



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

Heitor Flores Lizarelli

Efeito de plantas de cobertura na atividade enzimática do solo e sua relação com a fertilidade do solo, estado nutricional e rendimento de cebola (*Allium cepa* L.) em sistema de plantio direto de hortaliças

Florianópolis
2024

Heitor Flores Lizarelli

Efeito de plantas de cobertura na atividade enzimática total do solo e sua relação com a fertilidade do solo, estado nutricional e rendimento de cebola (*Allium cepa* L.) em sistema de plantio direto de hortaliças

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas.

Orientador: Prof. Jucinei José Comin, Pós Dr.
Coorientador: Prof. Arcângelo Loss, Dr.

Florianópolis

2024

Lizarelli, Heitor Flores

Efeito de plantas de cobertura na atividade enzimática total do solo e sua relação com a fertilidade do solo, estado nutricional e rendimento de cebola (*Allium cepa* L.) em sistema de plantio direto de hortaliças / Heitor Flores Lizarelli ; orientador, Jucinei José Comin, coorientador, Arcângelo Loss, 2024.

80 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Sistema de Plantio Direto de Hortaliças. 3. *Allium cepa* L.. 4. Atividade enzimática do solo. I. Comin, Jucinei José. II. Loss, Arcângelo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. IV. Título.

Heitor Flores Lizarelli

Efeito de plantas de cobertura na atividade enzimática do solo e sua relação com a fertilidade do solo, estado nutricional e rendimento de cebola (*Allium cepa* L.) em sistema de plantio direto de hortaliças

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 02 de agosto de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Cledimar Rogério Lourenzi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Monique Souza, Dra.
Centro Universitário Leonardo da Vinci

Prof. Paulo Ademar Avelar Ferreira, Dr.
Universidade Federal de Santa Maria

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Jucinei José Comin, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2024.

“Depois de algum tempo de chegada, o estrangeiro disse aos homens do vale, num morrer de tarde:
 até agora vos tinha falado apenas
 dos cânticos dos pássaros e
 da ternura das madrugadas.
 Era preciso fazer convosco um aprendizado fundamental:
 sentir a incerteza do amanhã
 vivendo a negação de mim mesmo,
 num trabalho que não é nosso.
 Só assim falar a vós seria uma forma de falar convosco.
 Agora vos digo:
 não acreditemos em quem proclame
 que nossa fraqueza é um presente dos deuses;
 que ela está em nós como o perfume nas flores
 ou o orvalho nas manhãs.
 Nossa fraqueza não é ornamento de nossas vidas amargas.
 Não acreditemos nos que afirmam com hipócrita entonação,
 que a vida é assim mesma;
 – uns poucos podendo muito,
 milhões nada podendo.
 Nossa fraqueza não é virtude.
 Façamos de conta, porém, que acreditamos
 em seus discursos.
 É preciso que nenhum gesto nosso
 revele nossa intenção real.
 É preciso que eles partam felizes com sua mentira; certos de que somos coisas suas.
 Necessitamos de tempo
 para preparar o nosso discurso
 que sacudirá montanhas e vale
 mares e rios
 e os deixará atônitos e medrosos.
 Nosso discurso diferente
 – nossa palavração – será dito
 por nosso corpo todo:
 nossas mãos, nossos pés, nossa reflexão.
 Tudo em nós falará uma linguagem
 criadora de vida
 – inclusive os instrumentos que
 nossas mãos usarão,
 quando, em comunhão
 transformarmos nossa fraqueza
 em nossa força.
 Ai de nós, porém, se pararmos de falar,
 Somente porque eles já não possam mais mentir.
 Por isto vos digo:
 Nosso discurso de libertação
 não é medicina para doença passageira.
 Se emudecermos ao se calarem
 as mentiras atuais
 novas mentiras surgirão
 em nome de nossa libertação.
 Nosso discurso diferente,
 – nossa palavração –
 como discurso verdadeiro, se fará e re-fará;
 jamais é ou terá sido
 porque sempre estará sendo.
 Nosso discurso diferente,
 – nossa palavração –
 tem de ser um discurso permanente.

Paulo Freire, Genebra, abril de 1971” (Do acervo de Ana Maria Araújo Freire, em Freire (2001)).

AGRADECIMENTOS

A ciência nunca é realizada de forma individual. Esta dissertação é resultado de um esforço coletivo de muitas partes. As melhores ideias são as que surgem dos múltiplos diálogos sociais. Se sou grato hoje pelo conhecimento que possuo, devo à pluralidade de vivências sociais e intrapessoais que tive o privilégio de experienciar. Sou fruto de um casal inimaginavelmente generoso. Aos meus pais, Rose e Paulo, que eu possa sempre retribuir o amor incondicional com o qual me presenteiam. Que seus propósitos continuem inspirando e nossa família possa sempre incentivar laços fraternos e ideais socioambientais. Durante os dois anos experimentando ciência do solo no contexto dos agroecossistemas, devo meus agradecimentos a diversas pessoas e seres. Ao casal de amigos, Owen e Gisele, que me proporcionaram a primeira morada na ilha, lugar especial que guardarei em profundas memórias litorâneas. Ao amigo de longa data Nathan Chaves, pela companhia de sempre, regada a boas conversas, cantorias e aventuras pelo interior do Paraná. Ao amigo Valdeir Prestes, que logo se tornará referência em Desenvolvimento Rural Sustentável. Ao orientador Jucinei José Comin, que se tornou amigo e um exemplo de ser humano sensível em busca de um mundo mais ecológico (e regado de bons vinhos). Seus “puxões de orelha”, sempre respeitosos, foram importantes e incorporados na minha trajetória pessoal e profissional. À Carolina Schaffer, que acompanhou e ajudou no processo de revisão da dissertação, sua companhia abraça minha alma. Aos colegas e amigos do NEPEA sempre dispostos a tirar dúvidas e a ajudar com conselhos sobre processos no laboratório e na pós-graduação. Ao Leonardo Giovanetti, nas infindáveis ajudas com o experimento a campo e em laboratório. Aos bolsistas do Laboratório de Solos, Água e Tecido Vegetal, João Germano, Maria Luíza Z, Miguel Barth e Douglas Zin no auxílio durante as coletas de solo e tecido vegetal. À amiga Zayne Duarte, por ouvir meus desabafos durante um cafezinho e outro e pela ajuda com o destilador de nitrogênio. À Letícia Filipini, pelas ajudas nas análises microbiológicas. Ao Victor Roberto pela ajuda na reta final das análises de laboratório. Ao Elelan Machado, pelas risadas em meio a rotinas cansativas de laboratório. Ao Jorge Guimaraes, pelas conversas em longos trechos de transporte público e em volta de fogueiras. Ao pessoal da salinha do PGA, pelos cafés e prosas durante o processo de escrita da dissertação. À Fabiana Dassoler, secretária do PPGA, que ajudou imensamente em todos os processos burocráticos durante a realização do mestrado. Ao Alan Batistão, técnico do Laboratório de Solos do CCA, por ter ensinado e ajudado tanto nos procedimentos laboratoriais; nestes dois anos ficou evidente seu esforço e consideração pelo laboratório de solos do CCA, buscando um ambiente mais profissional e qualificado. A todos os voluntários e bolsistas do NEPEA que auxiliaram em procedimentos que podem ser vistos como simples, mas que foram fundamentais para a condução da pesquisa. Aos professores do PPGA pelo conhecimento transmitido acerca dos agroecossistemas em suas diversas relações. A todos os colaboradores da Estação Experimental da EPAGRI de Ituporanga, especialmente ao Claudinei Kurtz, que conduzem o experimento de SPDH agroecológico para produção de cebola com excelência. Um agradecimento especial às minhocas, aos besouros e outros seres que habitam o solo.

“O solo não é um recurso.
O solo é uma entidade.”
Krenak, 2024.

“Earth has plenty for every man’s needs but not for every man’s greed.”
Gandhi, 1994.

“A especialização pode transformar-se numa perigosa fraqueza. Um animal que só desenvolvesse e especializasse os olhos se tornaria um gênio no mundo das cores e das formas, mas se tornaria incapaz de perceber o mundo dos sons e dos odores. E isto pode ser fatal para a sobrevivência.”
Alves, 1981.

“That which is conceived to be nature is only the idea of nature arising in each person’s mind. The ones who see true nature are infants. They see without thinking, straight and clear.”
Fukuoka, 1978.

“A caracterização da erosão induzida pelas atividades do homem como um problema implica, assim, levar em conta o seu significado frente à atividade humana que a promove, além do próprio significado daquela atividade frente aos critérios que determinam o comportamento do homem, ou seja, para que possamos atribuir adequada significação à erosão do solo agrícola, não basta saber explicar suas implicações sobre a agricultura, mas, principalmente, precisamos compreender o papel da agricultura nas relações de valores e na escala de prioridades do homem atual.”
D’Agostini, 1999

RESUMO

A produção de cebola (*Allium cepa* L.) em Santa Catarina, referência nacional com 551.225 toneladas na safra de 2022/23, se concentra na região do Alto Vale do Itajaí, caracterizada por relevo declivoso e agricultura em morros desflorestados. Esta atividade enfrenta desafios relacionados à erosão e degradação da fertilidade do solo devido ao sistema de preparo convencional, que envolve constante revolvimento do solo, monocultivo, uso de agrotóxicos e adubos minerais altamente solúveis, negligenciando práticas básicas como rotação de culturas e cobertura permanente do solo. O Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH) agroecológico contribui para recuperar e sustentar a fertilidade, estrutura e atividade biológica do solo, mantendo e elevando a produtividade da cebola a longo prazo sem depender de insumos caros e potencialmente poluidores. No SPDH, realiza-se rotação de culturas com plantas de cobertura. A matéria seca das plantas de cobertura se acumula na superfície, proporcionando ciclagem de nutrientes, estruturação do solo, redução da variabilidade térmica e diminuição dos impactos da chuva, erosão e lixiviação de nutrientes. Assim, a atividade biológica do solo é estimulada por meio da produção de biomassa, fornecendo carbono, nutrientes e exsudatos que alimentam organismos do solo. Estes produzem enzimas extracelulares, fundamentais para acelerar reações químicas no solo, sendo a atividade enzimática considerada indicador de qualidade e saúde do solo, que pode ser avaliada através da Hidrólise do Diacetado de Fluoresceína (DAF). O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes plantas de cobertura, solteiras ou consorciadas, em SPDH agroecológico de longo prazo sobre atributos químicos e atividade enzimática total (DAF) do solo, estado nutricional e rendimento da cebola. O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Epagri em Ituporanga, SC, com oito tratamentos em delineamento de blocos completos casualizados e quatro repetições, representando diferentes composições de sucessão de culturas. Foram realizadas coletas de solo para análises químicas, de fertilidade e de tecido vegetal para análise de macronutrientes nas plantas de cobertura e cebola, e atividade enzimática do solo. Também foi avaliada a matéria seca superficial e o teor de macronutrientes acumulados pelas plantas de cobertura. As análises foram conduzidas durante as safras de 2022 e 2023, com os dados submetidos à teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) e análise de componentes principais (PCA). Os tratamentos foram eficientes em manter a fertilidade do solo após 14 anos de manejo agroecológico, de forma que aqueles com consórcios de plantas de cobertura, especialmente aveia-preta e nabo-forrageiro, e aqueles com leguminosas no verão, apresentaram desempenho superior mais constante na atividade enzimática do solo. No geral, as diferentes composições de sucessão de cultivos com plantas de cobertura de inverno e de verão para o cultivo de cebola em SPDH não demonstraram diferenças para os indicadores de qualidade de solo e no rendimento da cebola. A fertilidade do solo está sendo mantida em longo prazo de manejo, promovendo ciclagem eficiente de nutrientes essenciais, melhorando o estado nutricional e o rendimento da cebola. Este estudo demonstrou a eficácia do SPDH agroecológico na manutenção da qualidade do solo e produtividade da cebola, oferecendo uma alternativa sustentável ao manejo convencional.

Palavras-chave: SPDH; manejo agroecológico; adubação verde; indicadores; qualidade do solo.

ABSTRACT

Onion (*Allium cepa* L.) production in Santa Catarina, a national benchmark with 551,225 tons in the 2022/23 season, is concentrated in the Alto Vale do Itajaí region, characterized by steep terrain and agriculture on deforested hills. This activity faces challenges related to erosion and soil fertility degradation due to the conventional tillage system, which involves constant soil turning, monoculture, use of pesticides, and highly soluble mineral fertilizers, neglecting basic practices such as crop rotation and permanent soil cover. The agroecological No-Tillage Vegetable Planting System (SPDH) contributes to recovering and sustaining soil fertility, structure, and biological activity, maintaining and increasing onion productivity in the long term without relying on expensive and potentially polluting inputs. In SPDH, crop rotation with cover crops is performed. The dry matter of cover crops accumulates on the surface, providing nutrient cycling, soil structuring, thermal variability reduction, and decreased impacts of rain, erosion, and nutrient leaching. Thus, soil biological activity is stimulated through biomass production, providing carbon, nutrients, and exudates that feed soil organisms. These produce extracellular enzymes, essential for accelerating chemical reactions in the soil, with enzymatic activity considered an indicator of soil quality and health, which can be assessed through Fluorescein Diacetate Hydrolysis (FDA). The objective of this study was to evaluate the effect of different cover crops, whether sole or intercropped, in long-term agroecological SPDH on soil chemical attributes, total enzymatic activity (FDA), nutritional status, and onion yield. The experiment was conducted at the Epagri Experimental Station in Ituporanga, SC, with eight treatments in a randomized complete block design and four replications, representing different crop succession compositions. Soil samples were collected for chemical, fertility, and plant tissue analyses for macronutrient analysis in cover crops and onions, and soil enzymatic activity. Surface dry matter and the macronutrient content accumulated by cover crops were also evaluated. Analyses were conducted during the 2022 and 2023 seasons, with data subjected to the Scott-Knott test ($p < 0.05$) and principal component analysis (PCA). The results demonstrated that all treatments were efficient in maintaining soil fertility after 14 years of agroecological management. Treatments with cover crop consortia, especially black oats and forage radish, and those with summer legumes, showed more consistently superior performance in soil enzymatic activity. Overall, the different compositions of crop succession with winter and summer cover crops for onion cultivation in SPDH showed no differences in soil quality indicators and onion yield. Soil fertility is being maintained in the long term, promoting efficient cycling of essential nutrients, improving nutritional status and onion yield. This study demonstrated the effectiveness of agroecological SPDH in maintaining soil quality and onion productivity, offering a sustainable alternative to conventional management.

Keywords: SPDH; agroecological management; green manuring; indicators; soil quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bioporos, fauna edáfica, coloração e estrutura em solos de diferentes cultivos manejados em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças.	24
Figura 2 - Médias de temperatura do ar e precipitação pluviométrica na Estação Experimental da Epagri em Ituporanga, SC, durante o período do estudo.	43
Figura 3 - Desenho experimental a campo na Epagri de Ituporanga, SC, tratamentos estudados, adubações, sistema de cultivo da cebola e amostragem do solo e plantas.	44
Figura 4 - Diagrama de ordenação baseado na análise de componentes principais (PCA) de variáveis selecionadas dos indicadores de qualidade do solo e plantas no cultivo agroecológico de cebola em SPDH com sucessão de culturas com plantas de cobertura de inverno e verão nas safras de 2022 (a) e 2023 (b).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da matéria seca das plantas de cobertura de inverno em sucessão de cultivos para a produção de cebola em SPDH com manejo agroecológico.	47
Tabela 2 - Propriedades Químicas e de Fertilidade do Solo nas Camadas de 0-10 cm e 10-20 cm em Diferentes Tratamentos de Sistema de Plantio Direto de Hortaliças Agroecológico em Dezembro de 2021 e 2022.	49
Tabela 3 - Matéria Seca Superficial Acumulada (MSSA) em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças sob Diferentes Sucessões de Culturas Para o Cultivo Agroecológico de Cebola...	52
Tabela 4 - Teores de N, P, K, Ca e Mg acumulados na parte aérea das plantas de cobertura de inverno e espontâneas em sucessão ao cultivo de cebola em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças com manejo agroecológico.	53
Tabela 5 - Teores de N, P, K, Ca e Mg nas folhas de cebola coletadas no início do estágio de bulbificação em sucessão de plantas de cobertura de inverno e espontâneas em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico de longo prazo nas safras de 2022 e 2023.....	54
Tabela 6 - Teores de N, P, K, Ca e Mg de nutrientes nos bulbos de cebola cultivadas em sucessão de plantas de cobertura de inverno e espontâneas em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico de longo prazo nas safras de 2022 e 2023.....	56
Tabela 7 - Atividade enzimática total (Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína) do solo manejado em SPDH com diferentes composições de sucessão de culturas com plantas de cobertura de inverno e verão para a produção agroecológica de cebolas.....	58
Tabela 8 - Produtividade da Cebola em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças Agroecológico com Diferentes Composições de Sucessão de Cultivos com Plantas de Cobertura de Inverno e Verão nas Safra de 2022 e 2023.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AO	Ácidos Orgânicos
ANOVA	Análise de Variância
C/N	Carbono/Nitrogênio
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COT	Carbono Orgânico Total
CQFS-RS/SC	Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CV	Coefficiente de Variação
cv.	Cultivar
DAF	Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína
DAT	Dias Após o Transplântio
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
EC	Comissão de Enzimas
Epagri	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
FMA	Fungos Micorrízicos Arbusculares
MO	Matéria Orgânica do Solo
MS	Matéria Seca
NEPEA-SC	Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Agroecologia da UFSC
NT	Nitrogênio Total
RNA	Ácido Ribonucleico
SC	Santa Catarina
SPC	Sistema de Preparo Convencional do Solo
SPD	Sistema de Plantio Direto
SPDH	Sistema de Plantio Direto de Hortaliças
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

APRESENTAÇÃO

Esta pesquisa é uma dentre as diversas realizadas e em desenvolvimento pelo Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Agroecologia (NEPEA-UFSC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O NEPEA gera conhecimento científico, contribui para a distribuição de saberes e estabelece conexões entre pesquisadores, acadêmicos, agricultores e outros envolvidos em seus diversos agroecossistemas. A participação ativa na consolidação de uma cultura agrônômica de transição agroecológica segue incentivando outras perspectivas à vista do solo, água, plantas e suas interações com os mais diversos seres. O grupo está em constante processo de transformação, assim como todo organismo, e traduz a experiência de pessoas dos mais variados contextos. O esforço constante por uma coletividade acadêmica-científica é uma característica da organização dos trabalhos elaborados.

Para a validação científica desta pesquisa, o estudo empírico foi conduzido pela parceria entre a UFSC e a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). O experimento agroecológico, localizado na Estação Experimental de Ituporanga da Epagri, se destaca por seu longo prazo de condução. A região onde se encontra, o Alto Vale do Itajaí, é caracterizada pelo bioma de Mata Atlântica, relevo montanhoso e ondulado, rios abundantes como o Itajaí-Açu, clima subtropical úmido com alta umidade relativa do ar, e uma rica diversidade ecológica, incluindo florestas densas e uma grande variedade de fauna e flora.

Entre a pluralidade de povos que habitam a região do Alto Vale do Itajaí, há neste ecossistema uma cultura agrícola voltada à produção de hortaliças, difundida principalmente por imigrantes europeus e suas subseqüentes gerações. A cebola tem relevância para a população rural e o desenvolvimento econômico da região. No entanto, as formas de cultivo desta cultura e de outras hortaliças vem sendo refletidas numa busca pela diminuição do impacto ecológico, recuperação de solos degradados e aumento da biodiversidade dentro das propriedades agrícolas.

Desde o ano de 2009, diferentes pesquisadores participaram da validação do manejo agroecológico e contribuíram para o desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto de Hortaliças voltados para a produção da cebola. Até o momento em que esta dissertação foi redigida, foram desenvolvidas 12 dissertações de mestrado e três teses de doutorado e atualmente, estão em desenvolvimento duas teses, em ordem cronológica:

Trabalhos concluídos:

- 1) VILANOVA, C. C. Sistema de plantio direto de cebola: contribuições das plantas de cobertura no manejo ecológico de plantas espontâneas. 2011. 78 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- 2) VARGAS, M. M. M. Atributos químicos e biológicos do solo e rendimento da cebola em sistema de plantio direto após cultivo com diferentes plantas de cobertura de inverno. 2012. 49 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- 3) SOUZA, M. Produção de cebola e dinâmica de emergência de plantas espontâneas sob plantas de cobertura em sistema plantio direto. 2012. 109 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- 4) CAMARGO, A. P. Aplicação de compostos polifenólicos de *Canavalia ensiformis* (L.) e *Mucuna aterrima* (Piper & Tracy) na germinação e na emergência de plantas espontâneas. 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- 5) MARTINS, R. P. Decomposição e Mineralização de Nutrientes de Resíduos de Plantas de Cobertura em Solo Cultivado com Cebola (*Allium cepa* L.). 2013. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- 6) OLIVEIRA, R. A. Decomposição de plantas de cobertura e efeito no rendimento da cebola e na biodisponibilidade de fósforo em sistema de plantio direto. 2015. 101 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- 7) SANTOS, L. H. Frações orgânicas e atributos químicos em agregados do solo sob sistemas de plantio direto e convencional de cebola. 2016. 87 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- 8) KOUCHER, L. P. Contribuição do nitrogênio de resíduos de plantas de cobertura para a cebola cultivada em sistema de plantio direto agroecológico. 2016. 73 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- 9) MULLER JÚNIOR, V. Sistema de plantio direto agroecológico de cebola e emissão de gases de efeito estufa. 2017. 83 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

10) SOUZA, M. Desempenho agrônômico e estudo fitoquímico de plantas de cobertura em sistema de plantio direto agroecológico de cebola. 2017. 210 p. Tese (Doutorado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

11) BARBOSA, T. M. Atributos químicos e frações da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo sob cultivo de cebola (*Allium cepa* L.). 2018. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistema) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

12) KUNESKI, A. C. Teores e estoques de carbono e nitrogênio em solo sob sistema de plantio direto e preparo convencional de cebola de longa duração. 2021. 70 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

13) BORTOLINI, J. G. Plantas de cobertura: influência nos atributos físicos, químicos e biológicos em solo sob sistema agroecológico de cultivo de cebola (*Allium cepa* L.). 2022. 135 p. Tese (Doutorado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

14) VENTURA, B. S. Efeitos da micotrofia de plantas de cobertura na ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares e na disponibilidade de fósforo para cebola em sistema de plantio direto de hortaliças (SPDH). 2022. 72 p. Tese (Doutorado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

15) GIOVANETTI, L. K. Diversidade de plantas espontâneas e de fungos micorrízicos arbusculares em sistema de plantio direto com cebola e culturas de cobertura micotróficas e não micotróficas. 2022. 132 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais, Florianópolis, 2022.

Em andamento:

1) GIOVANETTI, L. K. Microbioma rizosférico e aplicação de inoculante micorrízico em cebola cultivada em sistema de plantio direto de hortaliças. 2022 - Atual. Tese (Doutorado em Recursos Genéticos Vegetais) - Universidade Federal de Santa Catarina.

2) ANDRADE, A. P. C. Influência de culturas de cobertura de inverno sobre o controle de plantas espontâneas, produtividade e composição nutricional dos bulbos de cebola sob sistema de plantio direto. 2023 - Atual. Tese (Doutorado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina.

O presente estudo surge como uma continuação natural e necessária de uma série de investigações iniciadas em 2009, focadas no desenvolvimento e validação do Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH) para a produção de cebola. Apesar dos avanços significativos alcançados, identificou-se uma lacuna importante no entendimento da relação entre a atividade

enzimática do solo e o desempenho do SPDH agroecológico na produção de cebola a longo prazo. As enzimas do solo desempenham um papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos e na decomposição da matéria orgânica, sendo indicadores sensíveis da qualidade do solo e da eficácia das práticas de manejo. Compreender essa relação é relevante para otimizar o sistema e promover uma produção mais sustentável.

