrogenada é o principal desafio comum a todos os pomares, pois o N foi o único nutriente que se apresentou em quantidades aparentemente críticas. Além disso, há uma clara distinção na nutrição de bases (Ca e Mg) entre os pomares, sugerindo que áreas como C-21 e C-2b podem estar enfrentando problemas de acidez ou falta de calagem, enquanto O-23a e O-23b demonstram maior equilíbrio nutricional nesses elementos.

Dentre as cultivares estudadas, a cultivar Maciel foi a que demonstrou o maior teor de N na folha (29 g kg^{-1}). Além disso, foi a única cultivar com N acima da mediana (27 g kg^{-1}) das amostras de referência do trabalho de Betemps *et al.* (2020).

Quanto à relação entre a saúde do solo e a saúde da planta, diagnosticadas através da associação do modelo 4QM, CASH e do status nutricional do tecido vegetal, é possível observar que tanto a planta como o solo apresentam sinais de alerta no pomar C-21 (variedade Maciel). Das 5 amostras de solo coletadas no pomar C-21, 3 foram classificadas doentes, 1 em recuperação e 1 adoecendo. Quanto as análises foliares, observa-se níveis adequados para N e K, parcialmente fora dos limites para P e totalmente fora para Ca e Mg. Portanto, tanto o diagnóstico de saúde do solo como a diagnose nutricional do tecido foliar apontam para situação de necessidade de intervenção no manejo, sugerindo que o modelo 4QM e CASH também é capaz de representar a situação nutricional do tecido foliar qualitativamente.

A hipótese de que pomares orgânicos ocupariam os quadrantes de alta qualidade foi parcialmente confirmada. Os pomares orgânicos antigos (O-23a, O-23b, O-6b) situaram-se no Quadrante 1 ou próximos a ele (alta saúde). Contudo, o pomar O-6a (solo mais arenoso, histórico de silvicultura) ficou no Quadrante 4 (Em recuperação/Baixo Carbono), demonstrando que a baixa capacidade física do solo em armazenar carbono e enzimas e o histórico desfavorável do solo são fatores que fazem a classificação do solo tender a quadrantes mais desfavoráveis.

Os pomares convencionais com dois anos (C-2a e C-2b) diferiram significativamente do pomar C-21 em N e K e Mg foliar. Essa diferença também ocorreu para o teor de COT e MAM. Portanto a falta de N e K foliar coincide com a falta de COT e MAM na comparação entre os pomares C-2a e C-2b com o pomar C-21. Isso demonstra que o modelo 4QM e CASH tem potencial para separar situações muito divergentes, como é o caso dos pomares supracitados.

Porém, para adequar o diagnóstico de saúde do pomar à complexidade de relações entre solo, planta e ambiente, é necessário ponderar a diferença de histórico de uso dos solos, a granulometria e a diferença da cultivar dos pomares estudado nesse trabalho.

Ainda que essas diferenças coincidam ao comparar a faixa de suficiência foliar com a classificação no modelo de quatro quadrantes, os pomares C-2a e C-2b possuem plantas da cultivar Citrino, que costuma ser mais precoce que a Maciel, e isso pode ter afetado a comparação entre as cultivares com coletas realizadas no mesmo período. Isso pode indicar que o período de coleta a fim de diagnóstico nutricional precisa ser adaptado para cada cultivar, e/ou que o diagnóstico do solo

através do modelo 4QM+CASH foi capaz de diferenciar pomares através da correlação entre nutrição foliar e saúde do solo.

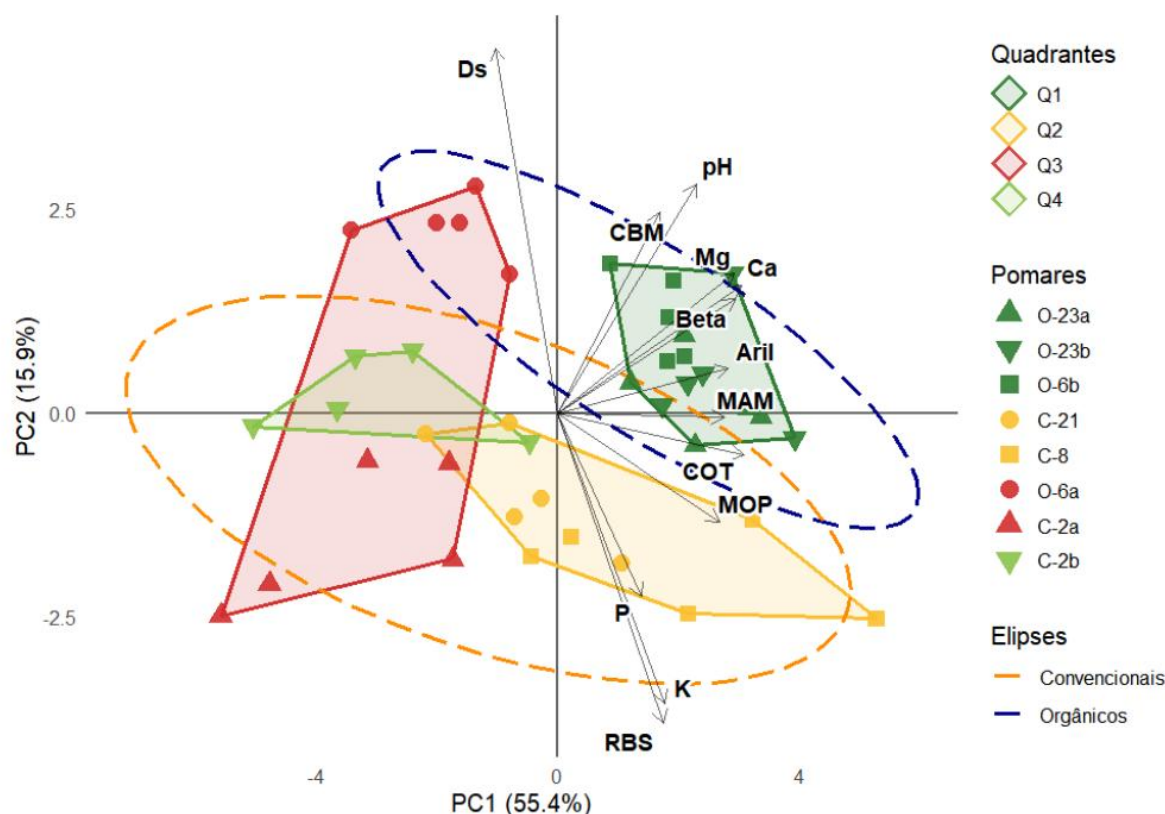
Muñoz *et al.* (1993) demonstraram que quanto mais perto da maturação, maior é a mobilização de N para o fruto, portanto, o baixo teor de N no tecido foliar nos pomares C-2a e C-2b pode ter sido pela influência fenológica da cultivar Citrino, por ser a única precoce dentre as cultivares estudadas nesse trabalho (Raseira; Franzon; Nakasu, 2022).

