

CONTROLE DA EROSIÃO EM TEMPOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS



PRIMEIRA EDIÇÃO



Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária
Rodovia PR 540, Km 9
Colônia Vitória – Entre Rios
Telefone: (42) 3625-5098 CEP: 85.139-400
Guarapuava, PR

Capa
Sandra Mara Parreira
1ª edição
Publicação digital (2026): PDF

**Tratamento das ilustrações e
editoração eletrônica**
Everaldo Lemos Siqueira

Observação:

A Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, e os autores desta obra, eximem-se de qualquer garantia, seja expressa ou implícita, quanto ao uso das tecnologias indicadas nesta publicação. Destacam que não assumem responsabilidade por perdas ou danos, incluindo-se, mas não se limitando, a tempo e dinheiro, decorrentes do emprego das mesmas, uma vez que muitas causas não controladas em agricultura, podem influenciar no desempenho das tecnologias indicadas

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Controle da erosão em tempos de mudanças
climáticas [livro eletrônico] / [organização
Juliano Luiz de Almeida]. -- 1. ed. --
Guarapuava, PR : Ed. do Autor, 2026.
PDF

Vários autores.
Bibliografia
ISBN 978-65-02-34572-6

1. Agricultura - Aspectos ambientais
2. Erosão do solo - Controle 3. Geomorfologia -
Aspectos ambientais 4. Mudanças climáticas - Aspectos
ambientais 5. Solo - Conservação 6. Tecnologia
I. Almeida, Juliano Luiz de.

26-393056.0

CDD-631.4

Índices para catálogo sistemático:

1. Solo : Manejo : Agricultura 631.4

Camila Aparecida Rodrigues - Bibliotecária CRB -
SP-010133/O

Sumário

Apresentação	5
Prefácio	7
Sobre os autores	8

	Correção da acidez do solo em Plantio Direto	11
---	--	----

	Rotação de culturas na construção de sistemas produtivos mais resilientes às mudanças climáticas	33
---	--	----

	Cultivos outonais e de cobertura de inverno	45
---	---	----



Estratégias para
proteção contra
a erosão

55



Estradas
Internas

63



Prevenção e
estabilização de
pequenas voçorocas

69



Manejo de
Compactação

76



Semear Cortando Água:
Plantio em Nível
e Controle da Erosão

86



Apresentação

Em um cenário de mudanças climáticas cada vez mais evidentes, a conservação do solo assume papel central na sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas. Eventos extremos, como chuvas intensas e períodos prolongados de estiagem, ampliam os riscos de erosão, comprometendo a produtividade e a qualidade das lavouras. Frente a esse desafio, o conhecimento técnico aliado à prática no campo torna-se essencial.

O livro “Controle da erosão em tempos de mudanças climáticas” foi elaborado com o objetivo de divulgar tecnologias e estratégias eficazes para prevenir e mitigar a erosão do solo, contribuindo para sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e sustentáveis. Destinado aos produtores rurais cooperados da Cooperativa Agrária Agroindustrial, este material reúne conceitos técnicos e recomendações práticas fundamentadas em pesquisas, experiências de campo e nos princípios da agricultura conservacionista.

A obra está alinhada ao ciclo estratégico Atitude 5C, que reforça a importância de comportamentos proativos, orientados à solução e comprometidos com o futuro. Ao integrar a Agricultura Sustentável como diretriz transversal de seu planejamento, a Agrária reafirma sua missão de promover a prosperidade do cooperado e da comunidade, valorizando sua tradição.

As práticas agrícolas regenerativas — como a rotação de culturas, o Plantio Direto, o uso de cultivos de cobertura e o manejo adequado da compactação — são apresentadas neste livro como ferramentas fundamentais para a conservação do solo e a melhoria contínua de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Nesse contexto, as pesquisas desenvolvidas pela Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA) desempenham papel estratégico ao oferecer suporte técnico-científico para decisões mais seguras e eficientes no campo.

Dividido em capítulos, o livro oferece uma visão integrada do manejo do solo em ambientes produtivos sujeitos às pressões climáticas atuais e futuras.

Ao disponibilizar este conteúdo, a Cooperativa reafirma seu compromisso com a Agricultura Sustentável, a segurança alimentar e a construção de um futuro mais equilibrado, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Pacto Global da ONU, do qual é signatária. Mais do que um material técnico, esta obra é um convite à atitude consciente e responsável no cuidado com o solo — base do desenvolvimento da Agrária e alicerce das próximas gerações.

Adam Stemmer

Presidente do Conselho de Administração
Cooperativa Agrária Agroindustrial

Bruno Reinhofer

Presidente da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária



Prefácio

O Paraná se destaca no cenário brasileiro pela produção de alimentos, cuja demanda tem sido crescente, o que aumenta os desafios para a agricultura paranaense, uma vez que o atendimento a essa demanda deverá se dar via aumento da produtividade. Por outro lado, o Estado também se destaca na produção de energia hidráulica. Assim, é imprescindível que os recursos naturais que sustentam a agricultura e a geração de energia - o solo e a água - sejam usados e manejados de forma sustentável.

A erosão hídrica é a causa mais importante da degradação dos solos agrícolas e da contaminação dos mananciais de águas de superfície no Estado do Paraná. Este fenômeno ocorre em três fases, a saber: **desagregação** do solo pelo impacto da gota de chuva sobre a superfície do solo; **transporte** pela enxurrada das partículas de solo desagregadas; **deposição** das partículas de solo transportadas pela enxurrada. Necessário salientar que no Paraná as chuvas são de elevada erosividade, capazes de degradar os solos, mesmo os de baixa erodibilidade e independente do sistema de manejo a que estejam submetidos. Por outro lado, está comprovado mudanças no clima com a ocorrência cada vez mais frequente de chuvas intensas, com alto potencial de causar prejuízos expressivos à agricultura.

A erosão atua localmente degradando o solo e as águas e fora do local de ocorrência ao causar danos, por exemplo, no sistema viário (estradas, pontes), no abastecimento de água às populações, nas barragens e nas áreas urbanas. As consequências são prejuízos ambientais por empobrecer o solo, contaminar as águas e exigir investimentos para recuperar a capacidade produtiva do solo, recompor sistemas viários danificados e restaurar a qualidade das águas.

Para obter êxito no combate da erosão, dados de pesquisas indicam que é necessário empregar tecnologias conservacionistas, de

forma sistêmica, que sejam capazes de controlar cada uma das fases.

Nos diferentes capítulos desta obra o leitor encontrará informações que permitem planejar o emprego de tecnologias conservacionistas adequadas para o combate às diferentes fases da erosão em condições geomorfológicas distintas: *correção da acidez do solo*, também como meio de controlar a erosão, por exemplo, via o aumento da capacidade das culturas produzir massa vegetal na parte aérea e raízes, o que aumenta a proteção da superfície do solo do efeito desagregador do impacto da gota de chuva, contribuindo, assim, para o controle da primeira fase da erosão e, melhoria da qualidade estrutural do solo via o aumento do volume de raízes no interior do solo, alargando a capacidade do solo infiltrar água; *Rotação de culturas e cultivos outonais*, como estratégia para promover a cobertura do solo o ano todo e, com isso, conferir melhor qualidade ao Sistema Plantio Direto que, por sua vez, contribuirá para o controle da erosão, particularmente na sua primeira fase; *operações em nível, sistema de terraceamento, adequação das estradas internas as propriedades integradas ao sistema de terraceamento e a prevenção e estabilização de voçorocas*, medidas indispensáveis para o controle da segunda e terceira fase da erosão, que quando associadas ao Sistema Plantio Direto amplia a eficácia no controle de todas as fases da erosão; *manejo de compactação*, fenômeno de elevada ocorrência nos solos do Paraná que, entre outros danos ao solo, potencializa a erosão por reduzir a capacidade de o solo infiltrar e percolar água, devido a degradação que ocasiona à estrutura do solo, o que favorece a formação de enxurradas e altera, para pior, as etapas do ciclo hidrológico que ocorrem na superfície e sub superfície do solo.

Dr. Oromar João Bertol
Engenheiro Agrônomo

Sobre os autores

Cimélio Bayer

Professor Titular do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e pesquisador com destacada atuação em manejo e fertilidade do solo. Desenvolve pesquisas há mais de três décadas nas áreas de matéria orgânica do solo, sequestro de carbono e gases de efeito estufa em sistemas agrícolas. É referência em agricultura de baixa emissão de carbono e Sistemas conservacionistas de manejo do solo. Coordena iniciativas científicas de abrangência nacional, com forte integração entre pesquisa, inovação e políticas públicas. Possui ampla produção científica e reconhecimento na ciência do solo.



Fabiano Pacentchuk

Engenheiro Agrônomo - Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)/Universidade de Vigo (UVIGO - Espanha) (2014); Mestre em agronomia - Manejo de grandes culturas - Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) (2016); Doutor em agronomia - Manejo de grandes culturas - Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) (2021). Atualmente é pesquisador de milho e feijão (fitotecnia) da Fundação Agrária de pesquisa Agropecuária (FAPA).



Gustavo Nogara de Siqueira

Gustavo Nogara de Siqueira é engenheiro agrônomo pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) (2025) e mestrando em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atua na área de química e fertilidade do solo, com foco no manejo da calagem e adubação e na dinâmica de nutrientes em diferentes sistemas de cultivo. Natural de Independência, RS.



Juliano Luiz de Almeida

Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal do Paraná (1987), mestrado em Melhoramento de Plantas - Texas A&M University (1994) nos EUA, doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Federal do Paraná (2006) e pós-doutorado em Química de Cereais pela Katholieke Universiteit Leuven (2013) na Bélgica. Atualmente é pesquisador da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária - FAPA. Tem experiência na área de agronomia, com ênfase em melhoramento vegetal e fitotecnia, focando as atividades nos últimos anos em melhoramento vegetal, experimentação, manejo e tratos culturais de cereais e oleaginosas de inverno, difusão de tecnologias agrícolas e atendimento de especificações de qualidade das indústrias processadoras de trigo, aveia, triticale, centeio, canola e carinata. A partir de 2025 assumiu a pesquisa de lúpulo.



Glaucio Roloff

Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal do Paraná (1976), mestrado em Agronomy - University of Missouri System (1978), doutorado em Soil Science - University of Minnesota (1987) e pós doutorado em Environmental Modelling - Eastern Cereal and Oilseeds Research Center (Canada). Atualmente é Professor Titular aposentado da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) e técnico sênior do Grupo GEOSOL. Tem experiência e atuação nos seguintes temas: conservação do solo, modelos de simulação de erosão, da hidrologia e da qualidade da água em encostas e bacias, e em agricultura de precisão aplicada aos diversos ambientes agrícolas.



Vitor Muller Anunciato

Doutor em Proteção de plantas pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), com período de pesquisa realizado na University of Nebraska-Lincoln (EUA). Mestre em Proteção de plantas com ênfase em matologia também pela FCA UNESP, possui graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual de Londrina (UEL) e especialização em Gestão de Territórios e Meio Ambiente pela École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEE), na França. Atualmente, atua como Pesquisador em Mecanização Agrícola e Inovações Tecnológicas na Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA).

Junior Kopp

Junior Kopp possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) e mestrado em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde atualmente é doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Atua como pesquisador na área de Ciência do Solo, com ênfase em manejo do solo e sistemas conservacionistas. Suas linhas de pesquisa incluem dinâmica do carbono do solo, emissões de gases de efeito estufa, qualidade do solo, sistemas integrados de produção e intensificação sustentável de sistemas agrícolas.



Lucas Aquino Alves

Engenheiro Agrônomo formado pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com Mestrado e Doutorado em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente é Professor do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI), campus de Frederico Westphalen. Atua na área de Química e Fertilidade do Solo, com ênfase no manejo e na correção da acidez do solo, bem como na recomendação e no uso de fertilizantes em sistemas agrícolas e pecuários.



Sandra Mara Vieira Fontoura

Possui graduação em Agronomia pela Universidade do Estado de Santa Catarina e mestrado em Ciência do Solo pelo Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná. Foi professora da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC entre os anos 1995 e 1997. Atualmente é pesquisadora da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária - FAPA na área de manejo e fertilidade do solo, sendo responsável pelo desenvolvimento de inúmeros projetos ao longo dos anos. É consultora científica, co-orientadora de estudantes de mestrado e doutorado e possui livros e trabalhos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais na sua área de atuação. Em 2022 recebeu o Prêmio Engenheira Enedina Marques, concedido pelo CREA-PR, como destaque na área de engenharia do estado do Paraná.



Gustavo Pesini

Engenheiro Agrônomo pela UFRGS, mestre em Ciência do Solo pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da mesma instituição e atualmente doutorando no mesmo programa. Professor no Departamento de Ciências Agrárias da URI-FW.



Tales Tiecher

Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com Mestrado e Doutorado em Ciência do Solo pela mesma instituição, incluindo período de co-tutela com a Universidade de Poitiers, França, onde também obteve o título de Doutor em Ciências da Terra. Realizou Pós-Doutorado na North Carolina State University (EUA) em 2022. Foi Professor do Departamento de solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) de 2016 a 2026. Atualmente é Pesquisador da Embrapa Pecuária Sul e docente permanente e orientador de mestrado e doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da UFRGS. É Pesquisador Nível 2 do CNPq e exerceu a coordenação do PPGCS entre 2023 e 2025. Já atuou como Diretor-Presidente do Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2019-2020). Desenvolve pesquisas na área de Ciência do Solo, com ênfase na dinâmica da acidez e de nutrientes no solo, bem como na transferência de sedimentos, nutrientes e contaminantes para os corpos aquáticos.



Ricardo Ralisch

Ricardo Ralisch foi Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina (UEL), com doutorado em Energia na Agricultura pela UNESP. Dedicou-se há mais de duas décadas ao estudo da física do solo, compactação e sistemas de manejo conservacionistas. É um dos pioneiros na introdução do método VESS no Brasil e na concepção do DRES. Coordenou projetos de pesquisa sobre qualidade física de solos sob diferentes sistemas de produção.



Wilson Arikita

Wilson Arikita é sócio-proprietário da WSA Tecnologia e especialista em geotecnologias aplicadas. Possui especialização em Geoprocessamento realizada em Fort Wayne, Indiana (EUA), e especialização no software de processamento geoespacial TNTmips pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). É Tecnólogo graduado pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Atualmente, lidera o desenvolvimento de soluções tecnológicas e inteligência geográfica, com foco no processamento de dados e suporte estratégico para o setor agroindustrial.



Correção da acidez do solo em Plantio Direto

.....

Lucas Aquino Alves¹, Sandra Mara Vieira Fontoura²,
Gustavo Pesini³, Junior Kopp⁴, Cimélio Bayer⁵, Tales Tiecher⁶

¹Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Regional Integrada. Rua Assis Brasil 709, Frederico Westphalen, RS, Brasil. CEP: 98400-000. Email: lucasaquinoalves.laa@gmail.com

²Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. Rodovia PR 540, Km 9, Colônia Vitória, Distrito de Entre Rios, Guarapuava, Paraná, Brasil. CEP: 85.139-400. Email: juliano@agraria.com.br

³Departamento de Ciências Agrárias. Universidade Regional Integrada. Rua Assis Brasil 709, Frederico Westphalen, RS, Brasil. CEP: 98400-000. Email: pesinig37@gmail.com

⁴Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 7712, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil. CEP: 91540-000. Email: ajr.kopp@gmail.com