Neste contexto, esta pesquisa se propõe a investigar o efeito de diferentes plantas de cobertura na atividade enzimática total do solo e sua relação com a fertilidade do solo, estado nutricional e rendimento da cebola em SPDH. Este estudo é particularmente relevante para a região do Alto Vale do Itajaí, em Santa Catarina, onde a produção de cebola tem grande importância econômica e social, mas enfrenta desafios relacionados à degradação do solo e à necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis.

Esta dissertação foi apoiada financeiramente por bolsa institucional (modalidade GM) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo 131674/2022-6, pelo projeto intitulado: “*Produção agroecológica, formas cooperadas de valorização de recursos territoriais e estratégias de comercialização*” e pelo projeto “*Qualidade do solo, emissão de gases de efeito estufa e rendimento de culturas no sistema de plantio direto de hortaliças*”, Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021, Processo: 405026/2021-8. Também contou com o apoio do Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas (PPGA) da Universidade Federal de Santa Catarina.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	O SOLO PARA SOCIEDADE E A AGRICULTURA	20
2.2	O SISTEMA DE PLANTIO DIRETO DE HORTALIÇAS	22
2.2.1	O cultivo de plantas de cobertura de inverno e cebola em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças.....	25
2.3	ATIVIDADE ENZIMÁTICA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO....	30
2.3.1	Papel das enzimas no solo e suas funções bioquímicas.....	32
2.3.2	Influência das plantas de cobertura na atividade enzimática e qualidade do solo.....	35
2.4	EFEITO DA ROTAÇÃO COM PLANTAS DE COBERTURA NA QUALIDADE E RENDIMENTO DA CEBOLA	37
3	HIPÓTESES.....	40
4	OBJETIVOS	40
4.1	OBJETIVO GERAL.....	40
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
5	METODOLOGIA.....	41
5.1	LOCAL DO EXPERIMENTO E HISTÓRICO DA ÁREA.....	41
5.1.1	Condições Climáticas.....	42
5.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL ATUAL DO ESTUDO	43
5.3	COLETA, PREPARO E ARMAZENAMENTO DE SOLO E TECIDO VEGETAL ..	44
5.4	ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO	45
5.5	INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO, DAS PLANTAS DE COBERTURA E CEBOLA.....	45
5.6	COLHEITA, PRODUTIVIDADE E CLASSIFICAÇÃO DOS BULBOS.....	46
5.7	MATÉRIA SECA ACUMULADA DAS PLANTAS DE COBERTURA.....	46
5.8	ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA DAS PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E NUTRIENTES ACUMULADOS NA PARTE AÉREA	47
5.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
6.1	INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO	48
6.2	MATÉRIA SECA SUPERFICIAL ACUMULADA	51
6.3	TEORES DE N, P, K, CA E MG ACUMULADOS NAS PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO.....	53
6.4	TEORES DE N, P, K, CA E MG NAS FOLHAS E BULBO DA CEBOLA	54
6.5	ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO	57
7	CONCLUSÃO.....	62
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63

1 INTRODUÇÃO

O estado de Santa Catarina, principal produtor de cebola no Brasil com 551.225 toneladas na safra de 2022/23, enfrenta desafios relacionados à erosão e à degradação da fertilidade do solo devido ao uso predominante do sistema de preparo convencional do solo (SPC) (ALTIERI et al., 2011; EPAGRI/CEPA, 2023a). Este sistema, que inclui práticas como aração, gradagem e destorroamento, frequentemente adota o monocultivo, o uso de agrotóxicos e adubos minerais solúveis, sem práticas de manejo como cobertura do solo e rotação de culturas (LOSS et al., 2015; SOUZA et al., 2021; VALARINI et al., 2011). Esse sistema tem mostrado efeitos deletérios a longo prazo em indicadores de qualidade, saúde e fertilidade do solo (KOPITKE et al., 2019; LAL, 2015), como a redução da eficiência no uso de nitrogênio (BHARDWAJ et al., 2011), diminuição do carbono da biomassa microbiana, da atividade enzimática (HEIDARI; MOHAMMADI; SOHRABI, 2016) e da proporção de macroagregados (ALINEJADIAN-BIDABADI; MALEKI; ROSHANIYAN, 2021), impactando negativamente a produtividade das culturas (CHAHAL et al., 2021; DERPSCH et al., 1991; PRIMAVESI, 2002b).

A adoção do Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH) em manejo agroecológico, com o cultivo de plantas de cobertura e o revolvimento restrito às linhas de plantio surge como uma opção viável para mitigar esses problemas e elevar a sustentabilidade dos agroecossistemas (COMIN et al., 2024; FAYAD et al., 2018, 2019; FAYAD; COMIN; BERTOL, 2013, 2015). A rotação ou sucessão de culturas com plantas de cobertura, como aveia-preta (*Avena strigosa* L.), nabo-forrageiro (*Raphanus sativus* L.), mucuna-preta (*Mucuna aterima* Piper & Tracy) e milheto (*Pennisetum glaucum* L.) contribui para a melhoria da qualidade do solo (COMIN et al., 2018b). Com produções que variam de 3 a 15 toneladas por hectare (CALEGARI, 2016; CARVALHO et al., 2022; SÁ et al., 2015), as plantas de cobertura melhoram a estrutura do solo (GIUMBELLI et al., 2020), contribuem para o aumento da matéria orgânica e promovem a ciclagem de nutrientes (MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016; TIECHER et al., 2016), fatores essenciais para a produtividade da cebola (LOSS et al., 2020; SOUZA et al., 2021).

As plantas de cobertura em agroecossistemas promovem um ambiente biológico mais ativo e equilibrado (FREIDENREICH et al., 2022), agindo como catalisadoras dinâmicas que modulam diretamente a atividade enzimática do solo (CHAVARRÍA et al., 2016; TYLER, 2020). Essa atividade é um processo cumulativo, resultante da atividade microbiana a longo prazo, essencial para a degradação, conversão e mineralização da matéria orgânica do solo,

assegurando a continuidade do fluxo energético e a funcionalidade dos ciclos biogeoquímicos de um ecossistema (BURNS et al., 2013; BURNS; DICK, 2002). A hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (DAF) pode ser utilizada como um indicador da atividade enzimática total do solo, representando a atividade de diferentes grupos de enzimas, como proteases, lipases e esterases (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996; SCHNÜRER; ROSSWALL, 1982).

Avaliar a eficácia de práticas conservacionistas a longo prazo em SPDH agroecológico é essencial para entender seus impactos na atividade enzimática do solo e na produtividade da cebola. A hidrólise do DAF, utilizada como indicador neste estudo, é influenciada pelas práticas de manejo adotadas e fornece uma medida sensível da qualidade do solo (ADAM; DUNCAN, 2001; MENDES et al., 1999).

Este trabalho contribui para a compreensão dos impactos das plantas de cobertura na fertilidade, atividade enzimática do solo, qualidade e rendimento da cebola. A avaliação de um agroecossistema manejado há 14 anos em SPDH fornece informações importantes sobre a sustentabilidade e a resiliência de sistemas agrícolas conservacionistas. Em agroecossistemas manejados com práticas conservacionistas baseadas em princípios de base ecológica se espera maior resiliência do solo e outros aspectos produtivos, como diversidade de culturas e ciclagem de nutrientes (ALTIERI et al., 2018; GLIESSMAN, 2014). A avaliação da qualidade do solo por indicadores microbiológicos, como a atividade enzimática se justifica por confirmar a eficiência do SPDH (ALKORTA et al., 2003; SOBUCKI et al., 2021).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A importância do solo tem sido reconhecida desde tempos antigos, com diversas religiões desenvolvendo costumes que evoluíram para um vínculo espiritual com a Terra, vista como uma fonte de vida (YAALON, 2000). Na Roma Antiga, por exemplo, os agricultores consideravam o solo uma entidade viva, cientes de que a prosperidade humana dependia do cuidado adequado com a terra. Em outro contexto, Charles Darwin descreveu o solo como um sistema dinâmico, capaz de responder às mudanças ambientais (POZNIAK; HAVRYSH, 2021). Séculos antes, Leonardo da Vinci considerava que “[...] a Terra possui um espírito de crescimento; *que sua carne é o solo*, seus ossos são a disposição e a conexão das rochas [...]” (RICHTER, 1970). Estudos recentes destacam que a forma como nos relacionamos com os solos terá implicações profundas para o futuro da humanidade, especialmente em face das mudanças climáticas e da crescente demanda por alimentos (AMUNDSON et al., 2015).

A percepção agrícola predominante na cultura brasileira muitas vezes considera o solo apenas como suporte para atividades humanas, negligenciando sua importância como componente vital da biosfera (SAHA et al., 2017). Em contraste, existem diferentes concepções sobre a terra como uma entidade viva. A perspectiva Maori, por exemplo, valoriza as interrelações entre os seres vivos, dando prioridade à terra e às plantas, que são consideradas anciãs em relação aos humanos (MCGOWAN, 2021). Essa cultura baseia seu manejo territorial na sustentação da vida e na promoção de conexões entre as formas de vida existentes. Esse enfoque vai além das espécies consideradas úteis pelos humanos, abrangendo outras que coexistem (HANDAYANI; PRAWITO, 2010).

No contexto brasileiro, em que houve um processo histórico de etnocídio das sociedades nativas, observa-se atualmente um movimento crescente e necessário de consideração e valorização do conhecimento tradicional. Este movimento reconhece a sabedoria dessas sociedades em relação à conservação da biodiversidade, proteção dos corpos d'água, manejo agroecológico e uso sustentável dos recursos naturais (BATISTA; MILIOLI; CITADINI-ZANETTE, 2020). Estudos recentes têm demonstrado que práticas tradicionais de manejo do solo, como a agricultura de coivara e o uso de biochar, podem melhorar significativamente a fertilidade do solo e a resiliência dos ecossistemas agrícolas (CARDOSO JÚNIOR et al., 2022; LOPES; NODA; FERMIN, 2021).

Neste contexto, este referencial teórico busca trazer, em uma linguagem científica, um conhecimento filosófico ancestral: a visão do solo como parte integrante de um ser vivo. Para tanto, o referencial visa compreender como a comunidade científica entende o ecossistema do solo e sua importância na agricultura. São exploradas diferentes práticas agrícolas, a qualidade do solo a partir de indicadores biológicos e como estes influenciam a saúde das plantas, com foco na cebola (*Allium cepa* L.). Ademais, são discutidas as interações entre a microbiota do solo e as plantas, destacando como essas relações podem ser experimentadas para promover formas sustentáveis de agricultura.

2.1 O SOLO PARA SOCIEDADE E A AGRICULTURA

O manejo territorial para a produção agrícola é fundamental para o desenvolvimento da humanidade, porém, nos leva à um dilema. Por um lado, muitas práticas agrícolas são essenciais, fornecendo alimentos, fibras, água potável e serviços ecossistêmicos vitais para a manutenção da vida. Por outro lado, algumas formas de manejo estão degradando os ecossistemas dos quais a humanidade faz parte e dos quais depende. As práticas da agricultura

“moderna” – ou convencional – estão trocando um aumento da produção de alimentos a curto prazo por perdas ambientais a longo prazo (FOLEY et al., 2005). A humanidade está próxima de atingir seis dos nove limites planetários, dois dos quais estão diretamente relacionados às práticas agrícolas atuais e ao manejo do solo: o limite das mudanças no uso da terra e o limite do ciclo do fósforo (RICHARDSON et al., 2023; ROCKSTRÖM et al., 2009).

A degradação do solo está direta e indiretamente relacionada às mudanças climáticas e a insegurança alimentar humana (LAL, 2004). Entre os efeitos diretos estão o declínio da produção de culturas agrícolas devido a estresses hídricos, baixa fertilidade do solo, deficiência de macro e micronutrientes e a susceptibilidade ao ataque de insetos e doenças. Além disso, ocorre uma redução de micronutrientes e proteínas nos alimentos, resultando em uma diminuição na quantidade e qualidade de proteínas e na absorção de micronutrientes. Entre os efeitos indiretos, podem ser citados a poluição do solo, água e ar, afetando a saúde humana e resultando na incidência de patógenos, além da emissão de gases de efeito estufa. Esses efeitos, provenientes do baixo investimento na restauração e conservação dos solos, aumentam a susceptibilidade à poluição, fome e desnutrição das populações afetadas (LAL, 2009).

O solo é um ambiente que favorece o desenvolvimento dos seres vegetais, a produção de biomassa, incluindo agricultura e silvicultura, armazenamento, filtragem e transformação de nutrientes, substâncias e água, detoxificação de poluentes, regulação do movimento da água, reserva de biodiversidade (habitats, espécies e genes), matérias-primas, reserva de carbono, ambiente físico e cultural para humanos (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2006; GUO, 2021; USDA-NRCS, 2022). O arranjo do solo permite que ele realize processos ecológicos, como ciclagem de nutrientes, decomposição de resíduos, regulação da população biológica do solo, trocas gasosas e movimentação de água e solutos. Para que o solo cumpra tais funções é necessária a expressão integrada de seus componentes biológicos, físicos e químicos.

Na ciência do solo, diversos conceitos são usados para avaliar suas capacidades. De forma resumida, a qualidade do solo refere-se à sua aptidão para suportar a produção agrícola e ecossistemas saudáveis. A saúde do solo abrange sustentabilidade ambiental e processos biológicos. A fertilidade do solo foca na disponibilidade de nutrientes essenciais para plantas. A segurança do solo, um conceito emergente, combina qualidade e saúde, destacando a importância dos serviços ecossistêmicos (LEHMANN et al., 2020).

Para avaliar a qualidade do solo são usados indicadores, que são propriedades mensuráveis, podendo ser quantitativas ou qualitativas, relacionadas a um processo, estado ou atividade, e que permitem caracterizar, avaliar e acompanhar alterações ocorridas em um dado

ambiente, natural ou manejado (COMIN et al., 2020; KARLEN et al., 1997). Indicadores físicos incluem densidade, umidade, porosidade e agregados; enquanto indicadores químicos incluem teores de nutrientes, matéria orgânica, pH e capacidade de troca catiônica. Já os indicadores biológicos do solo, ou bioindicadores, são organismos presentes no solo, de uma grande diversidade taxonômica e funcional, que interagem com propriedades e processos do solo, fornecendo informações sobre o estado desse ecossistema (DORAN; PARKIN, 1994).

A conversão de áreas naturais em terras agrícolas tem causado impactos em processos globais, envolvendo a degradação dos solos, cuja qualidade é diretamente influenciada pelas práticas agrícolas (LAL, 2023). Práticas promissoras como adição de matéria orgânica, plantio direto, rotação de culturas, e – no nível de sistema – agriculturas de base ecológica, quando comparadas às práticas convencionais, mostram que indicadores biológicos, como o número de minhocas, são significativamente afetados (BAI et al., 2018). O mesmo ocorre para a matéria orgânica do solo (MO), que é diretamente afetada pelo preparo convencional, reduzindo-a em comparação a sistemas de plantio direto (NASCENTE; LI; CRUSCIOL, 2013). A agricultura regenerativa e práticas agroecológicas são outros exemplos de estratégias promissoras para aumentar a produtividade enquanto minimizam os impactos ambientais negativos. A implementação de sistemas agrícolas complexos, como agricultura conservacionista, agroflorestal e sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, seguindo princípios ecológicos, pode restaurar a saúde do solo e aumentar a biodiversidade (LAL, 2022).

O modo convencional que são cultivadas plantas importantes para a cultura alimentícia e nutrição humana, como a cebola, traz consigo a degradação edáfica (LOSS et al., 2017; SANTOS et al., 2017). Neste contexto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre o cultivo desta e outras culturas em SPDH, gerando conhecimento científico e direções sobre o que fazer para melhorar indicadores químicos, físicos e biológicos do solo, além da qualidade e produtividade desses alimentos (FAYAD et al., 2018, 2019; FAYAD; COMIN; BERTOL, 2013, 2015).

2.2 O SISTEMA DE PLANTIO DIRETO DE HORTALIÇAS

Na região do Alto Vale do Itajaí, o SPDH, adotado desde a década de 1990, promove a transição agroecológica e o manejo conservacionista do solo, reduzindo a dependência do modelo convencional e proporcionando saúde ao solo e às plantas (MASSON; ARL; WUERGES, 2019). O SPDH é fundamentado em eixos político-pedagógicos e técnico-científicos, construídos em um processo dialético envolvendo agricultores, pesquisadores e

extensionistas rurais. O objetivo é reduzir a dependência das famílias agricultoras do modelo convencional de produção de hortaliças e proporcionar saúde ao solo e às plantas (MASSON; ARL; WUERGES, 2019).

O SPDH tem sido adotado por um número crescente de agricultores no estado de Santa Catarina, abrangendo cerca de 2,5 mil hectares, com impactos relevantes no aumento da produtividade e redução de custos na produção de hortaliças (EPAGRI, 2022). Esse sistema também tem se mostrado promissor na fruticultura (SALUME et al., 2020) e na cerealicultura (MARCHESI et al., 2022). Um compêndio de informações sobre a prática e a ciência compreendida na trajetória desta tecnologia agrícola-ecológica-social está disponível em livro de mesmo nome (FAYAD et al., 2019).

Os preceitos agronômicos do SPDH estão inter e correlacionados com aspectos político-pedagógicos que visam a organização dos agricultores e a valorização de sua qualidade de vida e a dos consumidores. O SPDH oferece ferramentas para a transição de uma agricultura industrial para agriculturas de base ecológica e inclusivas, preocupadas com a biodiversidade e a autonomia das famílias que buscam uma produção de alimentos de qualidade. Exemplos de possíveis formas de se fazer agricultura com o SPDH incluem a integração lavoura-pecuária e a implementação de sistemas agroflorestais multifuncionais (SIDDIQUE et al., 2019).

Os princípios técnicos do SPDH incluem o revolvimento do solo restrito às linhas de plantio, a adição anual de mais de 10 toneladas de matéria seca de fitomassa por hectare, e a rotação de culturas com adubos verdes e plantas de cobertura (FAYAD; COMIN; BERTOL, 2013). A nutrição vegetal é baseada nas taxas diárias de absorção de nutrientes, o que significa ajustar a oferta de nutrientes às necessidades diárias específicas das plantas, levando em consideração as condições ambientais, as reservas nutricionais do solo e os sinais apresentados pela própria planta (FAYAD et al., 2018; FAYAD; COMIN; BERTOL, 2015). Este método visa promover a saúde das plantas ao reduzir estresses nutricionais relacionados à disponibilidade de água, temperatura, luminosidade e salinidade (FAYAD et al., 2019). A transição para sistemas de produção com mínimo revolvimento do solo melhora indicadores biológicos (MIHELIČ et al., 2024; STRATTON et al., 2022), químicos (KRAUSS et al., 2020) e físicos do solo (CHAKRABORTY et al., 2022b).

A adoção do SPDH no contexto catarinense tem mostrado resultados positivos para indicadores biológicos, físicos e químicos de qualidade do solo (Figura 1). Os bioporos e a estrutura do solo observados em cultivo comercial de chuchu com cobertura permanente (Figura 1 a e 1 b), corroboram com resultados de melhoria da estruturação do solo pelo manejo em SPDH (LOSS et al., 2017). A camada de 0-20 cm de solo, de coloração escura e rica em matéria

orgânica (Figura 1 c) foi formada pela presença contínua de plantas de cobertura e manejo de longo prazo em SPDH, contrastando com a camada de 20-40 cm, que apresenta coloração marrom clara, típica de solo arenoso com baixo teor de matéria orgânica (c e d).

Figura 1 - Bioporos, fauna edáfica, coloração e estrutura em solos de diferentes cultivos manejados em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças.



Além dos benefícios observados na estrutura e composição do solo, pesquisadores têm demonstrado o efeito do SPDH na ocorrência e controle de plantas espontâneas, nos atributos químicos do solo e no rendimento da cebola (COMIN et al., 2018a; KOUCHER et al., 2017; LOSS et al., 2020; MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016, 2017; SOUZA et al., 2013, 2018, 2019, 2021; VILANOVA et al., 2014). Há resultados que mostram o efeito do SPDH sobre teores de carbono e/ou nitrogênio total, substâncias húmicas, matéria orgânica e a estabilidade de agregados do solo (BORTOLINI et al., 2021; GIUMBELLI et al., 2020, 2021; LOSS et al., 2017, 2020; SANTOS et al., 2017, 2018b). Pesquisas iniciais apontam para sua influência na emissão de gases de efeito estufa (MÜLLER JÚNIOR et al., 2019) e na atividade microbiológica (SOUZA et al., 2020; VENTURA et al., 2021).

2.2.1 O cultivo de plantas de cobertura de inverno e cebola em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças

A promoção da saúde pública e ambiental está intrinsecamente ligada a uma alimentação saudável, destacando-se o consumo de hortaliças e frutas frescas cultivadas sem agrotóxicos, fundamentais na prevenção de doenças crônicas (BRASIL, 2014; TITTARELLI et al., 2022). No Brasil, a transição para sistemas agroalimentares sustentáveis é uma realidade viável, com a agroecologia desempenhando papel essencial na preservação do solo, promoção da biodiversidade e redução da dependência de insumos químicos, contribuindo para a segurança alimentar (ALTIERI et al., 2018; DAROLT; ROVER, 2021; NASCIMENTO et al., 2019). A globalização, no entanto, tem exacerbado a dependência de alimentos ultraprocessados, com impactos negativos na saúde (WALLACE et al., 2020), reforçando a urgência de políticas públicas que incentivem a produção e o consumo de alimentos frescos e sustentáveis (FRISON; CLÉMENT, 2020). A produção agroecológica de cebola (*Allium cepa* L.) no Brasil exemplifica essa abordagem.

Os agroecossistemas fragilizados¹ pelo preparo do solo com revolvimento, baixa biodiversidade de espécies e dependência de insumos sintéticos e minerais podem ser redesenhados de forma colaborativa. Agricultores, agrônomos, técnicos e outros envolvidos devem considerar a saúde do solo como um aspecto essencial para o funcionamento sustentável dos sistemas agrícolas a longo prazo (ALTIERI, 2018). O SPDH tem se mostrado como uma das estratégias agroecológicas para a co-criação de sistemas agrícolas hortícolas sustentáveis, consolidando práticas agronômicas que minimizem a perturbação do solo enquanto maximiza a cobertura do solo, a presença de raízes vivas e a biodiversidade (COMIN et al., 2024).

O SPDH se caracteriza por usar práticas de manejo que promovem o conforto das plantas por meio da diminuição de estresses abióticos e da nutrição das plantas com base nas taxas diárias de absorção de nutrientes, adequando-as às condições ambientais, reservas nutricionais do solo e sinais apresentados pelas plantas. Para isso, há o aporte superior a 10 toneladas de fitomassa por hectare por ano, a adoção da prática da rotação de culturas com o

¹ Refiro-me a sistemas agrícolas que, devido à prática intensiva de monoculturas, uso excessivo de agrotóxicos e fertilizantes químicos, e manejo inadequado do solo, apresentam uma estrutura ecológica e funcional comprometida. São caracterizados por uma menor resiliência a eventos climáticos extremos, como chuvas torrenciais, que podem causar erosão severa e degradação do solo. A agricultura convencional, ao priorizar a produtividade a curto prazo, frequentemente negligência a sustentabilidade a longo prazo, resultando em solos empobrecidos e ecossistemas agrícolas vulneráveis.

uso de plantas de cobertura (cultivadas e/ou espontâneas), o revolvimento do solo restrito às linhas de plantio e o manejo das plantas de cobertura com o rolo-faca e a roçadeira (MAFRA et al., 2019; MASSON; ARL; WUERGES, 2019). Por isso é considerado uma estratégia para a transição da agricultura convencional para a agroecológica (FAYAD et al., 2019).