4.8 Análise das Componentes Principais - PCA

A análise de componentes principais (PCA) é apresentada na Figura 11, e explica 71,3% da variação dos dados, sendo 55,4% da variação explicada pela componente principal 1 (PC1) e 15,9% explicada pela componente principal 2 (PC2). A PCA demonstra a forte dicotomia vetorial entre a fração Areia (vetor negativo na PC1) e os indicadores de saúde do solo (COT, MAM, Enzimas), confirmando que a textura arenosa atua como fator limitante para o acúmulo de carbono e atividade biológica. A porosidade total (Pt) também ficou oposta ao O-6a, visto que a alta quantidade de areia baixou a sua porosidade natural. O detalhe é que a porosidade está associada à fertilidade nos pomares estudados.

Do lado esquerdo, onde estão os indicadores de baixa fertilidade do solo (Areia, H+Al) ficaram relacionados predominantemente os pomares convencionais (C-2a, C-2b, C-21) e o orgânico O-6a. Do lado direito, onde estão os indicadores de alta qualidade do solo (enzimas arilsulfatase e beta-glicosidase, COT, pH mais alto) a predominância foi dos pomares orgânicos (O-6b, O-23a, O-23b) e o convencional C-8. Essa situação mostra que nos pomares desse estudo, o manejo orgânico tem relação forte com bons indicadores de qualidade do solo, enquanto o manejo convencional se relacionou majoritariamente com indicadores de decadência de fertilidade. Porém os pomares O-6a e C-8 elucidam que a separação dos sistemas de manejo através da dicotomia “convencional” e “orgânico” nem sempre vai ser eficaz. Nesse estudo, o histórico de uso do solo, a granulometria e as práticas de manejo pontuais adotadas em cada pomar, independente do sistema, demonstraram ter influência primordial na definição da transformação do solo através do manejo.

Figura 10: Análise de componentes principais (PCA) de atributos do solo em pomares de pêssgo sob manejo orgânico e convencional, classificados nos quatro quadrantes de saúde do solo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os cátions Ca e Mg merecem destaque, pois estão localizados entre as enzimas e a MOS, demonstrando o seu papel primordial para incentivar os processos que regulam o pH e protegem a MOS. Os índices microbiológicos aparentam estar mostrando todos a mesma tendência ocasionada pela baixa respiração no pomar O-6a, mesmo possuindo bastante carbono microbiano. Por fim, o Al^{3+} está associado aos pomares convencionais e mais ácidos, que não fizeram calagem na implantação do pomar, ou usaram calcário granulado, que foi incapaz de neutralizar o Al^{3+} . A componente 2 separa os pomares orgânicos dos convencionais. Os orgânicos estão associados a um pH mais equilibrado e propício para a colonização microbiológica. Os convencionais aparentam estar relacionados à alta atividade microbiológica através da respiração e mineralização de carbono. Talvez essa tendência tenha sido puxada pelo pomar C-8, que possui muita matéria orgânica particulada (lábil) e alta atividade microbiológica.

A forte associação observada neste estudo entre a atividade da beta-glicosidase, o pH e os níveis de Ca e Mg, indica que a acidez do solo atua como um fator limitante primário para a funcionalidade biológica e a correlação positiva com Ca e Mg reflete o efeito direto da calagem. Conforme demonstrado por Hu *et al.* (2025), a atividade da beta-glicosidase é frequentemente mais influenciada pelo pH do solo do que pelo uso da terra ou práticas de manejo isoladas, sendo que valores abaixo de 5,5 (comuns nos pomares não corrigidos deste estudo, como o C-2a) restringem severamente a hidrólise da celulose uma vez que o pH ótimo para a atividade desta enzima situa-se próximo a 6,0, o mesmo recomendado para pessegueiros (Daunoras; Kačergius; Gudiukaitė, 2024).

Portanto, a calagem nos pomares com melhores indicadores de qualidade do solo, não apenas forneceu nutrientes, mas atuou como um condicionador biológico, elevando o pH para faixas ótimas que permitiram à microbiota expressar seu potencial enzimático, superando a inibição enzimática típica de ambientes ácidos não corrigidos.

4.9 Correlações entre atributos Químicos, Físicos e Biológicos

A análise de correlação de Pearson revelou associações significativas que elucidam os mecanismos reguladores da saúde do solo nos pomares avaliados (Figura 12). Observou-se uma forte dicotomia entre os atributos de acidez e os indicadores de funcionalidade biológica, confirmando o papel determinante do manejo químico na expressão do potencial biológico do solo.

A Acidez Potencial (H+Al) apresentou correlações negativas com os principais indicadores de fertilidade (pH e Saturação por Bases) e, fundamentalmente, com a atividade das enzimas beta-glicosidase e arilsulfatase. Inversamente, variáveis associadas à correção da fertilidade, como Ca, Mg e V%, correlacionaram-se positivamente com estes bioindicadores. Estes resultados sugerem que a correção do pH e o aporte de bases atuam como condicionadores ambientais, mitigando o estresse químico e favorecendo a atividade enzimática, contrastando com a acidez natural frequentemente encontrada em áreas não manejadas da região.

O carbono se correlacionou fortemente com o teor de Ca e Mg. Isso sugere que a calagem realizada através de calcário dolomítico favorece a conservação do

carbono no solo, corroborando com Shabtai *et al.* (2023), que sugerem que o teor de Ca está correlacionado positivamente com a persistência de matéria orgânica no solo.