⁵Departamento de Solos. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 7712, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil. CEP: 91540-000. Email: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁶Embrapa Pecuária Sul. Rodovia BR-153, Km 632,9, Vila Industrial (Zona Rural), Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil. CEP 96401-970. Email: tales.tiecher@embrapa.br

~~~~~



## **I**ntrodução

As práticas de manejo do solo e a correção da acidez são determinantes para a manutenção da produtividade agrícola em regiões tropicais e subtropicais (FAO, 2015). A acidez do solo, caracterizada por baixos valores de pH, elevada disponibilidade de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e redução na disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo (P), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), limita o crescimento radicular e compromete o desempenho das culturas (Osman, 2018; Hao et al., 2020; Rahman e Upadhyaya, 2021).

Além dos efeitos sobre a produtividade, o manejo da acidez do solo está diretamente relacionado à dinâmica do carbono (C), acesso a água e nutrientes no perfil do solo e aos processos associados às mudanças climáticas. Solos com limitações químicas tendem a restringir o desenvolvimento radicular e o aporte de resíduos vegetais, reduzindo assim o volume de solo utilizado para absorver água e o potencial de acúmulo e estabilização de C no perfil. Nesse sentido, práticas que promovem a correção da acidez podem contribuir simultaneamente para o aumento da produtividade e para o sequestro de C no solo (Briedis et al., 2012; Inagaki et al., 2016; Kopp et al., 2026).

A calagem é a principal estratégia utilizada para a correção da acidez do solo, sendo amplamente adotada por sua eficiência na elevação do pH, redução da toxicidade por  $\text{Al}^{3+}$  e fornecimento de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  às culturas (Rheinheimer et al., 2018; Holland et al., 2018; 2019; Li et al., 2019; Hale et al., 2020; Campos et al., 2022). No entanto, em sistemas de plantio direto (PD), a aplicação superficial de calcário pode limitar a correção da acidez em subsuperfície, o que tem implicações tanto para o crescimento radicular quanto para o acúmulo de C em profundidade.

O PD é amplamente reconhecido como uma estratégia conservacionista capaz de melhorar a qualidade do solo e contribuir para o sequestro de C, principalmente pela redução da perturbação do solo e pelo aumento do aporte de resíduos vegetais (Kaschuk et al., 2010; Nunes et al., 2020). Contudo, quando iniciado sem a correta correção da acidez, seu uso contínuo pode resultar em estratificação de nutrientes e limitações físicas e químicas em subsuperfície, o que pode restringir o pleno desenvolvimento radicular e reduzir a eficiência dos processos de armazenamento de C no solo.

Nesse contexto, estratégias de manejo que integrem sistemas de preparo do solo e formas de aplicação de calcário tornam-se fundamentais para otimizar a correção da acidez ao longo do perfil, melhorar o ambiente radicular, o aproveitamento da água armazenada em camadas profundas do solo e potencializar o sequestro de C, especialmente em cenários de mudanças climáticas, onde aumenta a frequência de eventos extremos. Dian-

te disso, o presente capítulo apresenta resultados de um experimento de longa duração, conduzido por mais de 30 anos em Guarapuava, região centro-sul do estado do Paraná, Brasil. O objetivo foi avaliar os efeitos de sistemas de manejo do solo, preparo convencional (PC) e PD, associados a diferentes estratégias de calagem (ausente, superficial e incorporada), em um Latossolo, sobre atributos químicos relacionados à acidez do solo, a disponibilidade e eficiência de uso de fósforo e potássio, os estoques de C, o rendimento das culturas e sua estabilidade ao longo do tempo.

### **Sistemas de manejo do solo e calagem para sistemas agrícolas de longo prazo**

Historicamente, a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA) tem desenvolvido pesquisas de longa duração voltadas ao manejo de sistemas de produção agrícola no Paraná, com destaque para estudos envolvendo diferentes sistemas de manejo do solo e estratégias de calagem. Embora existam diversos trabalhos avaliando os efeitos de práticas isoladas de manejo do solo, ainda são escassos os experimentos de longo prazo que investiguem, de forma integrada, a interação entre sistemas de manejo e estratégias de correção da acidez. Essa lacuna é especialmente relevante diante da necessidade crescente de desenvolver sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e produtivos, capazes de conciliar sustentabilidade, estabilidade produtiva e maior sinergia com o ambiente.

Com o objetivo de demonstrar os efeitos da in-

teração entre sistemas de manejo do solo e estratégias de correção da acidez, apresentam-se a seguir os principais resultados obtidos em um experimento de longa duração, conduzido há 39 anos. O estudo avalia dois sistemas de preparo do solo, preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), associados ou não à aplicação de calcário, superficial ou incorporada.

O delineamento experimental compreende cinco tratamentos: PC sem calagem (PC-Controle), PD sem calagem (PD-Controle), PC com calagem incorporada (PC-Calagem Incorporada), PD com calagem superficial (PD-Calagem Superficial) e PD com calagem incorporada (PD-Calagem Incorporada). A aplicação de calcário dolomítico foi realizada em cinco momentos ao longo dos primeiros 32 anos do experimento (1987, 1995, 2001, 2007 e 2018), totalizando 20,9 Mg ha<sup>-1</sup>, com doses de 4,5; 3,0; 4,0; 4,7 e 4,7 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. As doses foram calculadas com base em um poder relativo de neutralização total (PRNT) de 100% e definidas de acordo com as recomendações técnicas vigentes em cada período experimental (Siqueira et al., 1987; CFS RS/SC, 1995; CQFS RS/SC, 2004; Fontoura et al., 2015).

A rotação de culturas foi mantida de forma uniforme em todos os tratamentos ao longo do período avaliado. No inverno, foram cultivadas culturas comerciais como trigo (*Triticum aestivum*) em oito safras, cevada (*Hordeum vulgare*) em oito safras e aveia branca (*Avena sativa*) em sete safras. Como culturas de cobertura precedendo o milho, utilizaram-se nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) em seis safras, ervilhaca (*Vicia sativa*) em uma safra e o consórcio de ambas em uma safra. No verão, a soja (*Glycine max*) foi a cultura predominante, presente em 24 safras, enquanto o milho (*Zea mays*) integrou a rotação em oito safras. A sequência detalhada das culturas ao longo do período de 1987 a 2019 está apresentada na Fig. 1.

Para cada cultura, as adubações com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) foram estabelecidas com base nas recomendações regionais, considerando o tipo de cultura, a expectativa de rendimento e os resultados de análises de solo realizadas anualmente. Amostras compostas de solo foram coletadas todos os anos na área experimental, o que possibilitou a padronização das doses de fertilizantes entre os tratamentos. As quantidades acumuladas de N, P e K aplicadas, bem como as fontes utilizadas, encontram-se detalhadas em Tiecher et al. (2023).

### **Rendimento das culturas em função das práticas de manejo do solo e estratégias de calagem ao longo de 56 colheitas**

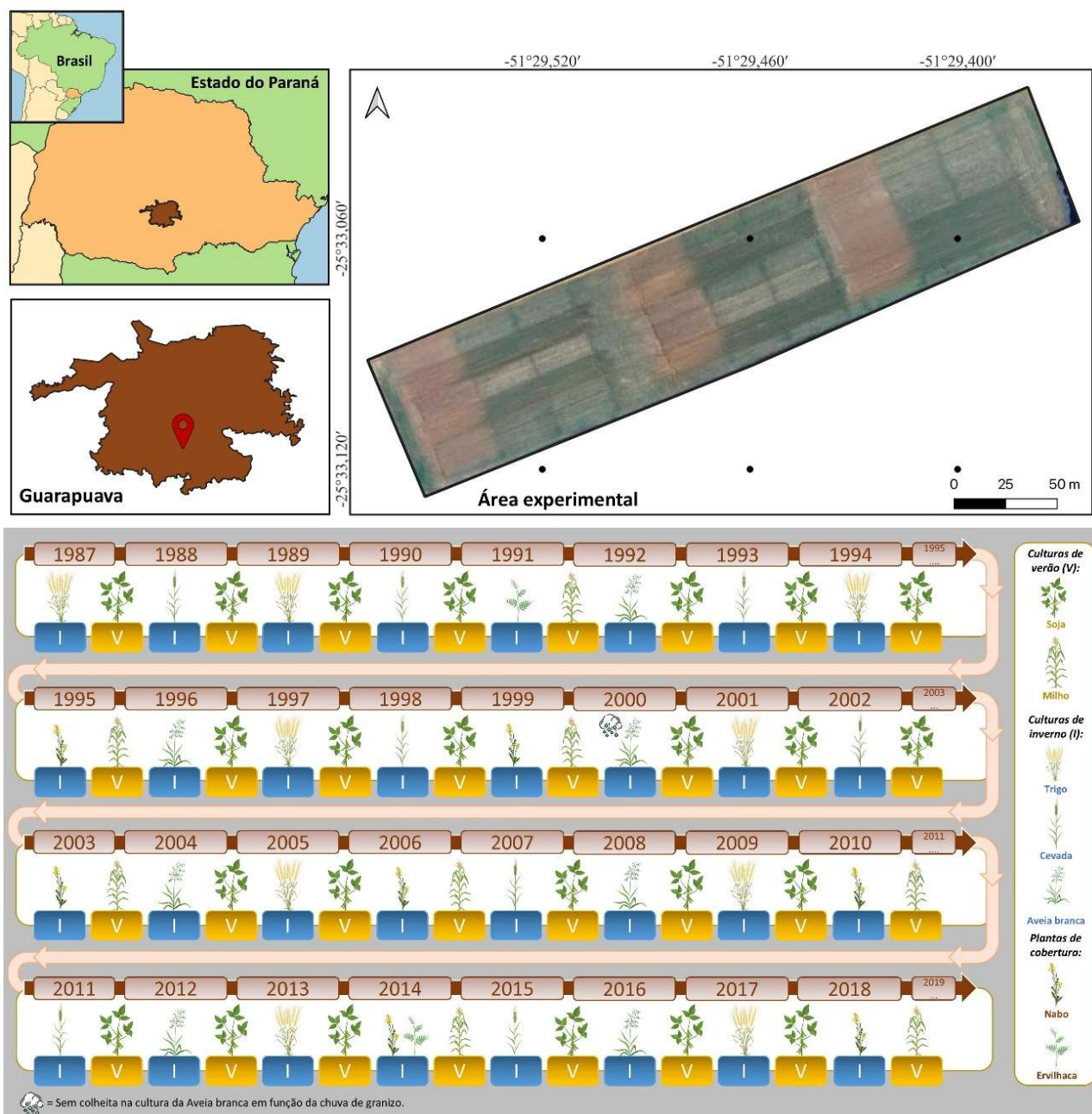
A produtividade das culturas foi avaliada em 56 colheitas, de 1987 a 2019, abrangendo 24 colheitas de soja, 8 de milho nas safras de verão, 9 de trigo, 8 de cevada e 6 de aveia branca nas safras de inverno, sendo que dentre os tratamentos avaliados, a aplicação de calcário teve mais impacto sobre o rendimento do que as estratégias de manejo do solo (Fig. 2).

Neste estudo, os resultados destacam que a aplicação de calcário, seja na superfície ou incorporada no sistema PD, leva a um aumento na produtividade das culturas em comparação com os tratamentos de controle sem calcário nos últimos 32 anos (Fig. 2). Em todas as culturas, os rendimentos mais baixos foram observados em parcelas de controle sem aplicação de calcário, independentemente do sistema de manejo do solo empregado (PC ou PD).

Além de serem mais produtivos, os tratamentos com calcário demonstraram maior estabilidade na produção. Para avaliar a estabilidade da produção podemos utilizar o coeficiente de variação (CV), que indica o quanto a produtividade oscila ao longo dos anos (sendo que, quanto menor o CV, mais regular é o sistema). No entanto, o CV sozinho não mostra se a produção é alta ou baixa. Por isso, utiliza-se também o índice de sustentabilidade produtiva (ISP), que combina produtividade média e estabilidade em um único valor (de 0 a 1). Quanto mais próximo de 1, maior a capacidade do sistema de produzir bem de forma consistente. Assim, o CV mede a variabilidade, enquanto o ISP indica a segurança produtiva ao longo do tempo.

No presente estudo de longo prazo, na maioria dos casos, esse aumento na estabilidade do rendimento, conforme indicado pelos menores valores de coeficiente de variação (CV) e maiores valores do índice de sustentabilidade produtiva (ISP) (Fig. 3), reflete sistemas mais eficientes (Luo et al. 2016; Choudhary et al. 2018). Para a maioria das culturas avaliadas, como a soja (Fig. 3a), o trigo (Fig. 3c), a cevada (Fig. 3d) e a aveia branca (Fig. 3e), os maiores rendimentos foram associados a maior estabilidade de rendimento. Uma situação diferente foi observada para o milho (Fig. 3b), no qual o rendimento foi mais estável com valores mais baixos de CV e mais alto de ISP, e menor nos tratamentos de controle sem calcário. Esta análise deve ser abordada com cautela, pois a estabilidade do rendimento pode ser definida como estática ou dinâmica





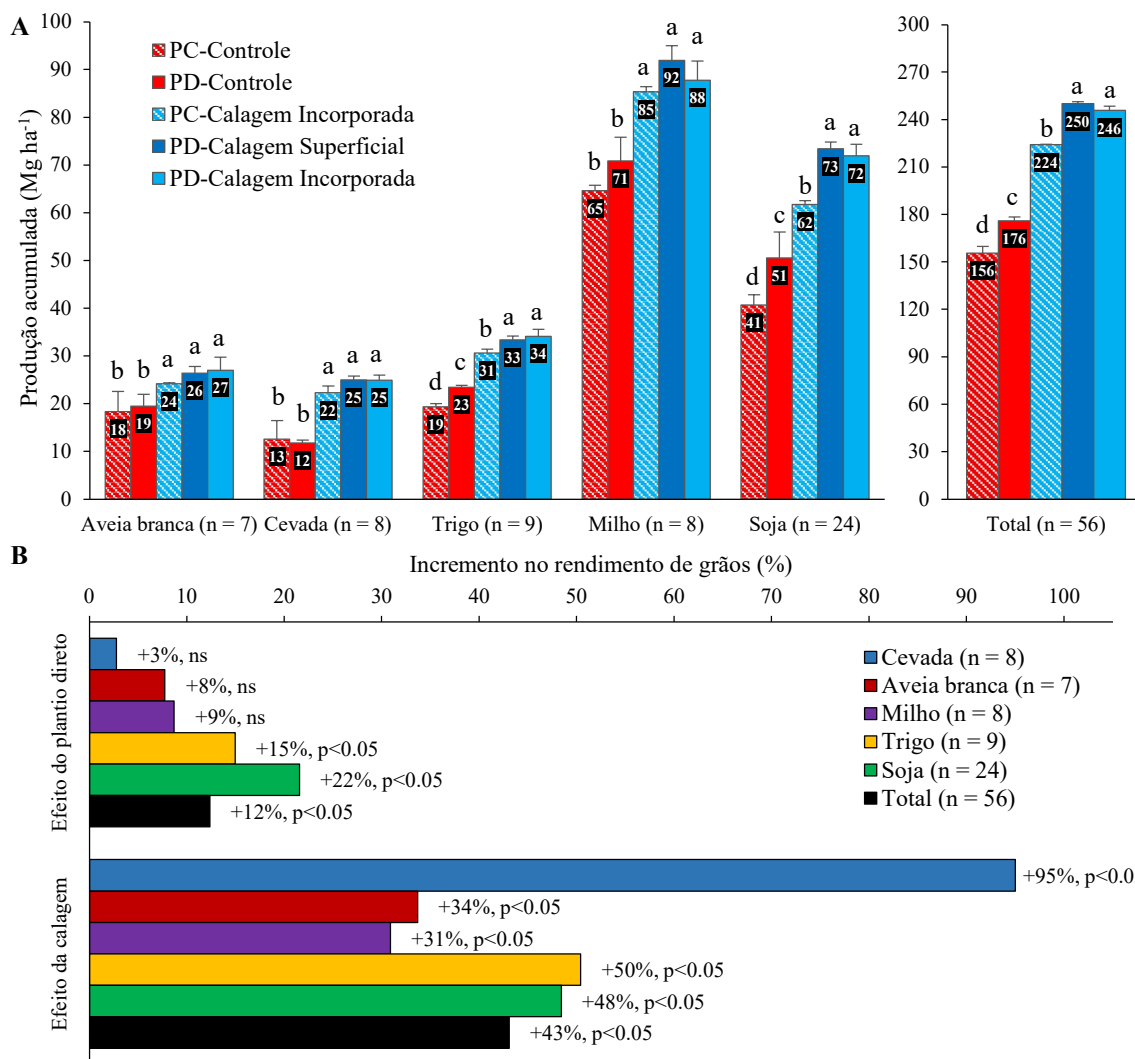
**Figura 1.** Localização da área experimental no município de Guarapuava, Estado do Paraná, Sul do Brasil e a sequência das culturas cultivadas ao longo dos 32 anos de condução experimental.

(Becker e Léon 1988; Reckling et al. 2021).

Na estabilidade estática, o desempenho da cultura permanece inalterado, muitas vezes devido a fatores limitantes da produção, enquanto na estabilidade dinâmica, a cultura ajusta os rendimentos às condições ambientais para expressar seu potencial (Tollenaar e Lee 2002). Possivelmente, o que observamos em nosso estudo é que a melhoria das condições do solo, proporcionada pela calagem, aliada às condições ambientais, permitiu que o milho expressasse seu potencial produtivo. Isso fica evidente nas safras de 2014/2015 e 2018/2019, nas quais a variação entre os rendimentos máximo e

mínimo foi maior nos tratamentos com calcário em comparação com aqueles sem calcário. Outro aspecto importante a destacar é que os rendimentos das culturas podem ser desestabilizados por condições ambientais, como secas (Mickelbart et al. 2015), que ocorrem com frequência, mesmo em regiões onde o clima normalmente apresenta chuvas bem distribuídas ao longo da estação de crescimento. Sistemas corrigidos, especialmente aqueles envolvendo PD, geralmente demonstram maior resiliência produtiva (Sá et al. 2014), oferecendo maior estabilidade em condições de déficit hídrico.

As evidências do aumento no rendimento das



**Figura 2.** Rendimento acumulado de grãos das culturas (a) e aumento médio no rendimento acumulado de grãos devido ao uso de plantio direto (PD) e calcário (b) em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Adaptado de Tiecher et al. (2023).

culturas submetidas à aplicação de calcário, em comparação com os tratamentos sem calcário, são notáveis. Os tratamentos com calcário demonstraram aumentos lineares no rendimento ao longo do tempo, contrastando com os tratamentos sem calcário, que estagnaram o potencial produtivo máximo da soja, do milho e do trigo ou, pior ainda, apresentaram queda ao longo do tempo no caso da cevada (Fig. 4). Dentre as culturas, destaca-se a sensibilidade da cevada a condições de acidez extrema, tais como baixo pH e baixas concentrações de cátions trocáveis como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , além de altas concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  trocável, assim como também observado por Ben et al. (1988). Portanto, a calagem surge como uma prática essencial para manter e aumentar a produção agrícola em solos ácidos, representando um fator crucial para a segurança alimentar em regiões tropicais e subtro-

picas (Wang et al. 2021; Bossolani et al. 2021; Moraes et al. 2023). Além disso, práticas de manejo de conservação, como a agricultura sob PD, também promoveram aumentos de rendimento em todas as culturas ao longo do tempo (Fig. 4). Os benefícios mais significativos da PD em relação à PC normalmente surgem a longo prazo, à medida que a fertilidade é gradualmente acumulada, aumentando os rendimentos e a resiliência do sistema (Vizioli et al. 2021; Hassan et al. 2022).

#### Impacto de longo prazo de práticas de manejo do solo e estratégias de calagem sobre os atributos químicos de acidez do solo

Após 32 anos de aplicação de diferentes estratégias de calagem em sistemas contrastantes de manejo do solo, foram observadas alterações consistentes nos atributos químicos relacionados



à acidez deste Latossolo, previamente manejado sob PC com incorporação de calcário entre 1950 e 1977. De modo geral, os tratamentos com calagem, independentemente da forma de aplicação (superficial ou incorporada) e do sistema de manejo (PC ou PD), apresentaram aumento do pH do solo, maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e maior saturação por  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^+$ , associados à redução dos teores e da saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , em comparação ao tratamento controle sem aplicação de calcário, em todas as camadas avaliadas até 40 cm de profundidade (Fig. 5).

Destaca-se o efeito da aplicação superficial de calcário sob PD, que manteve a correção da acidez até 40 cm de profundidade. Esse resultado contrasta com o padrão frequentemente reportado na literatura, no qual os efeitos da calagem superficial tendem a se restringir às camadas mais superficiais do solo (Rheinheimer et al., 2018). A resposta observada neste estudo sugere que as condições prévias de manejo desempenham papel determinante na dinâmica de movimentação do corretivo no perfil.

Em particular, a correção inicial da acidez em profundidade, realizada antes da adoção do PD, aliada à melhoria da estrutura do solo ao longo do tempo, pode ter favorecido a formação de poros contínuos e o aumento da conectividade estrutural, facilitando o deslocamento de produtos da dissolução do calcário para camadas subsuperficiais. Evidências semelhantes têm sido relatadas em sistemas bem estruturados e biologicamente ativos, nos quais a presença de canais radiculares e poros biogênicos intensifica esse processo (Martins et al., 2014; Tiecher et al., 2023; Fontoura et al., 2024).

Embora fatores como dose aplicada, granulometria do corretivo e tempo de reação também influenciem esse processo (Vargas et al., 2019), os resultados indicam que, em sistemas onde a acidez do perfil já foi previamente corrigida, a reaplicação superficial de calcário pode ser suficiente para manter níveis adequados de pH e baixa toxicidade por  $\text{Al}^{3+}$  ao longo do perfil do solo. Isso reforça que a necessidade de incorporação de calcário em áreas sob PD deve ser avaliada de forma criteriosa, considerando o histórico de manejo e as condições estruturais do solo.

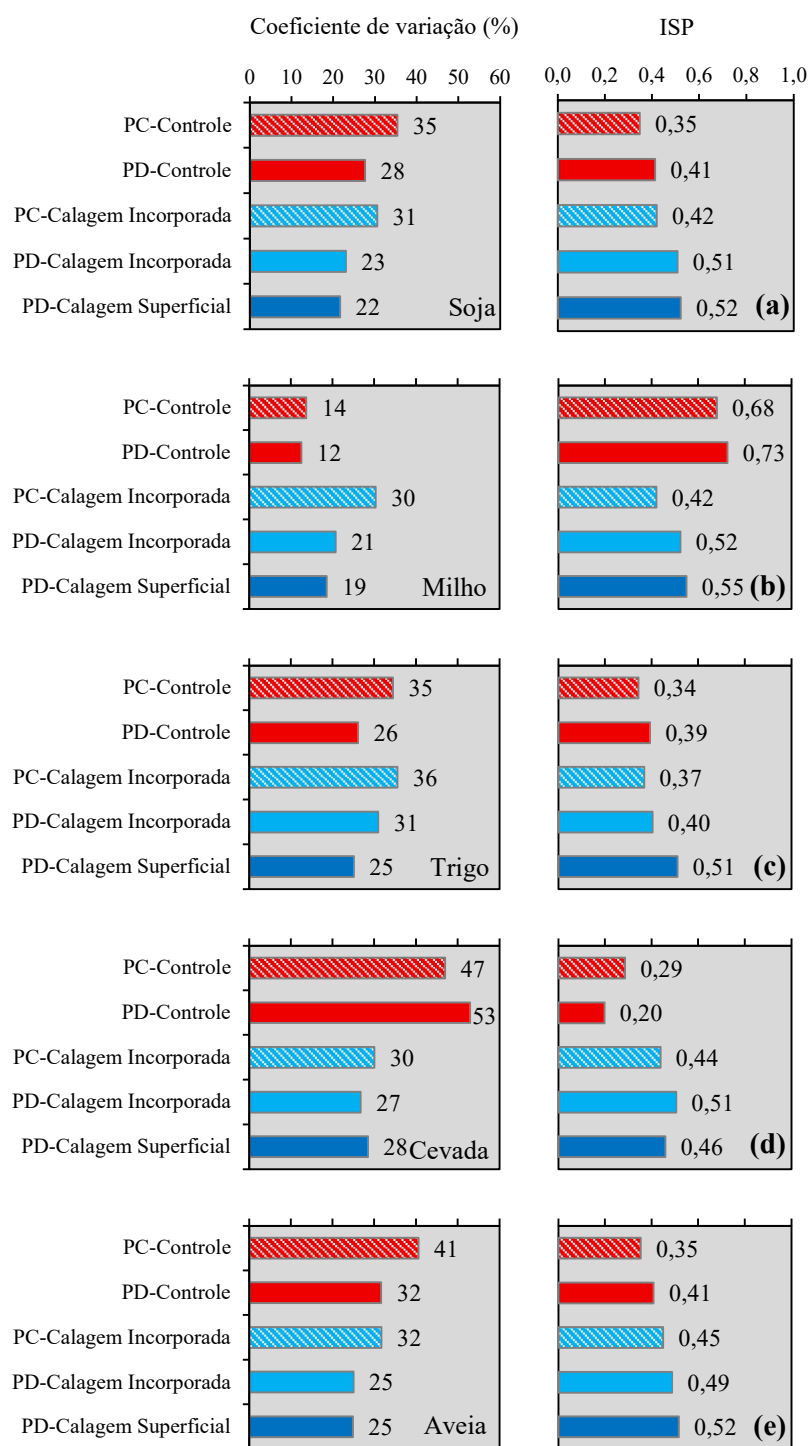
Como esperado, observou-se uma forte correlação entre as propriedades de acidez do solo, em que um aumento no pH do solo levou a uma maior saturação por  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^+$  e a uma menor saturação por  $\text{Al}^{3+}$ . Em níveis de pH do solo acima de 5,5, a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  é quase completamente neu-

tralizada, o que é benéfico para o desenvolvimento das culturas (CQFS-RS/SC 2016). É importante destacar que o aumento da saturação por  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^+$  é um resultado do aumento do pH do solo, e não a causa (Tiecher et al., 2022). Além disso, a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  diminui à medida que o pH do solo aumenta devido à formação de espécies de Al hidrolisadas ( $\text{Al}(\text{OH})_x$ ), que não são tóxicas para as plantas (Miotto et al., 2020).

As propriedades relacionadas à acidez do solo também mostraram uma forte correlação com o rendimento do milho, que aumentou com a elevação do pH do solo e da saturação por  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^+$ , e diminuiu com o aumento da saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , independentemente da camada de solo avaliada (Fig. 6). É comum encontrar na literatura correlações entre pH, saturação por  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^+$  e por  $\text{Al}^{3+}$  (Fageria 2008; Holland et al. 2019; Kirchmann et al. 2020), uma vez que essas variáveis são consideradas importantes para o fornecimento de nutrientes às plantas e a ausência de elementos tóxicos (Hao et al. 2020). Além disso, é importante destacar as relações significativas observadas em camadas subsuperficiais do solo, como 10–20 e 20–40 cm, enfatizando que o monitoramento da fertilidade não deve se limitar apenas à superfície, conforme observado anteriormente por Bellinaso et al. (2021) e Rheinheimer et al. (2024).

### **Eficiência do uso do fósforo em função das práticas de manejo do solo e estratégias de calagem**

O balanço parcial de fósforo (BPP), considerado um índice de eficiência do uso do fósforo, foi avaliado, considerando que todas as safras de 1987 a 2019 foram mais afetadas pela aplicação de cal do que pelo manejo do solo (Fig. 7). No caso da aveia branca, do milho e da cevada, não se observou efeito dos sistemas de cultivo sobre o Fator Parcial de Produtividade (FPP) e o BPP. Os resultados a longo prazo mostram uma redução acentuada na eficiência de utilização do P para a soja, o milho e os cereais de inverno quando a acidez do solo não é corrigida. A cevada foi a cultura mais positivamente impactada pela calagem, apesar de apresentar a menor eficiência de uso do fósforo (Fig. 7), e quase duplicou o rendimento e a eficiência de uso do P nos tratamentos com calagem em comparação com o controle, enquanto outras culturas (soja, milho, trigo e aveia branca) apresentaram um aumento de 1,3 a 1,5 vezes. Esses resultados estão de acordo com uma meta-análise global realizada por Yu et



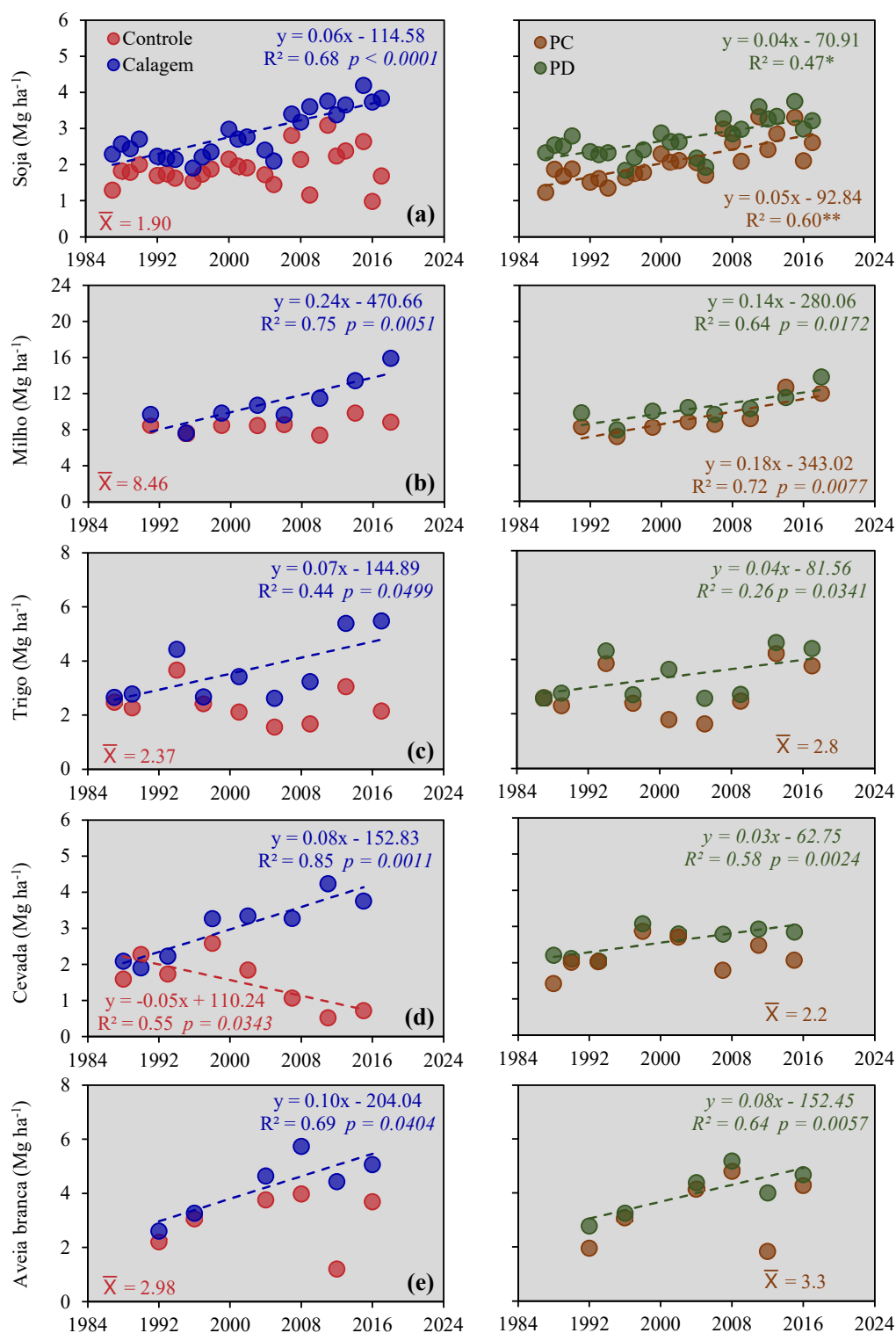
**Figura 3.** Coeficiente de variação (CV) e índice de sustentabilidade produtiva (ISP) para os rendimentos de soja (a), milho (b), trigo (c), cevada (d) e aveia branca (e) em função de diferentes práticas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto) combinada ou não com a aplicação de calcário ao longo de 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Adaptado de Alves et al. (2025).

al. (2021), que constatou que a cevada apresentou menor eficiência de uso de P do que o milho, o trigo e o arroz entre as culturas de cereais.

Nossos resultados demonstram que o rendimento de grãos (Fig. 2a) e a recuperação do P aplicado (Fig. 7) podem aumentar significativamente

quando se utiliza calcário para manter a acidez do solo em níveis toleráveis (pH do solo =  $5,4 \pm 0,2$  e saturação de Al =  $4 \pm 5\%$  na camada de 0–20 cm, Fig. 5). Esses resultados contrastam com os obtidos por Yu et al. (2021). Eles descobriram que a menor eficiência de uso de P foi observada na faixa de pH

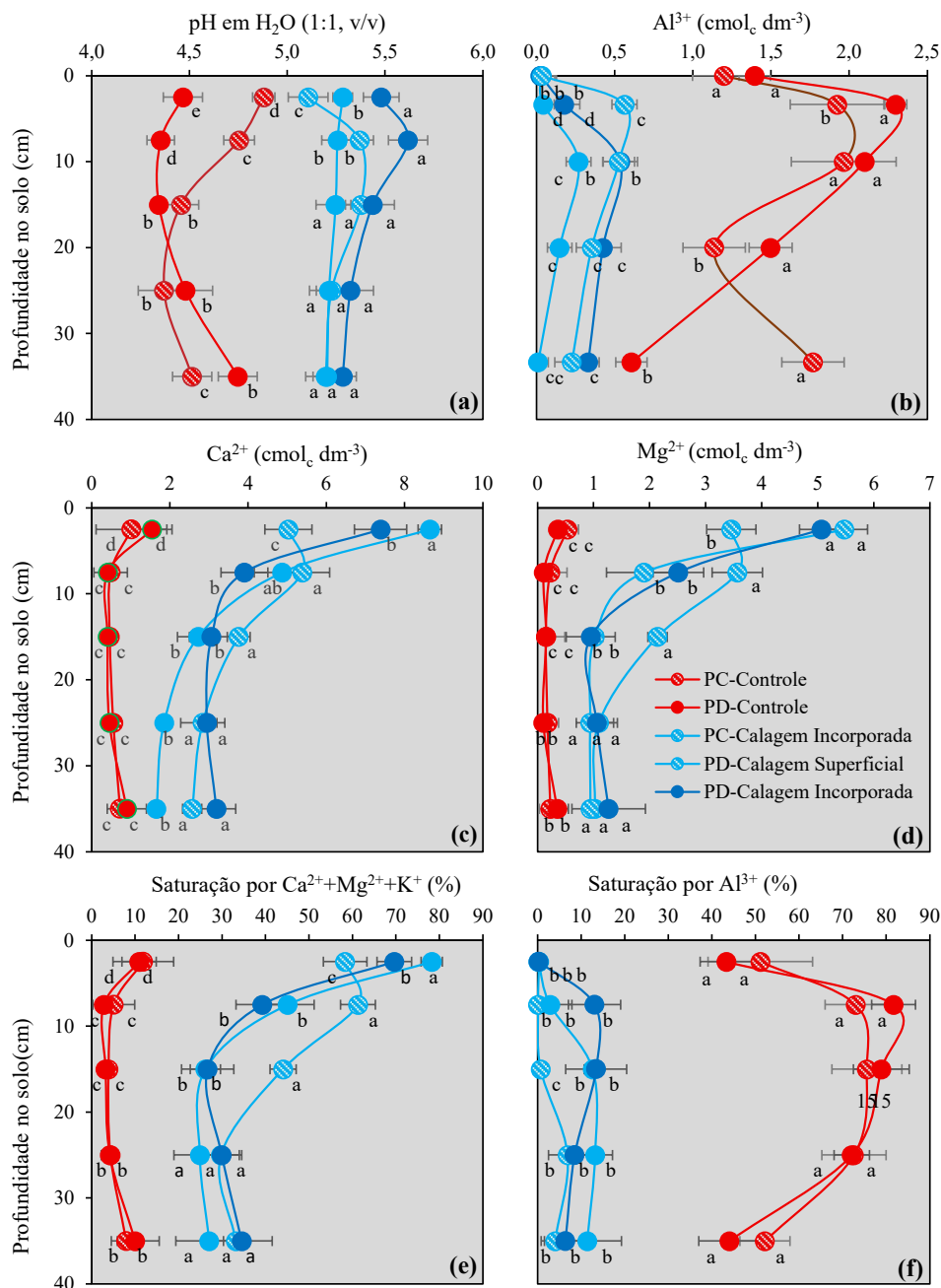




**Figura 4.** Tendências temporais no rendimento de grãos da soja (a), do milho (b), do trigo (c), cevada (d) e aveia branca (e) com base nos valores médios dos tratamentos sem (controle) e com calagem (calcário) na coluna da esquerda, e preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) na coluna da direita, em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Apenas as linhas de regressão estatisticamente significativas a um nível de significância inferior a 5% foram apresentadas.

do solo próxima da neutralidade (6,0–7,0) e que a eficiência aumentava à medida que o pH diminuía até 4,5, pois as plantas podem reduzir o pH da rizosfera excretando prótons ou ácidos orgânicos, aumentando assim a absorção de P (Chen & Liao,

2016). Em nosso estudo, no entanto, a condição de acidez nos tratamentos sem calcário ( $\text{pH } 4,5 \pm 0,2$ , Fig. 5a) esteve associada a uma alta saturação de Al ( $61 \pm 5\%$ , Fig. 5b). Isso pode ter prejudicado o desenvolvimento radicular e, consequentemente,



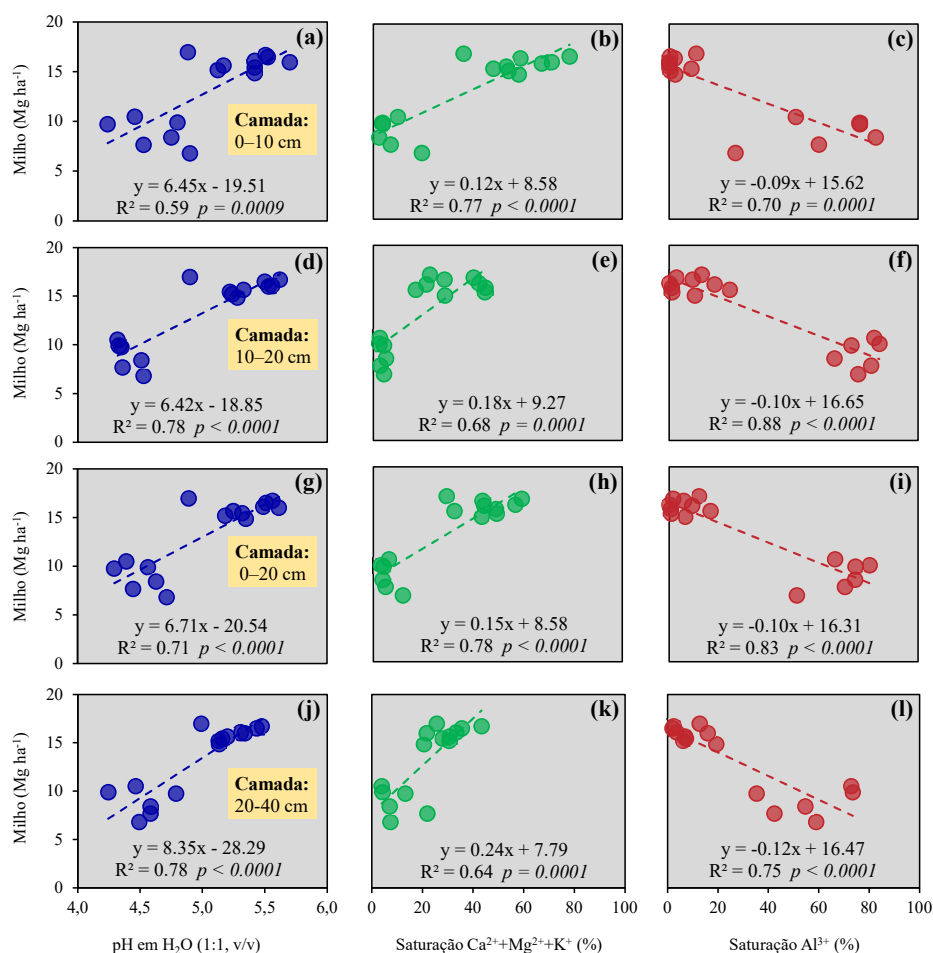
**Figura 5.** pH do solo (a),  $\text{Al}^{3+}$  (b),  $\text{Ca}^{2+}$  (c) e  $\text{Mg}^{2+}$  (d) trocáveis, saturação por  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$  (e) e saturação por  $\text{Al}^{3+}$  (f) em função de diferentes práticas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto) combinada ou não com a aplicação de calcário após 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Adaptado de Alves et al. (2025).

diminuído a absorção de P por difusão (Morel et al., 2021). Além disso, as condições de pH ácido favorecem a adsorção de P por óxidos de Fe, diminuindo sua disponibilidade para as plantas.

Apesar de o tratamento controle sob PD apresentar um rendimento acumulado de grãos 30% menor (Fig. 2), o teor de P disponível (Mehlich-1) na camada de 0–20 cm foi três vezes superior ao nível crítico e duas vezes maior do que o encontrado no tratamento sob PD com calagem superficial (Fig. 8). Isso sugere que não há problema de defi-

ciência de P no tratamento controle sob PD, mas que as plantas são incapazes de acessar o nutriente devido à maior acidez do solo e à toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$ , conforme previsto por Barrow (2017). Portanto, o uso de calcário para aumentar a eficiência de uso do P, um nutriente em grande parte importado para a agricultura brasileira (Wang et al., 2022), é uma estratégia com grandes benefícios. No entanto, embora o calcário seja um minério abundante no território brasileiro (Ruiz et al., 2020), levantamentos recentes de solo com mais de 35 mil análi-





**Figura 6.** Relação entre o pH do solo, a saturação por Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>+K<sup>+</sup> e por Al<sup>3+</sup> e o rendimento do milho (colheita 2018/2019) nas camadas de 0–10 cm (a, b e c, respectivamente), 10–20 cm (d, e e f, respectivamente), 0–20 cm (g, h e i, respectivamente) e 20–40 cm (j, k e l, respectivamente) após 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Adaptado de Alves et al. (2025).

ses no norte do RS e oeste de SC, mostram que apenas 20% das amostras apresentaram pH em água acima de 6,0, indicando que boa parte das áreas ainda necessitam de correção de acidez (Tiecher et al., 2016).

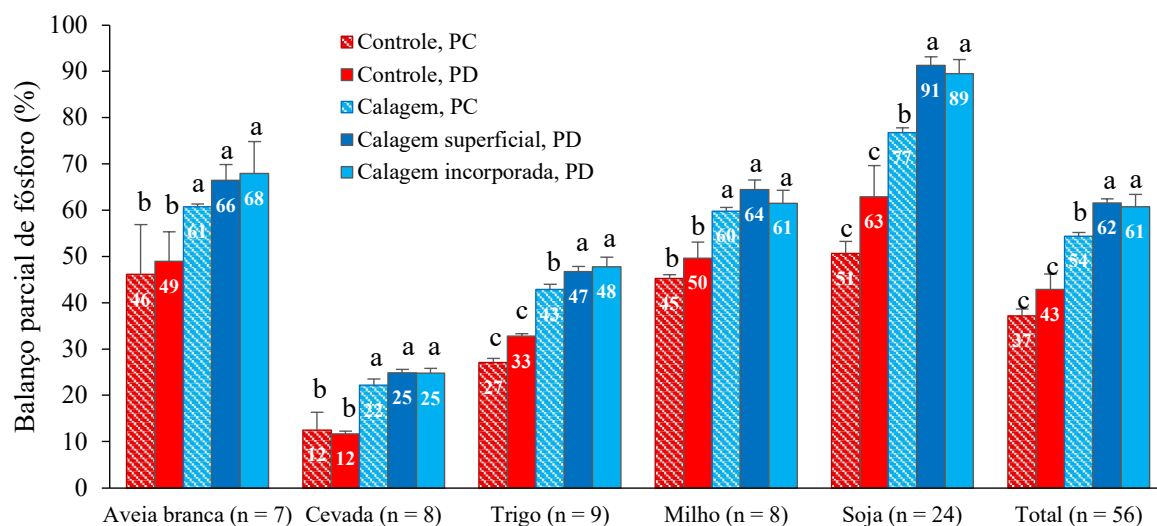
Na região Centro-Sul do Paraná a situação não é muito diferente. Um levantamento recente feito em 124 lavouras de cooperados da Cooperativa Agrária, verificou-se que na camada de 0-20 cm, 78% das áreas apresentam pH-CaCl<sub>2</sub> abaixo de 5,5, e 76% das áreas tem saturação por bases (Ca+Mg+K) menor que 70% (Fontoura et al., 2026). Considerando a camada de 20-40 cm, apenas 8% tem pH-CaCl<sub>2</sub> acima de 5,5 e 10% tem saturação por bases acima de 70% (Fontoura et al., 2026).

Ao longo dos anos, foram realizadas diversas pesquisas com o objetivo de aumentar a eficiência na utilização do P, utilizando diferentes tipos de fertilizantes e métodos de aplicação (Oliveira et al., 2022), o momento da fertilização com P (Alves et al., 2022), microrganismos solubilizadores de P (Bar-