Para a olericultura catarinense, o SPDH vem sendo uma das portas de entrada para relações mais respeitadas do ser humano com o solo, água e plantas. Em um contexto de incertezas sociais, ecológicas e econômicas perante o aquecimento global (RISING et al., 2022), agroecossistemas que persistem numa agricultura monocultural, com preparo do solo e ausência de cobertura, estão mais suscetíveis a eventos climáticos extremos (GANDÍA et al., 2021; SEMERARO et al., 2023). Países como o Brasil, com uma dependência socioeconômica significativa apoiada na agricultura, devem se preocupar com essa vulnerabilidade diante das mudanças climáticas.

Para aumentar a capacidade de adaptação e resiliência desses sistemas agrícolas, o redesenho de agroecossistemas baseada na agroecologia é urgente (ALTIERI, 2018; ALTIERI et al., 2015; NICHOLLS; HENAO; ALTIERI, 2015). Experiências empíricas de agricultores e pesquisadores demonstram esse potencial para culturas como tomate, melancia, abóbora híbrida, chuchu, couve-flor, repolho, brócolis, cebola, salsa, alface e maracujá (COMIN et al., 2024; FAYAD et al., 2019).

Em 2019, a cebola foi a segunda hortaliça mais produzida globalmente, totalizando aproximadamente 101 milhões de toneladas (FAO, 2021). No Brasil, o estado de Santa Catarina é o principal produtor, com uma produção de 551.225 toneladas na safra de 2022/23, das quais 46,6% são provenientes da microrregião de Ituporanga (EPAGRI/CEPA, 2023c). A região do Alto Vale do Itajaí, onde a cebolicultura catarinense está concentrada (IBGE, 2022), é caracterizada por declives acentuados em que a produção de monocultivos é realizada em morros desflorestados e com revolvimento do solo, estando suscetível a erosões e, conseqüentemente, a perdas econômicas (ALTIERI et al., 2011). Pesquisadores, extensionistas e agricultores demonstram o potencial da adoção ao SPDH para o cultivo de hortaliças nestas condições (COMIN et al., 2024; FAYAD et al., 2019), visando sítios com maiores níveis de biodiversidade e matrizes de paisagem complexas, que são mais resilientes a eventos climáticos extremos como chuvas torrenciais (ALTIERI et al., 2015).

A cebola, sendo uma planta herbácea com poucas folhas e baixo porte, apresenta um índice de área foliar reduzido. No contexto do SPDH agroecológico, é essencial utilizar plantas de cobertura, sejam elas solteiras ou consorciadas, com potencial alelopático. Essas plantas ajudam, por exemplo, a reduzir ou inibir o crescimento de plantas espontâneas (ALTIERI et al.,

2011; BITTENCOURT et al., 2013; COMIN et al., 2018a; KIELING et al., 2009; SOUZA et al., 2018). O SPDH aumenta a resiliência do agroecossistema ao promover a biodiversidade e as interações entre os organismos do solo, garantindo uma produção de alimentos de qualidade (ALTIERI et al., 2018).

Entre as espécies de plantas de cobertura de inverno utilizadas no SPDH, destacam-se as Poáceas, como a aveia-preta (*Avena strigosa* L.) e o centeio (*Secale cereale* L.), que produzem quantidades relevantes de matéria seca (MS) (acima de 5 Mg ha⁻¹) (OLIVEIRA et al., 2016). Com uma relação C/N superior a 19 (MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016), esses resíduos permanecem mais tempo na superfície do solo em comparação a espécies leguminosas (OLIVEIRA et al., 2016). O consórcio dessas Poáceas com o nabo-forrageiro (*Raphanus sativus* L.) resulta em resíduos com uma relação C/N entre 15 e 17 (MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016), proporcionando uma cobertura do solo mais duradoura e uma mineralização gradual de nutrientes. Isso proporciona um conforto térmico e facilita a absorção de nutrientes pelas plantas de cebola, aumentando a produtividade dos bulbos (OLIVEIRA et al., 2016; SOUZA et al., 2020).

A adoção da rotação de culturas com plantas de cobertura em sistemas agrícolas voltados ao cultivo de culturas perenes e anuais confere serviços ecossistêmicos que reduzem a degradação do solo e contribuem para elevar a sustentabilidade, mantendo ou melhorando a qualidade ambiental e habitat para outras seres vivos (BLANCO-CANQUI et al., 2015). Evidências demonstram o potencial desta prática agroecológica na adaptação de sistemas agrícolas às mudanças climáticas (KAYE; QUEMADA, 2017).

A diversidade de espécies de plantas de cobertura, com diferentes composições bioquímicas e quantidades de matéria seca (MS) produzida (MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016), atua como uma barreira física que cria áreas sombreadas, reduz a disponibilidade de umidade e a temperatura do solo, afetando a germinação de sementes de espécies espontâneas (QUEIROZ et al., 2010; FERNANDO; SHRESTHA, 2023). Essas plantas também liberam compostos alelopáticos que dificultam ou impedem a germinação e o desenvolvimento das plantas espontâneas (KUNZ et al., 2016; VARGAS; PASSOS; KARAM, 2018; FERNANDO; SHRESTHA, 2023). A utilização de diferentes espécies de plantas de cobertura também promove a absorção de nutrientes em diferentes camadas do solo, acumulando-os nas raízes ou na parte aérea. A decomposição da matéria seca dessas plantas contribui para a ciclagem de nutrientes, melhorando e mantendo indicadores químicos de qualidade do solo (OLIVEIRA et al., 2016, 2017). Um exemplo é o aumento dos teores de K

trocável, que contribui para o incremento do valor da soma de bases e uma maior saturação de K na CTC_{pH7,0} por bases (SOUZA et al., 2013).

A integração de plantas de cobertura em sistemas agrícolas também tem demonstrado efeitos positivos na estrutura física do solo. Estudos indicam que o uso de plantas de cobertura, como o centeio, aveia-preta, nabo-forrageiro, contribui para a formação de agregados estáveis no solo, o que melhora a porosidade e a infiltração de água. Aliás, a presença de raízes de plantas de cobertura pode aumentar a atividade biológica do solo, promovendo a formação de bioporos que facilitam a penetração das raízes das culturas subsequentes (BORTOLINI et al., 2021).

Em oito anos de cultivo de cebola em SPDH, incluindo aveia-preta, centeio e nabo forrageiro como plantas de cobertura na sucessão de culturas, tanto em sistemas solteiros quanto consorciados, foi demonstrado uma melhoria e manutenção dos indicadores químicos de qualidade do solo (SOUZA et al., 2021). Essa prática também favorece a recuperação, manutenção e aumento dos teores de carbono orgânico total (LOSS et al., 2015), o que, por sua vez, eleva os níveis de matéria orgânica do solo. A matéria orgânica é essencial, pois serve como fonte de energia para a população microbiana e de nitrogênio orgânico, que, ao ser mineralizado, pode aumentar os teores de nitrogênio mineral no solo (BRUNETTO et al., 2014). Ademais, o cultivo de plantas de cobertura contribui para o aumento da produção de bulbos de cebola (VILANOVA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016; SOUZA et al., 2013, 2021; BORTOLINI et al., 2021).

Entre os benefícios que o cultivo de plantas de cobertura na rotação de culturas proporciona, destaca-se sua influência positiva na dinâmica dos nutrientes essenciais para o desenvolvimento saudável da cultura comercial. Um desses é o fósforo (P), cuja importância na agricultura é evidente. Em solos altamente intemperizados, como os brasileiros, ricos em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, a capacidade de adsorção de P é alta, resultando em baixa disponibilidade do nutriente para as culturas. A necessidade crescente de fertilizantes fosfatados na agricultura pode levar ao acúmulo de P no solo ao longo do tempo. As raízes das plantas de cobertura diversificam o agroecossistema e estratificam o perfil de solo explorado pelas raízes, o que otimiza a ciclagem e aproveitamento do P mobilizado no solo (TIECHER et al., 2016).

A dinâmica entre os nutrientes absorvidos e liberados pelas plantas de cobertura e a absorção desses pela cebola ainda é pouco estudada. É evidenciado que o nitrogênio (N) derivado da decomposição de plantas de cobertura da safra anterior contribui pouco para o desenvolvimento da cebola no ciclo subsequente (KOUCHER et al., 2017). É demonstrado

também que existem dinâmicas de absorção distintas para diferentes cultivares de cebola, além do tipo do solo, clima e sistemas de cultivos (KURTZ; FAYAD; VIEIRA NETO, 2020). Uma outra prática utilizada no SPDH é a adubação orgânica², que pode substituir os fertilizantes minerais na produção de cebola. Por exemplo, o uso de composto de resíduos orgânicos, que em doses de 5 a 10 Mg ha⁻¹ resulta em absorção de nutrientes pelo bulbo da cebola similar às observadas com fertilizantes minerais (HIGASHIKAWA et al., 2023a; SOUZA et al., 2021).

No âmbito de saúde de planta, sabe-se que a cebola tem sua qualidade nutricional e rendimento influenciadas por condições climáticas e fatores técnicos, por exemplo, quando cultivadas após a incorporação de plantas de cobertura no solo, acumulam mais massa seca, N-total e potássio (K) (BŁAEWICZ-WONIAK et al., 2008). Além disso, o desempenho do SPDH - à medida em que o sistema se estabiliza ao longo do tempo - aumenta a produção total e o tamanho de bulbos de cebola, porém, sendo dependentes das condições climáticas, como temperatura e precipitação (SOUZA et al., 2021).

O manejo do solo influencia a dinâmica da MO, as propriedades físicas e químicas, a atividade e a composição da comunidade microbiológica. As plantas respondem ao incremento da qualidade do solo com o aumento da profundidade de enraizamento, tolerância a secas e resistência a doenças (REEVE et al., 2016). Assim como o SPDH, sistemas de produção orgânica também favorecem a formação de MO e a composição nutricional e de compostos bioativos de culturas agrícolas, como no caso do tomate (MITCHELL et al., 2007). As práticas preconizadas no SPDH influenciam os padrões de absorção de minerais e processos metabólicos da cebola. Por exemplo, em SPDH agroecológico, as plantas de cebola podem apresentar maiores concentrações de Ca, Mg e Zn em suas folhas (HIGASHIKAWA et al., 2023b).

A adoção de práticas agrícolas com caráter sustentável, como a substituição ou complementação da fertilização com adubos orgânicos, também pode manter a produtividade da cebola. A complementação de vermicomposto na adubação química de NPK proporciona características positivas ao sistema de produção agrícola, como teores mais elevados de N, P e K no tecido das cebolas e maior atividade das enzimas fosfatase ácida e desidrogenase quando comparado ao cultivo apenas com adubação mineral solúvel (ou química) (GUPTA; RAI; SWAMI, 2019).

² Aqui entende-se adubos orgânicos aqueles fertilizantes compostos por materiais de origem biológica, como resíduos animais e vegetais. Esses materiais podem passar por processos de decomposição e/ou compostagem, resultando em um produto rico em nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (NICOLOSO et al., 2016).

Estudos sugerem que a adoção do SPDH pode aumentar a produtividade das cebolas ao longo do tempo (SOUZA et al., 2021), ao passo que contribui para elevar a sustentabilidade e resiliência do agroecossistema pela manutenção da saúde do solo (COMIN et al., 2024). Para a produção de hortaliças no bioma da mata atlântica, principalmente em regiões montanhosas como o Alto Vale do Itajaí, o SPDH é indicado para uma agricultura mais responsável com o meio ambiente. Políticas públicas que incentivem a adoção do SPDH e a transição agroecológica poderiam ser implementadas em Santa Catarina para fomentar uma maior sustentabilidade e resiliência do meio rural.

2.3 ATIVIDADE ENZIMÁTICA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO

Os aspectos biológicos e microbiológicos têm ganhado destaque na ciência do solo, com a inclusão de indicadores biológicos em análises de rotina (MENDES et al., 2021; SEMENOV; SEMENOVA, 2018). Avalia-se a atividade de enzimas provenientes de microrganismos, raízes, resíduos de plantas e animais do solo (DAS; VARMA, 2011), uma vez que indicadores microbiológicos, como o quociente metabólico, respiração basal e atividade enzimática, podem ser correlacionados com características físico-químicas do solo (PEREIRA et al., 2013).

Embora o primeiro registro científico conhecido sobre enzimas no solo foi apresentado em 1899, ocorreu pouco progresso na área de enzimologia até 1950. A falta de metodologias apropriadas e o entendimento da real natureza das enzimas, fez com que o amadurecimento deste campo da bioquímica levasse algumas décadas. As questões iniciais dos pioneiros deste ramo da ciência do solo foram acerca da origem, estabilização, importância na nutrição de plantas, e papel das enzimas do solo na renovação da matéria orgânica do solo (DICK; TABATABAI, 1992).

O solo pode ser considerado como uma entidade biológica com reações bioquímicas complexas. As enzimas são proteínas que atuam como catalisadoras sem sofrer uma alteração permanente e são responsáveis por acelerar reações químicas (DICK, 1994). Os microrganismos excretam enzimas para a digestão extracelular, para obter nutrientes e outros compostos do meio exterior (PRIMAVESI, 2002a). Além dos microrganismos, as raízes das plantas, sua biomassa em decomposição, insetos e outros organismos do solo excretam enzimas extracelulares e que são encontradas em maior concentração no solo rizosférico (DICK, 1994). As enzimas comumente utilizadas como referência de indicadores de qualidade do solo são: β -

glicosidase (EC 3.2.1.21³), urease (EC 3.5.1.5), fosfatase ácida (EC 3.1.3.2), diacetato de fluoresceína (209-877-6), sulfatase (EC 3.1.6.2), amidase (EC 3.5.1.4), celobiohidrolase (EC 3.2.1.91) (PANDEY; AGRAWAL; BOHRA, 2014; SHERENE, 2017).

As enzimas estão envolvidas em ciclos biogeoquímicos fundamentais para a qualidade do solo, como a transformação de nutrientes, a decomposição de resíduos orgânicos, a formação da matéria orgânica e contribuem para a estruturação física do solo (MENDES et al., 2019; MOGHIMIAN et al., 2017). A verificação da atividade dessas substâncias proteicas é utilizada como um indicador de qualidade do solo porque elas são prontamente alteradas pelo manejo adotado no agroecossistema, tornando-as adequadas como indicadores precoces de distúrbios bióticos e abióticos (BANDICK; DICK, 1999; DICK, 1994). A adoção de práticas de produção de base ecológica, como o SPDH, aumenta a atividade de enzimas de interesse agrícola (LOPES et al., 2021; PANDEY; AGRAWAL; BOHRA, 2014).

O metabolismo das comunidades biológicas do solo (*i.e.*, metabolismo do solo⁴) é fundamental nos ciclos biogeoquímicos das teias alimentares detritívoras. Microrganismos regulam a produção e liberação de enzimas em resposta à disponibilidade de recursos ambientais, como substratos e produtos de reações enzimáticas. As enzimas edáficas são essenciais para a degradação, conversão e mineralização da matéria orgânica do solo, assegurando a continuidade do fluxo energético e a funcionalidade dos ciclos biogeoquímicos de um ecossistema (BURNS; DICK, 2002).

As atividades microbiológicas e bioquímicas do solo são indicadores para avaliar e determinar a qualidade e a saúde do solo, pois fazem parte da dinâmica da decomposição de resíduos e atuam na facilitação dos processos de transformação de nutrientes no solo (CHENG et al., 2013). Por exemplo, a decomposição da matéria orgânica do solo é diretamente influenciada pela atividade enzimática (ACOSTA-MARTÍNEZ; PÉREZ-GUZMÁN; JOHNSON, 2019). Para estabelecer a atividade enzimática do solo como um indicador válido para a avaliação da qualidade do solo foram realizadas pesquisas para identificar valores de referência que permitam a interpretação adequada dessa análise no contexto brasileiro (LOPES et al., 2013, 2018).

³ Número da enzima a partir da Comissão de Enzimas (EC), descrevendo a função enzimática e evoluindo em nível de detalhamento (o primeiro número distingue 1-oxireduases, 2-transferases, 3-hidrolases, 4-liases, 5-isomerases, e 6-ligases) (ZHENG et al., 2018).

⁴ Conjunto de todas as transformações biocatalisadas que ocorrem no solo, incluindo tanto os microrganismos quanto os organismos macroscópicos. Envolve reações bioquímicas de degradação (catabolismo) e síntese (anabolismo) que são essenciais para a manutenção das funções celulares e do ecossistema (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A análise da hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (DAF) pode ser considerada um indicador da atividade enzimática total do solo, visto que resulta da atividade de diferentes grupos de enzimas, como proteases, lipases e esterases (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996; SCHNÜRER; ROSSWALL, 1982). Diferentes composições de espécies de plantas de cobertura exercem influências distintas sobre as dinâmicas da atividade enzimática do solo. Em termos gerais, manejos com cultivo de plantas de cobertura têm sido associados ao aumento da atividade enzimática do solo (FENG et al., 2021; MBUTHIA et al., 2015; ZHANG et al., 2014), que também vem sendo associada com a produtividade de culturas (LUPWAYI et al., 2015).

2.3.1 Papel das enzimas no solo e suas funções bioquímicas

A presença de enzimas e a sua atividade no solo estão relacionadas com as propriedades físico-químicas, a estrutura da comunidade biológica, a cobertura vegetal, o manejo agrícola, a sucessão de cultivos, o uso da terra, o clima e a profundidade do perfil de solo (PAZ-FERREIRO; FU, 2016). As enzimas no solo são principalmente derivadas de microrganismos, resíduos vegetais, raízes de plantas e comunidades da fauna do solo. Elas são incorporadas e estabilizadas na matriz do solo por meio da acumulação ou formação de compostos com a MO, argila e complexo argila-húmus, e não são mais dependentes de células viáveis em proliferação (BANDYOPADHYAY; MAITI, 2021).

As enzimas possuem características distintivas, como especificidade e eficiência catalítica. As teorias que abordam as reações enzimáticas são fundamentadas no conceito de que a ação enzimática ocorre por meio da formação de um complexo com o substrato. O complexo enzima-substrato é instável e pode passar por uma ou várias etapas de rearranjo até a formação do produto e a regeneração da enzima original. A concentração das enzimas e do substrato são variáveis que exercem influência direta nas reações catalíticas (TABATABAI, 1994).

A atividade enzimática está no solo, principalmente, devido às comunidades biológicas presentes como algas, cianobactérias, líquens, musgos, bactérias e fungos (HUI et al., 2023). Estes organismos interagem com os ciclos de nutrientes essenciais para as plantas e para o funcionamento dos ecossistemas, e devido à sua atividade alteram os padrões de dominância de forma orgânicas ou inorgânicas de nitrogênio (N) (DELGADO-BAQUERIZO et al., 2010) e de outros nutrientes (CONCOSTRINA-ZUBIRI et al., 2013).

A atividade enzimática é um processo cumulativo resultante da atividade microbiana a longo prazo. As enzimas atuam como mediadores e catalisadores biológicos na decomposição

da matéria orgânica, liberação de nutrientes inorgânicos (C, N, P, S), fixação de nitrogênio, nitrificação, desnitrificação, desintoxicação de compostos estranhos e estabilização da estrutura do solo, e outros. Diferentes enzimas aceleram a decomposição da matéria orgânica (glicosidase, hidrolase), mineralizam nutrientes (amidase, urease, fosfatase, sulfatases) e desempenham papéis essenciais em ciclos biogeoquímicos, como o ciclo do carbono (β -glicosidase e β -galactosidase), nitrogênio (urease), fósforo (fosfatase) e enxofre (sulfatase) (BANDYOPADHYAY; MAITI, 2021).

As enzimas associadas com os ciclos de nutrientes são denominadas como hidrolases do solo. São exemplos a β -D-celobiosidase (EC 3.2.1.91); a β -1,4-glicosidase (EC 3.2.1.21); e a β -1,4-xilosidase (EC 3.2.1.37), relacionadas ao ciclo do C; a β -1,4-N-acetil-glucosaminidase (EC 3.2.1.30; EC 3.2.1.52) e leucina amino peptidase (EC 3.4.11.1) associadas ao ciclo do N; e a fosfatase ácida (EC 3.1.3.2) envolvida no ciclo de P (LI et al., 2019).

Diferentes fatores podem exercer influência sobre a atividade enzimática no solo. Eventos naturais, tais como variações sazonais, localização geográfica, propriedades físico-químicas e teor de matéria orgânica no solo geralmente afetam a atividade enzimática, tanto pela sua influência na produção de enzimas pelos microrganismos quanto pela sua persistência no ecossistema (FRÎNCU; DUMITRACHE; DUMITRIU, 2015). A atividade enzimática também é influenciada pelo manejo agrícola adotado no agroecossistema. Por exemplo, as atividades da β -glicosidase e da fosfatase ácida podem ser elevadas em sistemas de produção orgânica com plantas de cobertura, mas também em produções convencionais, quando se utiliza rotação de culturas e adubação orgânica (FALCÃO et al., 2013).

O crescimento saudável das plantas em um agroecossistema é fundamentalmente influenciado pelo manejo em andamento, especialmente ao que tange ao manejo e conservação do solo. A introdução de plantas de cobertura e a utilização de fertilizantes de fontes orgânicas promovem aumento do teor de nutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais do solo, a exemplo dos teores de N inorgânico. Este evento específico é associado à degradação de glicose e a transformação do N no solo, mediados pela atividade enzimática da β -N-acetilglicosaminidase (EC 3.2.1.52) (FREIDENREICH et al., 2022).

As plantas fornecem ao solo uma quantidade importante de C capturado da atmosfera. O ciclo do carbono é essencial para o funcionamento da vida no solo e acima dele também. As enzimas fazem parte deste processo, a exemplo dos grupos de enzimas das glicosidases e galactosidases, amplamente distribuídas na biosfera. Dentro destes grupos, a β -glicosidase é encontrada em diferentes tipos de solo e é proveniente tanto de fungos quanto de plantas. Os

produtos resultantes da hidrólise catalisada pela β -glicosidase são fontes energéticas de grande relevância para microrganismos do solo (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

Outro grande grupo de enzimas são as fosfatases, que atuam no ciclo do P, fornecendo formas assimiláveis às plantas por meio da liberação de íons fosfato (PO_4^{3-}) (TABATABAI, 1994). Dentro deste grupo estão as fosfomonoesterases, classificadas como ácidas (monoéster fosfórico fosfohidrolase ortofosfórica) ou alcalinas (monoéster ortofosfórico fosfohidrolase), dependendo da atividade ótima em pH ácido ou alcalino, respectivamente. A atividade das fosfatases é diretamente influenciada pelo pH do solo e aplicações repetidas de fertilizantes contendo PO_4^{3-} podem suprimir a atividade das fosfatases (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

A hidrólise do DAF (3',6'-diacetilfluoresceína) apresenta um potencial abrangente para representar a atividade enzimática do solo e os efeitos biológicos cumulativos, muitas vezes sendo referenciada como atividade enzimática total do solo. Isso ocorre devido à capacidade da DAF de ser hidrolisada por uma variedade de enzimas, incluindo proteases, lipases e esterases. Além disso, sua hidrólise é observada em diversos decompositores primários, tais como bactérias e fungos (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

A urease, também conhecida como ureia amidohidrolase, é a enzima responsável por catalisar a hidrólise da ureia, resultando em CO_2 e NH_4^+ (TABATABAI, 1994). Essa enzima está amplamente distribuída na natureza e tem sido identificada em microrganismos, plantas e animais. O método proposto por Tabatabai e Bremner (1972) se baseia na quantificação do NH_4^+ liberado durante o procedimento (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

Já as enzimas do grupo das sulfatases são responsáveis pela liberação de sulfato (SO_4^{2-}), a forma de enxofre (S) prontamente assimilável pelas plantas, a partir de diversos ésteres orgânicos de sulfato. A arilsulfatase (arilsulfatase sulfohidrolase) é a sulfatase do solo mais amplamente investigada, reconhecida por seu papel na hidrólise dos ésteres de sulfato, que compreende de 40% a 70% do enxofre (S) presente em muitos solos (TABATABAI, 1994). Estudos demonstram que a arilsulfatase exibe alta eficiência na avaliação dos efeitos das práticas de manejo do solo. Os ésteres de sulfato microbianos são exclusivamente encontrados em fungos, e a elevada atividade da sulfatase pode estar relacionada ao estímulo dessas enzimas pelo incremento nos níveis de ésteres de sulfato produzidos pelos fungos (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

A atividade enzimática do solo é um indicador importante da saúde e qualidade do solo, refletindo as interações complexas entre as propriedades físico-químicas do solo e as comunidades biológicas que nele habitam. Práticas agrícolas sustentáveis, como a rotação de

culturas, adubação orgânica e o não revolvimento do solo, são fundamentais para manter e melhorar a atividade enzimática. Tais práticas promovem a decomposição eficiente da matéria orgânica e a disponibilização de nutrientes, resultando em solos mais férteis e produtivos a longo prazo (KOBIERSKI et al., 2020).