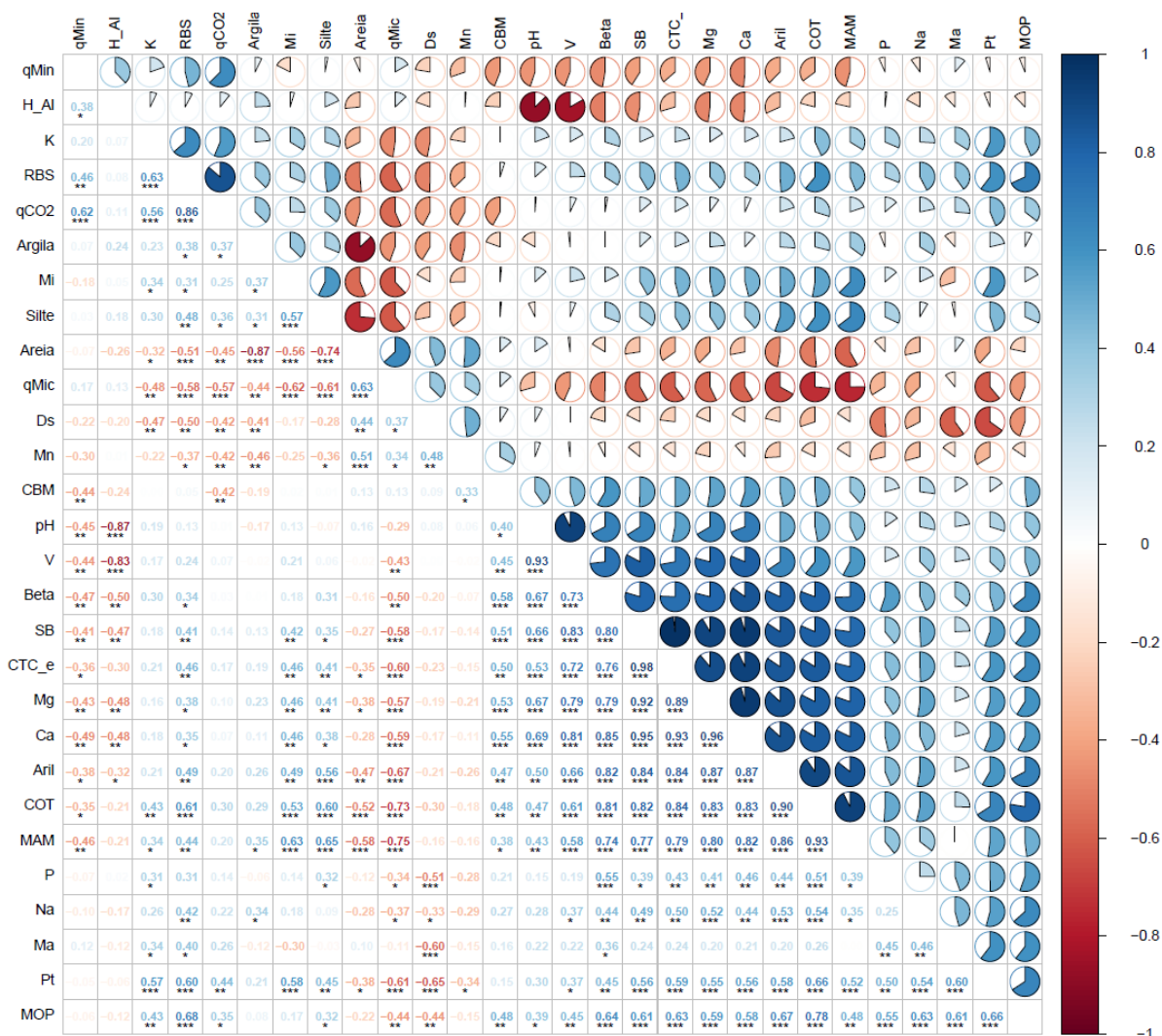
O Carbono Orgânico Total (COT) consolidou-se como o elemento central da qualidade do solo, demonstrando correlação positiva significativa com os melhores indicadores. Destaca-se a forte relação com a atividade enzimática da arilsulfatase ($r=0,9$) e beta-glicosidade ($r=0,8$). Sobre os quocientes, o qMic teve correlação negativa forte com o COT ($r=-0,73$) e MAM ($r=-0,75$). Quanto aos indicadores químicos, há correlação forte com os cátions Ca e Mg ($r=0,8$).

Quanto à física do solo, se relacionou significativamente com a Pt ($r=0,66$) tanto com atributos físicos (Porosidade Total) quanto, validando a matéria orgânica como agente de estruturação, favorecendo a aeração e retenção de água, e como substrato energético primário para a síntese enzimática, corroborando os pressupostos do método CASH (Carneiro *et al.*, 2024). Por outro lado, a fração areia revelou-se um fator de fragilidade edáfica, apresentando correlações negativas com a Porosidade Total e com o COT, reforçando a vulnerabilidade de solos com textura arenosa à perda de estrutura e de estoques de carbono.

Essa análise integrada permite transcender a visão mineralista tradicional e interpretar a qualidade do solo sob a ótica da Fertilidade Sistêmica, conforme proposto por (Anghinoni; Vezzani, 2021). A elevada atividade enzimática observada nos pomares saudáveis (Quadrante 1) indica que o manejo orgânico promoveu um fluxo contínuo de energia e matéria que estimulou a auto-organização do sistema edáfico. A correlação positiva entre COT, atividade biológica e porosidade confirma que a fertilidade é uma propriedade emergente da interação entre estes componentes, essenciais para a resiliência do agroecossistema. A interdependência entre química e biologia ficou evidente na comparação entre os pomares C-2a e C-2b. Kibet *et al.* (2023) pondera que a decomposição dos agentes ligantes dos *pellets* de calcário, essencial para sua reação e aumento do pH, é acelerada pela atividade biológica. O pomar C-2a, caracterizado por baixa atividade enzimática e menor teor de matéria orgânica, apresentou os menores valores de pH, sugerindo que a eficiência da calagem granulada foi prejudicada pela baixa atividade biológica. Em contrapartida, o pomar C-2b, submetido ao mesmo manejo em área adjacente, apresentou maior atividade enzimática média, resultando em valores superiores de pH, Ca e Mg. Isso demonstra que a eficiência da correção química é dependente da vitalidade biológica

do solo. É importante ressaltar que estas dinâmicas foram avaliadas na zona de maior influência radicular. A amostragem estratégica na projeção da copa (0,00–0,10 m) segue as evidências de Petry *et al.* (2016) que demonstraram que a maior densidade de raízes finas e atividade de absorção concentram-se nesta zona, onde a fertilização localizada cria um ambiente químico favorável, diferentemente das entrelinhas compactadas ou das camadas subsuperficiais ricas em alumínio tóxico.

Figura 27: Matriz de correlação de Pearson das variáveis analisadas no solo de pomares de pêssgo em pelotas RS.