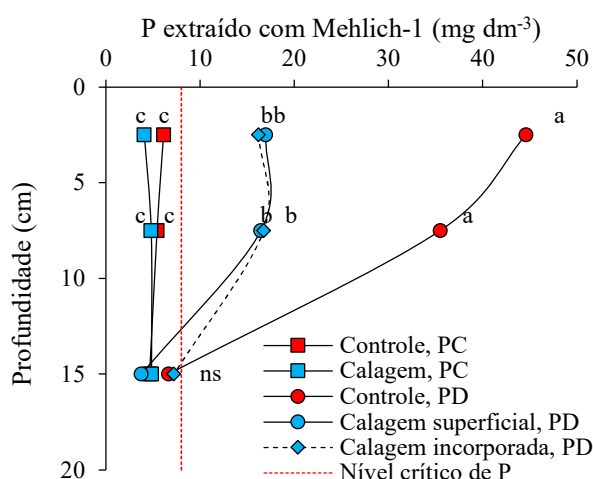
gaz et al., 2021), rotação de culturas (Rodrigues et al., 2021), entre outros. No entanto, em solos ácidos com presença de Al<sup>3+</sup> tóxico, todas essas estratégias serão limitadas pelo baixo desenvolvimento radicular e pela menor capacidade de absorção de P (Barrow, 2017; Bellinaso et al., 2021). Neutralizar a acidez e eliminar a toxicidade do Al<sup>3+</sup> deve ser o primeiro passo para aumentar a eficiência de uso do P, pois isso também beneficia os microrganismos do solo e a mineralização de resíduos orgânicos e da matéria orgânica do solo.

### Eficiência do uso do potássio em função das práticas de manejo do solo e estratégias de calagem

Da mesma forma que para o P, a calagem melhorou a eficiência de utilização do K em todas as culturas. Em média, a eficiência de utilização do potássio (EUK) para o milho, a soja, a aveia branca, o trigo e a cevada foi de 49%, 93%, 30%, 56% e 60% significativamente maior nos tratamentos com cal-



**Figura 7.** Balanço parcial de fósforo  $[(P \text{ exportado pelos grãos} / P \text{ aplicado}) \times 100]$  das culturas cultivadas em função de diferentes práticas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto) combinada ou não com a aplicação de calcário após 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Adaptado de Tiecher et al. (2023).



**Figura 8.** Teor de P no solo em uma única extração pelo método Mehlich-1 (P prontamente disponível) até 20 cm de profundidade após 32 anos em função de diferentes práticas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto) combinada ou não com a aplicação de calcário após 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra não são estatisticamente diferentes pelo teste de Scott-Knot com  $p < 0,05$ . ns, não significativo. Adaptado de Tiecher et al. (2023).

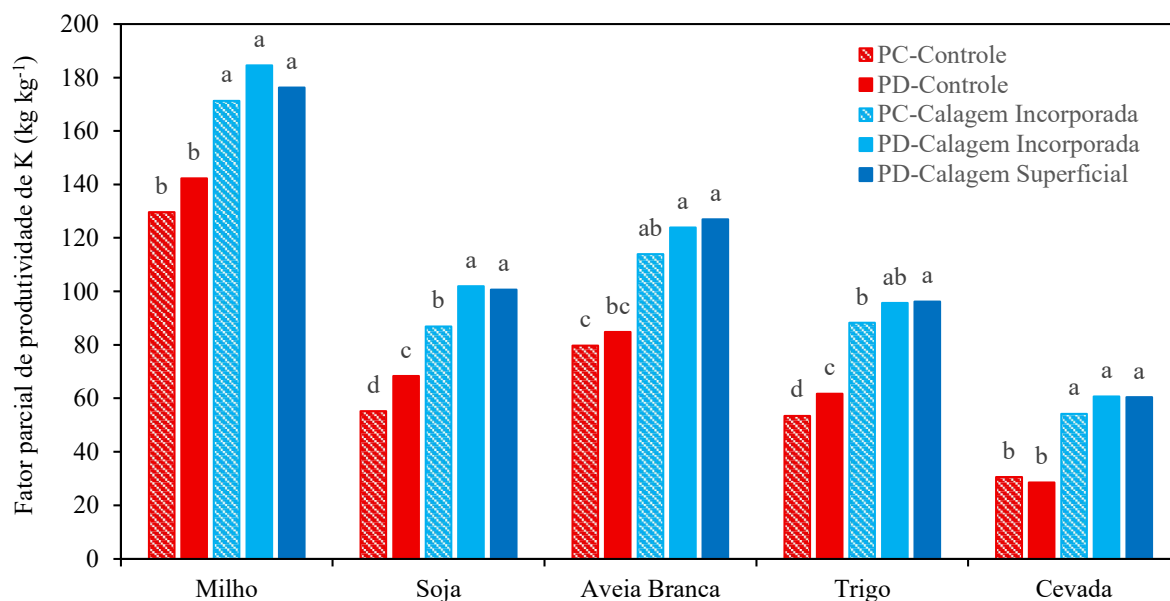
cário (PD-calcário superficial, PD-calcário incorporado e PC-calcário incorporado) em comparação com os tratamentos sem calcário (PD-controle e PC-controle) (Fig. 9). Além disso, o PD melhorou a eficiência de uso de K nos tratamentos com calagem, com a EUK no PD-calcário superficial e incorporado sendo 15%, 8% e 8% maior para a soja, a

aveia branca e o trigo, respectivamente, em comparação com o PC-calagem incorporada (Fig. 9). O PD-controle também aumentou a FPP da soja e do trigo em 19% e 13%, respectivamente, em comparação com o PC-controle. Para o milho e a cevada, o EUK não apresentou diferença significativa entre as práticas de manejo do solo nos tratamentos com calagem (PD-calcário superficial, PD-calcário incorporado, PC-calcário incorporado) e nos tratamentos sem calagem (PD-controle, PC-controle) (Fig. 9).

O balanço de potássio foi positivo para culturas de milho, aveia branca, trigo e cevada e negativo para soja, exceto no controle sob PC (Fig. 10). As exportações de K de soja por meio da colheita de grãos superaram as taxas aplicadas de K, resultando em um déficit de  $620 \text{ kg ha}^{-1}$  nos tratamentos com calcário sob PD. Por outro lado, o saldo para as culturas de milho, aveia, trigo e cevada foi positivo em todos os tratamentos. No geral, houve um balanço positivo de  $1154 \text{ kg ha}^{-1}$  de K no controle sob PC, que ao longo de 32 anos contribuiu com  $904 \text{ kg ha}^{-1}$  K a mais do que nos tratamentos com calcário sob PD (Fig. 10).

Devido à menor produtividade nas colheitas nos tratamentos sem calagem e no tratamento sob PC, combinadas com a mesma dose de fertilizante potássico, o FPP de K foi menor nesses tratamentos (Fig. 9), resultando em maior acúmulo de K no solo (Fig. 10). Aumentar a FPP de K para soja, milho, trigo, aveia e cevada é atualmente uma das estratégias mais sustentáveis para melhorar a efi-



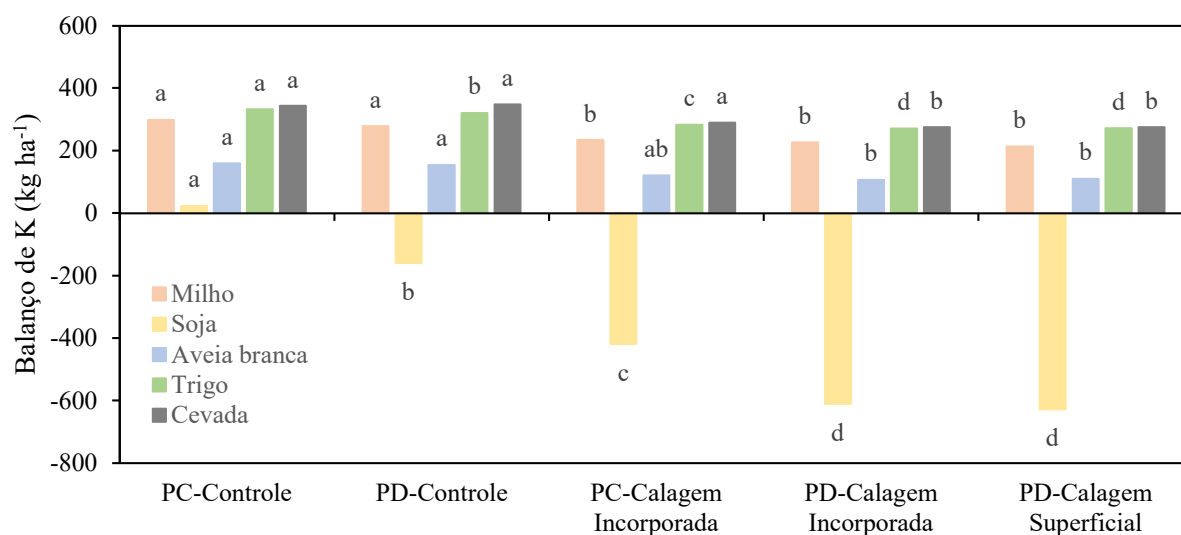


**Figura 9.** Fator parcial de produtividade (FPP) de K (kg de grão produzido por kg de K aplicado via fertilizante) em culturas em função de diferentes práticas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto) combinada ou não com a aplicação de calcário após 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula comparando tratamentos dentro de cada cultura não são estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey em  $p < 0,05$ . Adaptado de Pesini et al. (2025).

ciência do uso de K, como também observado para P (Tiecher et al. 2023). Globalmente, o K recebe menos atenção em comparação com o N e o P em esforços para aumentar a eficiência do uso de nutrientes (Singh et al. 2021). No entanto, este estudo demonstra que a calagem, especialmente quando combinada com PD, melhora a eficiência do K aplicado. Adotar essas práticas de manejo é essencial para aprimorar a sustentabilidade agrônômica e econômica dos sistemas de produção de grãos. O primeiro passo para aumentar a produtividade das culturas e a eficiência do uso do K é neutralizar a acidez do solo e eliminar a toxicidade do  $Al^{3+}$ . Essa estratégia promove o crescimento das raízes, aumentando a absorção de nutrientes, já que o K é predominantemente absorvido por difusão (Ragel et al. 2019). Além disso, em um sistema de produção integrado com múltiplas culturas, é importante fertilizar o solo com base nas necessidades nutricionais das culturas para manter um equilíbrio nutricional o mais próximo possível da neutralidade (Fig. 10). Essa abordagem previne perdas de nutrientes no sistema devido ao acúmulo excessivo destes no solo e evita perdas de rendimento devido a aplicações de nutrientes que não atendam à demanda das culturas.

Os resultados de longo prazo deste experimento indicam um acúmulo menor de K disponível em solos submetidos a calagem (Fig. 11). Os efeitos

biofísicos e químicos da adição de calcário influenciam a disponibilidade de K no solo, aumentando a absorção de K pelas raízes das culturas. Isso ocorre devido à competição com outros cátions e à formação indireta de sítios de adsorção, facilitada pelo aumento do acúmulo de C orgânico em solos livres de  $Al^{3+}$  tóxico (Han et al. 2023). Em contraste com nossos achados, alguns estudos relataram aumento ou nenhuma diferença na disponibilidade de K do solo após a calagem (Hamilton et al. 2012; Lin et al. 2018). Essa discrepância nas observações pode ser atribuída a diferentes condições edafoclimáticas, tipos de solo, níveis iniciais de acidez e disponibilidade de K do solo (Han et al. 2023). As concentrações de K no solo dependem do material de origem, da atividade radicular e do histórico de fertilização. Os níveis mais altos de K disponível nas camadas superficiais são observados com maiores entradas de K no sistema. (Fig. 11). Além disso, as concentrações de K no solo são influenciadas indiretamente pelo pH. A calagem desloca os sítios de carga anteriormente ocupados por íons  $Al^{3+}$  e  $H^+$ , aumentando a retenção de K no solo. No entanto, a correlação negativa entre K e o Al trocável está diretamente relacionada a distribuição desses elementos ao longo do perfil do solo. O Al trocável está concentrado em camadas mais profundas do solo devido ao menor teor de matéria orgânica que o complexa (Martins et al. 2020), enquanto concentrações mais



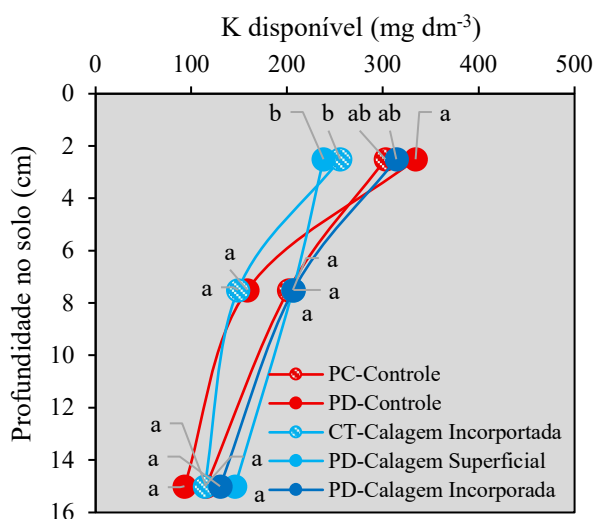
**Figura 10.** Balanço de potássio [(quantidade de K aplicada em cada cultura) – (quantidade de K exportada por grãos em cada cultura)] em culturas em função de diferentes práticas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto) combinada ou não com a aplicação de calcário após 32 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula comparando tratamentos dentro de cada cultura não são estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey em  $p < 0,05$ . Adaptado de Pesini et al. (2025).

altas de K nas formas avaliadas são encontradas nos centímetros superiores devido à reciclagem de nutrientes pelas plantas e adições de fertilizantes superficiais (Artuso et al. 2024).

O K disponível apresentou níveis mais baixos no tratamento com calagem sob PD (Fig. 11). Esse efeito é atribuído a uma combinação de fatores. Primeiramente, a maior absorção de K pelas plantas é evidenciada pela produtividade acumulada das culturas (Fig. 2) e balanço K (Fig. 10), comparado a tratamentos sem calagem. Em segundo lugar, o PC expõe os locais de troca do solo com maior energia de ligação devido à fragmentação dos agregados, promovendo assim maior adsorção de K. Devido a essas características, o K disponível, no tratamento destes no controle sob PC foi intermediário entre a calagem sob PC e o controle sob PD. De forma semelhante, o maior acúmulo de K no controle PD é atribuído à menor exportação de K em comparação com tratamentos calcareados/corrigidos e à preservação de material orgânico competindo pelos sítios de adsorção.

Ao correlacionar a produtividade da cultura do milho antes da amostragem do solo com as produtividades subsequentes das culturas de trigo e soja após a amostragem, observou-se uma relação significativa apenas na camada de 10–20 cm do solo (Fig. 12). Os resultados indicam que 80% dos dados na camada de 0–10 cm são classificados como “Muito Alto”, enquanto os 20% restantes são clas-

sificados como “Alto”. Em contraste, na camada de 10–20 cm, 7%, 67% e 27% dos dados enquadram-se nas categorias “Muito Alto”, “Alto” e “Médio”, respectivamente (Fontoura et al. 2015). A menor concentração de K na camada de 10–20 cm pode ter influenciado a relação entre o teor de K no solo e a produtividade das culturas. Nessa abordagem, o monitoramento constante das camadas mais profundas do solo é essencial para definir as melhores estratégias de adubação e calagem (Bellinaso et al. 2021; Reed et al. 2022; Rheinheimer et al. 2024). O nível crítico atual de K no solo adotado pela FAPA, com base em 47 experimentos ao longo de 5 anos, é de  $90 \text{ mg dm}^{-3}$  para culturas de inverno e  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  para culturas de verão na camada de 0–20 cm (Fontoura et al. 2015), valores inferiores aos encontrados no presente estudo. Estudos têm demonstrado que camadas mais profundas no perfil de absorção radicular, geralmente associadas a menores disponibilidades de K, devem receber atenção, pois estão diretamente relacionadas à produtividade das culturas (Obrycki et al. 2018; Yuan et al. 2020). A absorção de K em maiores profundidades e sua deposição na superfície do solo ocorrem em quantidades maiores e em taxas mais rápidas do que a migração descendente de K ao longo do perfil do solo. Nesse contexto, devem ser priorizadas estratégias de adubação voltadas a ambientes com deficiência de K e alta probabilidade de resposta à fertilização.



**Figura 11.** K disponível extraído por Mehlich<sup>-1</sup> sob diferentes manejos de preparo do solo (PD, plantio direto; PC, preparo convencional), combinados ou não com calagem, em um Latossolo sob clima subtropical. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, comparando as práticas de manejo dentro de cada camada do solo, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a  $p < 0,05$ . Adaptado de Pesini et al. (2025).

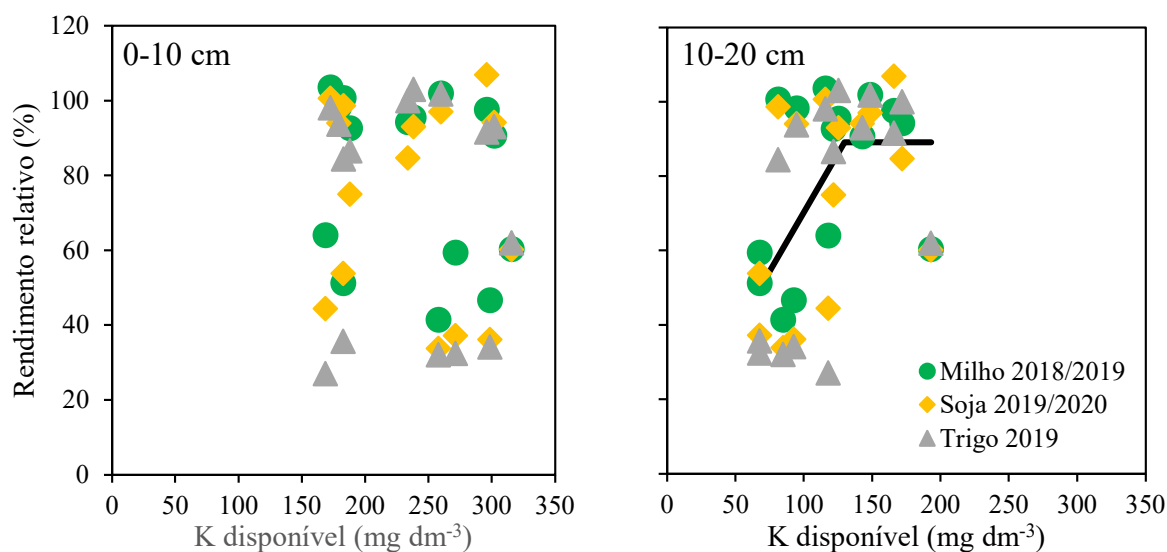
### Dinâmica e acúmulo de carbono no solo em função do manejo do solo e da calagem

Os sistemas de preparo do solo e as estratégias de calagem são tradicionalmente reconhecidos por sua influência sobre a acidez do solo, a disponibilidade de nutrientes e o rendimento das culturas. No entanto, seus efeitos vão além dos componentes

químicos e se estendem diretamente à dinâmica do carbono (C) no solo, um dos principais indicadores de qualidade e sustentabilidade dos agroecossistemas. Um estudo recente na área experimental considerando o período de 1987 a 2023 (Kopp et al., 2026), demonstrou que ao longo de 37 anos, ficou evidente que as decisões de manejo não apenas alteraram a produtividade vegetal, mas também definiram a quantidade de biomassa retornada ao sistema e, consequentemente, o potencial de acúmulo de carbono orgânico no solo (COS).

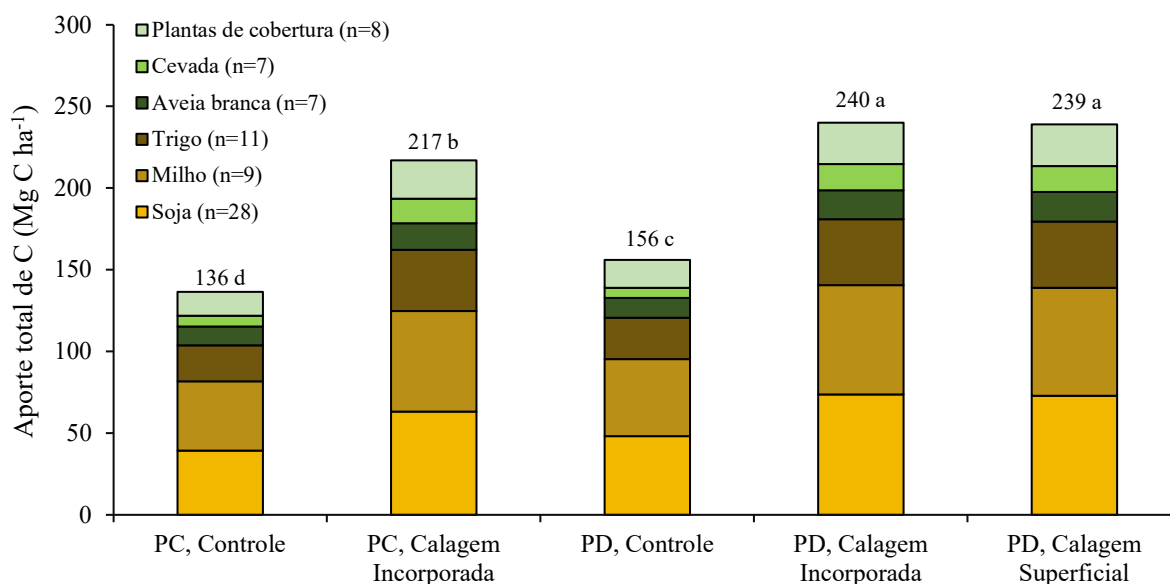
A contribuição relativa das culturas comerciais e das plantas de cobertura para os aportes acumulados de C (Fig. 13) evidencia que a diversificação da rotação foi determinante para sustentar a entrada de biomassa vegetal no sistema. Embora as plantas de cobertura não tenham sido avaliadas sob o ponto de vista produtivo, seu papel foi decisivo para aumentar a biomassa adicionada, sobretudo no plantio direto (PD), onde esse material permanece na superfície e contribui para a proteção física do solo. A soja respondeu pela maior parcela do aporte total, principalmente por sua alta frequência de cultivo, seguida por milho e trigo, culturas que apresentaram elevada produção de biomassa. As plantas de cobertura também exerceram contribuição expressiva, enquanto aveia branca e cevada tiveram menor participação relativa.

Como consequência, os maiores aportes totais de C ocorreram nos sistemas sob PD com calagem, atingindo aproximadamente 240 Mg ha<sup>-1</sup>, seguidos



**Figura 12.** Relação entre o potássio disponível no solo nas camadas de 0–10 cm (a) e 10–20 cm (b) e a produtividade relativa de grãos de milho, soja e trigo em um Latossolo subtropical brasileiro. A linha representa um modelo linear-platô. As 45 observações referem-se a cinco tratamentos, três repetições e três safras. Adaptado de Pesini et al. (2025).





**Figura 13.** Aportes totais de carbono em função de diferentes manejos de preparo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto), combinados ou não com diferentes estratégias de calagem, após 37 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adaptado de Kopp et al. (2026).

pelo preparo convencional (PC) com calagem (217 Mg ha<sup>-1</sup>). Nos solos sem aplicação de calcário, os aportes foram consistentemente menores, evidenciando que a limitação química imposta pela acidez restringiu o crescimento vegetal e reduziu as entradas de C no sistema.

Mais do que aumentar os aportes, o manejo determinou a capacidade do solo em reter esse C ao longo do tempo. Após 37 anos, os estoques de COS variaram amplamente entre os sistemas (Fig. 14), oscilando de 109,1 a 139,7 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 0–30 cm e de 205,7 a 297,4 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 0–100 cm. A calagem promoveu incrementos consistentes nos estoques de COS em ambos os sistemas de manejo, com respostas mais expressivas no PD, destacando-se a aplicação superficial de calcário que resultou no maior acúmulo em profundidade.

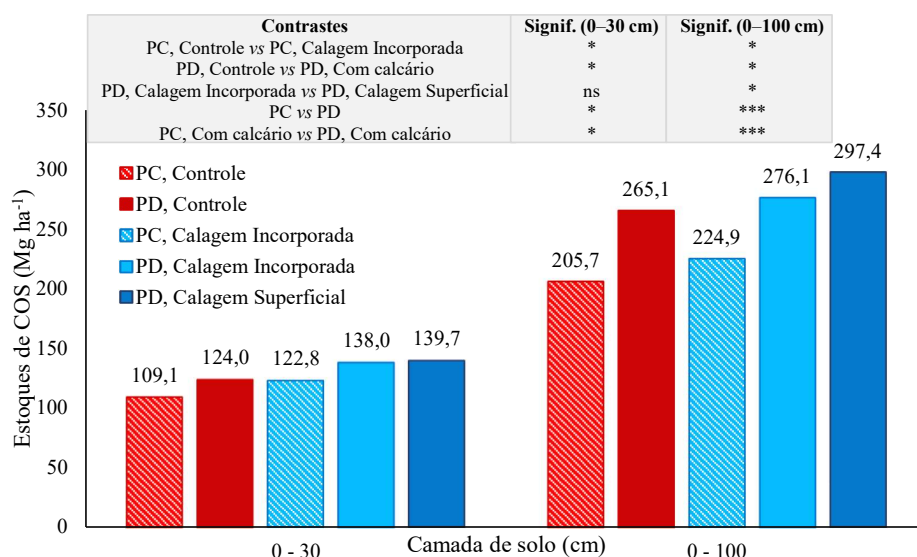
Mesmo na ausência de calagem, o sistema sob PD apresentou estoques substancialmente superiores aos observados no PC, inclusive em relação ao sistema com calagem. Esse resultado evidencia o papel central do manejo conservacionista na regulação do C no solo. Dentro dos sistemas de PD, a aplicação superficial de calcário mostrou-se mais eficiente do que a incorporação, resultando em 21,3 Mg ha<sup>-1</sup> a mais de C na camada de 0–100 cm. Esses resultados demonstram que os efeitos do manejo não se limitaram à superfície, alcançando camadas mais profundas, onde parte substancial do

C pode permanecer protegida e retida por longos períodos. Em todos os sistemas, aproximadamente 46–52% do estoque total encontrava-se abaixo de 30 cm, evidenciando a importância das camadas subsuperficiais como reservatório estratégico de C em longo prazo (Jobbágy e Jackson, 2000; Veloso et al., 2018).

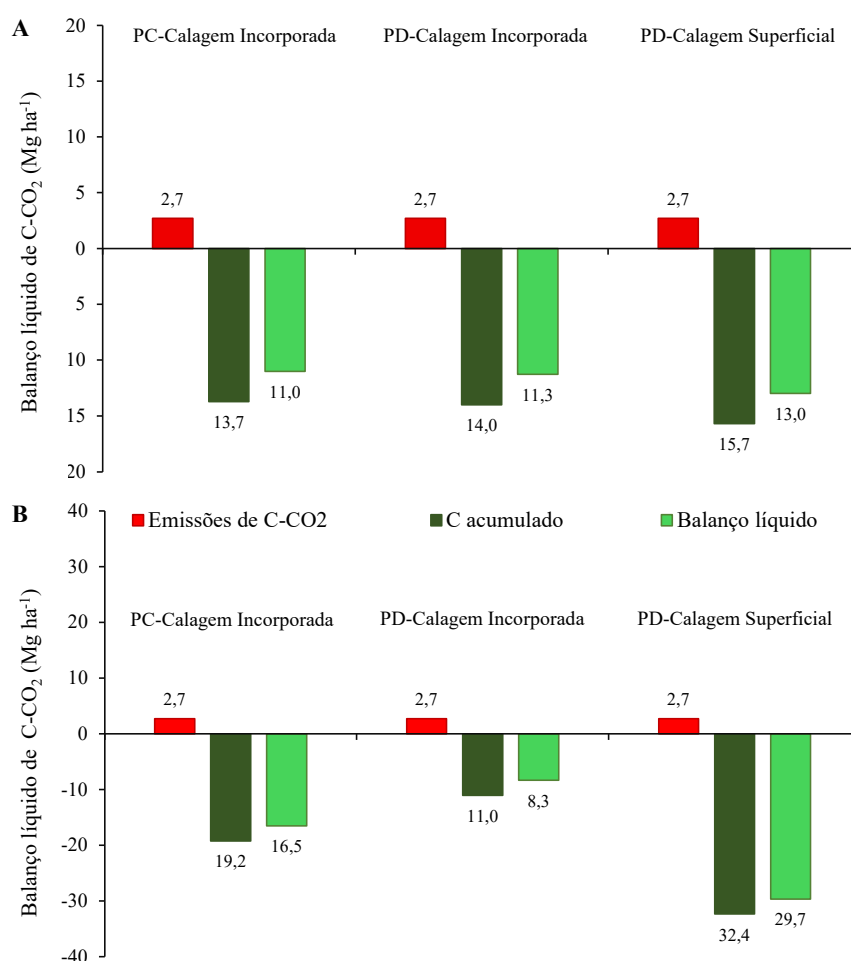
A discussão sobre calagem e C do solo frequentemente pressupõe que essa prática constitui uma fonte direta de emissão de CO<sub>2</sub>. Ao longo do experimento foram aplicados 20,9 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário e, com base no fator de emissão proposto pelo IPCC (2006), estimou-se uma emissão cumulativa de 2,7 Mg C–CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> associada à dissolução do carbonato no solo (Fig. 15). Contudo, quando se considera o sistema como um todo, essa emissão representa apenas uma fração do balanço de C.

Após descontar o CO<sub>2</sub> liberado pela calagem, todos os tratamentos com calcário apresentaram balanço líquido positivo dos estoques de COS, evidenciando que o estímulo ao crescimento vegetal e o aumento nos aportes de C ao solo superaram amplamente a emissão direta gerada pela dissolução do corretivo. O maior ganho líquido ocorreu no PD com calagem superficial, com taxas médias anuais de sequestro de 0,35 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na camada de 0–30 cm e 0,80 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na camada de 0–100 cm.

Quando esses ganhos foram expressos em função da quantidade de calcário aplicada, observou-



**Figura 14.** Estoques de carbono orgânico do solo (SOC) nas camadas de 0-30 e 0-100 cm, em função de diferentes manejos de preparo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto), combinados ou não com diferentes estratégias de calagem, após 37 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Contrastes significativos são indicados para  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*), e  $p < 0,001$  (\*\*\*) ; ns = não significativo. Adaptado de Kopp et al. (2026).



**Figura 15.** Balanço líquido entre as emissões e o sequestro de C-CO<sub>2</sub> resultantes da aplicação de 20,9 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário nas camadas de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b), em função de diferentes manejos de preparo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto), combinados ou não com diferentes estratégias de calagem, após 37 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Os tratamentos controle sob PC e PD foram utilizados como referência para as comparações com os tratamentos com calagem. Adaptado de Kopp et al. (2026).

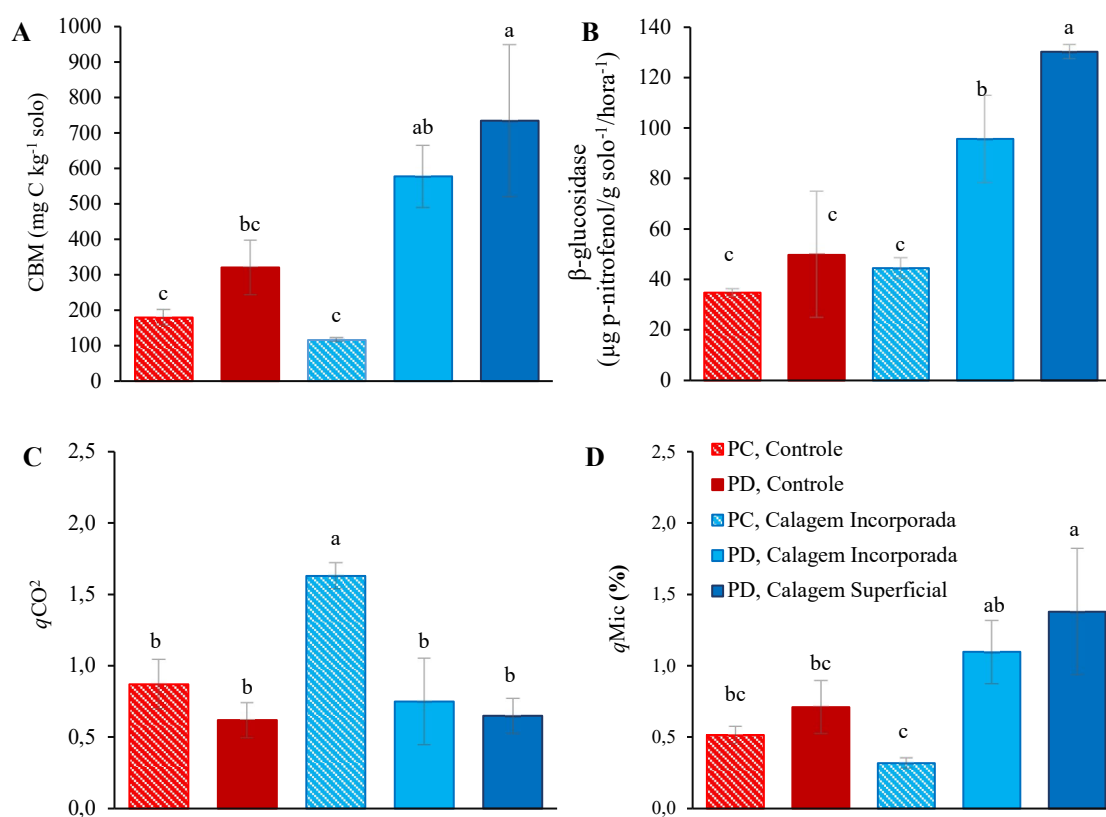
-se um sequestro equivalente a 1,4 Mg de C por Mg de calcário no PD com aplicação superficial, enquanto no PC esse valor foi 0,8 Mg de C por Mg de calcário, ambos em relação ao solo sem calcário dentro de cada sistema de manejo.

Analisando os aportes totais de C em conjunto com os estoques, observa-se que o atendimento a limiares mínimos de aporte não garante, por si só, maiores estoques de COS (Lovato et al., 2004; Costa et al., 2008; Bayer & Dieckow, 2020). O sistema sob PC com calagem, embora tenha apresentado aportes elevados, resultou em estoques significativamente inferiores aos observados no PD, inclusive em relação ao sistema sem calagem que obteve aportes 39% menores (Fig. 14).

Do ponto de vista da eficiência do sistema, o PD também apresentou maior capacidade de converter biomassa vegetal em C retido no solo. Enquanto esse sistema acumulou aproximadamente 0,4 Mg de C no solo por Mg de C aportado, o PC acumulou cerca de 0,2 Mg, evidenciando menor eficiência de manutenção mesmo com elevadas adições de biomassa vegetal.

Esse contraste demonstra que a dinâmica do C no solo é controlada predominantemente pelo manejo, superando o efeito isolado da quantidade de biomassa adicionada. Assim, a calagem, quando dissociada de práticas conservacionistas, não é suficiente para sustentar estoques elevados de C, uma vez que o revolvimento do solo favorece perdas e limita a retenção de C no solo ao longo do tempo (Bayer & Dieckow, 2020). A compreensão desses padrões requer considerar os processos biológicos que controlam o destino do C no solo. Após quase quatro décadas, a atividade biológica do solo foi fortemente influenciada pela interação entre manejo e calagem, com respostas mais expressivas observadas nos sistemas sob PD (Fig. 16).

A aplicação superficial de calcário em PD promoveu as melhorias mais expressivas no funcionamento biológico do solo, refletidas em aumentos na biomassa microbiana e na atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase (Fig. 16a,b), associados a maior eficiência no uso do C. Em contraste, no PC, as respostas biológicas à calagem foram limitadas e acompanhadas por aumento do quociente metabólico



**Figura 16.** Carbono da biomassa microbiana (CBM) (a); atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase (b); quociente metabólico ( $q_{CO_2}$ ) (c); e quociente microbiano ( $q_{Mic}$ ) (d), em função de diferentes sistemas de manejo do solo (PC, preparo convencional; PD, plantio direto), combinados ou não com diferentes estratégias de calagem, após 37 anos em um Latossolo subtropical no sul do Brasil. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adaptado de Kopp et al. (2026).



( $qCO_2$ ) (Fig. 16c), indicando menor eficiência metabólica e maior perda de C por respiração.

Esse padrão torna-se ainda mais evidente na análise conjunta dos indicadores microbianos. No PD, maiores valores de  $qMic$  (Fig. 16d) e menores valores de  $qCO_2$  indicam maior eficiência na assimilação e conservação do C. Em conjunto, esses indicadores revelam um sistema mais eficiente na incorporação do C da fitomassa vegetal à biomassa microbiana e à matéria orgânica (MO) do solo, favorecendo sua permanência em formas mais persistentes e melhorando a qualidade do solo.

De acordo com o modelo de estabilização mediada por microrganismos, essa maior eficiência favorece a formação de compostos associados à fração mineral do solo, principal mecanismo de proteção físico-química e estabilização do C em solos altamente intemperizados (Rumpel and Kögel-Knabner, 2011; Cotrufo et al., 2013; Lavelle et al., 2020). Nesse contexto, as diferenças na atividade microbiana ajudam a explicar por que maiores aportes de biomassa nem sempre resultam em maiores estoques de COS. No PC, o revolvimento do solo limita a formação de associações duráveis entre C e minerais. Em contraste, no PD, a combinação entre maior eficiência microbiana, maior continuidade de bioporos e proteção física dos agregados favorece o acúmulo do C no solo (Six et al., 2004).

Os resultados contribuem para revisar a visão de que a calagem reduz estoques de COS (Chan e Heenan, 1999; Kowalenko e Inhat, 2013). No presente estudo, quando associada a sistemas conservacionistas, a calagem aumentou a atividade biológica sem comprometer a manutenção do C, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a incorporação de C em formas mais persistentes, com aumento dos estoques de COS a longo prazo.

De forma integrada, os resultados demonstram que o acúmulo de C no solo não depende apenas da magnitude dos aportes, mas da eficiência com que o sistema processa e retém esse C (Briedis et al., 2012; Inagaki et al., 2016). A associação entre PD e calagem emerge como estratégia capaz de conciliar produtividade agrícola, melhoria da qualidade do solo e mitigação das mudanças climáticas, promovendo maior entrada e manutenção de C no solo (Wang et al., 2021). Esses resultados reforçam o papel do manejo conservacionista como estratégia efetiva de mitigação das mudanças climáticas (Lal, 2004; Paustian et al., 2016; Lal & Stewart, 2018).

Nesse sentido, a correção da acidez deve ser

compreendida não apenas como uma reação química, mas como uma intervenção agrônômica que reorganiza o funcionamento do sistema, favorecendo maior produção vegetal, melhoria da qualidade do solo e condições mais favoráveis ao acúmulo de C. Quando associada ao PD, a calagem emerge como elemento-chave na intensificação sustentável, promovendo incremento consistente dos estoques de COS, inclusive em profundidade. Esse conjunto de práticas demonstra como é possível conciliar produtividade agrícola com conservação do solo e resiliência climática em ambientes tropicais e subtropicais.