2.3.2 Influência das plantas de cobertura na atividade enzimática e qualidade do solo

As plantas de cobertura são cultivadas na rotação de culturas anuais (*e.g.* cebola, tomate, brócolis, couve-flor, alface, soja, milho e outras) ou integradas nas entrelinhas de culturas perenes (*e.g.* chuchu, pereira, macieira, café, lúpulo, goiabeira, videira e outras). Essas são terminadas e acamadas⁵ na superfície do solo antes de produzirem sementes. O planejamento do cultivo dessas plantas deve considerar as condições edafoclimáticas, a natureza da cultura comercial, sua época de cultivo e os benefícios esperados das culturas de cobertura. Dada a importância das culturas de cobertura em sistemas agrícolas sustentáveis, seu cultivo diversificado é considerado um componente essencial de práticas ambientalmente responsáveis e conservacionistas, visando apoiar serviços ecossistêmicos (DAS; KANDPAL; DEVI, 2021). Essa prática contribui para o aumento do teor de matéria orgânica e da capacidade de troca catiônica do solo, promovendo maior disponibilidade de nutrientes e, consequentemente, elevando a produtividade das culturas subsequentes ao longo do tempo (LOSS et al., 2015; SOUZA et al., 2021; TORRES et al., 2015).

A influência das plantas de cobertura na atividade enzimática do solo é variável de acordo com a espécie, assim como combinações de diferentes espécies em policultivos. Um exemplo disso é o centeio, que sua presença na composição de mix de plantas de cobertura pode elevar a atividade das enzimas β -glicosidase e urease no solo quando comparado à rotação com ervilhaca solteira e sem a presença de cobertura. Este aumento está relacionado tanto com a quantidade de biomassa quanto a relação C/N que o centeio apresenta (NEVINS; LACEY; ARMSTRONG, 2020).

Outro exemplo é de um agroecossistema com rotação de trigo (*Triticum aestivum* L.) – sorgo (*Sorghum bicolor* L.) – plantas espontâneas/rotação com plantas de cobertura. Neste estudo foi demonstrado que a combinação de espécies influencia a atividade das enzimas β -glicosidase, β -glicosaminidase e fosfatase alcalina. O policultivo de ervilha (*Pisum sativum*) + aveia + canola (*Brassica napus*) + ervilhaca + nabo-forrageiro + cevada (*Hordeum vulgare* L.)

⁵ “Terminar” refere-se a cortar, abafar ou cortar as plantas de cobertura e “acamar” refere-se a deixá-las na superfície do solo como uma camada de cobertura, processo geralmente feito com o implemento rolo faca.

resultou na maior atividade enzimática das enzimas combinadas quando comparado ao monocultivo destas plantas de cobertura. Nesta perspectiva, sistemas de cultivo diversificados pela integração de plantas de cobertura apresentam o potencial para elevar a atividade enzimática de enzimas relacionadas à ciclagem de carbono orgânico do solo (COS) e N (THAPA et al., 2021).

O cultivo de diferentes plantas de cobertura afeta a atividade enzimática do solo quando introduzido na rotação de grãos como a soja (*Glycine max* L.) e o milho (*Zea mays* L.). As combinações de aveia + nabo-forrageiro + ervilhaca e aveia + nabo-forrageiro demonstram, respectivamente, maior atividade de DAF, ácido docosaheptaenóico (DHA) e fosfatase ácida, quando comparadas a sucessão soja/milho sem rotação com plantas de cobertura. Os efeitos positivos da rotação e diversificação de culturas nestes indicadores biológicos também refletem na produção da cultura comercial e contribuem para sistemas agrícolas mais sustentáveis (CHAVARRÍA et al., 2016).

Além de contribuir para a atividade enzimática do solo, o cultivo de centeio e ervilhaca no inverno, integradas na rotação anual soja-milho, fornece carbono (C) de forma sincronizada nos estágios de crescimento do milho em que há maior demanda de N. Assim como esse manejo, o não revolvimento do solo em área total também contribui para a disponibilidade de N inorgânico, sendo demonstrado que a dinâmica de temperatura do solo pode ditar esses fatores (NEVINS; LACEY; ARMSTRONG, 2020).

O redesenho de monocultivos convencionais para sistemas de cultivo integrados - com plantas de cobertura em rotação - contribui para elevar a qualidade biológica do solo. Em um estudo sob sistema de plantio convencional de arroz (*Oryza sativa* L.), com sucessão arroz-arroz, a adoção da rotação de plantas de cobertura de inverno - azevém (*Lolium multiflorum* L.); ou astrágalo chinês (*Astragalus sinicus* L.); ou colza (*Brassica napus* L.); ou plantas espontâneas - influenciou os indicadores de atividade enzimática e comunidade microbiana. A decomposição da biomassa das coberturas elevou a atividade da β -glicosidase (EC 3.2.1.21), fosfatase alcalina (EC 3.1.3.1) e arilsulfatase (EC 3.1.6.1), que estão envolvidas, respectivamente, nos ciclos do carbono, fósforo e enxofre (TANG et al., 2014).

Esta forma de reorganizar sistemas agrícolas, estimulando o aumento da biodiversidade no tempo e espaço, pode ser empregada também na produção de culturas perenes, como pomares de frutas. Em um experimento com o manejo de plantas de cobertura espontâneas e cultivadas nas entrelinhas de um pomar de macieira foi demonstrado aumento da atividade das enzimas β -glicosidase (EC 3.2.1.21), β -xylosidase (EC 3.2.1.37), Cellobiohydrolase (EC 3.2.1.91) e β -N-acetylglucosaminidase (EC 3.2.1.52), que contribuem

para a decomposição da fitomassa vegetal. Neste sistema de produção sem revolvimento do solo em área total, os teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo foram elevados pela incorporação de um maior volume de resíduos orgânicos. Este experimento também demonstrou uma alteração na estrutura da comunidade microbiana do solo, com correlações positivas entre bactérias dos gêneros *Ruminococcaceae* e *Lachnospiraceae* e a atividade enzimática, o que indica que estes gêneros podem estar envolvidos na degradação de resíduos das plantas de cobertura nas condições estudadas (ZHENG et al., 2018).

O manejo com plantas de cobertura proporciona benefícios, especialmente para a fração orgânica e solúvel do solo, além de alterar sua temperatura, diminuir o escoamento superficial, a erosão e a lixiviação de nutrientes (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020). Quando essa prática é realizada de maneira contínua e correta, com produção adequada de biomassa (no SPDH considerada superior a 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na parte aérea), aumenta e estabiliza os níveis de matéria orgânica do solo, o que contribui diretamente para a comunidade microbiana e atividade enzimática do solo (COMIN et al., 2024; HAMIDO; KPOMBLEKOU-A, 2009; TYLER, 2020).

2.4 EFEITO DA ROTAÇÃO COM PLANTAS DE COBERTURA NA QUALIDADE E RENDIMENTO DA CEBOLA

Para seu desenvolvimento, as plantas necessitam de elementos químicos obtidos em maior parte da água e atmosfera (6% de H, 45% de C e 45% de O) e em menor quantidade de elementos adquiridos do solo, mas não menos fundamentais, como os macro (N, K, Ca, Mg, P e S que somam 3,6% na matéria seca vegetal) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl e Ni). Os nutrientes minerais são encontrados em todos os organismos que habitam os ecossistemas e são introduzidos na biosfera predominantemente pelo sistema radicular das plantas. Este processo ocorre em conjunto com outros organismos – *e.g.* fungos micorrízicos e bactérias fixadoras de nitrogênio. Após serem absorvidos da solução do solo para o tecido vegetal, passam por diversas partes da planta e participam de funções biológicas fundamentais para seu desenvolvimento. As relações entre planta-solo-atmosfera são complexas e na agricultura, as culturas agrícolas geralmente usam menos da metade dos fertilizantes aplicados ao solo e o restante geralmente passa a ser uma fonte para contaminação ambiental (TAIZ; ZEIGER, 2010).

As plantas de cobertura liberam ácidos orgânicos (AO) - em grande parte de caráter aniônico - que na solução do solo competem com nutrientes aniônicos (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄⁼,

MoO_4^{2-} , Cl^- e BO_3^-) pelos sítios de adsorção dos colóides de solo, mantendo estes nutrientes em formas mais disponíveis às plantas. Diferentes espécies vegetais sintetizam e exsudam AO de distintas estruturas moleculares, que determinará sua dinâmica no solo. Ácidos com alta massa molecular podem persistir por longos períodos no solo e serem mais efetivos na complexação de elementos tóxicos (como o Al). O pH, e outras características do solo, também influenciam nesta dinâmica (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). A decomposição da biomassa de plantas de cobertura também libera nutrientes como o P e K, que se acumulam, principalmente, nas camadas superficiais do solo (TEIXEIRA et al., 2012), influenciando assim a qualidade das culturas em sistemas de plantio direto sem revolvimento, como a cebola em SPDH (SOUZA et al., 2021).

As plantas de cobertura de verão, embora menos utilizadas que as de inverno, podem ser importantes para propriedades rurais familiares e agroecológicas. São exemplos das espécies mais populares na região do sul do Brasil a mucuna (*Mucuna aterrima*), crotalaria (*Crotalaria spectabilis*), feijão de porco (*Canavalia ensiformis*), feijão guandu (*Cajanus cajan*) e milheto (*Pennisetum glaucum*). Para a escolha destas espécies, a produção de MS da parte aérea e raízes, o acúmulo de nutrientes (principalmente C e N), são os principais aspectos considerados (REDIN et al., 2016). Neste arranjo de rotação de culturas com leguminosas, quantidades significativas de N são incrementadas ao solo, que podem satisfazer a demanda parcial ou completamente de N das plantas cultivadas em sequência (WEILER et al., 2018).

A qualidade da cebola pode ser representada pela concentração de compostos orgânicos e minerais e pelo diâmetro do bulbo, que reflete em seu rendimento (Mg ha^{-1}). A demanda de nutrientes pelas plantas varia durante seu crescimento (KURTZ et al., 2016; KURTZ; FAYAD; VIEIRA NETO, 2020), influenciando a produtividade da cebola. Para otimizar a produtividade agrícola e o manejo sustentável da nutrição mineral são realizadas análises de nutrientes no solo e no tecido vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2010). Até o período de bulbificação, o acúmulo de massa seca (MS) da cebola é lento e este processo se intensifica após esse período, momento fenológico em que a translocação de fotoassimilados e outros compostos para o bulbo se intensifica. Este evento ocorre independentemente do cultivar utilizado e do local de cultivo da cebola (BACKES et al., 2018; KURTZ; FAYAD; VIEIRA NETO, 2020).

A análise de macronutrientes em tecidos vegetais permite a diagnose de deficiências, toxicidades ou desequilíbrios nutricionais, essenciais para a saúde das plantas e a produtividade agrícola. Por meio dessa análise é possível quantificar os nutrientes transportados por uma cultura que os exportará do sistema, sendo uma estratégia positiva para a reposição adequada e

manutenção da fertilidade do solo. Esta análise também possibilita a estimativa do estado nutricional geral da região ou dos tipos de solo, monitorando a eficácia das práticas de fertilização adotadas e permitindo a previsão de rendimentos das culturas (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 2010).

O equilíbrio nutricional adequado da cebola é importante para que sejam resistentes a pragas e doenças. Foi evidenciado que o teor de nitrogênio no tecido vegetal está relacionado com o crescimento populacional e a incidência de trips ou piolho-da-cebola (*Thrips tabaci* Lind.), na cultivar Bola Precoce (GONÇALVES et al., 2013). O uso de plantas de cobertura no SPDH é uma estratégia para a ciclagem e disponibilização de nutrientes essenciais para as plantas, principalmente a longo prazo (WANG et al., 2021).

O legado de manejo do agroecossistema condiz ao histórico das práticas agrícolas performadas ao longo do tempo na área destinada à produção agropecuária. Os efeitos do legado de manejo no solo podem persistir mesmo após o solo não ser submetido àquelas condições do manejo realizado anteriormente. Estes efeitos na MO e nos microbiomas do solo podem afetar a aquisição de nutrientes pelas plantas e nas interações planta-planta, por exemplo, na habilidade competitiva de culturas comerciais com plantas espontâneas em sistema de plantio direto sem herbicida (GAN; EMMETT; DRINKWATER, 2021).

O manejo de hortaliças em agroecossistemas com rotação de culturas contendo plantas de cobertura também pode viabilizar o aumento de biodiversidade pela integração de plantas e animais no agroecossistema. No Uruguai, é realizado o cultivo de cebola em sistema hortipastoral, integrando plantas de cobertura forrageiras para pastoreio por gado ou ovelha na entressafra da hortaliça. Este manejo é capaz de aumentar a produção de cebolas, além de elevar a matéria orgânica e agregação do solo (REICHERT et al., 2022).

Em dois anos de cultivo em SPDH, o rendimento total da cebola pode aumentar 7 Mg ha⁻¹, além do aumento das classes de bulbos, que também é melhorada ao longo dos anos sob este manejo. Nas condições de Ituporanga-SC, um agroecossistema com legado de manejo de oito anos de produção de cebola em SPDH agroecológico foi possível observar um aumento no rendimento da cebola, de 10 Mg ha⁻¹ para 19 a 24 Mg ha⁻¹, chegando a se igualar a rendimentos de sistemas de produção convencional de cebola com revolvimento do solo, adubação mineral e aplicações de agrotóxicos (20 a 35 Mg ha⁻¹) (SOUZA et al., 2021).

Neste contexto, também foi evidenciado que combinações de plantas de cobertura têm potencial para elevar o rendimento de bulbos de cebola em um agroecossistema sob um manejo agroecológico. Bortolini et al. (2021), observaram maiores rendimentos da cebola (24,4 Mg ha⁻¹) em sucessão com aveia-preta + nabo-forrageiro; com centeio (21,7 Mg ha⁻¹); aveia-preta

(21,5 Mg ha⁻¹); e centeio + nabo-forrageiro (21,4 Mg ha⁻¹) (BORTOLINI et al., 2021). Estes rendimentos podem variar de acordo com as condições ambientais e de manejo adotado antes e durante a safra da cebola (VENTURA et al., 2021).

Fica evidente que o SPDH, ao integrar práticas como o mínimo revolvimento do solo e o uso diversificado de plantas de cobertura, promove melhorias significativas nos indicadores biológicos, químicos e físicos do solo. A atividade enzimática é um indicador sensível e precoce das mudanças na qualidade do solo, refletindo o efeito das práticas de manejo e fornecendo informações relevantes sobre a saúde do ecossistema agrícola. No contexto específico da produção de cebola, o SPDH demonstra potencial para aumentar o rendimento e a qualidade dos bulbos ao longo do tempo, além de contribuir para a resiliência do sistema frente a desafios técnicos e ambientais como eventos climáticos advindos das mudanças climáticas. Este corpo de conhecimento justifica a relevância da pesquisa proposta e destaca a importância de investigar as interações complexas entre práticas agrícolas de base ecológica, atividade biológica do solo e produtividade das culturas, em busca do fortalecimento de sistemas agroalimentares mais resilientes e ecologicamente responsáveis.

3 HIPÓTESES

1) A sucessão de cultivos de verão (mucuna, soja, feijão, milho e milheto) e plantas de cobertura de inverno (aveia-preta e nabo-forrageiro, solteiras ou consorciadas), em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico de longo prazo, melhora a nutrição da cebola, aumenta sua produtividade e eleva a atividade enzimática do solo.

2) Os tratamentos de Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico de longo prazo com plantas espontâneas no inverno são igualmente eficientes na promoção da nutrição da cebola, aumento da produtividade e elevação da atividade enzimática do solo, em comparação com os tratamentos com plantas de cobertura de inverno.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de diferentes plantas de cobertura, solteiras e consorciadas, em manejo de 14 anos em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico, sobre os atributos químicos e atividade enzimática do solo, estado nutricional e rendimento da cebola.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar os efeitos das plantas de cobertura de inverno e espontâneas, nos indicadores químicos e bioquímico de qualidade do solo.

Avaliar os efeitos das plantas de cobertura de inverno e espontâneas, no teor de N, P, K, Ca e Mg (folha e bulbo) e no rendimento (bulbo) da cebola.

5 METODOLOGIA

5.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E HISTÓRICO DA ÁREA

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Epagri em Ituporanga, SC (S 27° 24' 52" e W 49° 36' 9", 475 m de altitude), localizada na Mata Atlântica. O solo é classificado como Cambissolo Húmico (SANTOS et al., 2018a).

Entre 1976 e 1996, a área foi usada para produção de cebola sob sistema de preparo convencional (SPC). Em 1996, foi realizada calagem para elevar o pH do solo a 6,0, seguida de cultivo mínimo com rotação de culturas com as espécies aveia-preta, mucuna (*Mucuna aterima* Piper & Tracy), milheto (*Pennisetum glaucum* L.), crotalária (*Crotalaria juncea* L.) e ervilhaca, até 2007. Entre 2007 e 2009, a área foi usada para cultivo de batata-doce. Desde 2009, a produção de cebola ocorre em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH). Em 2009, ocorreu a última aplicação de herbicida (glifosato).

Em 2009, na implantação do experimento de SPDH, a camada 0-10 cm do solo possuía as seguintes características: 380 g kg⁻¹ de argila; 40 g kg⁻¹ de matéria orgânica; pH em água igual a 6,2; 26,6 mg dm⁻³ de P disponível; 145,2 mg dm⁻³ de K trocável (Mehlich-1); 0 cmol_c kg⁻¹ de Al trocável; 7,2 cmol_c kg⁻¹ de Ca trocável; 3,4 cmol_c kg⁻¹ de Mg trocável (KCl 1 mol L⁻¹); 14,3 cmol_c kg⁻¹ de capacidade de troca de cátions (CTC); e saturação da CTC_{pH7,0} por bases (V) de 76%.

No ano de implantação do experimento, o delineamento experimental foi estabelecido em 8 blocos, com 6 tratamentos iniciais, cada um com 8 repetições, totalizando 48 parcelas. Os tratamentos iniciais foram: I) testemunha, constituída predominantemente por espécies vegetais espontâneas (*Amaranthus lividus* L.; *Oxalis* spp.; *Cyperus* spp.; *Stachys arvensis* L.; *Cynodon* spp.; *Rumex obtusifolius* L.); II) aveia-preta (120 kg de sementes ha⁻¹); III) centeio (120 kg de sementes ha⁻¹); IV) nabo-forrageiro (20 kg de sementes ha⁻¹); V) nabo-forrageiro (10 kg de

sementes ha^{-1}) + centeio (60 kg de sementes ha^{-1}); e VI) nabo-forrageiro (10 kg de sementes ha^{-1}) + aveia-preta (60 kg de sementes ha^{-1}). As plantas de cobertura foram semeadas manualmente e incorporadas ao solo com uma semeadora de plantio direto. Em 2010, a aveia-preta foi substituída por cevada nos tratamentos II e VI, e em 2011, a cevada foi substituída novamente por aveia-preta devido à falta de sementes. As plantas de cobertura foram semeadas em abril, sem adição de fertilizantes solúveis ou irrigação. A densidade de semeadura foi calculada com base nas recomendações de Monegat, 1991 + 50%.

Ao longo do tempo, o delineamento experimental passou por modificações. Na primeira modificação, os tratamentos foram ajustados para 8, com a substituição de algumas espécies cultivadas no verão, e o número de repetições foi reduzido. Em 2019, os tratamentos foram expandidos para 12, mantendo os mesmos 8 blocos que somam 48 parcelas. Das 48 parcelas, 16 mantiveram os mesmos tratamentos desde o início do experimento, enquanto as demais foram ajustadas para incluir novas espécies e rotação de culturas. Atualmente, são conduzidos três experimentos consecutivos: um com sucessão de culturas com plantas de cobertura de verão (mucuna) e inverno (aveia-preta e nabo-forrageiro, solteiros ou consorciados) para o cultivo da cebola, mantendo alguns tratamentos desde o início do experimento, outro com inserção de culturas comerciais (milho, milheto, soja ou feijão) em substituição à mucuna, e um terceiro experimento consta de rotação de culturas envolvendo diferentes plantas de cobertura de inverno e verão (centeio, ervilhaca, aveia, nabo-forrageiro, crotalária, milho e milheto), cebola e culturas comerciais de verão (milho safrá, feijão e soja).

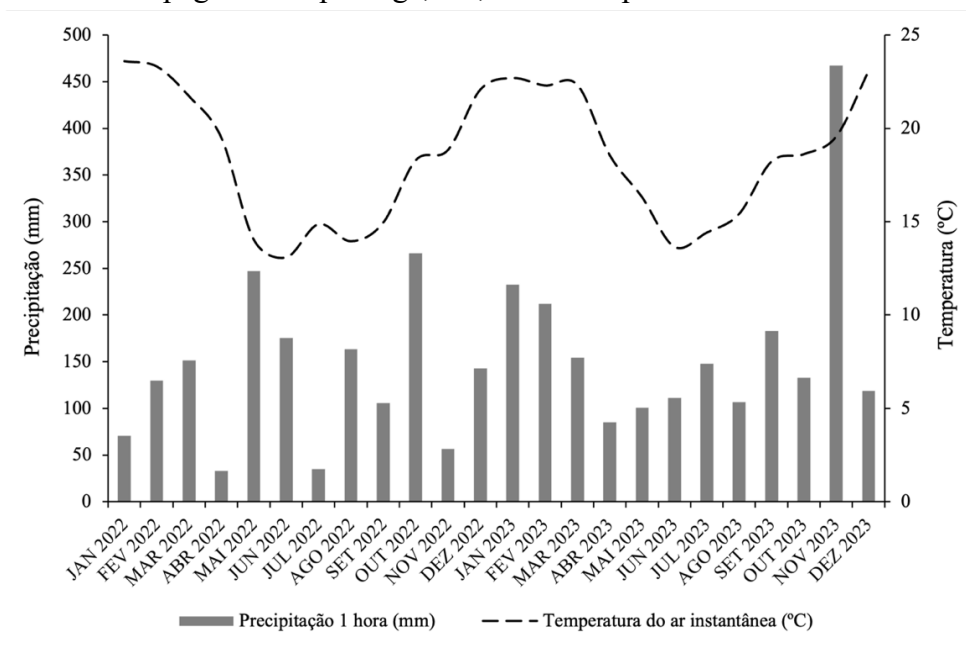
Desde 2009, as plantas de cobertura foram acamadas no mês de julho com rolo faca. Em seguida foram adicionados 96 kg de P_2O_5 , na forma de fosfato natural de Gafsa, 175 kg de P_2O_5 , 125 kg de K_2O e 100 kg de N por hectare com adubação orgânica (dejetos de aves, 6 Mg ha^{-1}), metade no momento de transplântio das mudas e o restante 45 DAT. A produção de mudas de cebola (cv. Empasc 352 – Bola Precoce) foi realizada em canteiros sob preparo convencional. Os sulcos de plantio foram abertos com uma máquina de plantio direto, e as mudas de cebola foram transplantadas manualmente, com espaçamento de 0,40 m entre linhas e 0,10 m entre plantas, totalizando uma população de 248.333 plantas por hectare. Desde 2011, não foi mais aplicado fosfato natural devido aos elevados teores de P no solo.