Nota: qMin= quociente de mineralização; H_AI=acidez potencial; K=potássio; RBS= respiração basal do solo; qCO2= quociente metabólico; Mi: microporosidade; qMic= quociente microbiano; Ds= densidade do solo; Mn= manganês; CBM = carbono da biomassa microbiana; V = saturação por bases; Beta = betaglicosidase; Aril= arilsulfatase; COT= carbono orgânico total; MAM= matéria orgânica associada aos minerais; P= fósforo; Na= sódio; Ma= macroporos; Pt= porosidade total; MOP= matéria orgânica particulada. Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Considerando a necessidade fisiológica do pessegueiro por solos bem drenados, a implantação de pomares em relevos declivosos e solos arenosos é comum, porém arriscada. Neste contexto, as práticas orgânicas demonstraram ser eficientes para viabilizar a produção nestes ambientes frágeis, promovendo a fertilidade sistêmica através do aumento dos estoques de carbono, estabilização via pontes de Ca e Mg na fração mineral (MAM) e ciclagem de nutrientes via fração particulada (MOP).

5 Considerações finais

A integração da metodologia CASH ao Modelo de Quatro Quadrantes (4QM) consolida-se como uma ferramenta de alta sensibilidade para o diagnóstico funcional do solo em pomares de pessegueiro, superando as limitações da análise química estática. No entanto, o uso de índices globais de qualidade edáfica exige a parametrização das exigências de carbono orgânico em função da classe textural. A adoção de limites avaliativos universais penaliza ecossistemas arenosos, mascarando o fato de que estes solos atingem rapidamente seu teto físico de saturação mineral (MAM) e passam a operar com sua máxima eficiência biológica apoiados na ciclagem rápida das frações orgânicas lábeis (MOP).

A correção da acidez do solo (pH) revelou-se o fator determinante primário para o desbloqueio do potencial biológico dos pomares. Uma vez mitigado o estresse químico, a atividade enzimática emergiu como o indicador mais sensível da qualidade do manejo. Especificamente, a arilsulfatase consolidou-se como o bioindicador mais eficaz para detectar a "memória do manejo", sendo capaz de distinguir históricos de uso do solo e a idade dos pomares precocemente, antecipando mudanças que os indicadores químicos e físicos tradicionais não foram tão eficazes em detectar.

A capacidade de sequestro de carbono nos pomares desse estudo é governada intrinsecamente pela textura e reatividade mineral do solo frente aos aportes radiculares. Em solos arenosos, a baixa disponibilidade de superfícies reativas e a restrição na formação de pontes catiônicas limitam a estabilização física do carbono. Nesses ambientes de baixa proteção, a Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MAM) constitui uma fração de ciclagem rápida que, somada à Matéria Orgânica Particulada (MOP), torna o sistema biologicamente ativo, porém vulnerável. Consequentemente, a sustentabilidade da funcionalidade edáfica nesses pomares

exige a manutenção contínua de raízes vivas (plantas de cobertura) nas entrelinhas, visto que o fluxo ininterrupto de exsudatos radiculares é o motor central da estruturação e nutrição do sistema.

A avaliação da fertilidade baseada exclusivamente na análise química estática subestima a real disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio, em sistemas biologicamente ativos. Confirmou-se que a alta atividade biológica compensa menores teores absolutos de nutrientes no solo através da ciclagem eficiente e da desestabilização contínua da fração mineral de ciclagem rápida mediada por raízes e microrganismos. Portanto, a adoção de faixas de referência locais para a diagnose foliar, integrada aos bioindicadores de saúde do solo, e condições edafoclimáticas, constitui a estratégia mais assertiva para diagnosticar a fertilidade do agroecossistema.

Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 25 fev. 2026.

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic Soil Fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0210090, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210090>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BARRETO, C. F.; ANTUNES, L. E. C.; FERREIRA, L. V.; NAVROSKI, R.; BENATI, J. A.; NAVA, G. Nitrogen fertilization and genotypes of peaches in high-density. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 6, p. e-629, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-29452020629>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BASSO, A.; MELO, G. W. B.; SETE, P. B.; OLIVEIRA, R. A.; DAL MAGRO, R.; BRUNETTO, G. Interferência do manejo de plantas de cobertura do solo sobre o estado nutricional e composição de frutos de pessegueiros. *In*: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2013, Florianópolis. **Anais XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Florianópolis: [s. n.], 2013. p. 4. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/992462/1/1541.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BELARMINO, L. C.; NAVARRO-PABSDORF, M. Economia, polos de produção e comércio de pêssegos no Brasil e mundo. *In*: MARIA DO CARMO BASSOLS, R.; PEREIRA, J. F. M.; CARVALHO, F. L. C. (org.). **Cultivo do pessegueiro**. 2. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2022. (4). p. 15–24. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149935/1/22472.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2025

BETEMPS, D. L.; PAULA, B. V. de; PARENT, S.-É.; GALARÇA, S. P.; MAYER, N. A.; MARODIN, G. A. B.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; MELO, G. W. B.; PARENT, L. E.; BRUNETTO, G. Humboldtian Diagnosis of Peach Tree (*Prunus persica*) Nutrition Using Machine-Learning and Compositional Methods. **Agronomy**, v. 10, n. 6, p. 900, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10060900>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BOARETTO, R. M.; MATTOS, D.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Absorption of $^{15}\text{NH}_3$ volatilized from urea by Citrus trees. **Plant and Soil**, v. 365, n. 1–2, p. 283–290, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1380-7>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BRUNETTO, G.; MELO, G. W. D.; KAMINSKI, J.; CERETTA, C. A. Adubação nitrogenada em ciclos consecutivos e seu impacto na produção e na qualidade do pêssego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 12, p. 1721–1725, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001200008>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BRUNETTO, G.; ROZANE, D. E.; MELO, G. W. B.; ZALAMENA, J.; GIROTTO, E.; LOURENZI, C.; COUTO, R. R.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J. Manejo da fertilidade de solos em pomares de frutíferas de clima temperado. In: TIECHER, T. (org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil**: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre: Ufrgs, 2016. p. 141–158. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1060616/1/ManejodaFertilidadeDoSoloEmPomaresDeFrutiferasDeClimatTemperado.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2025.