### Considerações finais

Os resultados deste experimento de longa duração demonstram que a correção da acidez do solo é o fator mais determinante para elevar e sustentar altos níveis de produtividade em sistemas agrícolas tropicais e subtropicais. A calagem, independentemente da forma de aplicação, promoveu aumentos consistentes no rendimento das culturas e maior estabilidade produtiva ao longo do tempo, enquanto a ausência de correção química limitou o potencial produtivo e reduziu a eficiência do sistema. A correção inicial da acidez em profundidade mostrou-se essencial para criar um ambiente radicular favorável e permitir que, sob plantio direto, a reaplicação superficial de calcário fosse suficiente para manter condições adequadas no perfil do solo. Esse ambiente livre de  $Al^{3+}$  favoreceu maior desenvolvimento radicular, maior absorção de nutrientes e maior resiliência frente à variabilidade climática.

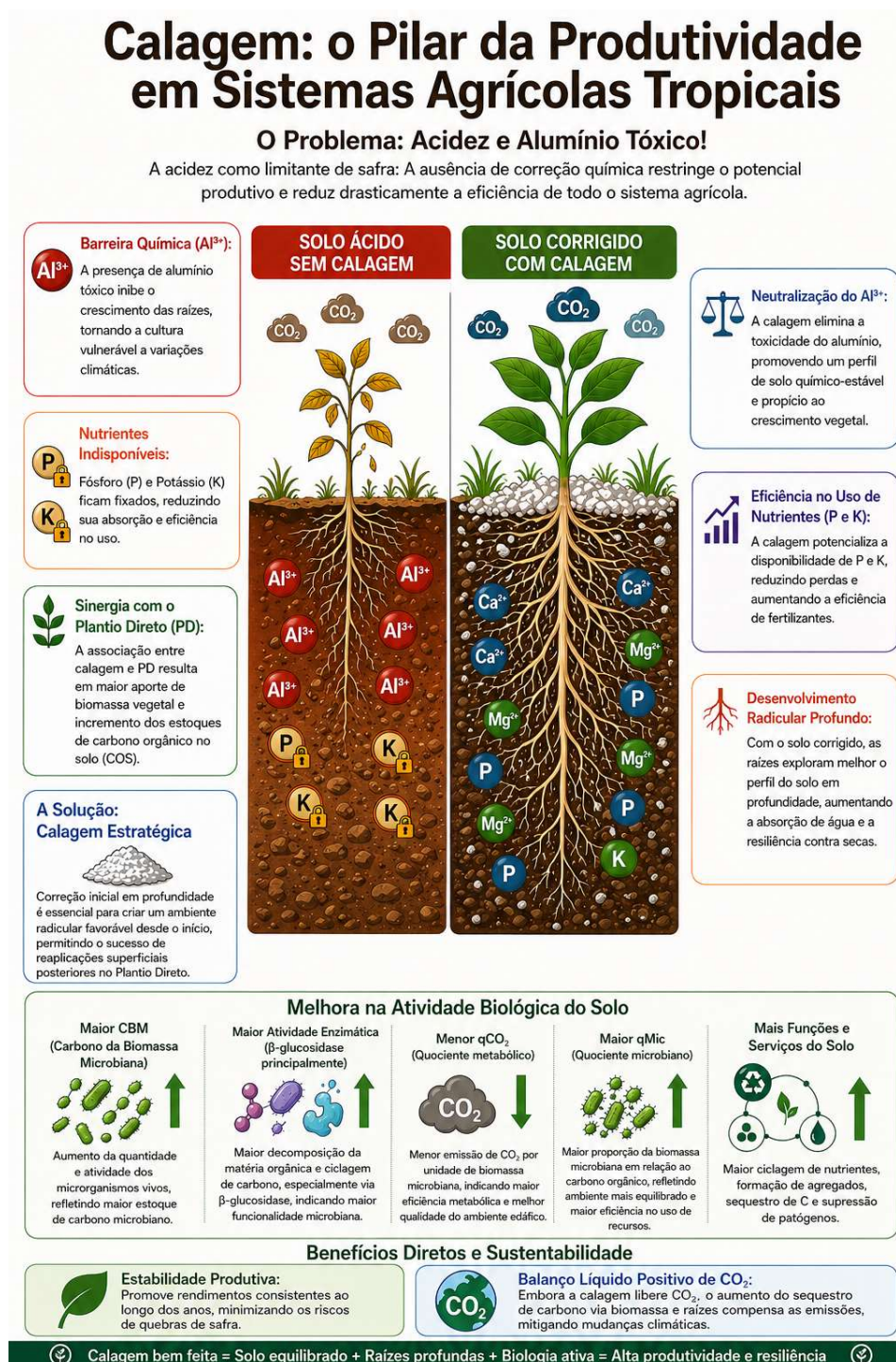
Além disso, a calagem foi decisiva para aumentar a eficiência no uso de fósforo e potássio, permitindo maior aproveitamento dos fertilizantes aplicados e reduzindo perdas econômicas e agrônômicas. Mesmo em solos com altos teores de P, a acidez restringiu a produtividade, reforçando que não há manejo eficiente de fertilidade sem neutralização prévia da acidez.

A associação entre PD e calagem resultou em maiores aportes de biomassa vegetal e incremento expressivo dos estoques de COS, inclusive em profundidade, sendo esse acúmulo condicionado não apenas pela magnitude dos aportes, mas pela maior eficiência do sistema em processar e reter o C no solo. Nesse contexto, a melhoria da qualidade biológica e da eficiência microbiana desempenhou papel central, favorecendo a incorporação do C à biomassa microbiana e sua posterior conversão

em formas mais estáveis no solo. Assim, embora a calagem seja considerada uma fonte potencial de  $\text{CO}_2$ , os resultados indicam que, em sistemas conservacionistas, o balanço líquido de C pode ser positivo, uma vez que o aumento da produção vegetal e da eficiência do sistema supera as emissões associadas à aplicação do corretivo.

Em síntese, os resultados demonstram que a integração entre correção da acidez e práticas con-

servacionistas, especialmente o PD, constitui uma estratégia central para sustentar altos tetos produtivos, aumentar a eficiência de uso de nutrientes e promover o acúmulo de C no solo. Essa abordagem evidencia que o manejo do sistema, mais do que a quantidade de insumos aplicada, é determinante para a conservação do solo e mitigação das mudanças climáticas (Fig. 17).



**Figura 17.** Esquema conceitual da calagem em sistemas agrícolas. Figura elaborada pelos autores com apoio de ferramentas de geração de imagens por inteligência artificial (OpenAI).

## Referencias

- Alves, L.A., Denardin, L.G.O., Farias, G.D., Flores, J.P.M., Filippi, D., Bremm, C., Carvalho, P.C.F., Martins, A.P., Gatiboni, L.C., Tiecher, T., 2022. Fertilization strategies and liming in no-till integrated crop–livestock systems: effects on phosphorus and potassium use efficiency. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 46, e0210125.
- Alves, L.A., Fontoura, S.M., Ambrosini, V.G., Pesini, G., Flores, J.P.M., Bayer, C., Tiecher, T., 2024. Impacts of tillage and liming on crop yields and soil acidity correction: insights from a 32-year experiment in Southern Brazil. *Plant Soil* 120. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-07076-w>.
- Artuso DR, Moterle DF, Santos DR, Tiecher T (2024). Potassium distribution in soil profiles under no-tillage system. *Rev Bras Cienc Solo* 48:e0230125. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230125>
- Bargaz, A., Elhaissofi, W., Khourchi, S., Benmrid, B., Borden, K.A., Rchiad, Z., 2021. Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus. *Microbiol. Res.* 252, 126842 <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126842>
- Barrow, N.J., 2017. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant Soil* 410, 401–410. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9>
- Bayer, C.; Dieckow, J., 2020. Lessons learnt from long-term no-till systems regarding soil management in Humid Tropical and Subtropical Regions. In: Dang, Y., Dalal, R., Menzies, N. (eds) *No-till farming systems for sustainable agriculture*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7_25).
- Becker HC, Leon J (1988) Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101(1):1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1988.tb00261.x>
- Bellinaso, R.J.S., Tiecher, T., Vargas, J.P.R., Rheinheimer, D.S., Bruun, S., 2021. Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. *Soil Res.* 60 (1), 33–49. <https://doi.org/10.1071/SR21021>
- Ben JR, Peruzzo G, Minella E (1988) Comportamento de alguns genótipos de cevada em relação à acidez do solo. *Pesqui Agropecu Bras* 23(11):1315–1320
- Bossolani JW, Crusciol CAC, Portugal JR, Moretti LG, Garcia A, Rodrigues VA, Fonseca MC, Bernart L, Vilela RG, Mendonça LP, Reis AR (2021) Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. *Eur J Agron* 128:126308. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126308>
- Briedis, C., Sá, J.C.M., Caires, E.F., Navarro, J.F., Inagaki, T.M., Boer, A., Ferreira, A.O., Neto, C.Q., Canalli, L.B., Santos, J. B., 2012. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an Oxisol under long-term no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76(1), 151–160. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0128>.
- Campos M, Rossato OB, Marasca I, Martello JM, Siqueira GF, Garcia CP, Rossetto R, Calonego JC, Cantarella H, Crusciol CAC (2022) Deep tilling and localized liming improve soil chemical fertility and sugarcane yield in clayey soils. *Soil till Res* 222:105425. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105425>
- Chan, K.Y., Heenan, D.P., 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(6), 1841–1844. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361841x>
- Chen, Z.C., Liao, H., 2016. Organic acid anions: An effective defensive weapon for plants against aluminum toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils. *J. Genet Genomics* 43 (11), 631–638.
- Choudhary M, Panday SC, Meena VS, Singh S, Yadav RP, Mahanta D, Mondal T, Mishra PK, Bisht JK, Pattanayak A (2018) Long-term effects of organic manure and inorganic fertilization on sustainability and chemical soil quality indicators of soybean-wheat cropping system in the Indian mid-Himalayas. *Agr Ecosyst Environ* 257:38–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.029>
- Colussi J, Schnitkey G (2020) Brazilian soybean profits to reach historical highest in 2020/21. *Farmdoc Daily* 10(175):1–4. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.328890>
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC (2016) Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11st ed. Sociedade Brasileira De Ciência Do Solo – Núcleo Regional Sul, Porto Alegre
- Costa, F.S., Bayer, C., Zanatta, J.A., Mielniczuk, J., 2008. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 32, 323–332. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100030>
- Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Denef, K. and Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. *Glob Change Biol*, 19: 988–995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>.
- Fageria NK (2008) Optimum soil acidity indices for dry bean production on an Oxisol in no-tillage system. *Commun Soil Sci Plan* 39(5–6):845–857. <https://doi.org/10.1080/00103620701880909>
- FAO, 2015. Status of the World’s Soil Resources (SWSR)—Main report. Natural Resources and Environment Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS), Rome, Italy.
- Fontoura SMV, Melinski AM, Motta ACV, Gotz LF, Araujo EM, Prior SA, Pauletti V (2024) Soybean and corn yield as affected by crop rotation and surface liming under a no-tillage system. *Soil Res* 62(1):SR22246. <https://doi.org/10.1071/SR22246>
- Fontoura, S.M.V., Vieira, R.C.B., Bayer, C., Viero, F., Anghinoni, I., Moraes, R.P., 2015. Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná (Soil fertility and its management in no-tillage in the Center-South of Paraná). *Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, Guarapuava*, p. 146.
- Franchini JC, Debiasi H, Junior AAB, Tonon BC, Farias JRB, Oliveira MCN, Torres E (2012) Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades
- Hale SE, Nurida NL, Mulder J, Sørmo E, Silvani L, Abiven S, Joseph S, Taherymoosavi S, Cornelissen G (2020) The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. *Sci Total Environ* 719:137455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137455>
- Hamilton EJ, Miles RJ, Lukaszewska K, Remley M, Massie M, Blevins DG (2012) Liming of two acidic soils Improved Grass Tetany ratio of stockpiled Tall Fescue without increasing plant available phosphorus. *J Plant Nutr* 35:497–510. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.631673>
- Han T, Li D, Liu K, Huang J, Zhang L, Liu S, Shah A, Liu L, Feng G, Zhang H (2023) Soil potassium regulation by initial K level and acidification degree when subjected to liming: a meta-analysis and long-term field experiment. *Catena* 232:107408. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107408>
- Hao T, Zhu Q, Zeng M, Shen J, Shi X, Liu X, Zhang F, Vries W (2020) Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. *J Environ Manage* 270:110888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>



Hassan W, Saba T, Jabbi F, Wang B, Cai A, Wu J (2022) Improved and sustainable agroecosystem, food security and environmental resilience through zero tillage with emphasis on soils of temperate and subtropical climate regions: A review. *Int Soil Water Conserv Res* 10(3):530–545. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.01.005>

Holland JE, Bennett AE, Newton AC, White PJ, McKenzie BM, George TS, Pakeman RJ, Bailey JS, Fornara DA, Hayes RC (2018) Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review. *Sci Total Environ* 610:316–332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020>

Holland JE, White PJ, Glendining MJ, Goulding KWT, McGrath SP (2019) Yield responses of arable crops to liming—An evaluation of relationships between yields and soil pH from a long-term liming experiment. *Eur J Agron* 105:176–188. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.016>

in southern Brazil. *Field Crop Res* 137:178–185. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.003>

Inagaki, T.M., Sá, J.C.M., Caires, E.F., Gonçalves, D.R.P., 2016. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 231, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.034>.

International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2015. Soil test levels in North America. *Int. Plant Nutrition Inst.* <http://soiltest.ipni.net/>

IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10(2), 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)

Kaschuk G, Alberton O, Hungria M (2010) Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biol Biochem* 42(1):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.020>

Kirchmann H, Börjesson G, Bolinder MA, Kätterer T, Djodjic F (2020) Soil properties currently limiting crop yields in Swedish agriculture—an analysis of 90 yield survey districts and 10 long-term field experiments. *Eur J Agron* 120:126132. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126132>

Kopp J, Fontoura SMV, Alves LAA, Tiecher T, Vieira FCB, Bayer C, (2026) Long-term no-tillage and liming enhance soil carbon accumulation, crop productivity, and soil biological indicators in a subtropical Oxisol: Results from a 37-year field experiment. *Soil & Tillage Research.* (Under Review).

Kowalenko, C.G., Ihnat, M., 2013. Residual effects of combinations of limestone, zinc and manganese applications on soil and plant nutrients under mild and wet climatic conditions. *Can. J. Soil Sci.* 93(1), 113–125. <https://doi.org/10.4141/cjss2011-044>

Lal, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623–1627 (2004). <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.

Lal, R., & Stewart, B.A. (Eds.). (2018). *Soil and Climate* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21225>.

Lavallee, J. M.; Soong, J. L.; Cotrufo, M. F. 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26: 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

Li Y, Cui S, Chang SX, Zhang Q (2019) Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. *J Soil Sediments* 19:1393–1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>

Lin Y, Ye G, Liu D, Ledgard S, Luo J, Fan J, Yuan J, Chen Z, Ding W (2018) Long-term application of lime or pig manure rather than plant residues suppressed diazotroph abundance and diversity and altered community structure in an acidic Ultisol. *Soil Biol Biochem* 123:218–228. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.018>

Lovato, T., Mielniczuk, J., Bayer, C., Vezzani, F., 2004. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 28, 175–187. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100017>

Luo S, Yu L, Liu Y, Zhang Y, Yang W, Li Z, Wang J (2016) Effects of reduced nitrogen input on productivity and N<sub>2</sub>O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system. *Eur J Agron* 81:78–85. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.002>

Martins AP, Anghinoni I, Costa SEVGA, Carlos FS, Nichel GH, Silva RAP, Carvalho PCF (2014) Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop–livestock system under varying grazing intensities. *Soil till Res* 144:141–149. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.019>

Martins AP, Denardin LG, de O, Tiecher T, Borin JBM, Schaidhauer

Mickelbart MV, Hasegawa PM, Bailey-Serres J (2015) Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability. *Nat Rev Genet* 16(4):237–251. <https://doi.org/10.1038/nrg3901>

Miotto A, Tiecher T, Kaminski J, Brunetto G, Conti L, Tiecher TL, Martins AP, Rheinheimer DS (2020) Soil acidity and aluminum speciation affected by liming in the conversion of a natural pasture from the Brazilian Campos Biome into no-tillage system for grain production. *Arch Agron Soil Sci* 66:138–151. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1605164>

Moraes FA, Moreira SG, Peixoto DS, Silva JCR, Macedo JR, Silva MM, Silva BM, Sanchez PA, Nunes MR (2023) Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. *Eur J Agron* 144:126763. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>

Morel, C., Plénet, D., Mollier, A., 2021. Calibration of maize phosphorus status by plant-available soil P assessed by common and process-based approaches. Is it soil-specific or not? *Europ. J. Agron.* 122, 126174 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126174>

Nunes MR, Karlen DL, Veum KS, Moorman TB, Cambardella CA (2020) Biological soil health indicators respond to tillage intensity: a US meta-analysis. *Geoderma* 369:114335. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114335>

Obrycki JF, Kovar JL, Karlen DL (2018) Subsoil Potassium in Central Iowa soils: Status and Future challenges. *Agrosystems Geosci Environ* 1:180018. <https://doi.org/10.2134/age2018.07.0018>

Oliveira, L.E.Z., Nunes, R.S., Figueiredo, C.C., Rein, T.A., 2022. Spatial distribution of soil phosphorus fractions in a clayey Oxisol submitted to long-term phosphate fertilization strategies. *Geoderma* 418 (2022), 115847. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115847>

Osman KT (2018) Acid soils and acid sulfate soils. In: Osman KT (ed) *Management of Soil Problems*. Springer, New York, pp 299–332. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75527-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75527-4_11)

Paustian, K.; Lehmann, J.; Ogle, S.; Reay, D.; Robertson, G.P.; Smith, P. Climate-smart soils. *Nature*. 2016 Apr 7;532(7597):49–57. PMID: 27078564. <https://doi.org/10.1038/nature17174>.

Pesini G, Fontoura SM, Ambrosini VG, Alves LA, Flores JPM, Bayer C, Tiecher T (2025). Long-term Impact of Tillage Systems and Liming on Grain Yield and Soil Potassium Dynamics in a Crop Rotation System. *J Soil Sci Plant Nutr* 25, 2451–2464 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02277-3>

Qaim M (2020) Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Appl Econ Perspect Policy* 42(2):129–150. <https://doi.org/10.1002/aep.13044>

Ragel P, Raddatz N, Leidi EO, Quintero FJ, Pardo JM (2019) Regulation of K + Nutrition in plants. *Front Plant Sci* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00281>

- Rahman, R., Upadhyaya, H., 2021. Aluminium toxicity and its tolerance in plant: a review. *J. Plant Biol.* 64 (2), 101–121. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09280-4>
- Reckling M, Ahrends H, Chen TW, Eugster W, Hadasch S, Knapp S, Laidig F, Linstädter A, Macholdt J, Piepho H, Schiffrers K, Döring TF (2021) Methods of yield stability analysis in long-term field experiments. *A Review Agron Sustain Dev* 41:1–28. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00681-4>
- Reed V, Finch B, Souza J, Watkins P, Arnall B (2022) Soil sampling depth impact on phosphorus yield response prediction in winter wheat. *Agric Environ Lett* 7:e20067. <https://doi.org/10.1002/acl.2.20067>
- Rheinheimer DS, Tiecher T, Gonzatto R, Santanna MA, Brunetto G, Silva LS (2018) Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from south Brazilian Campos. *Soil Till Res* 180:222–231. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03014>
- Rheinheimer, D. R., Troian, A., Camotti Bastos, M., Pesini, G., Tiecher, T. (2024). Soil aluminum saturation threshold for subtropical crops in no-tillage system. *Soil Research*, 62(3), SR23174. <https://doi.org/10.1071/SR23174>
- Rheinheimer, D.S., Fornari, M.R., Bastos, M.C., Fernandes, G., Santanna, M.A., Calegari, A., Canali, L.B.S., Caner, L., Labanowski, J., Tiecher, T., 2019. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. *Soil Tillage Res.* 192, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.018>
- Rodrigues, M., Withers, P.J.A., Soltangheisi, A., Vargas, V., Holzschuh, M., Pavinato, P. S., 2021. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. *Soil Tillage Res.* 205, 104770 <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104770>
- Ruiz, F., Perlatti, F., Oliveira, D.P., Ferreira, T.O., 2020. Revealing tropical technosols as an alternative for mine reclamation and waste management. *Minerals* 10, 110. <https://doi.org/10.3390/min10020110>
- Rumpel, C., Kögel-Knabner, I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil* 338, 143–158 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>.
- Sá JCM, Tivet F, Lal R, Briedis C, Hartman DC, Santos JZ, Santos JB (2014) Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil till Res* 136:38–50. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.010>
- Singh VK, Dwivedi BS, Rathore SS, Mishra RP, Satyanarayana T, Majumdar K (2021) Timing Potassium Applications to Synchronize with Plant demand. In: Murrell TS, Mikkelsen RL, Sulewski G, Norton R, Thompson ML (eds) *Improving potassium recommendations for agricultural crops*. Springer International Publishing, Cham, pp 363–384
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79(1), 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.
- Tiecher T, Fontoura SM, Ambrosini VG, Araújo EA, Alves LA, Bayer C, Gatiboni LC (2023) Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. *Geoderma* 435:116495. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116495>
- Tiecher T, Gatiboni LC, Rheinheimer DS, Bissani CA, Martins AP, Gianello C, Dick DP, Bortoluzzi EC, Escosteguy PAV, Silva LS, Brunetto G, Mallmann FJK, Pauletti V, Lourenzi CR, Sousa RO, Carlos FS, Azevedo AC (2022) Base saturation is an inadequate term for soil science. *Rev Bras Cienc Solo* 46:1–6. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220125>
- Tiecher, T., Gomes, M.V., Ambrosini, V.G., Amorim, M.B., Bayer, C., 2018. Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis. *Soil Tillage Res.* 175, 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.015>
- Tiecher, T., Martins, A.P., Peretto, E.J.S., Fink, J.R., Santos, L.S., Denardin, L.G.O., Tiecher, T.L., 2016. Evolução e estado da fertilidade do solo no Norte do Rio Grande do Sul e Sudoeste de Santa Catarina (Evolution and state of soil fertility in the North of Rio Grande do Sul and the Southwest of Santa Catarina). 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2016. v. 1. 53 p
- Tollenaar M, Lee EA (2002) Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crop Res* 75(2–3):161–169. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00024-2)
- Vargas JP, Santos DR, Bastos MC, Schaefer G, Parisi PB (2019) Application forms and types of soil acidity corrective: changes in depth chemical attributes in long term period experiment. *Soil till Res* 185:47–60. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.014>
- Veloso, M.G., Angers, D.A., Tiecher, T., Giacomini, S., Dieckow, J., Bayer, C., 2018. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 268, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.024>
- Vizioli B, Cavalieri-Polizeli KMV, Tormena CA, Barth G (2021) Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil Till Res* 209:104935. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104935>
- W, Anghinoni I, Carvalho PC, de Kumar F S (2020) Nine-year impact of grazing management on soil acidity and aluminum speciation and fractionation in a long-term no-till integrated crop-livestock system in the subtropics. *Geoderma* 359:113986. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113986>
- Wang Y, Yao Z, Zhan Y, Zheng X, Zhou M, Yan G, Wang L, Werner C, Butterbach-Bahl K (2021) Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Glob Change Biol* 27(12):2807–2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., Wang, L., Werner, C., Butterbach-Bahl, K., 2021. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Glob. Change Biol.* 27(12), 2807–2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Wang, Z., Yin, Y., Liu, G., Lun, F., Zhang, F., Cui, Z., Wu, J., 2022. International trade reduces global phosphorus demand but intensifies the imbalance in local consumption. *Sci. Total Environ.* 830, 154484 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154484>
- Yu, X., Keitel, C., Dijkstra, F.A., 2021. Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security* 29, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100545>
- Yuan M, Fernández FG, Pittelkow CM, Greer KD, Schaefer D (2020) Soil and crop response to phosphorus and potassium management under conservation tillage. *Agron J* 112:2302–2316. <https://doi.org/10.1002/agj2.20114>

# Rotação de culturas na construção de sistemas produtivos mais resilientes às mudanças climáticas

.....

Juliano Luiz de Almeida<sup>1</sup>, Lucas Alves<sup>2</sup>,  
Gustavo Nogara-Siqueira<sup>3</sup>, Tales Tiecher<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. Rodovia PR 540, Km 9, Colônia Vitória, Distrito de Entre Rios, Guarapuava, Paraná, Brasil. CEP: 85.139-400. Email: juliano@agraria.com.br

<sup>2</sup>Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Regional Integrada. Rua Assis Brasil 709, Frederico Westphalen, RS, Brasil. CEP: 98400-000. Email: lucasaquinoalves.laa@gmail.com

<sup>3</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 7712, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil. CEP: 91540-000. Email: gustavo.nogaras@gmail.com

<sup>4</sup>Embrapa Pecuária Sul. Rodovia BR-153, Km 632,9, Vila Industrial (Zona Rural), Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil. CEP 96401-970. Email: tales.tiecher@embrapa.br