5.1.1 Condições Climáticas

O clima é subtropical úmido (Cfa) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), com temperatura média anual de 17,6 °C e precipitação anual de 1400 mm. As médias de temperatura

do ar e precipitação pluviométrica ao longo do período do estudo estão na Figura 2. As informações meteorológicas foram disponibilizadas a partir dos registros da Estação Meteorológica da Estação Experimental da Epagri, situada a cerca de 300 metros do local do experimento. A temperatura do ar instantânea (°C) refere-se à média mensal da temperatura do ar, enquanto a precipitação 1 hora (mm) indica a soma mensal da precipitação acumulada em intervalos horários.

Figura 2 - Médias de temperatura do ar e precipitação pluviométrica na Estação Experimental da Epagri em Ituporanga, SC, durante o período do estudo.



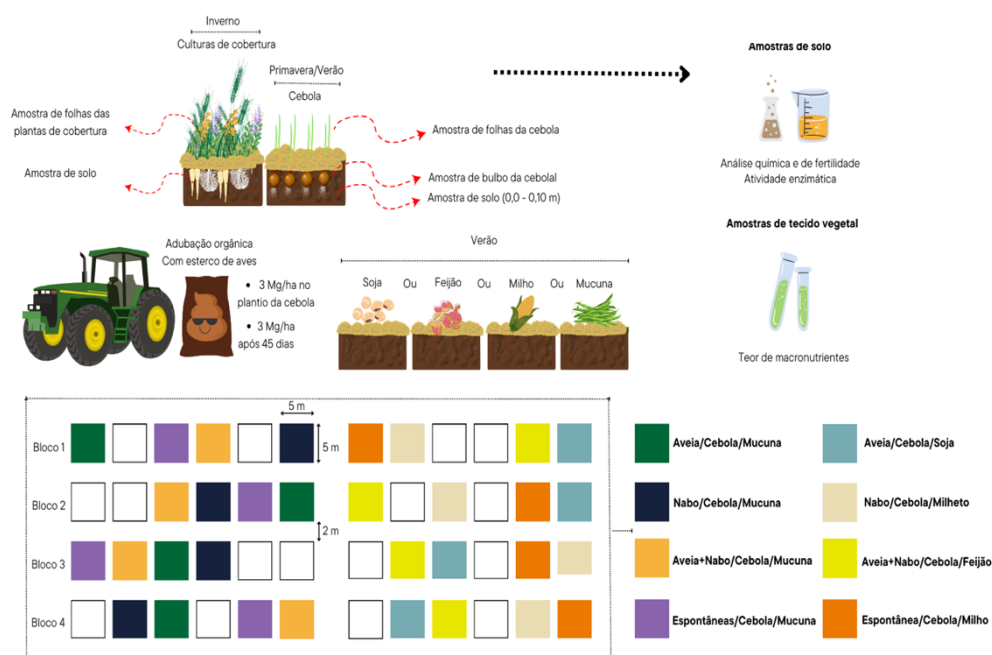
Fonte: Epagri (2024).

5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL ATUAL DO ESTUDO

Em 2019, os tratamentos do experimento original foram expandidos para 12, dos quais oito foram avaliados neste estudo: T1) aveia/cebola/mucuna; T2) nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3) aveia+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4) plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5) aveia/cebola/soja; T6) nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7) aveia+nabo-forrageiro/cebola/feijão; e T8) plantas espontâneas/cebola/milho. Todos os tratamentos foram manejados em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico, com sucessão de plantas de cobertura de inverno (aveia e nabo-forrageiro solteiras ou consorciadas) ou plantas espontâneas, cultivo anual de cebola (na primavera/verão) e plantas de cobertura ou grãos de verão (soja, feijão, milho, milho ou mucuna). A quantidade de sementes utilizadas foi de 120 kg ha⁻¹ para aveia-preta e 20 kg ha⁻¹ para nabo-forrageiro quando solteiros, 60 kg ha⁻¹

¹ de aveia com 10 kg ha⁻¹ de nabo em consórcio (proporção de 6:1) e para mucuna, utilizados 120 kg ha⁻¹. O delineamento experimental foi de blocos completos casualizados (DBC) com quatro repetições. Cada bloco tem 5 x 5 m², distanciados por 2 m como representado na Figura 3.

Figura 3 - Desenho experimental a campo na Epagri de Ituporanga, SC, tratamentos estudados, adubações, sistema de cultivo da cebola e amostragem do solo e plantas.



5.3 COLETA, PREPARO E ARMAZENAMENTO DE SOLO E TECIDO VEGETAL

Foram realizadas sete coletas de solo e tecido vegetal entre 2022 e 2023: 1) Julho de 2022 (Inverno 22); 2) Outubro de 2022 (Bulbificação 22); 3) Novembro de 2022 (Colheita 22); 4) Fevereiro de 2023 (Verão de 22); 5) Julho de 2023 (Inverno 23); 6) Outubro de 2023 (Bulbificação 23); e 7) Novembro de 2023 (Colheita 23).

Para a análise da atividade enzimática do solo foram coletadas três subamostras na camada 0-10 cm com trado calador, em pontos aleatórios de cada tratamento. As subamostras foram homogêneas para formar uma amostra composta por tratamento, armazenadas em caixa de isopor com gelo seco e encaminhadas ao laboratório. As amostras foram secas em estufa a 40 ± 5°C até peso constante, peneiradas em peneira de 2 mm e armazenadas. Para a análise química, amostras de solo das camadas de 0-10 cm e 10-20 cm foram coletadas após a colheita das duas safras de cebola, no mês de dezembro. As amostras foram secas, moídas,

peneiradas em malha de 2 mm e analisadas no laboratório de solos da Epagri em Ituporanga, SC.

Para a análise de macronutrientes dos tecidos vegetais, foram coletadas manualmente folhas de cebolas e plantas de cobertura de inverno e verão conforme Boaretto et al. (1999). As plantas de cobertura de inverno foram coletadas no estágio fenológico de plena floração, a cebola no estágio de bulbificação, e as plantas de cobertura de verão no estágio de enchimento de grãos. Para as plantas espontâneas, foram coletadas folhas de diferentes espécies presentes na área, predominantemente língua-de-vaca (*Rumex obtusifolius*) e losna (*Artemisia verlotorum*), formando uma amostra composta de tecido vegetal. As amostras de folhas foram secas em estufa a 65 °C até peso constante, moídas em moinho de facas tipo Willey e armazenadas. Os bulbos foram coletados no dia da colheita, descascados, limpos, cortados, secos em estufa a 65 °C até peso constante, moídos em moinho de facas tipo Willey e armazenados para análise posterior.

5.4 ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

Para a atividade enzimática total do solo, foi realizada a hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (DAF). O método para determinar a hidrólise do DAF foi segundo descrito por Dick; Breakwell; Turco (1996) e adaptado. Meio grama de solo seco ao ar (peneirado < 2 mm), 5 mL de tampão fosfato de sódio ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 60mmol L⁻¹, pH 7,6) e 0,05 mL de solução de diacetato de fluoresceína (Sigma F-7378, 4,8 mmol L⁻¹), exceto os controles, foram adicionados em tubos Falcon de 15 mL por meio de pipeta repetitiva. Os frascos foram selados e agitados a temperatura ambiente por 2 h. Após o período de reação em agitação, foi adicionado 0,1 mL de clorofórmio em todos os frascos e a mesma quantidade da solução de diacetato de fluoresceína foi adicionada nas amostras controle. Os frascos foram centrifugados a 4000 rpm por 2 minutos e feita a leitura da suspensão com espectrofotômetro em 490 nm. Os resultados foram expressos em mg (Fluoresceína) g⁻¹ (solo) hora⁻¹.

5.5 INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO, DAS PLANTAS DE COBERTURA E CEBOLA

Foram coletadas amostras de solo das camadas 0-10 e 10-20 cm em cada tratamento, após a colheita da cebola. As amostras de solo foram secas, moídas, peneiradas em malha de 2

mm mesh e submetidas às seguintes análises: teor de matéria orgânica do solo, determinado pelo método Walkley-Black (EMBRAPA, 1997); o pH foi determinado em água; teores trocáveis de Ca e Mg (por extração por KCl 1 mol L⁻¹); e teores disponíveis de P e K (pela extração por Mehlich-1) (TEDESCO et al., 1995). Foram calculados capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e CTC_{pH7,0} de acordo com CQFS-RS/SC, (2016).

As amostras de tecido das plantas de cobertura e espontâneas, das folhas e bulbo da cebola foram analisadas para o conteúdo total de N, P, K, Ca e Mg. As amostras foram submetidas a uma digestão úmida peroxídica-sulfúrica para determinar o teor de N por micro-Kjeldahl, P por espectrofotometria (UV-Visível a 882 nm), K por fotometria de chama, enquanto Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica (TEDESCO et al., 1995). Os teores médios de macronutrientes no tecido da cebola foram determinados a partir de folhas coletadas na fase fenológica de bulbificação (dez semanas após o transplante) e de bulbos do momento da colheita. Os resultados foram expressos em g kg⁻¹ de matéria seca.

5.6 COLHEITA, PRODUTIVIDADE E CLASSIFICAÇÃO DOS BULBOS

A colheita da cebola foi realizada no fim de novembro. As cebolas de linhas centrais de cada bloco foram colhidas manualmente, os bulbos permaneceram na superfície do solo por 10 dias para a cura (secagem e perda de água das folhas). Após, foram pesados e classificados pelo diâmetro conforme Brasil (1995): classe 0 ($\varnothing < 15$ mm); classe 1 ($\varnothing > 15-35$ mm); classe 2 ($\varnothing > 35-50$ mm); classe 3 ($\varnothing > 50-70$ mm); classe 4 ($\varnothing > 70-90$ mm); classe 5 ($\varnothing > 90$ mm); e bulbos podres e floridos.

Para a análise da produtividade, foram considerados dois parâmetros principais: produtividade total e produtividade comercial. A produtividade total inclui todos os bulbos colhidos por hectare (t/ha), independentemente da qualidade. A produtividade comercial considera apenas os bulbos das classes 2, 3, 4 e 5, que atendem aos padrões de mercado, excluindo os bulbos das classes 0, 1, podres e floridos.

5.7 MATÉRIA SECA ACUMULADA DAS PLANTAS DE COBERTURA

A quantificação da matéria seca acumulada (MSA) das plantas de cobertura foi realizada 95 dias após a semeadura das espécies de inverno. A MSA representa a soma da biomassa produzida no ciclo atual e os resíduos remanescentes de ciclos anteriores, devido à

impossibilidade de distinção entre estas frações. Utilizou-se um quadrado metálico de 0,25 m² para duas amostragens aleatórias por parcela. O material vegetal coletado foi seco em estufa com circulação de ar forçada a 65°C até massa constante, pesado e os resultados extrapolados para Mg ha⁻¹.

5.8 ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA DAS PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E NUTRIENTES ACUMULADOS NA PARTE AÉREA

Considerando o experimento de longo prazo, a produção de matéria seca (MS) das plantas de cobertura de inverno apresenta um padrão de estabilização. Para as safras de 2022 e 2023, a estimativa de MS foi realizada por meio da média de produção de três anos consecutivos anteriores. As espécies avaliadas incluíram aveia-preta, nabo-forrageiro, seu consórcio, e plantas espontâneas. A estimativa da MS foi realizada para cada tratamento, conforme apresentado na Tabela 1. A amostragem foi realizada no estágio de pleno florescimento, utilizando um quadrado de 0,25 m² com duas repetições por parcela. O material vegetal foi seco a 65°C até peso constante, e os resultados extrapolados para Mg ha⁻¹. A análise estatística envolveu ANOVA seguida pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Tabela 1 - Estimativa da matéria seca das plantas de cobertura de inverno em sucessão de cultivos para a produção de cebola em SPDH com manejo agroecológico.

Tratamento*	Espécie	Massa seca estimada
		Mg ha ⁻¹
T1	Aveia-preta	3,98 a
T2	Nabo-forrageiro	5,85 a
T3	Aveia-preta +Nabo-forrageiro	5,32 a
T4	Plantas espontâneas	1,87 b
T5	Aveia-preta	5,28 a
T6	Nabo-forrageiro	5,83 a
T7	Aveia-preta +Nabo-forrageiro	5,09 a
T8	Plantas espontâneas	4,65 a
CV** (%)		31,91

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milho; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) para Scott-Knott ($p < 0,05$).

Para a quantificação dos nutrientes acumulados na parte aérea, foram utilizados os dados de matéria seca estimada e os teores de nutrientes obtidos por meio da análise química do tecido vegetal em cada safra (2022 e 2023). O acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) foi calculado pela multiplicação dos teores de nutrientes (kg kg^{-1}) pela MS estimada (kg ha^{-1}) de cada espécie de planta de cobertura de inverno.

5.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos dados foi conduzida utilizando o software R versão 4.1.2 (R CORE TEAM, 2021). Os dados foram submetidos aos testes de Bartlett e Shapiro-Wilk para verificação de homogeneidade de variâncias e normalidade, respectivamente. Procedeu-se com análise de variância (ANOVA) seguida pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), utilizando o pacote 'ExpDes.pt' (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021). A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada com o pacote 'vegan' (OKSANEN et al., 2024) para identificar padrões de agrupamento. A comparação interanual da produtividade da cebola foi omitida devido a um evento climático extremo em 2023, que afetou significativamente a produção.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO

Os dados de pH, P, K, Ca, Mg, CTC pH 7,0, saturação na CTC e MO nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm para os diferentes tratamentos, avaliados em dezembro de 2021 e 2022, são apresentados na Tabela 2. Em geral, não foram verificadas diferenças ($p < 0,05$) entre os tratamentos e os períodos de coleta. No entanto, algumas propriedades específicas, como o pH em água e os níveis de K mostraram diferenças significativas em determinadas condições. Na camada de 0-10 cm, não houve diferença entre os tratamentos para MO, CTC a pH 7,0, Ca e Mg em ambos os anos, indicando que as diferentes combinações de plantas de cobertura e sucessões de cultivos no SPDH agroecológico mantiveram essas características estáveis, inclusive a com plantas espontâneas no inverno.

Tabela 2 - Propriedades Químicas e de Fertilidade do Solo nas Camadas de 0-10 cm e 10-20 cm em Diferentes Tratamentos de Sistema de Plantio Direto de Hortaliças Agroecológico em Dezembro de 2021 e 2022.

Tratamentos*	pH água	P	K	Ca	Mg	CTC pH 7,0	Saturação na CTC	MO
	1:01	mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³		V%	%
0-10 cm								
2021								
T1	6,33 bB	97,48 bB	452,00 aA	8,78 aB	2,80 ^{ns}	16,56 ^{ns}	80,98 b	4,33 aB
T2	6,35 bA	103,80 bA	412,20 aA	9,80 aA	2,80	16,60	82,38 b	4,58 aA
T3	6,40 bA	120,13 aA	461,55 aA	10,43 aA	3,23	17,75	83,40 b	5,33 aA
T4	6,40 bA	131,08 aA	492,65 aA	9,40 aA	3,05	16,56	82,91 b	4,78 aA
T5	6,35 bB	122,25 aA	409,90 aA	9,93 aA	2,78	16,26	84,34 a	4,48 aA
T6	6,50 aA	105,98 bA	413,90 aA	9,78 aA	3,03	16,10	85,68 a	4,68 aA
T7	6,53 aA	107,13 bA	389,70 aA	10,33 aA	2,98	16,84	84,87 a	4,40 aA
T8	6,68 aB	129,40 aB	475,90 aA	10,08 aA	2,78	16,30	86,50 a	4,43 aA
CV (%)**	3,45	59,20	27,19	14,08	14,13	10,31	6,35	15,35
2022								
T1	6,68 bA	125,78 aA	470,30 aA	9,50 aA	3,00 ^{ns}	16,46 ^{ns}	83,14 ^{ns}	5,53 aA
T2	6,48 bA	97,25 aA	411,25 aA	9,48 aA	2,75	16,36	80,03	4,63 aA
T3	6,58 bA	118,28 aA	445,35 aA	9,33 aA	2,75	15,81	83,41	5,08 aA
T4	6,50 bA	112,98 aA	451,40 aA	9,03 aA	2,70	15,49	79,44	4,90 aA
T5	6,60 bA	127,13 aA	341,75 bA	11,33 aA	2,88	17,82	84,39	4,60 aA
T6	6,90 aA	143,70 aA	358,80 bA	11,38 aA	3,10	17,78	86,45	5,00 aA
T7	6,63 bA	113,31 aA	309,40 bA	10,20 aA	2,80	16,63	82,77	4,35 aA
T8	7,00 aA	153,73 aA	384,00 bB	11,23 aA	2,78	17,10	87,13	5,25 aA
CV (%)**	3,85	33,98	20,40	17,63	14,62	11,55	6,57	15,13
10-20 cm								
2021								
T1	5,73 aB	26,60 aA	240,85 bB	6,23 ^{ns}	2,00 aB	13,57 aA	65,21 aA	3,20 aA
T2	5,78 aB	33,83 aA	223,45 bA	7,18	2,18 aA	14,00 aA	70,89 aA	3,03 aB
T3	5,83 aA	35,83 aA	326,23 aA	7,10	2,15 aA	14,23 aA	70,97 aA	3,50 aA
T4	5,63 aA	33,00 aA	305,85 aA	6,98	2,23 aA	14,49 aA	68,79 aA	3,55 aA
T5	5,68 aB	39,53 aA	201,15 bA	6,93	2,00 aA	13,25 aA	71,27 aA	2,78 aA
T6	5,80 aB	32,85 aB	269,50 bA	6,60	2,10 aA	13,17 aA	71,34 aA	3,40 aA
T7	5,75 aA	29,08 aA	233,18 bA	6,60	2,10 aB	13,48 aA	68,88 aA	2,85 aB
T8	5,98 aB	33,73 aA	325,85 aA	5,98	1,88 aA	12,15 aA	71,19 aA	2,85 aA
CV (%)**	2,46	33,25	16,89	9,38	10,88	8,12	3,14	11,64
2022								
T1	6,28 aA	57,50 aA	376,70 aA	8,30 a	2,70 aA	15,75 aA	75,38 aA	3,90 aA
T2	6,08 bA	37,10 aA	285,70 bA	6,95 b	2,10 bA	13,86 bA	70,63 aA	3,50 aA
T3	6,05 bA	35,93 aA	283,05 bA	7,03 b	2,13 bA	13,87 bA	71,06 aA	3,53 aA
T4	6,05 bA	34,38 aA	378,25 aA	7,20 b	2,30 bA	14,35 bA	73,07 aA	3,53 aA
T5	6,05 bA	44,70 aA	197,25 bA	7,55 b	2,15 bA	14,51 bA	70,19 aA	3,23 aA
T6	6,25 aA	51,35 aA	264,50 bA	7,80 a	2,33 bA	14,99 aA	71,81 aA	3,50 aA
T7	6,30 aA	67,65 aA	242,00 bA	8,63 a	2,55 aA	15,28 aA	76,58 aA	3,58 aA
T8	6,48 aA	44,45 aA	300,35 bA	8,30 a	2,45 aA	15,22 aA	75,83 aA	3,45 aA
CV (%)**	3,61	51,31	25,25	14,72	14,57	8,02	7,44	11,00

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) para Scott-Knott ($p < 0,05$). ^{ns}: não significativo.

Foram observadas diferenças no pH principalmente nos tratamentos T6, T7 e T8. Além disso, foram identificadas variações em T5, T6, T7 e T8, nos quais uma nova composição de espécies de verão foi introduzida a partir de 2019. Este padrão também foi observado para os níveis de K na camada de 0-10 cm no ano de 2022. A composição das espécies de plantas de

cobertura e o histórico de manejo influenciam as propriedades químicas do solo (CALEGARI et al., 2013). De maneira geral, o desenvolvimento das plantas de cobertura influencia principalmente o horizonte A do solo, com efeitos limitados em magnitude e profundidade no subsolo (aproximadamente 50 cm), seguindo a mesma tendência dos efeitos observados na camada superior do solo (SKADELL et al., 2023).

As diferenças de pH observadas nos tratamentos T6, T7 e T8 sugerem que as novas composições de espécies de verão podem estar aumentando a alcalinidade do solo. A decomposição da matéria orgânica das plantas de cobertura libera ácidos orgânicos e altera a disponibilidade de íons no solo (ADELEKE; NWANGBURUKA; OBOIRIEN, 2017). Diferentes espécies de plantas de cobertura têm características específicas como quantidade de biomassa produzida, taxa de decomposição e a capacidade de ciclar nutrientes, que modificam características biológicas, químicas e bioquímicas do solo (FREIDENREICH et al., 2022; GARCÍA-GONZÁLEZ et al., 2018).

Na camada de 10-20 cm, em 2021, T3, T4 e T8 destacaram-se com maiores concentrações de K. As raízes das plantas espontâneas nos tratamentos T4 e T8 foram tão eficientes quanto as das plantas de cobertura na ciclagem de K, o que contribui para a estratificação de nutrientes no perfil do solo (SOUZA et al., 2021). Em 2022, na camada de 0-10 cm do solo, T1, T2, T3 e T4 apresentaram os maiores teores de K. O manejo contínuo do SPDH agroecológico contribuiu para uma melhor retenção de K, mantendo a cobertura do solo e reduzindo a erosão. Tiecher et al. (2017), demonstraram que sistemas de cultivo sem revolvimento do solo e com uso de plantas de cobertura de longo prazo reduzem as perdas de K. A introdução de culturas de verão como milho, milheto, soja e feijão, com diferentes demandas de K, também influenciou a dinâmica deste nutriente nos tratamentos analisados.

Na camada superficial de 0-10 cm, observou-se que T3, T4, T5 e T8 apresentaram concentrações mais elevadas de P no ano de 2021. A diversidade de plantas nesses tratamentos contribuiu para esse resultado, pois espécies diferentes empregam mecanismos distintos para acessar e ciclar formas menos disponíveis de P no solo (TIECHER; SANTOS; CALEGARI, 2012). Por outro lado, o efeito das diferentes plantas na dinâmica do P é menos pronunciado do que o impacto do sistema de cultivo em si (RHEINHEIMER et al., 2019). Na camada de 10-20 cm, não houve diferença significativa na concentração de P. Os efeitos das plantas de cobertura nas formas de P no solo são concentrados principalmente na camada superficial (TEIXEIRA et al., 2012), onde promovem a manutenção da matéria orgânica e elevam a abundância de microrganismos solubilizadores de P (WANG et al., 2021). A transformação bioquímica do P

e sua consequente disponibilização às plantas contribui para uma ciclagem mais eficiente deste nutriente no sistema solo-planta (HALLAMA et al., 2019).

Os efeitos das plantas de cobertura de inverno observados para P e K corroboram com aqueles observados por Tiecher et al. (2017), que destacaram que, ao contrário dos efeitos do preparo do solo, o pH, o alumínio trocável, a saturação de bases, a acidez potencial e os teores de Ca e Mg não foram afetados diretamente pelas plantas de cobertura de inverno. As diferenças observadas nos teores de Ca e Mg trocáveis na camada de 10-20 cm no ano de 2022 seguem o mesmo padrão das variações no pH e na saturação de bases. As plantas de cobertura influenciam indiretamente os teores de Ca e Mg através da modificação do pH e da saturação de bases. O pH do solo afeta a solubilidade e a disponibilidade de Ca e Mg, em que solos mais ácidos geralmente apresentam menor disponibilidade desses cátions. Ou seja, quando o pH é ajustado, a disponibilidade de Ca e Mg é alterada devido à sua maior ou menor retenção no complexo de troca do solo (WEIL; BRADY, 2017).

O cultivo da cebola em SPDH com manejo agroecológico por 14 anos elevou e manteve as propriedades químicas do solo. Na camada 0-10 cm, os teores de P e K são classificados como muito altos, enquanto Ca e Mg são considerados altos (CQFS-RS/SC, 2016). O sistema de plantio direto promove maior formação de agregados (GIUMBELLI et al., 2020; LOSS et al., 2015), reduzindo perdas por erosão. A ausência de incorporação da matéria seca, a liberação lenta de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2016) e a aplicação de fertilizantes na linha de plantio contribuem para maior acumulação destes elementos na camada superficial do solo (SOUZA et al., 2021; TIECHER et al., 2017).