BRUNETTO, G.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; WELTER, P. D.; NETO, A. J. de L.; PAULA, B. V. de; BELLITÜRK, K. Future perspective on tissue nutrient sampling, analysis and interpretation in fruit trees. In: BELLITÜRK, K.; ÇELİK, A. (org.). **Sustainable Plant Nutrition and Soil Quality Management**. 1. ed. Istanbul: Eğitim Kitabevi, 2026. p. 331–354. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/399721094_Sustainable_Plant_Nutrition_and_Soil_Quality_Management_icerik_dosyasi_1. Acesso em: 25. fev. 2026.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CAMENZIND, T.; MASON-JONES, K.; MANSOUR, I.; RILLIG, M. C.; LEHMANN, J. Formation of necromass-derived soil organic carbon determined by microbial death pathways. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 2, p. 115–122, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01100-3>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CARNEIRO, R. G.; FIGUEIREDO, C. C. D.; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. C. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, v.

198, p. 105394, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CASSOL, A. J. S.; ZANÃO JÚNIOR, L. A. Viabilidade agronômica de modos de aplicação de fontes de cálcio na correção da acidez do solo. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**. Edição Especial, p. 9, 2018. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/476/304>. Acesso em: 26 fev. 2026.

CHARI, N. R.; TAYLOR, B. N. Soil organic matter formation and loss are mediated by root exudates in a temperate forest. **Nature Geoscience**, v. 15, n. 12, p. 1011–1016, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01079-x>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, M. L.; RODRIGUES, M. Avaliação da Saúde do Solo: Indicadores, Metodologias e Índices. **Informações Agronômicas NPCT**, Piracicaba, SP, v. 21, p. 5–13, 2024. Disponível em: <https://www.npct.com.br/publication/IASite.nsf/>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, p. 215–226, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>. Acesso em: 25 fev. 2026.

COSTA, M. C. G.; TONINI, H.; SCHWENGBER, J. A. M. **Aspectos Sobre Nutrição e Adubação do Eucalipto**: Fundamentos Para Pesquisas em Roraima. Documentos, 03. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2008. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/692091>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CQFS - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. [S. l.]: Núcleo Regional Sul - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. Disponível em: https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

DAS, A.; PATEL, D. P.; KUMAR, M.; RAMKRUSHNA, G. I.; MUKHERJEE, A.; LAYEK, J.; NGACHAN, S. V.; BURAGOHAIN, J. Impact of seven years of organic farming on soil and produce quality and crop yields in eastern Himalayas, India. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 236, p. 142–153, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.007>. Acesso em: 25 fev. 2026.

DAUNORAS, J.; KAČERGIUS, A.; GUDIUKAITĖ, R. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem. **Biology**, v. 13, n. 2, p. 85, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biology13020085>. Acesso em: 25 fev. 2026.

DE OLIVEIRA, V. H.; MAZZAFERA, P.; FALEIRO, R.; MAYER, J. L. S.; HESTERBERG, D.; PÉREZ, C. A.; ANDRADE, S. A. L. Tissue-level distribution and

speciation of foliar manganese in *Eucalyptus tereticornis* by μ -SXRF and μ -XANES shed light on its detoxification mechanisms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 461, p. 132555, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132555>. Acesso em: 25 fev. 2026.

DE PONTI, T.; RIJK, B.; VAN ITTERSUM, M. K. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. **Agricultural Systems**, v. 108, p. 1–9, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.12.004>. Acesso em: 25 fev. 2026.

DU TOIT, D. J.; SWANEPOEL, P. A.; HARDIE, A. G. Effect of lime source, fineness and granulation on neutralisation of soil pH. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 39, n. 3, p. 163–174, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02571862.2022.2043470>. Acesso em: 25 fev. 2026.

ESPER NETO, M.; ZAMPAR, É. J. D. O.; CORDIOLI, V. R.; CASSIM, B. M. A. R.; DIAS, G. A. R.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Biogenic and Common Lime Characterization in Granular and Powder Forms and Their Application in Sowing Furrows for Soybean Crops. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 10, p. 1382–1390, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1781157>. Acesso em: 25 fev. 2026.

FAN, X.; GAO, D.; ZHAO, C.; WANG, C.; QU, Y.; ZHANG, J.; BAI, E. Improved model simulation of soil carbon cycling by representing the microbially derived organic carbon pool. **The ISME Journal**, v. 15, n. 8, p. 2248–2263, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00914-0>. Acesso em: 25 fev. 2026.

FAOSTAT - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION CORPORATE STATISTICAL. Crops and livestock products, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 25 fev. 2026.

FENG, J.; WANG, L.; ZHAI, C.; JIANG, L.; YANG, Y.; HUANG, X.; RU, J.; SONG, J.; ZHANG, L.; WAN, S. Root carbon inputs outweigh litter in shaping grassland soil microbiomes and ecosystem multifunctionality. **npj Biofilms and Microbiomes**, v. 10, n. 1, p. 150, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00616-3>. Acesso em: 25 fev. 2026.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá, MS: Embrapa Pantanal, 2009. Comunicado Técnico. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/792567/1/COT69.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

GEORGIU, K. *et al.* Soil Carbon Saturation: What Do We Really Know? **Global Change Biology**, v. 31, n. 5, p. e70197, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.70197>. Acesso em: 25 fev. 2026.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71–85, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1). Acesso em: 25 fev. 2026.

HE, H.; LIU, Y.; HU, Y.; ZHANG, M.; WANG, G.; SHEN, W. Soil Microbial Community and Its Interaction with Soil Carbon Dynamics Following a Wetland Drying Process in Mu Us Sandy Land. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 12, p. 4199, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17124199>. Acesso em: 25 fev. 2026.

HENRIQUEZ, J. M. O. **Qualidade do solo no cultivo de pessegueiro, sob sistemas de produção agrícola familiar convencional e agroecológico, em Pelotas – RS**. 2020. - 169 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de PósGraduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/7556>. Acesso em: 20 jan. 2025.

HENRIQUEZ, J. M. O.; CARVALHO, J. dos S.; NUNES, R. B.; RIBEIRO, T. dos R.; CASALINHO, H. D.; LIMA, A. C. R. de. Mesofauna edáfica em diferentes sistemas de uso do solo em propriedades agrícolas familiares na Colônia São Manoel, Pelotas-RS, Brasil. *In*: VI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE AGROECOLOGIA; X CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA; V SEMINÁRIO DE AGROECOLOGIA DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO, 2018, Brasília, DF. **Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF**. Brasília, DF: Cadernos de Agroecologia, 2018. Disponível em: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/1552/306>. Acesso em: 25 fev. 2026.