~~~~~


Introdução

O aumento na frequência dos desastres climáticos tem afetado diretamente os sistemas agrícolas, seja pelo excesso ou pela falta de água. Esse problema reforça a importância de práticas de manejo visando à conservação do solo e à estabilidade da produção. Nesse cenário, a rotação de culturas é uma das principais estratégias utilizadas pelos agricultores que praticam uma agricultura economicamente viável e ambientalmente sustentável, não apenas para elevar, mas também para estabilizar o rendimento e construir sistemas agrícolas mais resilientes. Dessa forma, este capítulo visa destacar os principais conceitos relacionados à rotação de culturas, discutir os efeitos dessa prática sobre a estabilidade produtiva e a dinâmica dos nutrientes no solo e contribuir com indicações de sistemas de rotação mais adequados combinando as principais culturas de inverno e verão do estado do Paraná.

Afinal, o que é a rotação de culturas? Diversos autores abordam a rotação de culturas, com conceitos mais simples e outros mais complexos. Em uma visão mais simples, a rotação de culturas constitui-se na alternância regular de diferentes culturas em uma mesma área (Santos; Reis, 2001). Por outro lado, outros pesquisadores consideram que a rotação de culturas consiste em alternar espécies vegetais, ao longo dos anos, numa mesma área agrícola, em que as espécies escolhidas devem beneficiar as culturas sucessoras (Gonçalves et al., 2007). Já uma definição mais complexa considera que, além de uma alternância ordenada de diferentes culturas, não haja repetição da mesma espécie no intervalo de um, dois ou até três anos (Derpsch, 1985). É importante observar que definições mais complexas já impõem limitações em relação ao intervalo de tempo na repetição de espécies.

Considerando o manejo de doenças, a rotação de culturas possibilita a decomposição dos resíduos culturais e permite a redução da incidência de patógenos necrotróficos na cultura-alvo (Reis, 1991). Patógenos necrotróficos conseguem extrair nutrientes de tecidos mortos do hospedeiro, enquanto patógenos biotróficos extraem seus nutrientes apenas de tecidos vivos (Reis; Fernandes; Picinini, 1988). Nessa abordagem, a espécie poderia voltar ao sistema, permitindo uma menor pressão de doenças. Isso pode exigir, por exemplo, interromper o cultivo de trigo ou soja na lavoura, até que ocorra a decomposição da palhada dessa espécie, sendo necessário o cultivo de outra espécie não suscetível aos patógenos da cultura-alvo (Reis; Casa; Bianchin, 2011).

E o que é a sucessão de culturas? Rotação e sucessão de culturas podem até parecer semelhantes

em um primeiro olhar, mas envolvem uma diferença importante. A sucessão de culturas representa sistemas com uma sequência de culturas no mesmo ano agrícola e que repetem essa organização nos anos seguintes (Santos; Reis, 2001). Pode-se destacar sistemas como soja-trigo ou soja-cevada. Mesmo que ocorra semeadura de diferentes espécies na mesma área, se for caracterizada pela mesma cultura de verão ou inverno todos os anos, ainda assim é considerado como sucessão de culturas. Por outro lado, a separação entre sucessão e rotação de culturas não é tão fácil como parece. Dependendo do ponto de vista, um sistema soja-trigo-milho pode ser considerado rotação, mas para outros o fator tempo é mais limitado, exigindo pelo menos dois a três anos de ausência da mesma espécie na área. Não há unanimidade, mas desde que a sucessão clássica não prevaleça na área, os benefícios da rotação de culturas serão implementados no sistema (Figura 1). Isso será demonstrado neste capítulo.

Dentre os sistemas de produção mais simples está o monocultivo. O uso de apenas uma espécie, na mesma área e de forma repetida ao longo dos anos caracteriza o monocultivo, seja no inverno ou no verão, sob a palha dessa espécie (Reis; Casa; Bianchin, 2011). Segundo esta concepção, o cultivo de soja-pousio-soja é considerado como um monocultivo. Para alguns autores, soja-trigo, repetidos ao longo dos anos, podem ser chamados de monocultivo de soja no verão e monocultivo de trigo no inverno ou duplo monocultivo de inverno e verão (Santos; Reis, 2001). No entanto, essa definição se assemelha a um sistema de sucessão soja-trigo. Portanto, neste trabalho consideramos o primeiro conceito.

CONTINUUM DOS SISTEMAS DE CULTIVO



Figura 1. Continuum dos sistemas de cultivo.

Os sistemas de produção vigentes no Paraná têm utilizado sistemas de preparo do solo com menor revolvimento, quando comparados ao plantio convencional. Um dos principais é o plantio direto, que tem sido definido de diferentes formas durante o seu processo de evolução. O plantio direto é um sistema agropecuário, com mínima mobilização do solo, exceto na linha de semeadura, que envolve a diversificação de espécies e manutenção dos resíduos vegetais das culturas anteriores na superfície do solo, mantendo a cobertura constante ao longo do ano (Denardin, 1997). Nesse sentido, a sucessão ou a rotação de culturas são fatores essenciais, pois se não houver a diversificação de culturas, não haverá cobertura de solo suficiente para viabilizar esta prática agrícola.

Já o “Sistema Plantio Direto” (SPD) é um termo que surgiu da necessidade de tratar o plantio direto não como uma simples prática de preparo do solo, mas sim um conjunto complexo de preceitos da agricultura conservacionista destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos (Denardin et al., 2012). O SPD visa à produção de alimentos em harmonia com a conservação da natureza, seguindo os requisitos de mínimo revolvimento do solo, cobertura permanente e diversificação de culturas nos diferentes modelos de produção agrícola ou agropastoril, seja com rotação ou consorciação de espécies (Denardin et al., 2012; FEBRAPDP, [S.d.]). Além disso, a partir dos anos 2000, a ideia de colher-semear foi sendo adotada no SPD, em que o intervalo entre colheita e semeadura é o menor

possível, podendo ocorrer até no mesmo dia. Esta definição destaca a dependência do SPD da rotação de culturas, pois se não houver a diversificação de culturas, não haverá plantas em crescimento durante todo o ano para garantir a cobertura de solo e os benefícios decorrentes do seu uso.

Nesse sentido, o sistema de produção, no meio agrícola, é caracterizado pelo conjunto de sistemas de cultivo de uma propriedade rural levando em conta os fatores de produção, como a terra, mão de obra e o capital, organizados pelo processo de gestão (Hirakuri et al., 2012). Isso engloba as tomadas de decisão quanto ao sistema de preparo do solo até a escolha das espécies cultivadas em sucessão ou rotação de culturas. Portanto, a definição das espécies no sistema de produção, seja organizada em sucessão ou rotação de culturas, deve levar em conta não só os aspectos da produtividade das culturas, mas também a estabilidade do sistema, aporte de matéria seca, uso da água, cobertura do solo e eficiência de uso de nutrientes.

Sistemas de sucessão e rotação no contexto do estado do Paraná

Historicamente, a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA) investigou e ainda desenvolve pesquisas relacionadas aos sistemas de produção no Paraná, especialmente sobre sucessão e rotação de cultivos. Vários sistemas de produção do Paraná têm se baseado no cultivo de soja no verão e, muitas vezes, apenas cevada no inverno. Isso ocorre, especialmente devido ao preço eleva-

do da soja e menor risco de investimento em comparação ao milho. Como consequência, os sistemas agrícolas têm sido simplificados, o que contribuiu para o baixo aporte de palha e afeta negativamente a estabilidade de produção e a conservação do solo.

Para ilustrar os efeitos do uso de diferentes sucessões/rotações de culturas, aqui serão apresentadas as principais descobertas obtidas ao longo de um experimento de mais de 25 anos, iniciado no ano de 2000 e que permanece ativo até os dias atuais na área experimental da FAPA. Este experimen-

to avalia cinco sistemas de diversificação de culturas, nos quais há alternância entre soja e milho no verão e também das culturas de inverno entre si. Os tratamentos consistem em proporções de milho e soja no verão, sendo 0, 25, 33, 50 e 100% de milho no verão, além do cultivo de cevada, trigo, aveia branca, canola, ou nabo forrageiro no inverno (Figura 2).