Em geral, os valores de MO foram classificados como médio nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, sem diferenças entre tratamentos (CQFS-RS/SC, 2016). Em comparação aos teores de MO observados nos primeiros oito anos do experimento (SOUZA et al., 2021), o manejo adotado promoveu um aumento médio de 37,8% na camada 0-10 cm e 12,8% na camada 10-20 cm no décimo quarto ano de condução. O cultivo de plantas de cobertura, especialmente em sistemas de plantio direto, eleva a ciclagem de nutrientes e o conteúdo de MO do solo (AMADORI et al., 2022; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). Os tratamentos com plantas espontâneas foram igualmente eficientes na manutenção e aumento da MO. Contudo, o plantio direto com pousio pode não apresentar a mesma eficiência que o cultivo de plantas de cobertura já reconhecidas na manutenção das propriedades físicas e químicas do solo (FERNANDES et al., 2022; NASCENTE; STONE, 2018).

6.2 MATÉRIA SECA SUPERFICIAL ACUMULADA

A matéria seca superficial acumulada (MSSA) nos diferentes tratamentos de SPDH com manejo agroecológico é apresentada na Tabela 3. Em 2022, T1, T3, T4, T5 e T8 apresentaram MSSA até 2,05 vezes superior aos demais tratamentos. Em 2023, T1, T5, T6 e T8 formaram o grupo de maior MSSA, com valores até 2,68 vezes superiores aos outros. Os tratamentos com plantas espontâneas no inverno (T4 e T8) mostraram eficiência comparável aos com plantas de cobertura em 2022. Após 14 anos de manejo em SPDH, a dinâmica da sucessão de cultivos promoveu uma diversidade funcional que contribui para a manutenção da cobertura do solo a longo prazo. Contudo, a variabilidade interanual observada em T4 indica a necessidade de um aprofundamento sobre os fatores que influenciam a estabilidade da produção de biomassa em sistemas de plantio direto com plantas espontâneas.

Tabela 3 - Matéria Seca Superficial Acumulada (MSSA) em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças sob Diferentes Sucessões de Culturas Para o Cultivo Agroecológico de Cebola.

Tratamento*	2022	2023
	Mg ha ⁻¹	
T1	11,15 aA	13,14 aA
T2	6,29 bA	6,81 bA
T3	9,89 aA	8,37 bA
T4	10,07 aA	4,91 bB
T5	12,91 aA	10,18 aA
T6	6,96 bB	10,41 aA
T7	7,43 bA	7,19 bA
T8	9,94 aA	10,41 aA
CV** (%)	24,35	

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) e maiúsculas entre colunas para Scott-Knott ($p < 0,05$).

No SPDH, recomenda-se a adição anual de 10 Mg ha⁻¹ de matéria seca pelas plantas de cobertura (FAYAD et al., 2018, 2019), o que contribui para a estabilidade da MSSA e eficácia do plantio direto na proteção do solo e ciclagem de nutrientes (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018). Entre 2022 e 2023, a maioria dos tratamentos manteve MSSA estável, exceto T4 e T6. A redução em T4 condiz à variabilidade das plantas espontâneas, com picos de produção associados ao ciclo fenológico de espécies como *Rumex obtusifolius* (SOUZA et al., 2021). Já o aumento em T6, há a contribuição do milheto no verão, conhecido por sua alta produção de biomassa (10 a 20 Mg ha⁻¹) (ASSIS; FREITAS; MASON, 2018).

6.3 TEORES DE N, P, K, CA E MG ACUMULADOS NAS PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO

Os teores de N, P, K, Ca e Mg acumulados pela parte aérea das plantas de cobertura de inverno nas safras de 2022 e 2023 são apresentadas na Tabela 4. Em 2022, não houve diferenças para N, exceto em T4 (plantas espontâneas). Para K, Ca e Mg em 2022, e todos os nutrientes em 2023, observaram-se diferenças entre os tratamentos ($p < 0,05$). Os tratamentos nabo-forrageiro e o consórcio aveia-preta+nabo-forrageiro geralmente apresentaram os maiores teores de nutrientes, especialmente para P e Mg. As plantas espontâneas em T4 apresentaram os menores teores, e em T8 os teores acumulados de K nos dois anos, N e Mg em 2022 foram equiparáveis aos outros tratamentos com plantas de cobertura de inverno.

Tabela 4 - Teores de N, P, K, Ca e Mg acumulados na parte aérea das plantas de cobertura de inverno e espontâneas em sucessão ao cultivo de cebola em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças com manejo agroecológico.

Tratamentos	Espécies	N		P		K		Ca		Mg	
		2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
T1	Aveia-preta	178,55 a	186,07 b	-	5,83 c	162,94 b	74,76 c	127,76 a	48,90 c	3,78 b	11,22 c
T2	Nabo-forrageiro	174,10 a	313,69 a	-	18,27 a	218,65 a	194,90 a	45,20 b	151,05 b	7,13 a	27,77 a
T3	Aveia-preta +Nabo-forrageiro	168,17 a	264,35 a	-	13,41 b	122,89 b	131,39 a	96,34 a	99,74 b	3,19 b	20,60 b
T4	Plantas espontâneas	54,97 b	86,33 c	-	3,27 c	64,10 b	43,50 c	44,95 b	30,36 c	2,49 b	10,28 c
T5	Aveia-preta	134,00 a	246,33 a	-	9,82 c	161,12 b	117,21 b	155,18 a	60,32 c	4,41 b	13,51 c
T6	Nabo-forrageiro	164,31 a	190,61 b	-	21,97 a	203,37 a	168,09 a	70,44 b	258,91 a	9,77 a	33,93 a
T7	Aveia-preta +Nabo-forrageiro	130,18 a	219,43 a	-	15,46 b	218,42 a	108,19 b	121,47 a	107,76 b	4,79 b	21,84 b
T8	Plantas espontâneas	137,78 a	166,04 b	-	13,22 b	290,50 a	144,81 a	29,90 b	76,03 c	6,84 a	22,88 b
CV (%)**		37,71	38,07	-	54,31	46,5	43,71	56,32	72,62	54,13	47,05

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) para Scott-Knott ($p < 0,05$). ^{ns}: não significativo.

Houve uma tendência geral de aumento dos teores acumulados no segundo ano, especialmente para N, P e Mg. O tratamento nabo-forrageiro se destacou na acumulação de P e Mg, em ambos os anos. A inclusão desta espécie na sucessão ou rotação para o cultivo da cebola é uma boa estratégia para ciclagem de nutrientes essenciais para a cebola, como P, K e S, podendo acumular, por exemplo, até 15,6 kg de S ha⁻¹ (HANSEN et al., 2021).

O consórcio aveia-preta + nabo-forrageiro proporciona uma ciclagem de nutrientes diversificada, explorando diferentes camadas do solo e mobilizando uma gama mais ampla de nutrientes (FINNEY; WHITE; KAYE, 2016). As plantas espontâneas em T8 também

demonstraram este potencial, particularmente para K, com teores comparáveis ou superiores aos das plantas de cobertura cultivadas em 2022. A dinâmica da sucessão de cultivos contribuiu para a manutenção da ciclagem de nutrientes a longo prazo. As plantas de cobertura proporcionam serviços ecossistêmicos fundamentais para sistemas de produção agroecológicos (ALTIERI et al., 2015; BLANCO-CANQUI et al., 2015). Além disso, rotações de culturas com maior diversidade de espécies reduzem a necessidade de insumos externos sintéticos para manter a produtividade (DAVIS et al., 2012).

6.4 TEORES DE N, P, K, CA E MG NAS FOLHAS E BULBO DA CEBOLA

Os teores de N, P, K, Ca e Mg acumulados nas folhas das cebolas cultivadas em diferentes tratamentos de SPDH com manejo agroecológico nas safras 2022 e 2023 são apresentados nas Tabelas 5 e 6. Os tratamentos influenciaram os teores de P e Mg em 2022, e de N e Ca em 2023 ($p < 0,05$). Os tratamentos T6, T7 e T8 apresentaram teores inferiores desses nutrientes, refletindo as propriedades químicas do solo na camada 0-10 cm (Tabela 1). Entre os anos, foram evidenciadas diferenças ($p < 0,05$) nos teores de N, P e K. Embora algumas variações pontuais, especialmente em 2022, a ordem decrescente de concentração dos macronutrientes nas folhas foi predominantemente $N > K > Ca > P > Mg$, corroborando com Kurtz et al. (2016) e semelhante a Higashikawa et al. (2023), para a mesma cultivar (Epagri 532 – Bola Precoce).

Tabela 5 - Teores de N, P, K, Ca e Mg nas folhas de cebola coletadas no início do estágio de bulbificação em sucessão de plantas de cobertura de inverno e espontâneas em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico de longo prazo nas safras de 2022 e 2023.

Tratamentos*	Plano de Direção de Fertilizações agroecológicas de longo prazo nas safras de 2022 e 2023:									
	N		P		K		Ca		Mg	
	g kg ⁻¹									
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
T1	37,07 aA	35,60 aA	4,61 aA	2,36 aA	41,45 aA	32,37 aA	8,72 ^{ns}	9,07 a	2,94 a	2,66 ^{ns}
T2	33,10 aA	36,10 aA	3,84 aA	2,96 aA	33,88 aA	32,90 aA	7,20	8,47 a	2,41 b	2,46
T3	33,58 aA	36,93 aA	4,40 aA	2,79 aB	36,14 aA	35,23 aA	8,71	9,14 a	2,83 a	2,64
T4	35,77 aA	35,12 aA	3,76 aA	2,74 aA	39,02 aA	34,93 aA	9,09	8,28 b	3,10 a	2,46
T5	34,99 aA	33,71 aA	3,66 aA	2,69 aA	33,49 aA	32,79 aA	9,45	9,03 a	2,80 a	2,47
T6	29,30 aA	29,78 bA	2,52 bA	2,68 aA	26,63 aB	33,61 aA	6,84	7,79 b	2,06 b	2,23
T7	29,12 aA	30,28 bA	2,83 bA	2,91 aA	28,81 aB	35,27 aA	7,43	8,79 a	2,27 b	2,41
T8	31,22 aA	27,22 bB	2,90 bA	2,75 aA	31,66 aA	32,82 aA	7,88	7,57 b	2,29 b	2,09
FA**	25-40		2-4		20-50		7-30		2-4	
CV***	16.93	12.87	28.22	12.60	23.74	10.71	21.74	12.86	22.17	12.75

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

FA: Faixa adequada de nutrientes para folhas de cebola na fase de bulbificação (CQFS-RS/SC, 2016).*CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) para Scott-Knott ($p < 0,05$). ns: não significativo.

Os teores de N, P, K, Ca e Mg nas folhas de cebola, em geral, se mantiveram dentro da faixa adequada para a cebola (CQFS-RS/SC, 2016), com exceção dos tratamentos T1 e T3 em 2022, que apresentaram teores de P acima do recomendado (2-4 g kg⁻¹). Estes teores são consistentes para o cultivar Epagri 532 – Bola Precoce em cultivo convencional (GONÇALVES et al., 2013) e SPDH (HIGASHIKAWA et al., 2023c), e em outras cultivares em sistema orgânico (BETTONI et al., 2016).

A baixa variação do teor de P entre os anos demonstra uma estabilização na disponibilidade deste nutriente ao longo do tempo no SPDH agroecológico. Kurtz et al. (2016) indicaram que o P é o quarto elemento mais absorvido pela cv. Bola Precoce, com acúmulo de 34,9 kg ha⁻¹ na planta toda, sendo 31% na parte aérea. A absorção de P é influenciada pela presença de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) associados às plantas micotróficas no sistema (GIOVANETTI, 2022; GOLUBKINA et al., 2020; SATO et al., 2015). As variações nos teores de N entre os tratamentos em 2023 estão relacionadas à modificação da composição das espécies na sucessão de cultivos a partir do ano de 2019. A ausência de diferenças para K demonstra uma ciclagem eficiente deste nutriente, inclusive os com plantas espontâneas. Já para Ca e Mg, Kurtz et al. (2016) observaram que as maiores taxas de absorção ocorrem aos 63 e 70 DAT, respectivamente, com acúmulos totais de 46,6 kg ha⁻¹ de Ca e 12,1 kg ha⁻¹ de Mg, predominantemente na parte aérea.

Os teores de N, P, K, Ca e Mg nos bulbos das cebolas são apresentados na Tabela 6. Os tratamentos influenciaram significativamente ($p < 0,05$) os teores de P e Mg em 2022, e de N, P, K e Mg em 2023. Os tratamentos T1, T2 e T3, que incluem mucuna no verão, geralmente apresentaram teores superiores desses nutrientes, especialmente em 2023. Entre os anos, foram evidenciadas diferenças ($p < 0,05$) nos teores de N, P, K e Mg. Os teores de N e P nos bulbos refletem as especificidades da cultivar Epagri 532 – Bola Precoce no contexto do SPDH agroecológico, mas semelhantes aos achados de Lee et al. (2012) e Bettoni et al. (2016) em outras variedades cultivadas em sistema orgânico.

Tabela 6 - Teores de N, P, K, Ca e Mg de nutrientes nos bulbos de cebola cultivadas em sucessão de plantas de cobertura de inverno e espontâneas em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico de longo prazo nas safras de 2022 e 2023.

Tratamentos*	desempenho agrônomico de longo prazo das culturas de 2022 e 2023									
	N		P		K		Ca		Mg	
	----- g kg ⁻¹ -----									
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
T1	13,56 aB	17,46 aA	1,67 aA	2,14 aA	14,02 aA	13,26 aA	2,45 ^{ns}	2,16 ^{ns}	1,22 aA	1,10 aA
T2	12,31 aA	15,48 aA	1,51 bA	1,70 bA	12,18 aA	12,86 aA	2,42	2,34	1,34 aA	1,11 aA
T3	13,86 aB	15,69 aA	1,59 aA	1,68 bA	12,73 aA	13,18 aA	2,29	2,37	1,24 aA	1,10 aB
T4	11,30 aA	12,76 bA	1,25 bA	1,65 bA	13,13 aA	12,09 bA	2,11	2,28	1,07 bA	1,04 bA
T5	12,48 aA	13,31 bA	1,84 aA	1,62 bA	14,07 aA	12,30 bA	2,45	1,99	1,08 bA	0,97 cA
T6	12,96 aA	10,29 cA	1,73 aA	1,55 bA	12,93 aA	12,04 bA	2,49	2,40	1,19 aA	1,02 bA
T7	11,65 aA	11,14 cA	1,73 aA	1,42 cA	12,22 aA	11,73 bA	2,45	2,30	1,04 bA	0,94 cB
T8	11,19 aA	9,57 cA	1,72 aA	1,38 cB	13,45 aA	10,81 bB	2,66	2,59	1,10 bA	0,95 cB
CV**	14.40	22.38	18.03	17.19	11.94	9.71	15.42	14.78	13.44	7.80

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) para Scott-Knott ($p < 0,05$). ns: não significativo.

A ordem dos teores de nutrientes nos bulbos foi $K > N > Ca > P > Mg$ em 2022 e $N > K > Ca > P > Mg$ em 2023, diferindo da observada nas folhas, refletindo as funções fisiológicas específicas de cada parte da planta, com o K desempenhando papel essencial na formação e qualidade dos bulbos (MARSCHNER, 2012). Os teores de K nos bulbos demonstraram relativa estabilidade entre tratamentos e anos, reforçando a eficiência das diferentes composições de sucessão de cultivos do SPDH agroecológico de longo prazo na ciclagem deste nutriente. O K, predominante nos bulbos, está associado à firmeza e conservação pós-colheita (MARCONATTO; MARCUZZO, 2020; RESENDE; COSTA; PINTO, 2009), enquanto o excesso de N pode comprometer a sua conservação (KURTZ et al., 2013).

Em 2023, T1, T2 e T3 apresentaram teores mais elevados de N, K e Mg nos bulbos. Nestes tratamentos, a mucuna no verão contribui para o aumento de N através da fixação biológica de N atmosférico (LOPES et al., 2023). No inverno, a aveia-preta e o nabo-forrageiro são eficientes na ciclagem de K e P (SOUZA et al., 2021; TIECHER et al., 2017) e o consórcio aveia-preta+nabo-forrageiro proporciona efeitos sinérgicos, estratificando a profundidade da ciclagem de nutrientes e a persistência do resíduo na superfície do solo (GIACOMINI et al., 2004).

Em comparação a sistemas de produção convencional e orgânico, o SPDH agroecológico proporcionou teores de nutrientes nos bulbos similares. Díaz-Pérez; Silva & Valdez-Aguilar (2022), evidenciaram teores de 13,4 g kg⁻¹ de N, 3,1 g kg⁻¹ de P, 14,9 g kg⁻¹ de K, 4,7 g kg⁻¹ de Ca e 1,5 g kg⁻¹ de Mg nos bulbos de cebola (cv. Yellow Granex PRR) com fertilização química, sem diferenças significativas em comparação à adubação orgânica. O SPDH agroecológico pode ser tão eficiente quanto estes sistemas na nutrição da cebola, com

benefícios adicionais para a conservação do solo (COMIN et al., 2024), incluindo melhorias na estrutura do solo (GIUMBELLI et al., 2020; LOSS et al., 2017), aumento da matéria orgânica (FERREIRA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2016; SANTOS et al., 2018b) e maior atividade biológica (BORTOLINI et al., 2021; SOUZA et al., 2020).

Os níveis adequados de nutrientes, particularmente de N, K e S, estão diretamente relacionados à síntese de compostos bioativos como alicina, quercetina e outros flavonoides, aumentando o valor nutracêutico das cebolas produzidas (GRIFFITHS et al., 2002; PAREEK et al., 2017). Essas características nutricionais têm implicações positivas para a saúde dos consumidores, contribuindo para uma dieta equilibrada e apoiando a saúde cardiovascular e óssea (CHAKRABORTY et al., 2022a; SULERIA et al., 2015), além de oferecer um produto livre de resíduos de agroquímicos.

Os teores de N, P, K, Ca e Mg adequados nas folhas e bulbos das cebolas demonstram o potencial do SPDH para a redução do uso de insumos caros e potencialmente poluidores (FAYAD et al., 2018, 2019), alinhando-se com princípios da Lei Federal nº 6.938/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente), que visa à preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental. A eficácia do SPDH agroecológico de longo prazo na nutrição da cebola corrobora com estudos em outros contextos. O cultivo de cebola em sistemas agroflorestais na Índia (BHARDWAJ et al., 2021), agricultura orgânica na Coreia do Sul (LEE et al., 2012) e agricultura conservativa na Etiópia (BELAY et al., 2022) reforçam a viabilidade e eficácia na promoção de sistemas agrícolas produtivos que integram a conservação do solo.

6.5 ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

A atividade enzimática total do solo apresentou variações significativas entre os tratamentos e períodos de amostragem (Tabela 7). O tratamento T5 se destacou por demonstrar as maiores médias de forma mais consistente ao longo do experimento. Os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram variações nos grupos estatísticos ao longo dos períodos, ora no grupo superior, ora no grupo intermediário, enquanto T8 apresentou os menores valores.

Tabela 7 - Atividade enzimática total (Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína) do solo manejado em SPDH com diferentes composições de sucessão de culturas com plantas de cobertura de inverno e verão para a produção agroecológica de cebolas.

Tratamentos*	Inverno	Bulbificação	Colheita	Verão	Inverno	Bulbificação	Colheita
	----- mg g ⁻¹ hora ⁻¹ -----						
	2022				2023		
T1	17,25 aA	18,64 bA	8,39 bC	7,07 aC	13,77 bB	14,36 aB	10,01 bC
T2	14,17 aB	18,10 bA	8,82 bD	8,94 aD	15,97 aB	11,85 bC	11,08 bC
T3	13,99 aB	19,94 aA	11,65 aC	8,77 aC	16,01 aB	11,42 bC	9,57 bC
T4	10,36 bB	16,06 bA	11,63 aB	7,69 aC	15,44 aA	11,54 bB	10,98 bB
T5	12,64 aC	21,57 aA	13,40 aC	9,14 aD	16,98 aB	13,87 aC	13,97 aC
T6	10,65 bC	18,59 bA	11,64 aB	7,58 aD	12,25 bB	10,23 cC	13,98 aB
T7	9,31 bC	17,65 bA	14,41 aB	5,48 aD	13,33 bB	8,99 cC	11,58 bB
T8	7,77 bB	11,82 cA	9,79 bA	6,60 aB	10,78 bA	6,81 dB	13,26 aA
CV** (%)	22,0						

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) e maiúsculas entre colunas (períodos) para Scott-Knott ($p < 0,05$).

No inverno de 2022, T1, T2, T3 e T5 apresentaram os maiores valores de atividade enzimática. Durante a bulbificação de 2022, T3 e T5 apresentaram os maiores valores. Observou-se uma tendência geral de redução na atividade enzimática do inverno de 2022 para o verão de 2023, seguida por um aumento no inverno de 2023. A flutuação sazonal ocorre pela alteração na disponibilidade de matéria orgânica e resíduos de culturas, além das condições climáticas, fatores que influenciam diretamente a atividade microbiológica (ZAGO et al., 2016).

Os tratamentos com leguminosas apresentaram valores de DAF até 20% superiores em comparação com tratamentos sem leguminosas. Além da capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e à sua produção de biomassa rica em nutrientes, as leguminosas apresentam uma baixa relação C/N em seus resíduos, o que promove uma decomposição e disponibilização de nutrientes mais rápida para a microbiota do solo (PERRONE et al., 2020). A diversidade de culturas, por sua vez, contribuiu para uma maior variedade de exsudatos radiculares e resíduos vegetais, estimulando uma comunidade microbiana mais diversa e ativa (BLESCH, 2018). A inclusão de leguminosas e a diversificação de culturas eleva a biomassa microbiana e a atividade enzimática do solo (BALOTA; CHAVES, 2010; GRACIANO et al., 2023; PIRES et al., 2020).

Os tratamentos com plantas espontâneas (T4 e T8) apresentaram resultados variáveis ao longo do experimento. T4 frequentemente não diferiu dos tratamentos com plantas de cobertura, enquanto T8 tendeu a apresentar valores inferiores aos demais tratamentos. O pousio

com plantas espontâneas pode ser menos consistente na promoção da atividade enzimática (SIMON et al., 2017), já o manejo de plantas espontâneas no SPDH pode resultar em atividade enzimática e microbiológica semelhantes ou superiores ao manejo com plantas de cobertura de inverno (SOUZA et al., 2020).

Em 2023, um evento climático extremo foi registrado, com um volume excepcional de precipitação em novembro (467,40 mm, Figura 2), coincidindo com o final do ciclo da cebola. Este evento influenciou a atividade enzimática e a produtividade da cultura. Apesar disso, quando comparado ao SPC, o SPDH demonstra melhor estruturação do solo (GIUMBELLI et al., 2020), maior capacidade de infiltração e retenção de água (LOSS et al., 2017) e aumento da diversidade biológica, que consequentemente contribui para a resiliência a eventos climáticos extremos (COMIN et al., 2024). Kaye e Quemada (2017) reforçam que plantas de cobertura de inverno aumentam o sequestro de carbono, melhoram a retenção de nutrientes e reduzem riscos de erosão em eventos de precipitação extrema.

Esses resultados ressaltam a importância de práticas agrícolas conservacionistas, como o SPDH, na mitigação dos impactos de eventos climáticos extremos. Contudo, é fundamental reconhecer que ecossistemas naturais, como florestas, oferecem níveis ainda mais elevados de resiliência e serviços ecossistêmicos. Ferreira, Stone e Martin-Didonet (2017), observaram que solos de floresta apresentaram valores de DAF superiores aos de plantio direto e convencional, ressaltando a importância ecológica das áreas florestais. Embora o SPDH não alcance os níveis de atividade biológica observados em solos florestais, representa um avanço significativo em direção a práticas agrícolas mais sustentáveis, que buscam conciliar a produção de alimentos com a conservação dos recursos naturais (FAYAD et al., 2019).