HERTER, F. G.; CARVALHO, F. L. C. Clima e Solos. *In*: MARIA DO CARMO BASSOLS, R.; PEREIRA, J. F. M.; CARVALHO, F. L. C. (org.). **Cultivo do pessegueiro**. 2. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2022. (4). p. 25–29. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149938>. Acesso em: 26 jan. 2025.

HINDERSMANN, J. *et al.* Proposing Nutrient Reference Values in Peach Leaves Based on Bayesian Segmented Quantile Regression. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02989-6>. Acesso em: 18 fev. 2026.

HU, X.; RAKKAR, M. K.; LYON, S. W.; ARMSTRONG, K. S.; JACKSON-SMITH, D. B.; HADEN, V. R.; LORENZ, N.; WHITACRE, S. D.; IPPOLITO, J. A. Soil health quantification via SMAF and CASH across diverse land uses. **Geoderma**, v. 461, p. 117492, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117492>. Acesso em: 25 fev. 2026.

HUANG, J.; WANG, T.; XIN, C.; WU, D.; WANG, J.; GE, Z.; LOU, X. Orchard Soil Health—Current Challenges and Future Perspectives. **Horticulturae**, v. 11, n. 10, p. 1206, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11101206>. Acesso em: 25 fev. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa exploratório de solos do estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2002. Escala 1:1000000. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/rs_pedologia.pdf. Acesso em: 11 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção de Pêssego**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pesego/rs>. Acesso em: 11 maio 2025.

JILLING, A. *et al.* Evidence for the existence and ecological relevance of fast-cycling mineral-associated organic matter. **Communications Earth & Environment**, v. 6, n. 1, p. 690, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02681-8>. Acesso em: 25 fev. 2026.

KIBET, P. K.; MUGWE, J. N.; KORIR, N. K.; MUCHERU-MUNA, M. W.; NGETICH, F. K.; MUGENDI, D. N. Granular and powdered lime improves soil properties and maize (*Zea mays* L.) performance in humic Nitisols of central highlands in Kenya. **Heliyon**, v. 9, n. 6, p. e17286, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17286>. Acesso em: 25 fev. 2026.

KLIEWER, W. M.; COOK, J. A. Arginine Levels in Grape Canes and Fruits as Indicators of Nitrogen Status of Vineyards. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 25, n. 2, p. 111–118, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.5344/ajev.1974.25.2.111>. Acesso em: 25 fev. 2026.

LI, Y.; HAN, M.-Q.; LIN, F.; TEN, Y.; LIN, J.; ZHU, D.-H.; GUO, P.; WENG, Y.-B.; CHEN, L.-S. Soil chemical properties, 'Guanximiyou' pummelo leaf mineral nutrient status and fruit quality in the southern region of Fujian province, China. **Journal of soil science and plant nutrition**, p. 615-628, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000029>. Acesso em: 25 fev. 2026.

LIANG, G.; STARK, J.; WARING, B. G. Mineral reactivity determines root effects on soil organic carbon. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 4962, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40768-y>. Acesso em: 25 fev. 2026.

LINO, I. A. N.; DOS SANTOS, V. M.; ESCOBAR, I. E. C.; DA SILVA, D. K. A.; DE ARAÚJO, A. S. F.; MAIA, L. C. Soil Enzymatic Activity in *Eucalyptus Grandis* Plantations of Different Ages. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 1, p. 77–82, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2454>. Acesso em: 25 fev. 2026.

LOLLATO, R. P.; EDWARDS, J. T.; ZHANG, H. Effect of Alternative Soil Acidity Amelioration Strategies on Soil pH Distribution and Wheat Agronomic Response. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1831–1841, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.04.0129>. Acesso em: 25 fev. 2026.

LOPES, P. R.; LOPES, K. Sistemas de produção de base ecológica—a busca por um desenvolvimento rural sustentável. **REDD – Revista Espaço de Diálogo e Desconexão**, v. 4, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.32760/1984-1736/REDD/2011.V4I1.5047>. Acesso em: 25 fev. 2026.

LORENSINI, F.; CERETTA, C. A.; CONTI, L. D.; FERREIRA, P. A. A.; DANTAS, M. K. L.; BRUNETTO, G. Nitrogen fertilization in the growth phase of “Chardonnay” and “Pinot Noir” vines and nitrogen forms in sandy soil of the Pampa Biome. **Revista Ceres**, v. 64, n. 4, p. 433–440, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737x201764040013>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MATOS, E. da S.; MENDONÇA, E. D. S. Fracionamento físico da matéria orgânica. *In: MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. (org.). Matéria orgânica do solo métodos de análises*. 2. ed. Viçosa, MG: Gefert, 2017. p. 77–114.

MATOS, E. da S.; MENDONÇA, E. D. S.; MORALES, M. M.; SILVA, B. R. da. Carbono total e frações químicas de carbono do solo. *In: MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. (org.). Matéria orgânica do solo métodos de análises*. 2. ed. Viçosa, MG: Gefert, 2017. p. 9–59.

MATSUNAGA, W. K.; RODRIGUES, H. J. B.; RODRIGUES, P. G. Microbiological Attributes of the Soil, Associated to Microfauna Activities of Soil in the Amazonia Forest. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, n. 3, p. 630–638, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2018_3_630_638. Acesso em: 25 fev. 2026.

MAYER, F. A.; SURITA, R. M. G.; MARTINEZ, E. Á.; NORMBERG, A. V.; WOJAHN, E. Fomento à transição ecológica da produção familiar de pêssego no Território Zona Sul do RS. *In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA*, 2016a, Belém. **Resumos do IX Congresso Brasileiro de Agroecologia**. Belém: [s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.aba-agroecologia.org.br/revista/cad/article/view/17071/11701>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MAYER, F. A.; SURITA, R. M. G.; MARTINEZ, E. Á.; POLLNOW, G. E.; WOJAHN, E. Princípios agroecológicos para a cultura do pessegueiro. *In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA*, 2016b, Belém. **Resumos do IX Congresso Brasileiro de Agroecologia**. Belém: [s. n.], 2016. Disponível em: <https://revista.aba-agroecologia.org.br/cad/article/view/17058/11700>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MAYER, N. A.; UENO, B.; SILVA, V. A. L. da; NEVES, T. R. das. **Avaliações Agrônômicas de Porta-enxertos para o Pessegueiro “Maciel”**: Documentos. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1056713/1/Boletim241.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MELO, G. W. B. D.; SETE, P. B.; AMBROSINI, V. G.; FREITAS, R. F.; BASSO, A.; BRUNETTO, G. Nutritional status, yield and composition of peach fruit subjected to the application of organic compost. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 38, n. 1, p. 103, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i1.25638>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; JUNIOR, F. B. dos R.; OLIVEIRA, M. I. L.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V. **Fazendas de referência para a implementação do modelo de quatro quadrantes na avaliação de tendências do carbono do solo pela tecnologia BioAS**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2023. Documentos. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1154741/1/Doc-403-leda.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MENEGATTI, R. D.; SOUZA, A. D. G.; BIANCHI, V. J. Nutritional efficiency for nitrogen, phosphorus and potassium in peach rootstocks. *Journal of Plant*