O objetivo inicial do estudo foi determinar se a diminuição da palha do milho em plantio direto é efetiva para resolver o problema da giberela

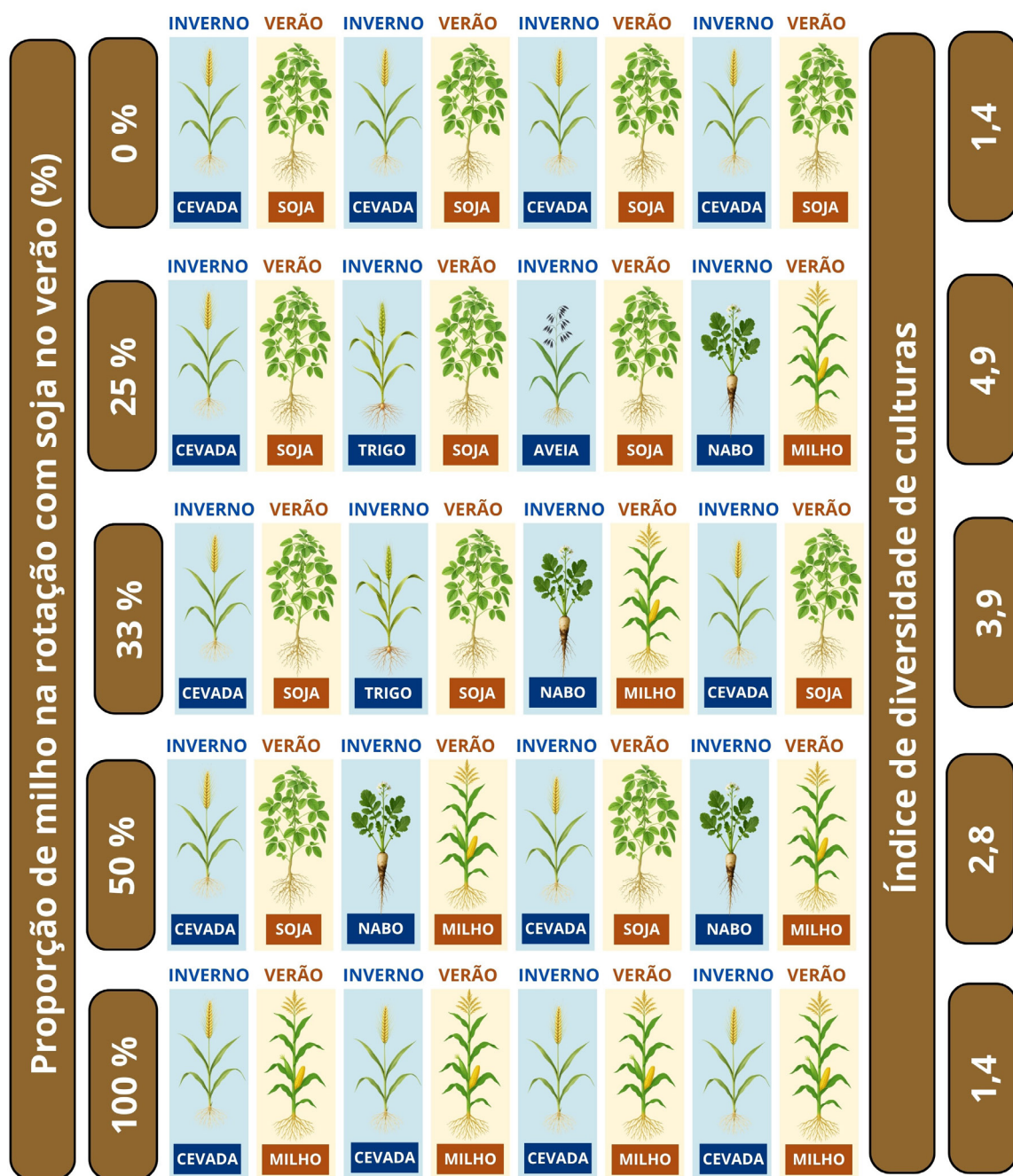


Figura 2. Representação esquemática das rotações de culturas adotadas no ciclo de 4 anos envolvendo proporções variadas de milho em rotação com soja no verão e diferentes cereais de inverno em plantio direto. Desde 2009, o nabo forrageiro foi substituído por canola.

e da produção de micotoxinas em nível de campo. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da tese de doutorado, intitulada “Manejo em plantio direto no 2º Planalto do Paraná e consequências sobre a produção de micotoxinas” (Almeida, 2006). Os resultados obtidos nos primeiros anos do estudo indicaram que a diminuição da quantidade da palha de milho em plantio direto, seja por meio de rotação e sucessão de culturas ou por meio de degradação da palha de milho, não diminuiu a ocorrência de giberela e a quantidade das micotoxinas deoxinivalenol (DON) e zearalenona (ZEA) produzidas nas culturas do milho, da cevada e do trigo em nível de campo. Desde então, a pesquisa evoluiu e segue até hoje, evidenciando que sistemas conservacionistas (como o plantio direto com rotação de culturas) aumentam a estabilidade produtiva, melhoram a eficiência de uso de nutrientes e favorecem o acúmulo de carbono no solo.

Como observado na representação esquemática (Figura 2), o sistema com 0% de milho representa uma sucessão soja-cevada. Por outro lado, os sistemas com 25, 33 e 50% incluem milho a cada 4, 3 e 2 anos, respectivamente. Assim, o sistema com 50% consiste em um ano com soja e o outro com milho. Por fim, o sistema com 100% de milho representa a sucessão milho-cevada. No inverno, também ocorre a diversificação das espécies nos sistemas intermediários (25, 33 e 50%), nos quais trigo, aveia branca, nabo forrageiro ou canola são utilizados em rotação com a cevada.

O índice de diversidade (à direita do esquema – Figura 2) fornece uma informação do grau de diversificação de cada sistema. Quanto maior o número de espécies e o tempo necessário para concluir um ciclo completo de sucessão/rotação, maior é o valor do índice de diversidade. Portanto, tratam-se de sistemas mais diversificados. Os sistemas com apenas soja ou milho no verão e cevada no inverno (0 e 100%) têm os menores índices de diversificação, sendo 1,4 para ambos. Por outro lado, os sistemas com maior alternância de espécies apresentam os maiores índices de diversificação, sendo 4,9, 3,9 e 2,8 para os sistemas 25, 33 e 50%, respectivamente.

Ao longo dos 25 anos do experimento, os sistemas mais complexos já completaram mais de cinco ciclos de rotação enquanto os sistemas menos diversificados completaram mais de 10 ciclos. Vale destacar que a adubação foi realizada de forma específica para cada cultura conforme sua necessidade, mantendo-se igual para cada espécie no mesmo

ano. Isso permite simular um sistema de produção real e investigar como as culturas e a escolha da sucessão/rotação influenciam no rendimento, estabilidade e eficiência no uso de nutrientes.

Produtividade, estabilidade de produção e estoque de carbono no solo

Os sistemas de rotação de culturas têm impacto direto não só na produtividade, mas também na estabilidade da produção ao longo dos anos, que é o que realmente garante segurança ao produtor (Alves et al., 2026). Sistemas mais simples, como monocultivos e sucessão de culturas, até podem ter bons resultados em anos favoráveis, mas tendem a oscilar muito quando o clima se apresenta mais instável. Já sistemas mais diversificados, com rotação de culturas e uso de plantas de cobertura, apresentam produção mais consistente, com menor variação entre safras. No experimento de longa duração da FAPA, entre 2000 e 2019, os sistemas diversificados aumentaram a produtividade de culturas como soja, milho e cevada em até 8%, 52% e 30%, respectivamente, em comparação aos sistemas de sucessão soja-cevada e milho-cevada (Figura 3) (Alves et al. 2026). Na soja, a adoção de sistemas com rotação de culturas resultou em aumento de produtividade, com médias de até 3,7 Mg ha⁻¹ nos sistemas mais diversificados, em comparação a cerca de 3,3 Mg ha⁻¹ na sucessão soja-cevada (Alves et al., 2026). No milho, os sistemas com rotação apresentaram ganhos expressivos de produtividade, com médias de até 13,1 Mg ha⁻¹, enquanto a sucessão milho-cevada apresentou cerca de 8,4 Mg ha⁻¹. Para a cevada, os sistemas com rotação também apresentaram maior produtividade, com médias em torno de 4,2–4,3 Mg ha⁻¹, enquanto os sistemas de sucessão soja-cevada e milho-cevada ficaram próximos de 3,2–3,3 Mg ha⁻¹. Esses resultados evidenciam o ganho produtivo associado à diversificação.

Além de produzir mais, esses sistemas são mais estáveis e sustentáveis. Antes de mais nada, é importante entender como podemos medir estabilidade e sustentabilidade dos sistemas de produção. A estabilidade de produção pode ser estimada pelo coeficiente de variação (CV), que é uma forma simples de medir o quanto a produtividade varia ao longo dos anos. Ele é calculado dividindo a variação da produção (quanto ela oscila de um ano para outro) pela média de produtividade, com o resultado expresso em porcentagem. Na prática, o produtor pode entender assim: quanto menor o CV,

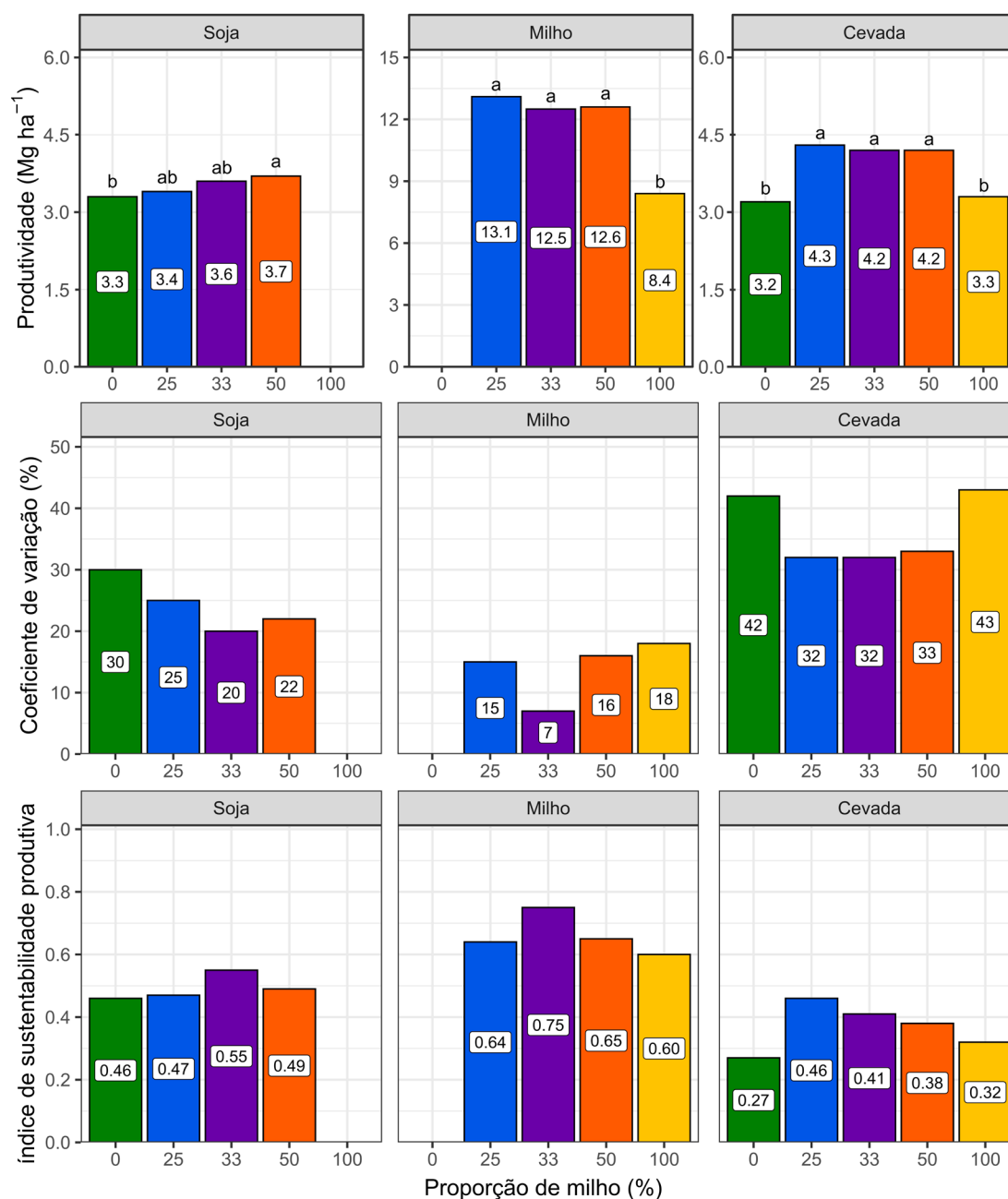


Figura 3. Produtividade média, coeficiente de variação e índice de sustentabilidade produtiva de 2000 a 2019 no experimento com diferentes proporções de milho da FAPA. As letras minúsculas diferentes são significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

mais “regular” é a lavoura. Por exemplo, um sistema com CV de 20% é mais estável do que um com 40%, pois sofre menos altos e baixos entre safras. Contudo, um CV de 20% pode ser estável em baixa e em alta produtividade. Por isso é preciso combinar essa informação com a medida de sustentabilidade. O índice de sustentabilidade produtiva (ISP) combina produtividade média e estabilidade em um único número, variando de 0 a 1. Ele considera quanto a produção média resiste às variações ao longo dos anos, comparando com o melhor rendimento já obtido. De forma prática: quanto mais

próximo de 1, melhor, pois indica um sistema que produz bem e com menor risco, e mais próximo ao máximo que o ambiente pode produzir. Assim, enquanto o CV mostra a oscilação, o ISP mostra a segurança de produzir bem todos os anos, e por isso são dois indicadores importantes para tomar decisão no campo.

E o que a série histórica de 2000 a 2019 desse experimento de longa duração nos mostra? Para a soja, a sucessão soja-cevada apresentou um CV de 30% e ISP de 0,46, enquanto os sistemas com rotação mostraram maior estabilidade: 25% milho (CV

25%, ISP 0,47), 33% milho (CV 20%, ISP 0,55) e 50% milho (CV 22%, ISP 0,49) (Figura 3). No milho, a sucessão milho-cevada apresentou CV de 18% e ISP de 0,60, enquanto os sistemas diversificados tiveram melhor desempenho: 25% milho (CV 15%, ISP 0,64), 33% milho (CV 7%, ISP 0,75) e 50% milho (CV 16%, ISP 0,65). Para a cevada, a menor estabilidade foi observada nos sistemas simplificados, com soja/cevada (CV 42%, ISP 0,27) e milho/cevada (CV 43%, ISP 0,32). Já os sistemas com rotação apresentaram melhores índices: 25% milho (CV 32%, ISP 0,46), 33% milho (CV 32%, ISP 0,41) e 50% milho (CV 33%, ISP 0,38). Isso acontece porque a diversidade de culturas melhora o funcionamento do solo: diferentes raízes exploram camadas distintas, há melhor distribuição de nutrientes e maior atividade biológica. Na prática, isso reduz riscos. Indicadores de estabilidade mostram que sistemas diversificados têm menor variabilidade de rendimento e maior índice de sustentabilidade produtiva, ou seja, entregam resultados mais previsíveis ao longo do tempo.

Como consequência, sistemas mais diversificados apresentaram clara vantagem na produção de biomassa e no acúmulo de carbono no solo. A sucessão de soja-cevada gerou cerca de 8,3 Mg ha⁻¹ de biomassa por ano e 3,8 Mg ha⁻¹ de carbono, en-

quanto sistemas com rotação envolvendo milho produziram entre 14,0 e 17,6 Mg ha⁻¹ de biomassa e 6,5 a 8,1 Mg ha⁻¹ de carbono por ano (Figura 4) (Alves et al., 2026). Esse maior aporte refletiu diretamente no solo: os estoques de carbono chegaram a 126,6 Mg ha⁻¹ nos sistemas mais diversificados, contra 114,3 Mg ha⁻¹ na sucessão soja-cevada, evidenciando o papel da rotação e da diversificação na construção da fertilidade e na sustentabilidade do sistema produtivo (Alves et al., 2026).

Outro ponto importante é a resiliência ao clima, principalmente à falta de água. Sistemas com rotação e cobertura do solo conseguem armazenar mais água devido a maior cobertura de solo com biomassa vegetal e maior teor de matéria orgânica do solo, o que reduz perdas por evaporação e promove melhor uso da água da chuva. Com isso, as culturas sofrem menos em anos secos. Em alguns casos, sistemas bem equilibrados (como soja e milho em rotação) conseguem manter a produtividade mesmo com menor disponibilidade hídrica, enquanto as sucessões simplificadas são muito mais dependentes de chuva regular.

Eficiência de uso de fósforo e potássio

Em sistemas de rotação de culturas, uma diferença importante emerge, a capacidade de

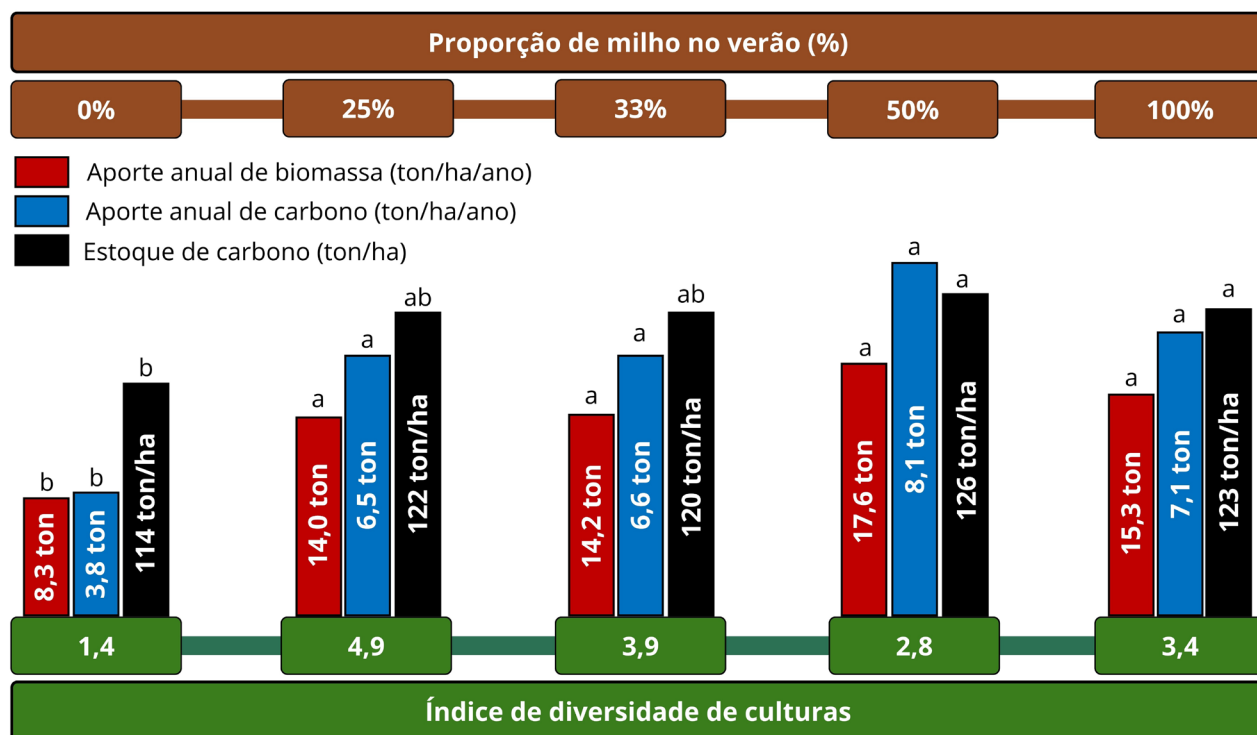


Figura 4. Aporte de biomassa e carbono anual pelas culturas e estoque de carbono do solo (0–40 cm) após 19 anos no experimento com diferentes proporções de milho da FAPA. As letras minúsculas diferentes são significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

absorção de nutrientes. As plantas absorvem os nutrientes da solução do solo e grande parte é utilizada na síntese de biomassa. A partir da metade final do ciclo das culturas, parte desses nutrientes é remobilizada para os grãos e parte permanece na biomassa. Isso influencia diretamente a forma como as recomendações de fertilizantes para cada cultura são determinadas. Sem contabilizar a correção dos nutrientes no solo, culturas que remobilizam maiores quantidades de nutrientes absorvidos para os grãos, necessitam de maiores quantidades de fertilizantes. Por outro lado, mesmo com grande absorção de nutrientes, se estes elementos essenciais permanecem na palha e não são exportados, as doses tendem a ser menores, uma vez que estes nutrientes retornam ao solo, processo conhecido como ciclagem de nutrientes.

Quando observamos as culturas mais utilizadas no verão, a exportação de fósforo (P) e potássio (K) por tonelada de grãos de soja produzidos é significativamente maior que a do milho. Enquanto o milho exporta em média 2,1 e 3,1 kg por tonelada de grãos produzidos de P e K (Duarte et al., 2019), respectivamente, a soja exporta 5,5 e 17,6 kg por tonelada de P e K, respectivamente (Filippi et al., 2021). Além da demanda por tonelada, a produtividade total é outro fator relevante. Nesse sentido, o milho compensa parcialmente a menor demanda por tonelada, uma vez que os patamares produtivos dessa espécie são maiores do que os da soja. Por exemplo, de 2000 a 2023 (24 safras) no experimento de rotação de culturas da FAPA, a sucessão com milho no verão produziu em média 2,5 vezes mais grãos que a sucessão com soja no verão. Isso compensa e torna a exportação de P semelhante em ambas as culturas, uma vez que a relação é próxima (2,6 vezes). No entanto, a soja continua demandando a maior parte do K no sistema produtivo, pois os teores médios de K nos grãos são 5,7 vezes maiores na soja.

As diferenças nutricionais também persistem no período do inverno, mas a maior parte da remoção de nutrientes concentra-se nas culturas de verão (Figura 5). Além da diferença na demanda e remoção dos nutrientes no sistema, as culturas possuem sistemas radiculares diversos. Isso confere maior capacidade de acessar nutrientes em camadas diferentes ou explorar um maior volume de solo e, portanto, ter mais acesso ao P e K. Além disso, algumas espécies podem utilizar estratégias como a associação micorrízica para aumentar o vo-

lume explorado pelas raízes (Dalla Costa; Lovato, 2004). Dentre as demais estratégias, as plantas ou microrganismos podem produzir enzimas para degradar formas orgânicas dos nutrientes ou mesmo ácidos orgânicos para melhorar sua disponibilidade (Lambers; Clements; Nelson, 2013; Vance; Uhde-Stone; Allan, 2003). Ou seja, além das diferenças de produtividade e exportação de nutrientes, as culturas escolhidas no sistema de rotação são verdadeiros produtos e agentes biológicos que conferem acesso diferenciado aos nutrientes retidos no solo. Assim, o fertilizante aplicado ao solo pode ser mais ou menos aproveitado, dependendo da rotação utilizada.

Existem várias formas de medir a eficiência de uso dos fertilizantes nos sistemas produtivos (Dobermann, 2007). Uma das formas mais simples e que ao mesmo tempo traz uma informação valiosa é o balanço parcial (Tiecher et al., 2023). O balanço parcial representa a porcentagem do nutriente aplicado que foi exportada por meio dos grãos em cada cultura ou sistema de rotação, variando de 0 a 100%. Onde 0% indica que nada do que foi aplicado se transformou em grão colhido, e 100% indica que todo nutriente aplicado foi transformado em grão e exportado com a colheita. Valores acima de 100% podem ocorrer, o que indica que a cultura absorveu nutriente além daquele adicionado via adubação na semeadura, ou seja, quando o sistema está conseguindo ser eficiente a ponto de obter P e K de formas menos disponíveis no solo e/ou de camadas mais profundas do solo.

Nos 24 anos dos sistemas de rotação da FAPA, os sistemas mais diversificados apresentaram um uso mais eficiente de P e K na soja e no milho (Figura 6 e 7). Na soja, o maior balanço parcial foi obtido no sistema com 50% de milho, seguido dos sistemas com 33 e 25% de milho. Com a diversificação, a soja exportou até 84 e 149% do P e K aplicado em seu cultivo, enquanto na sucessão soja-cevada, os valores foram de 70 e 129% para P e K, respectivamente. No cultivo de milho, os sistemas diversificados apresentaram uma eficiência, em média, 20% maior em comparação a sucessão milho-cevada. Isso demonstra claramente que a inclusão do milho na rotação com a soja e a diversificação no inverno aumenta a eficiência de uso dos fertilizantes no sistema de rotação.

No inverno, a mesma tendência é observada. Sistemas como o de 33% de milho apresentaram maior eficiência no uso de P e K no cultivo de cevada e canola. Dessa forma, esse sistema, seguido

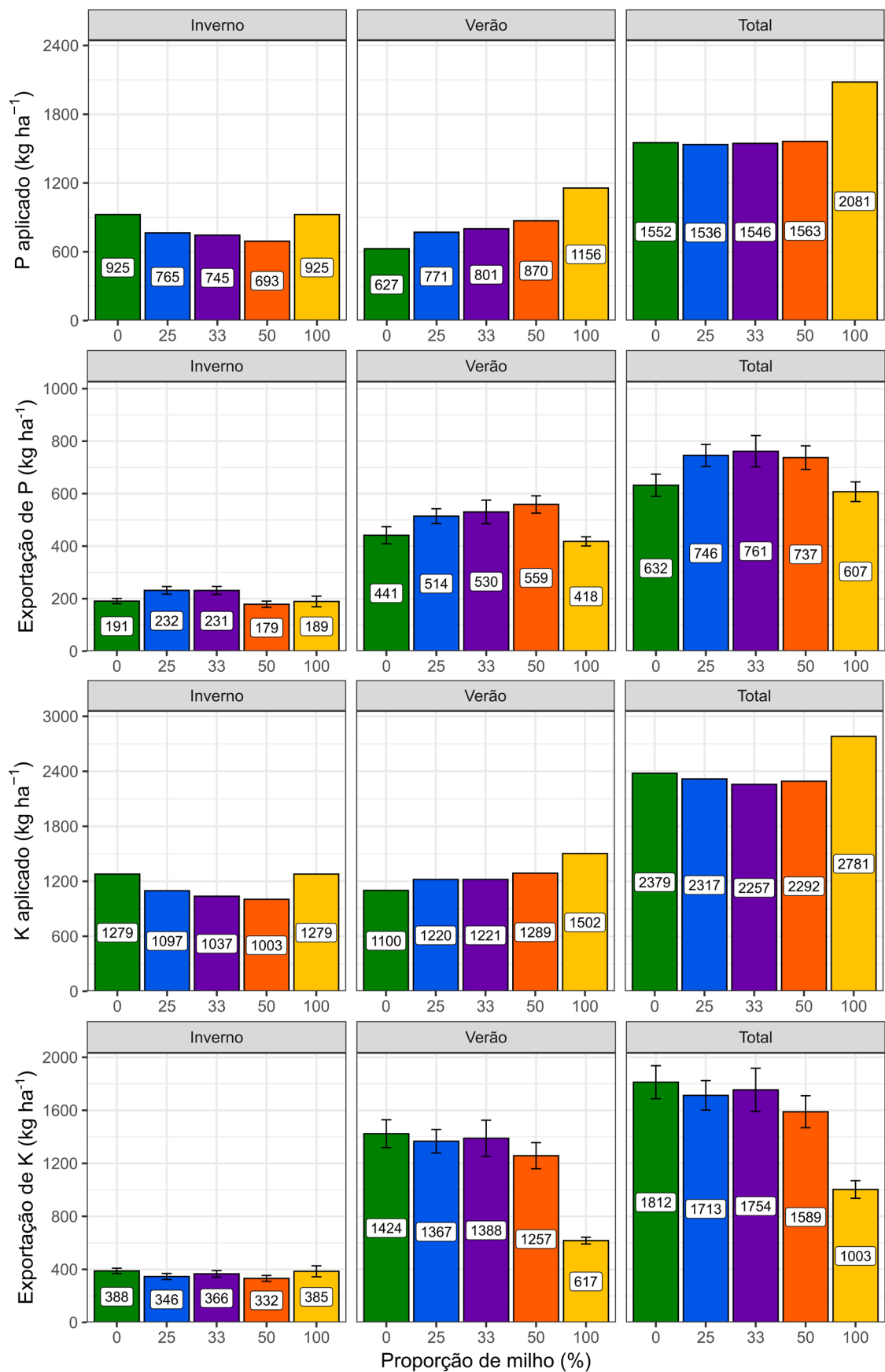


Figura 5. Fósforo e potássio aplicados e exportados no inverno, verão e no total, de 2000 a 2023 (24 safras) no experimento com diferentes proporções de milho da FAPA.

dos de 25 e 50% foram mais eficientes que o cultivo sucessivo de cevada no inverno.