6.6 PRODUTIVIDADE DA CEBOLA

Na safra de 2022 a maioria dos tratamentos (T1 a T6) apresentou produtividades equivalentes e elevadas (Tabela 8), superando a média da produção convencional estadual de 28,5 Mg ha⁻¹ (IBGE, 2022). As diferentes composições de sucessão de plantas de cobertura avaliadas foram eficazes na promoção da produtividade da cebola agroecológica em SPDH. A safra de 2023 foi caracterizada pelo evento climático extremo em novembro, coincidindo com o período de colheita e afetando significativamente a produção estadual (EPAGRI/CEPA, 2023b). Nesta safra, T1 apresentou produtividade de 26,28 Mg ha⁻¹, 21,8% acima da média estadual (21,58 Mg ha⁻¹) (IBGE, 2023), e não diferiu de T2, T3, T4 e T5. Estes tratamentos, demonstraram produtividade média de 23,92 Mg ha⁻¹, o que reforça que as diferentes

composições do manejo em SPDH para o cultivo de cebola são tão eficientes quanto o manejo convencional no aspecto de produtividade.

Tabela 8 - Produtividade da Cebola em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças Agroecológico com Diferentes Composições de Sucessão de Cultivos com Plantas de Cobertura de Inverno e Verão nas Safras de 2022 e 2023.

Tratamentos*	Produtividade Safra 2022		Produtividade Safra 2023	
	Total	Comercial	Total	Comercial
T1	36,40 aA	34,30 aB	26,28 aA	24,03 aB
T2	37,27 aA	35,08 aA	22,54 aA	20,16 aA
T3	38,05 aA	36,74 aA	24,91 aA	23,19 aA
T4	36,15 aA	35,11 aA	20,99 aA	19,17 aB
T5	37,53 aA	36,69 aB	26,05 aA	23,94 aB
T6	36,33 aA	34,52 aA	16,69 bA	15,05 bB
T7	31,16 bA	30,72 bA	22,77 aA	20,71 aA
T8	25,02 cA	24,61 cA	12,69 bA	10,69 bB
CV** (%)	18,1	17,1	25,3	28,4

*Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho.

**CV: coeficiente de variação. Letras minúsculas iguais não diferem entre si entre as linhas (tratamentos) e maiúsculas entre colunas (total e comercial em cada ano) para Scott-Knott ($p < 0,05$).

O SPDH agroecológico demonstrou capacidade de manter produtividades competitivas sob condições climáticas adversas devido a melhorias nas propriedades físicas do solo, como maior capacidade de infiltração e retenção de água (GIUMBELLI et al., 2020; LOSS et al., 2015, 2017). Esta resiliência tem implicações práticas relevantes aos agricultores, já que a adoção das práticas de manejo que caracterizam o SPDH podem contribuir na mitigação de riscos associados à mudanças climáticas (KAYE; QUEMADA, 2017), que tornarão cada vez mais frequentes os eventos climáticos extremos no estado de Santa Catarina (FERREIRA et al., 2023).

O tratamento T8 consistentemente apresentou as menores produtividades em ambas as safras, também relatado por Souza et al. (2021). Por outro lado, a performance de T4 nas duas safras sugere que o SPDH com plantas espontâneas no inverno deve ser estudada, pois também pode demonstrar produtividades equiparáveis aos tratamentos com plantas de cobertura de inverno comerciais.

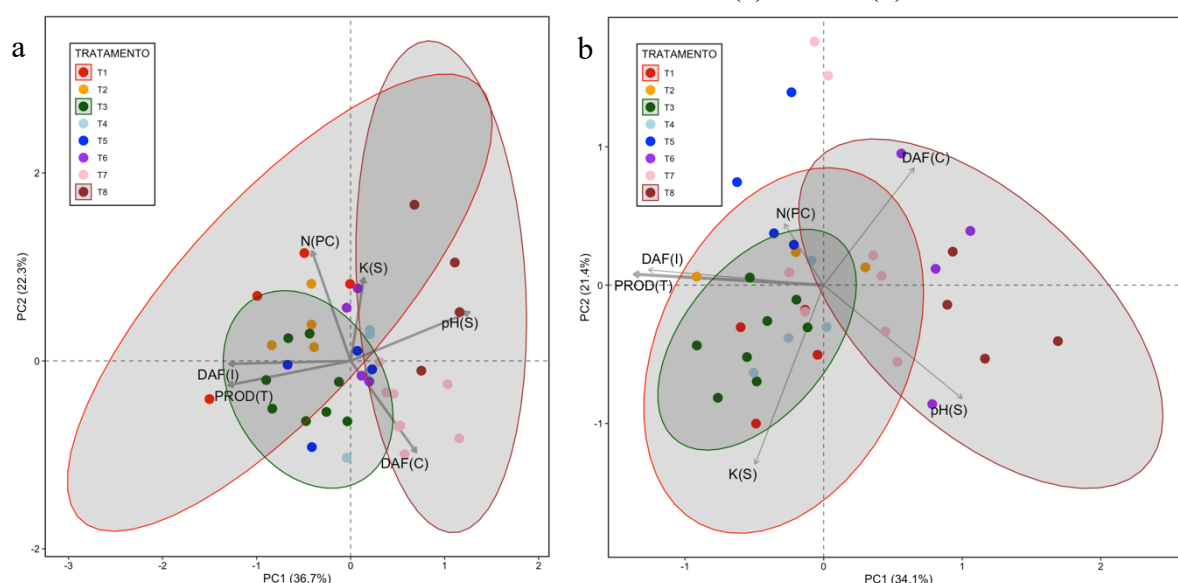
A evolução da produtividade da cebola no SPDH com manejo agroecológico ao longo de 14 anos demonstra o potencial deste sistema para melhorar a qualidade do solo e aumentar o rendimento das culturas. A produtividade aumentou de 10-13 Mg ha⁻¹ no primeiro ano (2009)

para 36,15-38,05 Mg ha⁻¹ em 2022, superando a média de cultivos convencionais de 20-35 Mg ha⁻¹ (SOUZA et al., 2021). Este incremento de aproximadamente 33,41% desde 2016 (21,85 Mg ha⁻¹) pode ser atribuído à melhoria contínua dos indicadores de qualidade do solo, incluindo propriedades físicas (LOSS et al., 2017), químicas (COMIN et al., 2018b; FERREIRA et al., 2018; LOSS et al., 2020) e biológicas (BORTOLINI et al., 2021; SOUZA et al., 2020).

6.7 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

Os indicadores selecionados para análise de PCA foram agrupados em dois componentes principais e explicaram 59% da variância total (PC1: 36,7%; PC2: 22,3%) na safra de 2022 (Figura 4 a) e 55,5% da variância total (PC1: 34,1%; PC2: 21,4%) na safra de 2023 (Figura 4 b).

Figura 4 - Diagrama de ordenação baseado na análise de componentes principais (PCA) de variáveis selecionadas dos indicadores de qualidade do solo e plantas no cultivo agroecológico de cebola em SPDH com sucessão de culturas com plantas de cobertura de inverno e verão nas safras de 2022 (a) e 2023 (b).



Tratamentos representam a composição da sucessão de culturas ao longo do tempo (inverno/primavera-verão/verão). T1: aveia-preta/cebola/mucuna; T2: nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T3: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/mucuna; T4: plantas espontâneas/cebola/mucuna; T5: aveia-preta/cebola/soja; T6: nabo-forrageiro/cebola/milheto; T7: aveia-preta+nabo-forrageiro/cebola/feijão; T8: plantas espontâneas/cebola/milho. N(PC): teor de N acumulado nas plantas de cobertura; K(S): teor de K disponível no solo; pH(s): pH_{7,0} em água do solo; DAF(I): teor da hidrólise de DAF no inverno (acamamento das plantas de cobertura); DAF(C): teor da hidrólise de DAF na colheita das cebolas; PROD(T): produtividade total de bulbos de cebola.

Os tratamentos T1 e T3 mostraram forte associação com a produtividade total e a atividade enzimática no inverno, sugerindo que estas composições de sucessão de cultivos

promovem sinergicamente a produtividade da cebola e a atividade biológica do solo. Em contraste, T8 apresentou maior variabilidade e associação com pH do solo e atividade enzimática na colheita, indicando um padrão distinto de influência sobre as propriedades do solo. A proximidade entre o teor de N nas plantas de cobertura (N (PC)) e T1, T2 reforça a eficácia destes tratamentos na ciclagem de nitrogênio. O diagrama de ordenação reforça que diferentes composições de plantas de cobertura podem modular de forma diferenciada os parâmetros de fertilidade do solo, atividade biológica e produtividade da cebola. Plantas de cobertura como a aveia-preta e o nabo-forrageiro possuem maior capacidade de ciclagem de P e K em sistemas de plantio direto sem revolvimento do solo em área total de longo prazo, quando comparadas ao pousio com plantas espontâneas (SOUZA et al., 2021; TIECHER et al., 2017).

A aveia-preta é reconhecida como planta de cobertura pela alta capacidade de produção de matéria seca, qualidade de seu resíduo e estímulo da microbiota do solo (BORTOLINI et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2016; TIECHER et al., 2017). O cultivo de aveia-preta solteira e seu consórcio com o nabo-forrageiro proporcionam uma matéria seca com relação C/N em torno de 19 e 17, respectivamente. Esta biomassa acamada na superfície do solo tem uma decomposição lenta com mineralização gradual durante o ciclo da cebola (OLIVEIRA et al., 2016). Avaliando a decomposição, liberação de nutrientes pelas plantas de cobertura e produtividade das cebolas na mesma área experimental, Oliveria et al. (2016) e Souza et al. (2021) demonstraram que a biomassa superficial nos tratamentos com plantas espontâneas permanece por menos tempo e libera uma quantidade de nutrientes inferior quando comparados aos tratamentos com plantas de cobertura, resultando em menores produtividade de cebola. A matéria seca superficial gerada no inverno pelo nabo-forrageiro em T2 demonstra relação C/N e lignina/N com maiores quantidades de N e taxa de mineralização mais alta, com decomposição mais rápida nos primeiros 15-20 dias (MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016).

7 CONCLUSÃO

As diferentes composições de sucessão de culturas no SPDH agroecológico são capazes de manter a fertilidade solo após 14 anos de manejo, inclusive as com plantas espontâneas no inverno. Os tratamentos que incluem consórcios de plantas de cobertura, especialmente aveia-preta e nabo-forrageiro (T3), e aqueles com leguminosas no verão (T1, T2, T3, T5), apresentam consistentemente desempenho superior em termos de atividade enzimática

do solo, acúmulo de nutrientes e produtividade da cebola. A análise de componentes principais corrobora estas observações, revelando fortes associações entre estes tratamentos, a atividade microbiológica do solo e a produtividade. Estes resultados validam a viabilidade agrônômica do SPDH agroecológico, oferecendo um sistema agrícola consolidado para a produção sustentável de cebola.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstram que o cultivo de plantas de cobertura de inverno, principalmente quando em policultivo, exerce um impacto positivo significativo nos indicadores microbiológicos de qualidade do solo em um agroecossistema manejado em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças agroecológico. A atividade enzimática total do solo foi constantemente superior no tratamento com aveia, cebola e soja (T5). Ainda, a fertilidade do solo foi aprimorada, promovendo uma ciclagem eficiente de nutrientes essenciais, o que, por sua vez, melhorou o estado nutricional e o rendimento das plantas de cebola (*Allium cepa* L.).

Esses achados reforçam a importância do SPDH agroecológico para a sustentabilidade de sistemas agrícolas. A implementação de policultivos de plantas de cobertura beneficia os indicadores de qualidade do solo. Recomenda-se a adoção dessas práticas - contextualizadas às condições ambientais, sociais e econômicas dos interessados - para garantir a saúde do solo e a produtividade a longo prazo, em apoio a sistemas agrícolas mais resilientes e adaptados às mudanças climáticas.

Estudos futuros poderiam explorar o potencial de resiliência do sistema perante a eventos climáticos extremos, visto que na safra de 2023, a maioria dos tratamentos estudados manteve uma produtividade média de bulbos superior à média estadual na mesma safra. O SPDH poderia, assim, ser uma estratégia de adaptação às mudanças climáticas aos sistemas agrícolas convencionais de produção de cebola.

REFERENCIAS

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; JOHNSON, J. M. F. Simultaneous determination of β -glucosidase, β -glucosaminidase, acid phosphomonoesterase, and arylsulfatase activities in a soil sample for a biogeochemical cycling index. **Applied Soil Ecology**, v. 142, p. 72–80, 1 out. 2019.
- ADAM, G.; DUNCAN, H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 7–8, p. 943–951, jun. 2001.
- ADELEKE, R.; NWANGBURUKA, C.; OBOIRIEN, B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. **South African Journal of Botany**, v. 108, p. 393–406, jan. 2017.
- ALINEJADIAN-BIDABADI, A.; MALEKI, A.; ROSHANIYAN, M. The impact of tillage systems and crop residues on microbial mass and soil structure stability indices. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 19, n. 1, 2021.
- ALKORTA, I. et al. Soil Enzyme Activities as Biological Indicators of Soil Health. **Reviews on environmental health**, v. 18, n. 1, p. 65–73, 2003.
- ALTIERI, M. A. et al. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 35, n. 8, p. 855–869, out. 2011.
- ALTIERI, M. A. et al. **Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agronomy for Sustainable Development** Springer-Verlag France, , 26 jul. 2015.
- ALTIERI, M. A. Designing sustainable agroecosystems. Em: **Agroecology: the science of sustainable agriculture**. [s.l.] Taylor & Francis Group, 2018.
- ALTIERI, M. A. et al. **Agroecology: The science of sustainable agriculture**. Second Edition ed. [s.l.] CRC Press, 2018.
- AMADORI, C. et al. Soil organic matter fractions in an Oxisol under tillage systems and winter cover crops for 26 years in the Brazilian subtropics. **Bragantia**, v. 81, 2022.
- AMUNDSON, R. et al. **Soil and human security in the 21st century**. ScienceAmerican Association for the Advancement of Science, , 8 maio 2015.
- ASSIS, R. L. DE; FREITAS, R. S. DE; MASON, S. C. Pearl millet production practices in Brazil: A review. **Experimental Agriculture**, v. 54, n. 5, p. 699–718, 1 out. 2018.
- BACKES, C. et al. Determination of growth and nutrient accumulation in bella vista onion. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 1, p. 246–254, 2018.
- BAI, Z. et al. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 265, p. 1–7, 1 out. 2018.

BALOTA, E. L.; CHAVES, J. C. D. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1574–1583, 2010.

BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil enzyme activities as indicators of soil quality**, v. 31, p. 1471–1479, 1999.

BANDYOPADHYAY, S.; MAITI, S. K. **Different Soil Factors Influencing Dehydrogenase Activity in Mine Degraded Lands—State-of-Art Review**. **Water, Air, and Soil Pollution** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 set. 2021.

BATISTA, K. M.; MILIOLI, G.; CITADINI-ZANETTE, V. Saberes tradicionais de povos indígenas como referência de uso e conservação da biodiversidade: considerações teóricas sobre o povo Mbya Guarani. **Ethnoscientia**, v. 5, n. 1, 28 fev. 2020.

BELAY, S. A. et al. Conservation and Conventional Vegetable Cultivation Increase Soil Organic Matter and Nutrients in the Ethiopian Highlands. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 3, 1 fev. 2022.

BETTONI, M. M. et al. Export and nutrient partitioning in organic onion. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 683–690, 2016.

BHARDWAJ, A. et al. Optimization of onion planting time and variety under Populus deltoides-based agroforestry system in North-Western India. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 3, p. 533–546, 1 mar. 2021.

BHARDWAJ, A. K. et al. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 140, n. 3–4, p. 419–429, mar. 2011.

BITTENCOURT, H. V. H. et al. Effect of winter cover crop biomass on summer weed emergence and biomass production. **Journal of Plant Protection Research**, v. 53, n. 3, p. 248–252, 2013.

BŁAEWICZ-WONIAK, M. et al. The influence of conservation tillage on the mineral elements content in soil and chemical composition of onion. **Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus**, v. 7, n. 2, p. 61–72, 2008.

BLANCO-CANQUI, H. et al. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2449–2474, 2015.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164–200, set. 2018.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. **Cover crop impacts on soil physical properties: A review**. **Soil Science Society of America Journal** John Wiley and Sons Inc, , 1 set. 2020.

BLESH, J. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 1, p. 38–48, 9 jan. 2018.

BOARETTO, A. E. et al. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. Em: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de Análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa, 1999. p. 50–73.

BORTOLINI, J. G. et al. Soil Carbon, Glomalin, And Aggregation in Onion Crop Under No-Tillage with Cover Crops or Conventional Tillage Systems for Eight Years. **Journal of Agricultural Studies**, v. 9, n. 2, p. 130, 26 jan. 2021.

BRASIL. **Ministério da agricultura, do abastecimento e da reforma agrária. Portaria n. 529 de 18 de ago. 1995**. Brasília Diário Oficial da República Federativa do Brasil, , 1 set. 1995.

BRASIL. **Guia alimentar para a população brasileira**. Brasília, DF: [s.n.].

BRUNETTO, G. et al. Mobility of copper and zinc fractions in fungicide-amended vineyard sandy soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 5, p. 609–624, maio 2014.

BURNS, R. G. et al. **Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions**. **Soil Biology and Biochemistry**, mar. 2013.

BURNS, R. G.; DICK, R. P. **Enzymes in the Environment**. [s.l.] CRC Press, 2002.

CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, out. 2013.

CALEGARI, A. **Manual Técnico de Plantas de Cobertura**. [s.l.: s.n.].

CARDOSO JÚNIOR, C. D. et al. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e futuras pesquisas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e55711225999, 5 fev. 2022.

CARVALHO, M. L. et al. **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo - USP, 2022.

CHAHAL, I. et al. Long-term effects of crop rotation, tillage, and fertilizer nitrogen on soil health indicators and crop productivity in a temperate climate. **Soil and Tillage Research**, v. 213, p. 105121, set. 2021.

CHAKRABORTY, A. J. et al. Allium cepa: A Treasure of Bioactive Phytochemicals with Prospective Health Benefits. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2022, p. 1–27, 18 jan. 2022a.

CHAKRABORTY, P. et al. Does the duration of no-till implementation influence depth distribution of soil organic carbon, hydro-physical properties, and computed tomography-derived macropore characteristics? **Soil and Tillage Research**, v. 222, 1 ago. 2022b.

CHAVARRÍA, D. N. et al. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Soil Biology**, v. 76, p. 74–82, 1 set. 2016.

CHENG, F. et al. Soil Microbial Biomass, Basal Respiration and Enzyme Activity of Main Forest Types in the Qinling Mountains. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, 28 jun. 2013.

COMIN, J. J. et al. Avaliação fitossociológica de plantas invasoras em cultivo de cebola sob sistema plantio direto sem uso de agrotóxicos. **Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata**, v. 117, n. 2, p. 197–206, 2018a.

COMIN, J. J. et al. Carbon and nitrogen contents and aggregation index of soil cultivated with onion for seven years using crop successions and rotations. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 195–202, 1 dez. 2018b.

COMIN, J. J. et al. **Guia prático de avaliação participativa da qualidade do solo em Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH)**. 2. ed. Florianópolis, SC: UFSC, 2020.

COMIN, J. J. et al. Soil Health in No-tillage Vegetable Production Systems-SPDH. Em: CHERUBIN, M. R.; MENDES, I. C. (Eds.). **Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil**. 3. ed. [s.l.] Access, 2024. p. 208–235.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Thematic Strategy for Soil Protection**. Brussels: [s.n.].

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, v. 129, p. 40–47, maio 2013.

CONCOSTRINA-ZUBIRI, L. et al. Biological soil crusts greatly contribute to small-scale soil heterogeneity along a grazing gradient. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 64, p. 28–36, set. 2013.

CQFS-RS/SC, C. DE Q. E F. DO S. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. [s.l.: s.n.].

DAROLT, M. R.; ROVER, O. J. **Circuitos curtos de comercialização, agroecologia e inovação social**. Florianópolis, SC: Estúdio Semprelo, 2021.

DAS, B.; KANDPAL, B. K.; DEVI, H. Cover Crops for Orchard Soil Management. Em: **Cover Crops and Sustainable Agriculture**. 1. ed. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2021. p. 147.

DAS, S. K.; VARMA, A. Role of enzymes in maintaining soil health. Em: SHUKLA, G.; VARMA, A. (Eds.). **Soil biology**. Soil enzymology ed. [s.l.] Springer, 2011. v. 22p. 25–42.

DAVIS, A. S. et al. Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. **PLoS ONE**, v. 7, n. 10, p. e47149, 10 out. 2012.

DELGADO-BAQUERIZO, M. et al. Plants and biological soil crusts modulate the dominance of N forms in a semi-arid grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 2, p. 376–378, fev. 2010.

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo convencionista do solo.** [s.l.] Fundação Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1991.

DÍAZ-PÉREZ, J. C.; DA SILVA, A. L. B. R.; VALDEZ-AGUILAR, L. A. Seasonal plant growth, leaf and bulb mineral nutrients, and bulb yield and quality under chemical, mixed, and organic fertilization in sweet onion (*Allium cepa* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 2, p. 153–167, 20 jan. 2022.

DICK, R. P. Soil Enzyme Activities as Indicators of Soil Quality. Em: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment.** [s.l.] Soil Science Society of America, 1994. v. 35p. 107–124.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil Enzyme Activities and Biodiversity Measurements as Integrative Microbiological Indicators. Em: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for Assessing Soil Quality.** Madison, WI: Soil Science Society of America, 1996. p. 247–271.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Significance and potential uses of soil enzymes. Em: METTING JR., F. B. (Ed.). **Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management.** New York: Marcell Dekker, Inc., 1992. p. 95–130.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. Em: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment.** Madison: SSSA, 1994. p. 1–20.

EMBRAPA. **Manual de metodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

EPAGRI. **Balanço social 2021.** Florianópolis: [s.n.].

EPAGRI/CEPA. **Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina.** Florianópolis: [s.n.].

EPAGRI/CEPA. **Boletim Agropecuário nº 127.** Florianópolis: [s.n.].

EPAGRI/CEPA. **Boletim agropecuário nº 118.** Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <<https://cepa.epagri.sc.gov.br>>.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and Mineral Nutrition of Field Crops.** [s.l.] CRC Press, 2010.

FALCÃO, J. V. et al. Qualidade do solo cultivado com morangueiro sob manejo convencional e orgânico. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 43, n. 4, p. 450–459, 2013.

FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2021.** Rome: [s.n.].

FAYAD, J. A. et al. **Sistema de Plantio Direto de Hortalças (SPDH): O cultivo da cebola.** Florianópolis: [s.n.].

FAYAD, J. A. et al. **Sistema de plantio direto de hortaliças: método de transição para um novo modo de produção**. 1. ed. São Paulo: Expressão popular, 2019. v. 1

FAYAD, J. A.; COMIN, J.; BERTOL, I. **Sistema de plantio direto de hortaliças: o cultivo do chuchu**. Florianópolis: [s.n.].

FAYAD, J. A.; COMIN, J. J.; BERTOL, I. **Sistema de Plantio Direto de Hortaliças (SPDH): Cultivo da moranga híbrida Tetsukabuto**. Florianópolis: [s.n.].

FENG, H. et al. On-farm assessment of cover cropping effects on soil C and N pools, enzyme activities, and microbial community structure. **Journal of Agricultural Science**, v. 159, n. 3–4, p. 216–226, 8 abr. 2021.

FERNANDES, M. M. H. et al. Do fallow in the off-season and crop succession promote differences in soil aggregation in no-tillage systems? **Geoderma**, v. 412, p. 115725, abr. 2022.