Nutrition, v. 44, n. 2, p. 228–237, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1806306>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MILLARD, P.; GRELET, G. -a. Nitrogen storage and remobilization by trees: ecophysiological relevance in a changing world. **Tree Physiology**, v. 30, n. 9, p. 1083–1095, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq042>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MOEBIUS-CLUNE, B. N.; MOEBIUS-CLUNE, D. J.; SCHINDELBECK, R. R.; KURTZ, K. S. M.; VAN ES, H. M.; RISTOW, A. J. **Comprehensive assessment of soil health: the Cornell framework manual**. Third edition ed. Ithaca, NY: Cornell University, 2016. Disponível em: <https://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>. Acesso em 20 jan. 2025.

MOURA-BUENO, J. M.; BETEMPS, D. L.; MARODIN, G. A. B.; TOSELLI, M.; NATALE, W.; BRUNETTO, G. Peach Yield Prediction Models: The Importance of Climate Variables and Different Machine Learning. **Horticulturae**, v. 12, n. 2, p. 155, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae12020155>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MUÑOZ, N.; GUERRI, J.; LEGAZ, F.; PRIMO-MILLO, E. Seasonal uptake of ¹⁵N-nitrate and distribution of absorbed nitrogen in peach trees. **Plant and Soil**, v. 150, n. 2, p. 263–269, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00013023>. Acesso em: 25 fev. 2026.

NAVA, G.; BARICELO, L. G. **Gestão de custos e viabilidade econômica do cultivo protegido de pêssegos na região de Pelotas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2024. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168367/1/BdePDes-374-Gestao-de-custos-e-viabilidade-economica-do-cultivo-protegido-de-pessegos.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

NAVA, G.; PAULA, B. V. de; HAHN, L.; BARRETO, C. F.; BENATI, J. A.; BRUNETTO, G.; NAVROSKI, R.; HINDERSMANN, J.; PAESE, B. T.; MOURA-BUENO, J. M. (org.). Calagem, adubação e estado nutricional em pessegueiro. In: **Atualização Técnica sobre calagem e adubação em frutíferas**. Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo - Núcleo Regional Sul, p. 383-403, 2025.

NAVROSKI, R.; BARRETO, C. F.; CANTILLANO, R. F. F.; VIZZOTTO, M.; NAVA, G. Physicochemical and functional characteristics of peach cv. Esmeralda fertilized with different doses of nitrogen. **Comunicata Scientiae**, v. 15, p. e3565, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/cs.v15.3565>. Acesso em: 25 fev. 2026.

NAVROSKI, R.; BENATI, J. A.; BARRETO, C. F.; FISCHER, L. D. O.; PEREIRA, J. F. M.; NAVA, G.; MALGARIM, M. B. Estado nutricional do pessegueiro na principal região produtora de pêssego para indústria no Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 4, p. 407–413, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711942020407>. Acesso em: 25 fev. 2026.

NUNES, E. A.; CASSIANO, G. H.; DA SILVEIRA, A. P. D.; DE ANDRADE, S. A. L. Soil legacies left by a 20-year eucalypt plantation and a secondary vegetation covers on young eucalypt plants and plant-soil feedback. **Biology and Fertility of Soils**, v. 61, n. 2, p. 187–210, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01880-3>. Acesso em: 25 fev. 2026.

NUNES, J. L. D. S. Assessment of the Influence of Peach Production Systems on the Quantity and Quality of Root Collinization by Arbuscular Mycorrhizal Fungi. **Current Agriculture Research Journal**, v. 12, n. 2, p. 564–577, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.12944/CARJ.12.2.06>. Acesso em: 25 fev. 2026.

OLSSON, L. *et al.* Land degradation. *In*: SHUKLA, P. R. *et al.* (org.). **Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems**. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2022. p. 345–436. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157988.006>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 187, p. 87–105, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>. Acesso em: 25 fev. 2026.

PAULA, B. V. de; BRUNETTO, G.; MELO, G. W. B.; ZALAMENA, J.; TASSINARI, A.; BELLINASSO, R. J.; SOMAVILLA, L. M. Efeito de espécies de plantas de cobertura no crescimento e na produtividade do pessegueiro. *In*: 14º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E 10º ENCONTRO DE PÓS-GRADUANDOS DA EMBRAPA UVA E VINHO, 2016, Bento Gonçalves. **Anais do 14º Encontro de Iniciação Científica e 10º Encontro de Pós-graduandos da Embrapa Uva e Vinho**. Bento Gonçalves: [s. n.], 2016. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1049009>. Acesso em: 25 fev. 2026.

PAULA, B. V. de; LIMA, A. C. R. de; CASALINHO, H. D.; BUSS, R. B.; RIBES, R.; RIBEIRO, T. dos R. Diagnóstico da qualidade do solo sob cultivo de pêssego em agroecossistemas de base familiar. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata, v. 114, n. 2, p. 271–278, 2015. Disponível em: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/51353/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 20 jan. 2025.

PETRY, H. B.; MAZURANA, M.; MARODIN, G. A. B.; LEVIEN, R.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C.; SCHWARZ, S. F. Root Distribution of Peach Rootstocks Affected by Soil Compaction and Acidity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150135>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PRIMAVESI, A. **Manual do solo vivo**. Sao Paulo: Expressão Popular, 2016.

QU, Q.; WANG, Z.; GAN, Q.; LIU, R.; XU, H. Impact of drought on soil microbial biomass and extracellular enzyme activity. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p.

1221288, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221288>. Acesso em: 25 fev. 2026.

RASEIRA, M. do C. B.; FRANZON, R. C.; NAKASU, B. H. Cultivares. In: MARIA DO CARMO BASSOLS, R.; PEREIRA, J. F. M.; CARVALHO, F. L. C. (org.). **Cultivo do pessegueiro**. 2. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2022. (4). p. 40–78. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149945>. Acesso em: 20 jan.2025.