Portanto, ao levar em conta o balanço parcial total dos sistemas, os sistemas diversificados (25, 33 e 50% de milho) utilizaram de forma mais eficiente o P e K aplicados, produzindo mais grãos por kg de nutriente aplicado. Nestes sistemas, cerca de 50% do P e 75% do K aplicados foram utilizados pelas culturas de inverno e verão para produção de grãos. O restante dos nutrientes aplicados permanece retida no solo. Uma parte dessa fração satisfaz as necessidades do solo e a outra parte ainda é

passível de ser absorvida. O mais importante é que, ao longo do tempo, a tendência é que a eficiência de uso aumente, uma vez que os locais onde os nutrientes ficam retidos no solo vão sendo saturados e o novo nutriente adicionado permanece mais disponível às plantas.

A partir da diversificação de espécies no sistema de rotação, diferentes plantas exploram o solo em profundidades e volumes distintos. Evitar sistemas simplificados como a sucessão de soja-cevada ou milho-cevada é essencial para manter o sistema mais eficiente e, em anos de custos eleva-

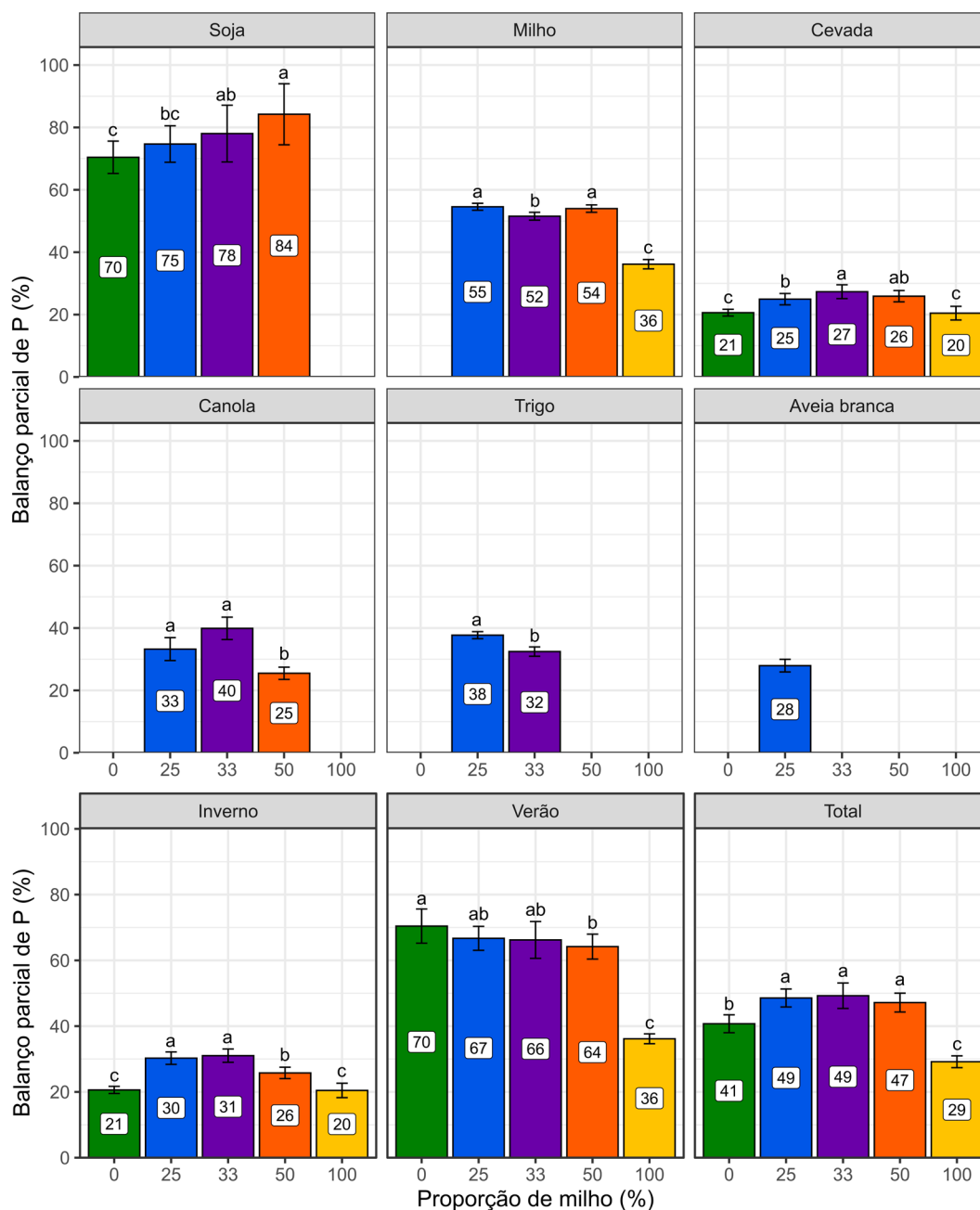


Figura 6. Balanço parcial de fósforo em diferentes culturas de verão e inverno e balanço parcial no inverno, verão e total de 2000 a 2023 (24 safras) no experimento com diferentes proporções de milho da FAPA. As letras minúsculas diferentes são significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

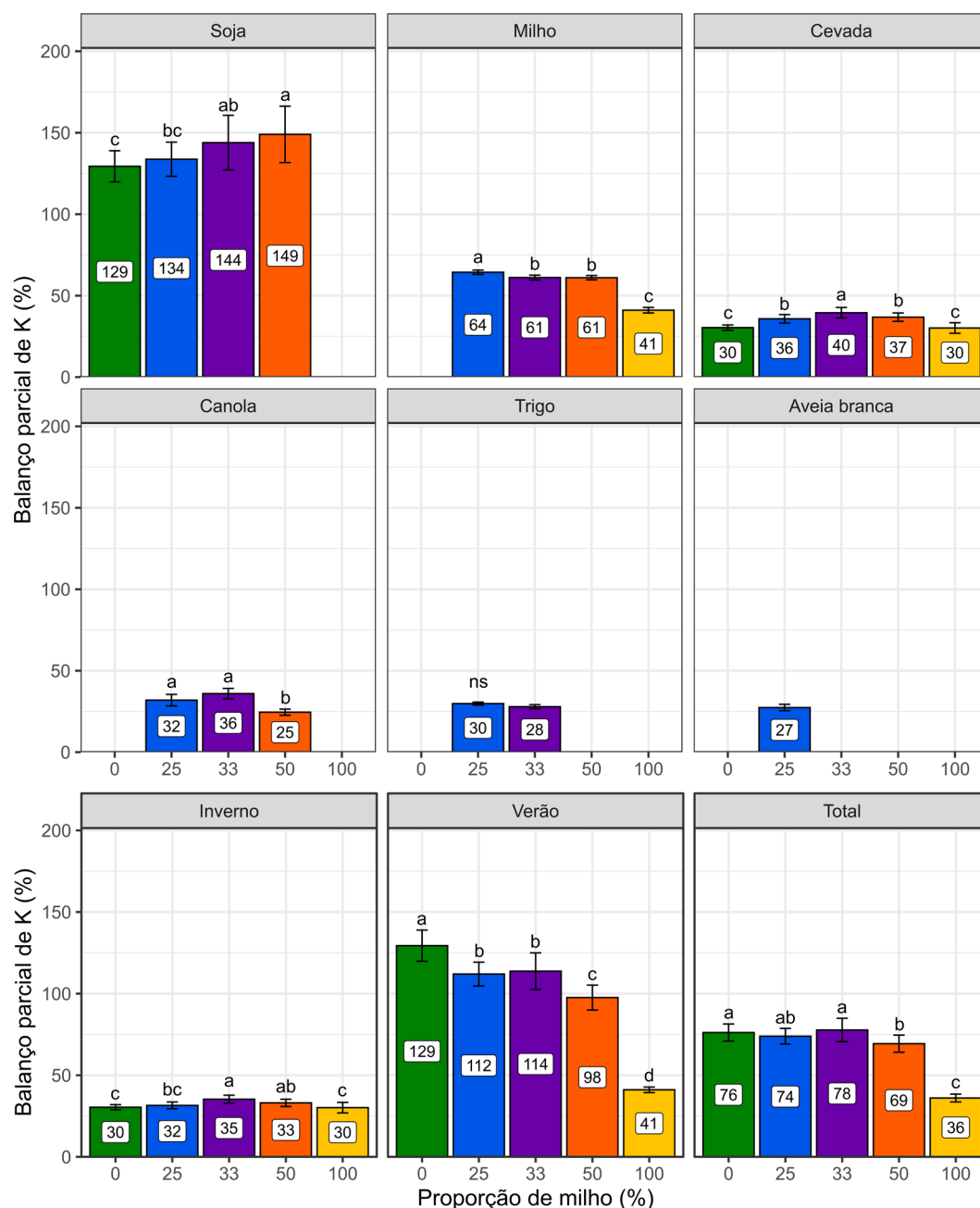


Figura 7. Balço parcial de potássio em diferentes culturas de verão e inverno e balço parcial no inverno, verão e total de 2000 a 2023 (24 safras) no experimento com diferentes proporções de milho da FAPA. As letras minúsculas diferentes são significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

dos, reduzir gastos com fertilizantes. Além disso, diversificar as espécies no verão e inverno garante a ciclagem dos nutrientes e a manutenção de formas orgânicas de nutrientes, especialmente de P, reduzindo a adsorção no solo (Calegari et al., 2013; Tiecher; Dos Santos; Calegari, 2012). Dessa forma, aumentar a participação do milho nos sistemas de produção de soja é fundamental para melhorar a eficiência da adubação e garantir um aumento na quantidade de palha aportada ao sistema. Isso também é desejado no inverno, com a inserção de ou-

tras espécies em rotação com a cevada, e garantindo que outras espécies explorem o solo e tenham acesso a formas de nutrientes inacessíveis à cevada e mantenham a ciclagem de nutrientes. Essas estratégias melhoram não só a produtividade das espécies, mas também o uso mais eficiente do fertilizante aplicado.

Considerações finais

A rotação de culturas permite a construção de sistemas produtivos mais resilientes frente às

mudanças climáticas cada vez mais intensas e frequentes. Sistemas mais diversificados, que evitam a sucessão soja-cevada ou milho-cevada, aumentam o rendimento das culturas, além de reduzir as variações de produtividade entre as safras, o que favorece a estabilidade de produção. Sistemas de produção baseados apenas na produção de soja no verão devem ser evitados, pois acarretam baixo aporte de palha e comprometem o acúmulo de

carbono no sistema. Nesse sentido, a inserção de milho na rotação, seja a cada 2, 3 ou 4 anos, é fundamental, visando à manutenção da qualidade do solo. A rotação de culturas, tanto no inverno quanto no verão, é essencial para garantir um uso mais eficiente dos fertilizantes fosfatados e potássicos aplicados e permitir maior acesso aos nutrientes no solo.

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, Juliano Luiz de. Manejo em plantio direto no 2º Planalto do Paraná e consequências sobre a produção de micotoxinas. 2006. **Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, 2006. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/5990/TESE%20PRONTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ALVES, Lucas Aquino *et al.* Diversified cropping systems lead to productive resilience, water efficiency, and soil carbon sequestration in a no-till system in southern Brazil. **European Journal of Agronomy** (sob avaliação), 2026.
- CALEGARI, Ademir *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.
- DALLA COSTA, Murilo; LOVATO, Paulo Emílio. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 603–605, jun. 2004.
- DENARDIN, José E. **Parceria entre empresas públicas e privadas na pesquisa e na difusão do sistema plantio direto**. Boletim Técnico. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1997.
- DENARDIN, José Eloir *et al.* **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. [S.l.]: Embrapa Trigo, 2012.
- DERPSCH, R. Adubação verde e rotação de culturas. In: **ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO**. Ponta Grossa: Fundação ABC, 1985. p. 85–104.
- DUARTE, Aildson Pereira *et al.* Reference Values of Grain Nutrient Content and Removal for Corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. e0180102, 2019.
- FEBRAPDP. **SISTEMA PLANTIO DIRETO - O que é? Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto**, [S.d.]. Disponível em: <<https://plantiodireto.org.br/sistema-plantio-direto-o-que-e>>
- FILIPPI, Dionata *et al.* Concentration and removal of macronutrients by soybean seeds over 45 years in Brazil: a meta-analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0200186, 5 nov. 2021.
- GONÇALVES, Sergio Lu *et al.* **Rotação de Culturas**. Circular Técnica. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2007.
- HIRAKURI, Marcelo Hirosh *et al.* **Sistemas de Produção: conceitos e definições no contexto agrícola**. Londrina: Embrapa Soja, 2012.
- LAMBERS, Hans; CLEMENTS, Jon C.; NELSON, Matthew N. How a phosphorus-acquisition strategy based on carboxylate exudation powers the success and agronomic potential of lupines (*Lupinus*, Fabaceae). **American Journal of Botany**, v. 100, n. 2, p. 263–288, fev. 2013.
- REIS, E. M. Potencialidade de controle de doenças de trigo e de cevada por rotação de culturas. In: **Reunião brasileira sobre controle biológico de doenças de plantas**. Campinas: Embrapa-CNPDA, 1991. p. 78–99.
- REIS, Erlei M.; FERNANDES, José Maurício C.; PICININI, Edson C. **Estratégias para o controle de doenças do trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1988.
- REIS, Erlei Melo; CASA, Ricardo Trezzi; BIANCHIN, Vânia. Controle de doenças de plantas pela rotação de culturas. **Summa Phytopathologica**, v. 37, n. 3, p. 85–91, set. 2011.
- SANTOS, H. P.; REIS, E. M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001.
- TIECHER, Tales *et al.* Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. **Geoderma**, v. 435, p. 116495, jul. 2023.
- TIECHER, Tales; DOS SANTOS, Danilo Rheinheimer; CALEGARI, Ademir. 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.
- VANCE, Carroll P.; UHDE-STONE, Claudia; ALLAN, Deborah L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, n. 3, p. 423–447, mar. 2003.

Cultivos outonais e de cobertura de inverno

Fabiano Pacentchuk e Juliano Luiz de Almeida

Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. Rodovia PR 540. Km 9. Colônia
Vitória. Distrito de Entre Rios. Guarapuava. Paraná. Brasil. CEP: 85.139-400.
Email: fabiano.pacentchuk@agraria.com.br e juliano@agraria.com.br

Introdução

Além de abordarmos a rotação de cultivos (capítulo 2), também abordaremos mais detalhadamente as principais sucessões de cultivos que podem ser adotadas na região Centro-sul do Estado do Paraná. Segundo SANTOS & REIS (2001), a sucessão de culturas é a sequência de cultivos dentro do mesmo ano agrícola. Nesta concepção o cultivo de trigo após soja, ao longo dos anos, é considerado como sendo a prática agrícola denominada sucessão anual de culturas e não rotação de cultivos. Para a adoção da rotação de cultivos é necessário adotar sucessões de cultivos com diferentes espécies vegetais no mesmo talhão ao longo do tempo.

Até pouco tempo atrás não se fazia distinção entre as denominações “cultivos de cobertura de inverno” e “cultivos outonais”. Geralmente estes cultivos, tanto os cultivados no outono como os cultivados no inverno, eram tratados como cultivos de cobertura de inverno ou plantas para adubação verde de inverno. A separação entre as duas denominações começou a aparecer quando as colheitas de milho e de soja ocorreram cada vez mais cedo, devido ao encurtamento dos ciclos dos principais híbridos de milho e cultivares de soja. Atualmente nas regiões altas, frias e úmidas do Sul do Brasil, o solo fica descoberto após os cultivos de verão e antes dos cultivos de inverno por um período maior do que no passado. Como por exemplo na sucessão milho – trigo/cevada, a colheita do milho ocorre a partir de meados de fevereiro e a semeadura cevada/trigo ocorre em meados junho, resultando em um período de até 120 dias com solo descoberto. Já na sucessão soja – trigo/cevada, a colheita da soja ocorre a partir de meados de março e a semeadura cevada/trigo ocorre em meados junho, resultando em um período de 92 dias com solo descoberto. Grande parte dos agricultores simplesmente não praticam nenhuma agricultura durante estes períodos, deixando os solos descobertos, sujeitos a erosão e ao desenvolvimento de espécies de plantas daninhas resistentes tanto de verão como de espécies de plantas daninhas de inverno. Não obstante, um grupo de agricultores mais preocupados com a conservação dos solos e conscientes do custo de oportunidade das terras sem cultivos em um determinado período do ano, tem buscado alternativas que gerem renda extra ou que protejam os solos durante o período outonal. Esta safra extra, também tem sido denominada como a terceira sa-

fra ou safra outonal, e a adoção tem sido crescente nos últimos anos. Desta forma, atualmente faz-se distinção entre os cultivos outonais sem renda e com renda e os cultivos de cobertura de inverno. Portanto neste capítulo serão destacados os principais cultivos outonais e os cultivos de cobertura de inverno para as regiões alta, fria e úmida do Sul do Brasil. Não obstante cabe esclarecer que também existem os cultivos de cobertura de verão, como o guandu e a crotalária, mas como estes cultivos competem por área com a soja e o milho, eles têm baixa adesão pelos agricultores e não serão tratados neste capítulo. Outro esclarecimento que se faz importante é que evitaremos nominar os híbridos e as cultivares das diferentes espécies para dar mais destaques as espécies e aos ciclos. Híbridos e cultivares tem a vida relativamente curta e poderiam tornar este capítulo desatualizado mais rapidamente. Então no lugar dos nomes de híbridos e cultivares adotaremos as seguintes denominações: aveia preta precoce, aveia preta tardia, aveia branca precoce e aveia branca tardia e assim por diante.

Sucessão milho / cultivos outonais – cultivos de cobertura de inverno / cereais de inverno / soja – feijão safra

Na sucessão de cultivos que tem origem na colheita do milho e tem como destino a semeadura da soja ou do feijão na safra principal no mesmo ano, temos diferentes possibilidades de cultivos outonais (sem e com renda), cultivos de cobertura de inverno e de cereais de inverno (Figura 1).

Para o agricultor que não gostaria de implantar cultivos outonais depois da colheita de milho, ele pode partir direto para os cultivos de cobertura de inverno.

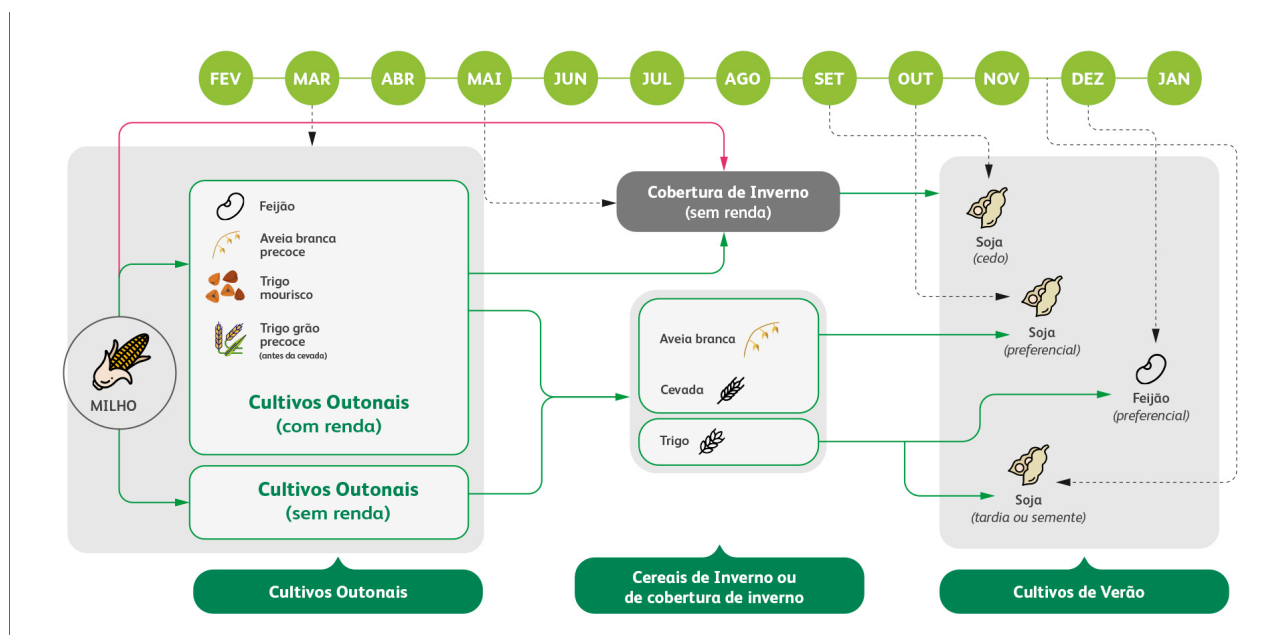


Figura 1. Sucessão milho / cultivos outonais – cultivo de cobertura de inverno / cereais de inverno / soja – feijão safra.

Cultivos de cobertura de inverno

Aveia preta tardia

Vantagens

Baixo custo de implementação; contém nitrogênio na fitomassa 56 a 88 kg ha⁻¹; maior tolerância a ferrugem da folha e possibilidade manejo da soja guaxa.

Desvantagens

Liberação lenta do nitrogênio pós-manejo, pois segundo Fontoura, 2008, na decomposição da palhada da aveia preta ocorre imobilização temporária de nitrogênio no solo e a diminuição da disponibilidade de nitrogênio para o cultivo subsequente.

Comentários

Para as cultivares de aveia preta tardia, para o propósito cobertura de solo, utiliza-se densidade de 350 sementes aptas por metro quadrado e o ciclo médio é de 127 dias da emergência até o ponto de manejo quando 50% das panículas estão expandidas.

Aveia branca tardia

Vantagens

Disponibilização de nitrogênio – 76 a 84 kg ha⁻¹ – na fitomassa; mais tolerante ao dano de geada na folha quando comparada às aveias pretas e possibilidade manejo da soja guaxa.

Desvantagens

As aveias brancas têm maior custo de semente devido ao maior tamanho e peso quando comparado com as sementes de aveia preta; a liberação do nitrogênio também é mais lenta e a maioria das cultivares de aveia branca é mais suscetível à ferrugem da folha.

Comentários

Utiliza-se densidade de 350 sementes aptas por metro quadrado para as cultivares de aveia branca tardia, com o propósito cobertura de solo. O ciclo médio vai de 117 a 127 dias da emergência até o ponto de manejo quando 50% das panículas estão expandidas.

Nabo forrageiro tardio

Especificamente como cobertura de inverno, utiliza-se cultivares de nabo forrageiro de ciclo mais longo.

Vantagens

Menor custo de implementação, com utilização de até 7 kg ha⁻¹ de sementes, quando comparado ao nabo precoce que utiliza 25 kg ha⁻¹ de sementes. Outro ponto positivo do nabo tardio quando comparada ao nabo precoce é a tolerância ao dano de geada. Com relação aos teores de nitrogênio na fitomassa o nabo tardio contém 63 a 149 kg ha⁻¹ e segundo Fontoura, 2008, a liberação de até 40 kg de N⁻¹ é mais rápida, quando comparada as gramíneas.

Desvantagens

Possibilidade de aumentar a esclerotínea na área. Para amenizar este problema, agricultores da região utilizam o controle da florada do nabo para inibir a formação de escleródios e para prolongar o ciclo cobrindo o solo por um maior período.

Comentários

Utiliza-se densidade de 60 sementes aptas por metro quadrado para as cultivares de nabo forrageiro tardia, com o propósito cobertura de solo. O ciclo médio é de 97 dias da emergência até o ponto de manejo quando 50% das plantas já iniciaram a emissão das flores. Nos últimos anos, principalmente após o aumento do preço dos adubos nitrogenados, tem aumentado a área de ervilhaca.

Ervilhaca

Vantagens

Maior tolerância aos danos de geada, quando comparada ao nabo precoce e à ervilha. Além disso, apresenta acúmulo de nitrogênio na fitomassa estimado em 106 kg ha⁻¹ e liberação mais rápida desse nutriente. Segundo Fontoura, 2008, pode liberar até 90 kg ha⁻¹ de N para o milho.

Desvantagens

Elevado custo de implantação, pois são necessários aproximadamente 40 kg ha⁻¹ de sementes, além do desenvolvimento inicial lento.

Comentários

O ciclo médio das cultivares mais utilizadas varia entre 170 e 190 dias.

Para os agricultores que pretendem implantar cultivos outonais após a colheita do milho, há duas possibilidades: utilizar espécies com geração de renda ou optar por cultivos destinados exclusivamente à cobertura do solo, sem retorno econômico direto.

Cultivos outonais com renda

Aveia branca precoce

Vantagens

Existe comercialização da produção de grãos de aveia branca principalmente nos três estados do Sul. Além disso, a aveia branca oferece diferentes possibilidades de uso dos grãos dentro da própria propriedade. Este cultivo apresenta tolerância à geada na fase vegetativa, quando comparada à aveia preta precoce, e proporciona elevada produção de palhada, contribuindo para a manutenção da cobertura do solo. O cultivo também possibilita o manejo da soja guaxa no sistema.

Desvantagens

O custo de aquisição de sementes é elevado e a liquidez do produto pode ser considerada média a baixa. Soma-se a isso a necessidade de controle de ferrugem, que deve ser monitorada ao longo do ciclo. A resteva pode dificultar a emergência de cevada e/ou trigo e aumentar o risco de danos por geada nas fases iniciais dessa cultura. Também pode ocorrer aveia guaxa nas lavouras de cevada e/ou trigo. Para encurtar o ciclo, indica-se a dessecação na maturação fisiológica, devendo-se considerar ainda o risco de geadas em maio, especialmente durante o enchimento de grãos.

Comentários

A indicação é estabelecer população de aproximadamente 280 plantas m², com ciclo em torno de 120 a 125 dias. Ressalta-se, ainda, a importância de atenção à antecipação da semeadura, pois essa prática pode provocar o encurtamento do ciclo.

Trigo precoce outonal	
Vantagens	Desvantagens
Devido a concentração de moinhos nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, existe a possibilidade da comercialização dos grãos de trigo, desde que estes grãos atinjam padrões de comercialização. Além da produção de grãos de trigo fora da época convencional, este cultivo fomenta a formação de palhada no sistema, contribuindo para a manutenção da cobertura do solo. A cultura também apresenta tolerância à geada na fase vegetativa e possibilita o manejo da soja guaxa, agregando funcionalidade ao sistema produtivo.	Elevado custo de sementes, que exige aproximadamente 160 kg ha ⁻¹ . O manejo fitossanitário também demanda cuidados, especialmente para o controle de giberela e outras doenças, além do risco de ocorrência de brusone. Soma-se a isso o risco de geadas em maio, que pode coincidir com o período de enchimento de grãos. Após a colheita, a resteva do trigo pode dificultar a emergência da cevada e aumentar o risco de danos por geada nas fases iniciais dessa cultura. Além desses fatores, não há zoneamento agrícola para essa época de semeadura, o que amplia o nível de risco da operação.
Comentários	
Para ajustar o calendário e encurtar o ciclo, indica-se a dessecação na maturação fisiológica. O ciclo do trigo precoce é de aproximadamente 97 dias, sendo indicada a população de 350 plantas m ² estabelecidas.	