FERNANDO, M.; SHRESTHA, A. **The Potential of Cover Crops for Weed Management: A Sole Tool or Component of an Integrated Weed Management System?** *PlantsMDPI*, 1 fev. 2023.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Package ‘ExpDes.pt’**. , 2021.

FERREIRA, E. P. DE B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. Population and microbial activity of the soil under an agro-ecological production system. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 48, n. 1, p. 22–31, 2017.

FERREIRA, L. B. et al. Organic carbon and nitrogen contents and their fractions in soils with onion crops in different management systems. **Soil Research**, v. 56, n. 8, p. 846–855, 2018.

FERREIRA, N. C. R. et al. Projections of severe weather and the impacts on transmission line towers in Santa Catarina, Brazil, under future scenarios of global climate change. **Derbyana**, v. 44, 18 dez. 2023.

FINNEY, D. M.; WHITE, C. M.; KAYE, J. P. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 1, p. 39–52, 1 jan. 2016.

FOLEY, J. A. et al. Global Consequences of Land Use. **Science**, v. 309, p. 570–574, 2005.

FREIDENREICH, A. et al. Influence of Leguminous Cover Crops on Soil Chemical and Biological Properties in a No-Till Tropical Fruit Orchard. **Land**, v. 11, n. 6, 1 jun. 2022.

FRÎNCU, M.; DUMITRACHE, C.; DUMITRIU, A. C. Soil fertility assessment through enzyme activity. **Journal of Young Scientist**, v. III, 2015.

GAN, H.; EMMETT, B. D.; DRINKWATER, L. E. Soil management legacy alters weed-crop competition through biotic and abiotic pathways. **Plant and Soil**, v. 462, n. 1–2, p. 543–560, 1 maio 2021.

GANDÍA, M. L. et al. The influence of rainfall and tillage on wheat yield parameters and weed population in monoculture versus rotation systems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2021.

GARCÍA-GONZÁLEZ, I. et al. Legacy of eight-year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 6, p. 818–826, 1 dez. 2018.

GIACOMINI, S. J. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: II - Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 751–762, ago. 2004.

GIOVANETTI, L. K. **Diversidade de plantas espontâneas e de fungos micorrízicos arbusculares em sistema de plantio direto com cebola e culturas de cobertura micotróficas e não micotróficas**. Dissertação (mestrado)—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

GIUMBELLI, L. D. et al. Aggregation index, carbon, nitrogen, and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in soil aggregates and bulk soil cultivated with onion under crop successions and rotations. **Soil Research**, v. 58, n. 7, p. 622–635, 1 out. 2020.

GIUMBELLI, L. D. et al. Combinations of Plant Species for Rotation With Onion Crops: Effects on the Light Fraction, Carbon, and Nitrogen Contents in Granulometric Fractions of the Soil Organic Matter. **Journal of Agricultural Studies**, v. 9, n. 1, p. 202, 20 jan. 2021.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems**. [s.l.] CRC Press, 2014.

GOLUBKINA, N. et al. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi utilization in production of Allium plants. **Plants**, v. 9, n. 2, 1 fev. 2020.

GONÇALVES, P. A. DE S. et al. Relação dos nutrientes foliares com a incidência de trips nos cultivares de cebola Epagri 352 Bola Precoce e Epagri 362 Crioula Alto Vale. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 26, n. 3, p. 86–90, 2013.

GRACIANO, E. S. A. et al. Biomass and soil microbial activity in degraded pasture of *Brachiaria decumbens* after implantation of herbaceous legumes. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 02, p. 1033–1039, 2023.

GRIFFITHS, G. et al. Onions—A global benefit to health. **Phytotherapy Research**, v. 16, n. 7, p. 603–615, 30 nov. 2002.

GUO, M. **Soil health assessment and management: Recent development in science and practices**. **Soil Systems**MDPI, , 1 dez. 2021.

GUPTA, R.; RAI, A.; SWAMI, S. Soil enzymes, microbial biomass carbon and microbial population as influenced by integrated nutrient management under onion cultivation in sub-tropical zone of Jammu. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 3, p. 194–199, 2019.

HALLAMA, M. et al. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, v. 434, n. 1–2, p. 7–45, 27 jan. 2019.

HAMIDO, S. A.; KPOMBLEKOU-A, K. Cover crop and tillage effects on soil enzyme activities following tomato. **Soil and Tillage Research**, v. 105, n. 2, p. 269–274, nov. 2009.

HANDAYANI, I. P.; PRAWITO, P. Indigenous soil knowledge for sustainable agriculture. Em: LICHTFOUSE, E. (Ed.). **Sociology, organic farming, climate change and soil science**. [s.l.] Springer, 2010. p. 303–318.

HANSEN, V. et al. Towards integrated cover crop management: N, P and S release from aboveground and belowground residues. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 313, 15 jun. 2021.

HEIDARI, G.; MOHAMMADI, K.; SOHRABI, Y. Responses of soil microbial biomass and enzyme activities to tillage and fertilization systems in soybean (*Glycine max* L.) Production. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. NOVEMBER2016, 21 nov. 2016.

HIGASHIKAWA, F. S. et al. Use of Compost in Onion Cultivation under No-Tillage System: Effect on Nutrient Uptake. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 9, p. 1215–1238, 2023a.

HIGASHIKAWA, F. S. et al. Effects of the application of biochar on soil fertility status, and nutrition and yield of onion grown in a no-tillage system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 2, p. 212–227, 2023b.

HIGASHIKAWA, F. S. et al. Effects of the application of biochar on soil fertility status, and nutrition and yield of onion grown in a no-tillage system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 2, p. 212–227, 28 jan. 2023c.

HUI, R. et al. A comparative study of soil nutrient availability and enzyme activity under biological soil crusts in different erosion regions of the Loess Plateau, China. **Plant and Soil**, v. 484, n. 1–2, p. 425–440, 1 mar. 2023.

IBGE, I. B. DE G. E E. **Produção Agropecuária: Cebola em Santa Catarina**.

KARLEN, D. L. et al. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, jan. 1997.

KAYE, J. P.; QUEMADA, M. **Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. Agronomy for Sustainable Development** Springer-Verlag France, , 1 fev. 2017.

KIELING, A. DOS S. et al. Plantas de cobertura de inverno em sistema de plantio direto de hortaliças sem herbicidas: efeitos sobre plantas espontâneas e na produção de tomate. **Ciência rural**, v. 39, n. 7, p. 2207–2209, out. 2009.

KOBIERSKI, M. et al. The effect of organic and conventional farming systems with different tillage on soil properties and enzymatic activity. **Agronomy**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2020.

KOPITTKKE, P. M. et al. **Soil and the intensification of agriculture for global food security. Environment International** Elsevier Ltd, , 1 nov. 2019.

KOUCHER, L. D. P. et al. Nitrogen transfer from cover crop residues to onion grown under minimum tillage in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, 2017.

KRAUSS, M. et al. Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.

KUNZ, C. et al. Allelopathic effects and weed suppressive ability of cover crops. **Plant, Soil and Environment**, v. 62, n. 2, p. 60–66, 2016.

KURTZ, C. et al. Produtividade e conservação de cebola afetadas pela adubação nitrogenada no sistema de plantio direto. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 4, p. 559–567, dez. 2013.

KURTZ, C. et al. Crescimento e absorção de nutrientes pela cultivar de cebola Bola Precoce. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 279–288, 1 abr. 2016.

KURTZ, C.; FAYAD, J. A.; VIEIRA NETO, J. Dinâmica de crescimento e absorção de nutrientes pelo cultivar de cebola Epagri 363 Superprecoce. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 74696–74714, 2020.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 11 jun. 2004.

LAL, R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. **Food Security**, v. 1, n. 1, p. 45–57, fev. 2009.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 13 maio 2015.

LAL, R. Reducing carbon footprints of agriculture and food systems. **Carbon Footprints**, v. 1, n. 1, p. 3, 2022.

LAL, R. Farming systems to return land for nature: It's all about soil health and re-carbonization of the terrestrial biosphere. **Farming System**, v. 1, n. 1, p. 100002, abr. 2023.

LEE, J.-T. et al. Evaluation of Composted Pig Manure and Organic Fertilizer for Organic Onion Production in Paddy Soil. **Korean Journal of Horticultural Science and Technology**, v. 30, n. 2, p. 123–128, 30 abr. 2012.

LEHMANN, J. et al. **The concept and future prospects of soil health. Nature Reviews Earth and Environment** Springer Nature, , 1 out. 2020.

LI, T. et al. Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, 1 dez. 2019.

LOPES, A. A. C. et al. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72–82, 1 mar. 2018.

LOPES, A. A. DE C. et al. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461–472, mar. 2013.

LOPES, A. A. DE C. et al. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 4, p. 2193–2204, 1 dez. 2021.

LOPES, D. I. et al. Uso da mucuna-preta e vermicomposto como adubo orgânico de alface em Moçambique. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p. e17512240017, 2 fev. 2023.

LOPES, M. C.; NODA, H.; FERMIN, M. E. N. Os sistemas de manejo dos agroecossistemas do Alto Solimões - Amazonas e sua influência na fertilidade dos solos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e9310816763, 5 jul. 2021.

LOSS, A. et al. Total organic carbon and soil aggregation under a no-tillage agroecological system and conventional tillage system for onion. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1212–1224, 1 jul. 2015.

LOSS, A. et al. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 11, n. 1, p. 105–113, 1 jan. 2017.

LOSS, A. et al. Efeito da sucessão ou rotação de culturas sobre a fertilidade do solo após sete anos de cultivo com cebola. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 16587–16606, 2020.

LUPWAYI, N. Z. et al. Relating soil microbial properties to yields of no-till canola on the Canadian prairies. **European Journal of Agronomy**, v. 62, p. 110–119, jan. 2015.

MAFRA, A. L. et al. Iniciando o sistema de plantio direto de hortaliças: adequações do solo e práticas de cultivo. Em: FAYAD, J. A. et al. (Eds.). **Sistema de Plantio Direto de Hortaliças: método de transição para um novo modo de produção**. 1. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2019. v. 1p. 215–226.

MARCHESI, D. R. et al. **O cultivo da soja no método SPDH. Boletim didático** Florianópolis, SC Instituto SPDH, , 2022.

MARCONATTO, L. J.; MARCUZZO, L. L. Relação entre os nutrientes aplicados na cultura com a composição química e perdas durante o armazenamento de bulbos de cebola. **Global Science and Technology**, v. 13, n. 2, p. 28–35, 2020.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. [s.l.] Elsevier, 2012.

MARTINS, R. P. et al. Mineralização do nitrogênio de plantas de cobertura, solteiras e consorciadas, depositadas sobre um solo com histórico de cultivo de cebola. **Revista Ceres**, v. 61, n. 4, p. 587–596, 2014.

MASSON, I.; ARL, V.; WUERGES, E. W. Trajetória, concepção metodológica e desafios estratégicos junto ao sistema de plantio direto de hortaliças (SPDH). Em: FAYAD, J. A. et al. (Eds.). **Sistema de plantio direto de hortaliças: método de transição para um novo modo de produção**. 1. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2019. v. 1p. 25–37.

MBUTHIA, L. W. et al. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 89, p. 24–34, out. 2015.

MCGOWAN, R. **Papatuanuku, Earth Mother: Indigenous knowledge in 21st century soil management**. Soil Research. **Anais...CSIRO**, 1 ago. 2021.

MENDES, I. C. et al. Microbial Biomass and Activities in Soil Aggregates Affected by Winter Cover Crops. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 4, p. 873–881, jul. 1999.

MENDES, I. C. et al. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. Em: SEVERIANO, E. C.; MORAIS, M. F.; PAULA, A. M. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 399–462.

MENDES, I. DE C. et al. **Tecnologia BioAS Uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. **Documentos 369** Planaltina, DF Embrapa Cerrados, , 2021. Disponível em: <<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>>

MIHELIC, R. et al. Effects of transitioning from conventional to organic farming on soil organic carbon and microbial community: a comparison of long-term non-inversion minimum tillage and conventional tillage. **Biology and Fertility of Soils**, v. 60, n. 3, p. 341–355, 1 abr. 2024.

MITCHELL, A. E. et al. Ten-Year Comparison of the Influence of Organic and Conventional Crop Management Practices on the Content of Flavonoids in Tomatoes. 2007.

MOGHIMIAN, N. et al. Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. **Catena**, v. 157, p. 407–414, 1 out. 2017.

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: características e manejo em pequenas propriedades**. Chapecó: [s.n.].

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006.

MÜLLER JÚNIOR, V. et al. Nitrous oxide emissions in no-tillage onion (*Allium cepa* L.) crops are increased by oilseed radish cover crop and poultry manure application. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 43, 2019.

NASCENTE, A. S.; LI, Y. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, v. 130, p. 52–57, jun. 2013.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover Crops as Affecting Soil Chemical and Physical Properties and Development of Upland Rice and Soybean Cultivated in Rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340–349, nov. 2018.

NASCIMENTO, S. G. S. et al. Produção agroecológica e Segurança Alimentar e Nutricional (Brasil). **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 294–304, 2019.

NEVINS, C. J.; LACEY, C.; ARMSTRONG, S. The synchrony of cover crop decomposition, enzyme activity, and nitrogen availability in a corn agroecosystem in the Midwest United States. **Soil and Tillage Research**, v. 197, 1 mar. 2020.

NICHOLLS, C. I.; HENAO, A.; ALTIERI, M. A. Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. **Agroecologia**, v. 10, n. 1, p. 7–31, 2015.

NICOLOSO, R. DA S. et al. Adubos e adubação orgânica. Em: COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC (Ed.). **Manual de calagem e adubação: para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. [s.l.] Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016. p. 317–328.

OKSANEN, J. et al. **Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.6-6.1**, 2024.

OLIVEIRA, R. A. DE et al. Cover crops effects on soil chemical properties and onion yield. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, 23 jun. 2016.

OLIVEIRA, R. A. DE et al. Release of phosphorus forms from cover crop residues in agroecological no-till onion production. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, 2017.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; BOHRA, J. S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 51–60, mar. 2014.

PAREEK, S. et al. Onion (*Allium cepa* L.). Em: **Fruit and Vegetable Phytochemicals**. [s.l.] Wiley, 2017. p. 1145–1162.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 911–920, 2008.

PAZ-FERREIRO, J.; FU, S. Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 1, p. 14–25, 1 jan. 2016.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. **Hydrology and Earth System Sciences Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification** Hydrol. Earth Syst. Sci. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/>.

- PEREIRA, J. DE M. et al. Relationships between microbial activity and soil physical and chemical properties in native and reforested *Araucaria angustifolia* forests in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 572–586, 2013.
- PERRONE, S. et al. Nitrogen fixation and productivity of winter annual legume cover crops in Upper Midwest organic cropping systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, n. 1, p. 61–76, 6 maio 2020.
- PIRES, C. A. B. et al. Diversified crop rotation with no-till changes microbial distribution with depth and enhances activity in a subtropical Oxisol. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 6, p. 1173–1187, 1 nov. 2020.
- POZNIAK, S.; HAVRYSH, N. **People, ideas and stories of soils research: a brief overview. Soil Science Annual** Soil Science Society of Poland, , 2021.
- PRIMAVESI, A. A microbiologia do solo. Em: **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Editora Nobel, 2002a. p. 164–203.
- PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Editora Nobel, 2002b.
- QUEIROZ, L. R. et al. Supressão de plantas daninhas e produção de milho-verde orgânico em sistema de plantio direto. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 263–270, 2010.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. URL www.r-project.org. Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, , 2021.
- REDIN, M. et al. Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio. Em: TIECHER, T. (Ed.). **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.
- REEVE, J. R. et al. Organic farming, soil health, and food quality: Considering possible links. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Academic Press Inc., 2016. v. 137p. 319–367.
- REICHERT, J. M. et al. Onion-forage cropping systems on a Vertic Argiudoll in Uruguay: Onion yield and soil organic matter, aggregation, porosity and permeability. **Soil and Tillage Research**, v. 216, 1 fev. 2022.
- RESENDE, G. M. DE; COSTA, N. D.; PINTO, J. M. Rendimento e conservação pós-colheita de bulbos de cebola com doses de nitrogênio e potássio. **Horticultura Brasileira**, v. 27, n. 2, p. 139–143, 2009.
- RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 33–41, set. 2019.
- RICHARDSON, K. et al. **Earth beyond six of nine planetary boundaries**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.science.org>>.

RICHTER, J. P. **The Notebooks of Leonardo Da Vinci**. New York: Dover Publications, 1970.

RISING, J. et al. **The missing risks of climate change**. *Nature* NLM (Medline), , 1 out. 2022.

ROCKSTRÖM, J. et al. A safe operating space for humanity. *Nature* , v. 461, p. 472–475, 2009.

SÁ, J. C. DE M. et al. Carbon Depletion by Plowing and its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531–543, 14 ago. 2015.

SAHA, J. K. et al. Soil and Its Role in the Ecosystem. Em: **Soil Pollution - An emerging threat to agriculture, environmental chemistry for a sustainable world**. [s.l: s.n.]. p. 11–36.

SALUME, J. A. et al. Decomposition and nutrient release from cover crop residues under a pear orchard *Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos de culturas herbáceas num pomar de pereiras*. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, n. 1, p. 72–81, 2020.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018a.

SANTOS, L. H. DOS et al. Chemical properties in macroaggregates of a humic dystrochic cultivated with onion under no-till and conventional tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.

SANTOS, L. H. DOS et al. Carbon of humic substances in soil aggregates cultivated with onion under no-till and conventional tillage systems. **IDESIA (Chile)**, v. 36, n. 1, p. 15–25, 2018b.

SATO, T. et al. Release of acid phosphatase from extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 61, n. 2, p. 269–274, 24 dez. 2015.

SCHNÜRER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Total Microbial Activity in Soil and Litter. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 1256–1261, jun. 1982.

SEMENOV, A. M.; SEMENOVA, E. V. Soil as a Biological System and Its New Category—Health. **Biology Bulletin Reviews**, v. 8, n. 6, p. 463–471, nov. 2018.

SEMERARO, T. et al. **Impact of Climate Change on Agroecosystems and Potential Adaptation Strategies**. *Land* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jun. 2023.

SHERENE, T. Role of soil enzymes in nutrient transformation: a review. **Bio Bulletin**, v. 3, n. 1, p. 109–131, 2017.

- SIDDIQUE, I. et al. Sistema de Plantio Direto de Hortaliças em sucessão agroflorestal: Recuperação produtiva de diversos benefícios socioeconômicos e ambientais. Em: FAYAD, J. A. et al. (Eds.). **Sistema de Plantio Direto de Hortaliças: Método de transição para um novo modo de produção**. 1. ed. Florianópolis: Expressão Popular, 2019. p. 67–84.
- SIMON, C. A. et al. Microbial activity in a soil with cover crops in succession with maize in no-tillage system. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 92, n. 2, p. 198–207, 2017.
- SKADELL, L. E. et al. Twenty percent of agricultural management effects on organic carbon stocks occur in subsoils – Results of ten long-term experiments. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 356, p. 108619, out. 2023.
- SOBUCKI, L. et al. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 30 nov. 2021.
- SOUZA, M. et al. Matéria seca de plantas de cobertura, produção de cebola e atributos químicos do solo em sistema de plantio direto agroecológico. **Ciência rural**, v. 43, n. 1, p. 21–27, jan. 2013.
- SOUZA, M. et al. Weed emergence in a soil with cover crops in an agroecological no-tillage system. **Planta Daninha**, v. 36, 2018.
- SOUZA, M. et al. Phenolic compounds with allelopathic potential of secale cereale l. And raphanus sativus l. grown under an agroecological no-tillage system. **Planta Daninha**, v. 37, 2019.
- SOUZA, M. et al. Microbial activity in soil with onion grown in a no-tillage system with single or intercropped cover crops. **Ciencia Rural**, v. 50, n. 12, p. 1–11, 2020.
- SOUZA, M. et al. Soil chemical properties and yield of onion crops grown for eight years under no-tillage system with cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 208, 1 abr. 2021.
- STRATTON, A. E. et al. Assessing cover crop and intercrop performance along a farm management gradient. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 332, 1 jul. 2022.
- SULERIA, H. A. R. et al. Onion: Nature Protection Against Physiological Threats. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 1, p. 50–66, 2 jan. 2015.
- TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. Em: WEAVER CHAIR, R. W. et al. (Eds.). **Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties**. [s.l.] Soil Science Society of America, 1994. p. 775–833.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 5. ed. [s.l.] Sinauer Associates, Inc., 2010.
- TANG, H. M. et al. Effects of winter cover crops residue returning on soil enzyme activities and soil microbial community in double-cropping rice fields. **PLoS ONE**, v. 9, n. 6, 23 jun. 2014.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TEIXEIRA, M. B. et al. Decomposição e ciclagem de nutrientes dos resíduos de quatro plantas de cobertura do solo. **IDESIA (Chile)**, v. 30, n. 1, p. 55–64, 2012.

THAPA, V. R. et al. Cover crop biomass and species composition affect soil microbial community structure and enzyme activities in semiarid cropping systems. **Applied Soil Ecology**, v. 157, 1 jan. 2021.

TIECHER, T. et al. Cover Crops Affecting Soil Phosphorus Dynamic in Brazilian Highly Weathered Soils. Em: REUTER, J. (Ed.). **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**. New York: Nova publishers, 2016. p. 23–52.

TIECHER, T. et al. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78–85, dez. 2017.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R. DOS; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 124, p. 57–67, ago. 2012.

TITTARELLI, F. et al. Food Citizenship as an Agroecological Tool for Food System Re-Design. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 3, 1 fev. 2022.

TORRES, J. L. R. et al. Development and productivity of cauliflower and cabbage influenced by soil mulching types. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 4, p. 510–514, 1 out. 2015.

TYLER, H. L. Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. **Pedobiologia**, v. 81–82, 1 set. 2020.

USDA-NRCS, U. S. D. OF A.-N. R. C. S. **Soil Health**.

VALARINI, P. J. et al. Qualidade do solo em sistemas de produção de hortaliças orgânico e convencional. **Horticultura Brasileira**, v. 29, n. 4, p. 485–491, dez. 2011.

VARGAS, L. A.; PASSOS, A. M. A.; KARAM, D. Allelopathic potential of cover crops in control of shrubby false buttonweed (*Spermacoce verticillata*). **Planta Daninha**, v. 36, 2018.

VENTURA, B. S. et al. Soil phosphorus availability and uptake by mycorrhizal and non-mycorrhizal plants in an onion no-tillage system. **Ciencia Rural**, v. 51, n. 10, 2021.

VILANOVA, C. DE C. et al. Interferência de plantas e cobertura sobre a incidência de plantas invasoras e a produção de cebolas sob sistema de plantio direto. **Scientia Agraria**, v. 15, n. 1, p. 9–14, 2014.

WANG, Y. et al. Long-term cover crops improved soil phosphorus availability in a rain-fed apple orchard. **Chemosphere**, v. 275, p. 130093, jul. 2021.

WEIL, RAY. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. New York: Pearson, 2017.

WEILER, D. A. et al. Trade-off between C and N recycling and N₂O emissions of soils with summer cover crops in subtropical agrosystems. **Plant and Soil**, v. 433, n. 1–2, p. 213–225, 1 dez. 2018.

YAALON, D. H. Down to earth: why soil-and soil science-matters. **Nature**, v. 407, n. 301, 21 set. 2000.

ZAGO, L. D. M. S. et al. Enzimas extracelulares de solos de cerrado como bioindicadores de qualidade em áreas agricultáveis em Goiás, Brasil. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 5, n. 1, p. 104–127, 1 jan. 2016.

ZHANG, B. et al. Short-term effect of tillage and crop rotation on microbial community structure and enzyme activities of a clay loam soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 50, n. 7, p. 1077–1085, 23 out. 2014.

ZHENG, W. et al. Changes in the soil bacterial community structure and enzyme activities after intercrop mulch with cover crop for eight years in an orchard. **European Journal of Soil Biology**, v. 86, p. 34–41, 1 mar. 2018.