REEVE, J. R.; HOAGLAND, L. A.; VILLALBA, J. J.; CARR, P. M.; ATUCHA, A.; CAMBARDELLA, C.; DAVIS, D. R.; DELATE, K. Organic Farming, Soil Health, and Food Quality: Considering Possible Links. In: **Advances in Agronomy**. [S. l.]: Elsevier, 2016. v. 137, p. 319–367. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.003>. Acesso em: 19 fev. 2026.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**. v. 27, p. 30–48, 2003. Disponível em: <https://cienciaeambiente.com.br/shared-files/2300/?029-048-1.pdf>. Acesso em 20 jan. 2025.

REIGHARD, G. L.; BRIDGES, W.; RAUH, B.; MAYER, N. A. Prunus Rootstock Influence Peach Leaf and Fruit Nutrient Content. In: POOVARODOM, S.; INTERNATIONAL SOCIETY FOR HORTICULTURAL SCIENCE (org.). **Proceedings of the VIIth International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops: Chanthaburi, Thailand, May 19 - 25, 2012**. Leuven: ISHS, 2013. (Acta horticulturae). p. 117–124. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.984.10>. Acesso em: 25 fev. 2026.

ROMBOLA, A. D.; SORRENTI, G.; MARODIN, G. A. B.; DE PIERI, A. Z.; BARCA, E. Nutrição e manejo do solo em fruteiras de caroço em regiões de clima temperado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 639–654, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p639>. Acesso em: 25 fev. 2026.

ROZANE, D. E.; BRUNETTO, G.; NATALE, W. Manejo da fertilidade do solo em pomares de frutíferas. **Informações Agronômicas NPCT**, v. 160, p. 16–29, 2017. Disponível em: <https://www2.unesp.br/Modulos/Noticias/31423/ia-160---p.-16-29.pdf>. Acesso em 20 jan. 2025.

RUFATO, L.; RUFATO, A. D. R.; KRETZSCHMAR, A. A.; PICOLOTTO, L.; FACHINELLO, J. C. Coberturas vegetais no desenvolvimento vegetativo de plantas de pessegueiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 1, p. 107–109, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452007000100023>. Acesso em: 25 fev. 2026.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025. *E-book*. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1176834>. Acesso em: 25 fev. 2026.

SETE, P. B.; MELO, G. W. B. D.; OLIVEIRA, B. S.; FREITAS, R. F.; MAGRO, R. D.; AMBROSINI, V. G.; TRAPP, T.; COMIN, J. J.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. Perdas de nitrogênio do solo e resposta do pessegueiro à adição de composto orgânico. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 651–657, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131232>. Acesso em: 25 fev. 2026.

SEUFERT, V.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. **Nature**, v. 485, n. 7397, p. 229–232, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature11069>. Acesso em: 25 fev. 2026.

SHABTAI, I. A.; WILHELM, R. C.; SCHWEIZER, S. A.; HÖSCHEN, C.; BUCKLEY, D. H.; LEHMANN, J. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 6609, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42291-6>. Acesso em: 25 fev. 2026.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S. de; DE-POLLI, H. **Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (BMS-C)**: Comunicado Técnico. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2007 a. Comunicado Técnico. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/625010/1/cot098.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S. de; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico (qCO₂)**: Comunicado Técnico. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2007 b. Comunicado Técnico. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/627577/1/cot099.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. (org.). **SSSA Book Series**. 1. ed. [S. l.]: Wiley, 1994. v. 5, p. 775–833. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>. Acesso em: 18 fev. 2026.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, planta e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. (Boletim Técnico 5).

TEIXEIRA, P. C.; FONTANA, A.; DONAGEMMA, G. K.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

TERÁN-SAMANIEGO, K.; ROBLES-PARRA, J. M.; VARGAS-ARISPURO, I.; MARTÍNEZ-TÉLLEZ, M. Á.; GARZA-LAGLER, M. C.; FÉLIX-GURROLA, D.; MAYCOTTE-DE LA PEÑA, M. L.; TAFOLLA-ARELLANO, J. C.; GARCÍA-FIGUEROA, J. A.; ESPINOZA-LÓPEZ, P. C. Agroecology and Sustainable Agriculture: Conceptual Challenges and Opportunities—A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 17, n. 5, p. 1805, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17051805>. Acesso em: 25 fev. 2026.

UNITED NATIONS CONVENTIONS TO COMBAT DESERTIFICATION - UNCCD. **Global Land Outlook**. 2. ed. Bonn: [s. n.], 2022. *E-book*. Disponível em: https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-04/UNCCD_GLO2_low-res_2.pdf. Acesso em: 25 fev. 2026.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>. Acesso em: 25 fev. 2026.

VERGUTZ, L.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. D.; BARROS, N. F. D.; NUNES, T. N.; PIAU, A. A. D. M. Mudanças na matéria orgânica do solo causadas pelo tempo de adoção de um sistema agrossilvopastoril com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 43–57, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100005>. Acesso em: 25 fev. 2026.

VEZZANI, F. M.; TEDESCO, M. J.; BARROS, N. F. Alterações dos nutrientes no solo e nas plantas em consórcio de eucalipto e acácia negra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 225–231, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100024>. Acesso em: 25 fev. 2026.

WHALEN, E. D.; GRANDY, A. S.; GEYER, K. M.; MORRISON, E. W.; FREY, S. D. Microbial trait multifunctionality drives soil organic matter formation potential. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 10209, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53947-2>. Acesso em: 25 fev. 2026.

XU, J.; LIU, B.; QU, Z.; MA, Y.; SUN, H. Age and Species of Eucalyptus Plantations Affect Soil Microbial Biomass and Enzymatic Activities. **Microorganisms**, v. 8, n. 6, p. 811, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060811>. Acesso em: 25 fev. 2026.

XU, Y.; DU, A.; WANG, Z.; ZHU, W.; LI, C.; WU, L. Effects of different rotation periods of Eucalyptus plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity. **Forest Ecology and Management**, v. 456, p. 117683, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117683>. Acesso em: 25 fev. 2026.

YU, X.; GUO, L.; JIANG, G.; SONG, Y.; MUMINOV, M. A. Advances of organic products over conventional productions with respect to nutritional quality and food security. **Acta Ecologica Sinica**, v. 38, n. 1, p. 53–60, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.01.009>. Acesso em: 25 fev. 2026.