Trigo mourisco	
Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de implantação e condução, cuja produção tem comércio na região dos Campos Gerais do Paraná. No sistema, apresenta a vantagem de que sua palhada não prejudica a emergência de cevada e/ou trigo e ainda contribui para reduzir o risco de danos por geada nas fases iniciais dessas culturas.	A data limite de semeadura é 15 de fevereiro, e há risco de geada, especialmente nas regiões mais altas e frias. A comercialização é restrita a um comprador, o que resulta em baixa liquidez. Além disso, o trigo mourisco deixa pouca palha no sistema e pode ocorrer mourisco guaxo nas lavouras de cevada e/ou trigo. Para viabilizar a colheita, é necessária a dessecação na maturação fisiológica.
Comentários	
O ciclo da cultura varia de aproximadamente 90 a 100 dias, sendo recomendada a população de 250 plantas m ² .	

Feijão	
Vantagens	Desvantagens
Boa liquidez e o potencial de elevada rentabilidade. Soma-se a isso o ciclo rápido e o fato de a produção ter liquidez em várias regiões brasileiras, principalmente do estado do Paraná, fatores que reforçam sua viabilidade quando o cultivo é bem conduzido e implantado dentro da janela adequada.	Elevado custo de implantação e condução da lavoura, bem como o risco de ocorrência de geadas, especialmente em regiões mais altas e frias. Soma-se a isso a alta volatilidade dos preços, que pode impactar diretamente o resultado econômico. O manejo fitossanitário é criterioso e oneroso, exigindo acompanhamento constante. Além disso, a semeadura deve ser realizada até 15 de fevereiro, respeitando a janela recomendada para reduzir riscos produtivos.
Comentários	
O ciclo varia entre 75 a 95 dias - a depender da cultivar e condições edafoclimáticas, sendo recomendada população de aproximadamente 25 plantas m ² .	

Para agricultores que pretendem implantar cultivos outonais após a colheita do milho, mas que não querem o compromisso de manejar uma lavoura de maneira mais intensiva, existe a opção de cultivos destinados exclusivamente à cobertura do solo, sem retorno econômico direto.

Cultivos outonais sem renda

Aveia preta precoce

Vantagens

Baixo custo de implantação e acúmulo de nitrogênio na fitomassa variando de 56 a 88 kg ha⁻¹. A espécie demonstra maior tolerância à ferrugem da folha e possibilita o manejo da soja guaxa no sistema.

Desvantagens

A resteva da aveia preta pode prejudicar a emergência de cevada e/ou trigo e aumentar o risco de danos por geada nas fases iniciais dessas culturas. O nitrogênio acumulado apresenta liberação mais lenta, e há possibilidade de ocorrência de aveia preta guaxa nas lavouras de cevada e/ou trigo.

Comentários

O ciclo varia entre 110 e 115 dias, sendo recomendada população de aproximadamente 350 plantas m².

Aveia branca precoce

Vantagens

Apresenta tolerância ao dano de geada na folha, característica importante para as condições de outono. O acúmulo de nitrogênio na fitomassa varia de 76 a 84 kg ha⁻¹ e a espécie possibilita o manejo da soja guaxa, contribuindo para o ajuste do sistema produtivo.

Desvantagens

O custo de implantação é mais elevado, com necessidade aproximada de 88 kg ha⁻¹ de sementes, o que pode representar investimento significativo por hectare. Há possibilidade de ocorrência de ferrugem da folha já no início do desenvolvimento da cultura. Além disso, a resteva da aveia branca pode prejudicar a emergência de cevada e/ou trigo e aumentar o risco de danos por geada nas fases iniciais dessas culturas. O nitrogênio acumulado na fitomassa apresenta liberação lenta.

Comentários

O ciclo varia entre 74 e 78 dias, sendo recomendada população de aproximadamente 350 plantas m².

Nabo forrageiro precoce

Vantagens

Tolerante ao dano de geada quando comparada à ervilha, embora seja menos tolerante que o nabo tardio. Apresenta elevado acúmulo de nitrogênio na fitomassa, variando de 63 a 197 kg ha⁻¹, com liberação mais rápida desse nutriente para a cultura subsequente. Também auxilia na degradação e no manejo da palhada de milho e pode contribuir para o controle de azevém.

Desvantagens

Como limitações, apresenta maior custo de implantação quando comparado ao nabo tardio, com necessidade aproximada de 25 kg ha⁻¹ de sementes. É mais suscetível a doenças em relação ao nabo tardio. A resteva pode prejudicar a emergência de cevada e/ou trigo e aumentar o risco de danos por geada nas fases iniciais dessa cultura.

Comentários

Para implantação, indica-se população de aproximadamente 40 plantas m², com ciclo médio variando de 55 a 60 dias.

Ervilha forrageira	
Vantagens	Desvantagens
A cultura apresenta maior precocidade quando comparada à ervilhaca e desenvolvimento inicial mais rápido, favorecendo a cobertura antecipada do solo. O nitrogênio acumulado possui liberação mais rápida para a cultura subsequente. Pode ainda auxiliar no controle de azevém, e os grãos secos e tostados podem ser utilizados na alimentação de suínos e bovinos.	Custo de implantação é elevado (superior ao da ervilhaca), com necessidade aproximada de 60 kg ha ⁻¹ de sementes. A cultura é mais suscetível ao dano de geada quando comparada à ervilhaca e apresenta suscetibilidade a <i>Ascochyta pisi</i> , especialmente em invernos chuvosos. Indica-se evitar a semeadura de ervilha sobre ervilha para reduzir riscos fitossanitários.
Comentários	
Indica-se população de aproximadamente 120 plantas m ² , com ciclo médio de 95 dias.	

Sucessão soja / cultivos cobertura inverno / milho

Diferentemente do sistema em que a soja é cultivada após o inverno — situação em que há tempo para uma cobertura outonal seguida de um cultivo de inverno —, nesse caso o intervalo entre a colhei-

ta da soja e a implantação do milho — início de setembro — é mais curto, impossibilitando dois cultivos sucessivos nesse período. Assim, existem duas alternativas: estabelecer um cultivo de cobertura de inverno, sem finalidade comercial ou optar por cultivo de inverno com renda (Figura 2).

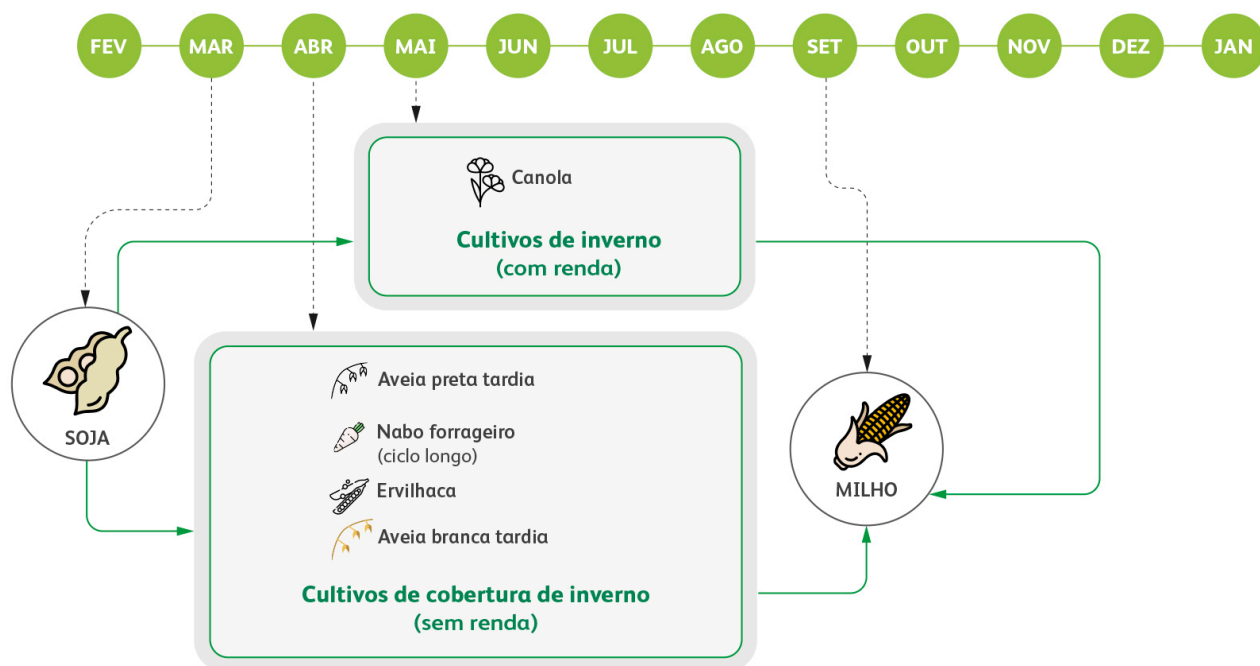


Figura 2. Sucessão soja / cultivo de cobertura de inverno / milho.

Cultivos de inverno sem renda

Os cultivos aveia preta tardia, nabo forrageiro de ciclo longo, ervilhaca e aveia branca tardia já foram apresentados na sucessão anterior. Não obstante, existe atualmente somente uma possibilidade de cultivo com renda, a canola, entre a colheita de soja e a instalação da lavoura de milho.

Canola

Vantagens

Existe demanda de grãos de canola no Brasil, com possibilidade de obtenção de margem bruta positiva, dependendo do custo de frete entre a lavoura e a indústria processadora. A canola apresenta elevado aporte de nitrogênio na fitomassa – aproximadamente 111 kg ha⁻¹, com liberação rápida desse nutriente, o que favorece a emergência inicial do milho em sucessão.

Desvantagens

Risco de ocorrência de geadas durante a fase de enchimento de grãos, o custo elevado de implantação — cerca de 3 kg ha⁻¹ de semente, liquidez considerada média a baixa e a necessidade de manejo rigoroso para controle de esclerotínia.

Comentários

Para o estabelecimento, indica-se população em torno de 40 plantas m², com opções de cultivares que variam quanto ao ciclo de 115 a 150 dias.

Sucessão soja / cultivos outonais – cultivos cobertura inverno / cereais de inverno/soja-feijão safra

Nesse sistema de sucessão, após a colheita da soja no final do verão, há maior flexibilidade de uso do período outono/inverno em comparação ao sistema anterior – que o cultivo de verão subsequente seria milho. Nesse caso, é possível implantar inicialmente cultivos outonais sem renda.

Na sequência, pode-se optar por uma cobertura de inverno sem renda ou por cultivos de inverno com finalidade comercial. Após esses cultivos de inverno, o sistema retorna aos cultivos de verão, permitindo a semeadura de soja em diferentes épocas (cedo, preferencial ou tardia/para semente) ou ainda feijão na safra preferencial, demonstrando um arranjo mais diversificado e intensificado de uso do solo ao longo do ano agrícola (Figura 3).

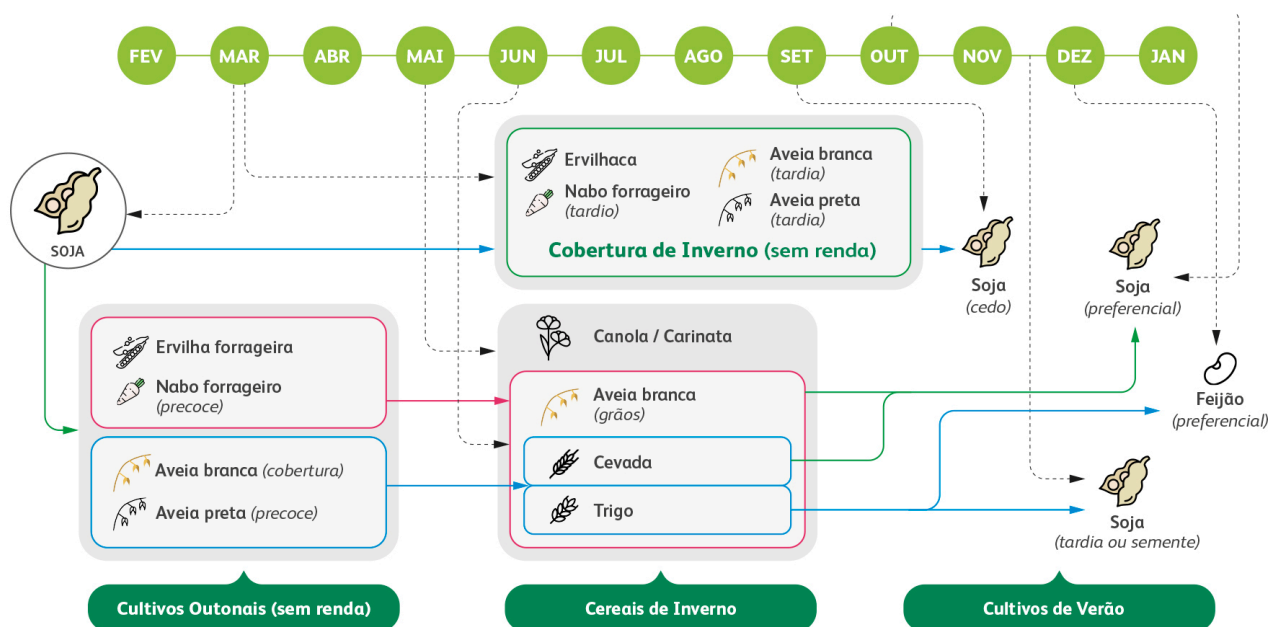


Figura 3. Sucessão soja / cultivos outonais – cultivos cobertura de inverno / cereais de inverno / soja – feijão safra.

Os cultivos ervilha forrageira, nabo forrageiro ciclo precoce, aveia preta e branca precoces, foram apresentados na primeira sucessão anterior. Também já foram discutidos os cultivos cobertura de inverno sem renda. Falta ainda apresentarmos os cereais de inverno e oleaginosas de inverno, aveia branca grãos, cevada, trigo, canola e carinata.

Aveia branca grãos	
Vantagens	Desvantagens
Quando comparado com o trigo e a cevada, o cultivo de aveia branca grãos é um pouco mais “rústico” ou resiliente às condições adversas de clima. Existem cultivares tolerantes ao dano de geada na folha. O custo de implantação da lavoura de aveia branca é menor quando comparado com o custo de implementação da cevada e do trigo. De maneira geral a aveia branca também utiliza menor quantidade de insumos durante sua condução. Destaca-se que existem programas de melhoramento já bem estabelecidos que oferecem cultivares com diferentes ciclos. Desta forma existe oferta de sementes certificadas em grande parte do Brasil.	Há possibilidade de ocorrência de ferrugem da folha já no início do desenvolvimento da cultura. Desta forma o monitoramento e controle desta doença se faz necessário. Embora exista comercialização dos grãos de aveia branca em grande parte do Brasil, o valor praticado é bem inferior quando comparado com os grãos de trigo e cevada, fazendo com que a aveia branca tenha menor liquidez. Não obstante, o valor de comercialização dos grãos de aveia branca varia muito entre regiões, quanto a finalidade e a qualidade dos grãos. Como por exemplo os valores de grãos para ração costumam estar atrelados ao valor de comercialização do milho, sendo, em geral, inferiores ao deste cereal. Por outro lado, para a indústria alimentícia, o preço do grão de aveia branca costuma estar atrelado ao preço de comercialização do trigo, girando em torno de 80 %. Entretanto há exceções destes comparativos, especialmente em safras com escassez de grãos de aveia.

Comentários
O ciclo da emergência até a maturação varia entre 115 e 140 dias, dependendo da cultivar e das condições climáticas. A população indicada para a maioria das cultivares é de aproximadamente 300 plantas m ² .

Cevada cervejeira	
Vantagens	Desvantagens
Quando comparado com a aveia branca e o trigo, o cultivo da cevada cervejeira tem maior potencial produtivo. É um cultivo muito responsivo quanto a utilização de tecnologia, adaptando-se muito bem antes da soja semeada em época preferencial. Os grãos de cevada cervejeira, desde que atinjam as especificações de qualidade, tem liquidez nas regiões onde é cultivado, desde que tenha contrato de venda da produção com alguma maltaria. É um cultivo em expansão no Brasil, pois novas maltarias estão sendo inauguradas, para utilização de matéria prima nacional. Além do mais, a cevada é uma excelente cultura para rotacionar com trigo e aveia no inverno.	É um cultivo mais exigente em termos de fertilidade e correção do solo quando comparado à aveia branca e ao trigo. Devido a esta característica tem custo de implantação e de condução maior quando comparado ao custo destes outros cereais de inverno. A cevada cervejeira adapta-se melhor em regiões com maior altitude (preferencialmente acima de 700 m). Quando cultivado em regiões com menor altitude pode apresentar problemas de qualidade (maior teor de proteína e menor tamanho dos grãos), características estas indispensáveis para que a produção possa ser utilizada na indústria de malte cervejeiro, impossibilitando a sua comercialização para estes fins. A comercialização de grãos de cevada cervejeira tem várias especificações de qualidade e são poucos os compradores (maltarias nacionais), não existindo um mercado alternativo seguro para outros fins. Desta forma, indica-se que os agricultores devem cultivar este cereal somente mediante contratos de comercialização junto às maltarias.

Comentários
O ciclo total desde a emergência até a colheita varia entre 120 e 135 dias, dependendo da cultivar e das condições climáticas e da região de cultivo. A população indicada para a maioria das cultivares é de aproximadamente 200 a 250 plantas m ² . Outro detalhe importante é que diferentemente do trigo a cevada não tolera solos ácidos e de baixa fertilidade.

Trigo	
Vantagens	Desvantagens
Quando comparado com a cevada cervejeira, o cultivo do trigo é um pouco mais resiliente às condições adversas de clima. Existem cultivares tolerantes ao dano de geada na folha e à germinação da espiga no campo devido às chuvas na colheita. Também é menos exigente em termos de fertilidade, quando comparado a cevada cervejeira, principalmente em solos menos corrigidos. O cultivo do trigo pode ocorrer em uma maior região de abrangência, pois produz também em regiões de menor altitude. Existem muitos programas de melhoramento estabelecidos há muitos anos, que vem oferecendo cultivares produtivas, com diferentes ciclos e tolerância às principais doenças. Em função destes investimentos em genética, existe grande oferta de sementes certificadas em todo Brasil. A produção de trigo tem liquidez na maioria das regiões produtoras e o número de especificações de qualidade são bem menores do que as especificações da cevada cervejeira.	Atualmente a maior desvantagem do trigo, principalmente nas regiões de maior altitude, é o atraso da semeadura da soja. De maneira geral, soja após cevada cervejeira obtém maiores rendimentos quando comparada à soja após o trigo, devido à época de semeadura da soja. Outra desvantagem, nos últimos anos, é o baixo preço recebido pelos produtores, que vem achatando a margem e desmotivando a semeadura deste cereal. Excesso de chuvas na colheita, com variação de temperaturas, pode provocar germinação das espigas no campo, resultando em descontos devido à redução do número de queda dos lotes.
Comentários	
O ciclo da emergência até a maturação varia entre 120 e 145 dias, dependendo da cultivar e das condições climáticas. A população indicada para a maioria das cultivares é de aproximadamente 330 plantas m ² .	

Referências bibliográficas

FONTOURA, S.M.V.; **Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná** / Sandra Mara Vieira Fontoura, Cimélio Bayer. – Guarapuava, PR : Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2008. 32p.

SANTOS, H.P. dos; REIS, E.M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 212p.

Estratégias para proteção contra a erosão

Eng Agro Glaucio Roloff, PhD

Professor Titular aposentado (UFPR/UNILA), Técnico Sênior (Grupo Geosoil)
roloffg@hotmail.com

A erosão hídrica é um fenômeno natural, que ajuda a moldar as paisagens do nosso Paraná a milhares de anos. Afinal, as Cataratas do Iguaçu é formada por mecanismos similares aos da cabeceira de um canal de erosão... só muda a magnitude dos processos. Mas o que acontece quando o ser humano, para produzir alimentos e fibras, troca a cobertura vegetal nativa por outra, menos protetora, trafega com máquinas pesadas sobre o solo, abre estradas que concentram a água que escorre? Acontece a erosão antrópica, com mecanismos iguais à erosão natural, mas com sua ação e consequências aceleradas em relação ao que aconteceria sem esta intervenção antrópica. Claro que essa alteração no uso da terra é inevitável, o que temos que fazer é saber como evitar a degradação pela erosão.

“Estratégias de proteção” então é o que fazer para evitar que a erosão ocorra. Para desenvolver ou escolher quais estratégias usar, é necessário antes entender como essa erosão acelerada acontece.

E tudo começa com a gota de chuva... que tem energia cinética e realiza um trabalho, o de desagregar o solo exposto, reduzindo o tamanho das partículas e facilitando o seu transporte. Além disso, essa gota causa uma pequena compactação no seu ponto de impacto, que reduz a permeabilidade dessa fina camada superficial em até 10 vezes, fazendo com que menos água infiltre e mais escorra pela superfície. Essa erosão pelo impacto da gota, então, atinge todo o solo descoberto, desagrega o solo e reduz fortemente a permeabilidade da superfície. Parece inocente, sem consequências.... mas não é, pois alimenta outras formas na sequência, estas com maior capacidade de degradação.

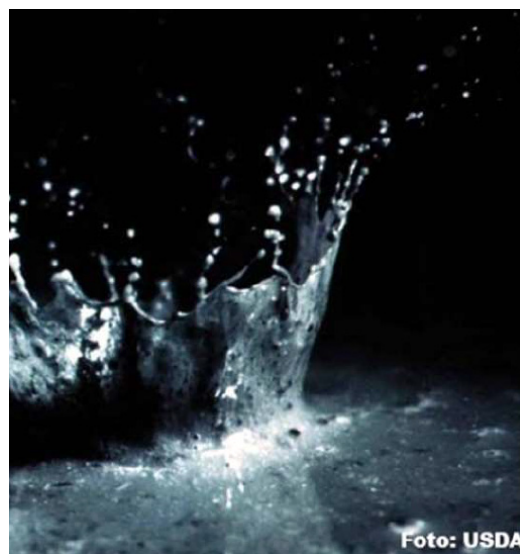
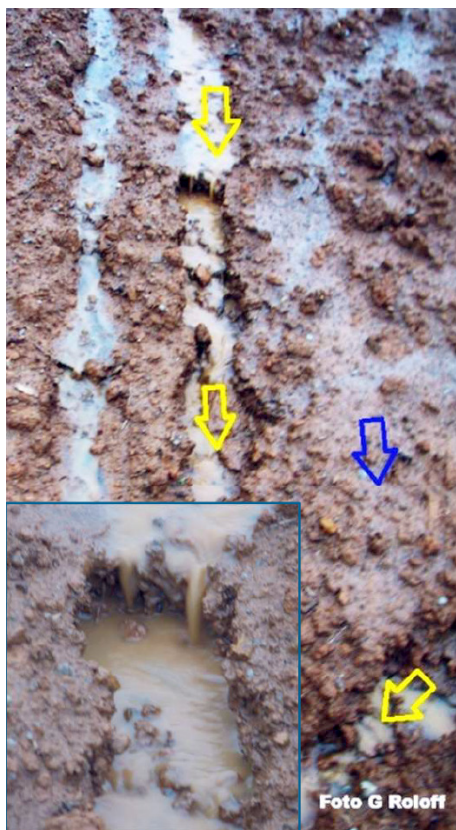


Foto: USDA



Estratégia 1

Mantenha sempre o solo coberto, com palha ou planta viva, minimize o tempo e a área de solo exposto.

Alguns minutos após o início de uma chuva mais forte, sobre solo exposto, a água começa a escorrer pela superfície (seta azul na imagem a lado), procurando as depressões ou canais formados pelo microrelevo e começando a se concentrar. Quando existe um sulco de semeadura morro abaixo, facilita essa concentração da água e o seu ganho de energia, aumentando a sua capacidade de transporte e de também desagregar mais solo em pontos de turbulência (setas amarelas na imagem), formando a erosão em sulcos. O solo revolvido já está parcialmente desagregado, o que vai facilitar a desagregação e o transporte pela água que escorre na superfície, magnificando o processo.

Claro que essa imagem é de uma área revolvida recém semeada, com zero de cobertura. Na região central do Paraná seria o caso típico de uma área preparada para o plantio da batata inglesa.

Estratégia 2

Plantio ou semeadura em solo exposto e com sulcos morro abaixo magnificam também a erosão em sulcos; nesses casos plante em nível e introduza obstáculos ao fluxo concentrado morro abaixo (terraços, faixas de vegetação permanente, por exemplo).

O plantio direto não está imune a esta forma de erosão. Mesmo quando a cobertura do solo por palha e/ou plantas vivas é boa, mas existe compactação que diminui a permeabilidade do solo ou a chuva é muito intensa e longa, estes fazem com que um volume significativo de água escorra pela superfície. Esse escoamento superficial vai descendo morro abaixo e se concentrando nas vias de drenagem induzidas pelo micro ou macro relevo, até atingir volume e velocidade suficientes para iniciar a desagregação do solo em pontos de turbulência, as cabeceiras (seta amarela na imagem). Com o decorrer da chuva, ou em próximas chuvas, estas cabeceiras irão subir morro acima e expandir o comprimento e a largura do sulco.

Efeito similar ocorre em solos rasos, com volume pequeno de armazenamento de água, o que resulta na formação mais rápida do escoamento superficial, em comparação à solos mais profundos.



Estratégia 3

O controle da compactação é essencial para manter alta a permeabilidade do solo, especialmente sob plantio direto, para evitar a formação dos sulcos causada por excesso de enxurrada (escoamento superficial) e, similarmente, o plantio em solos rasos deve ser evitado.



A partir da parte mais alta da paisagem, onde inicialmente se formam os sulcos de pequenas dimensões, a enxurrada vai se concentrando em vias de drenagem naturais do terreno, adquirindo mais energia, com mais pontos de turbulência, aprofundando e alargando os sulcos até formar canais largos e rasos, tipificando a erosão em canal.

Esse é um exemplo relativamente raro, causado por uma tormenta em época de solo com pouca cobertura, com plantio direto sem qualidade, solo compactado e com rampas longas (região de Campo Mourão, PR). Os resultados desta combinação de erosão em sulco e canal são visualmente dramáticos, mas também pesam financeiramente para o produtor, pela remoção de nutrientes, matéria orgânica, sementes (se recém semeado). Apenas

em nutrientes carregados pela erosão, um estudo¹ de 2015 identificou perdas entre US\$18 e 108/ha/ano. Já para o Paraná, o IAPAR², em 2018, estimou perdas anuais de US\$242 milhões por ano.

Existem também os impactos regionais, com seus custos associados, em razão do assoreamento dos rios e represas e pela redução na qualidade

das águas superficiais, inclusive com o aumento de população das macrófitas aquáticas (aguapés, por exemplo), levando a episódios de falta de oxigênio e mortandade de peixes. Estradas também são afetadas pela enxurrada concentrada e carregada de sedimentos, com estes prejuízos sendo bancados por toda a comunidade regional e estadual.

Estratégia 4

O manejo para aumentar a infiltração de água no solo e para reduzir a velocidade e a concentração da enxurrada são essenciais para evitar a erosão, especialmente a erosão em canal.

Estratégia 5

Eventos de erosão extrema são episódicos, acontecem com certa raridade (1 vez a cada 5 a 10 anos), então o produtor deve sempre trabalhar com a prevenção.

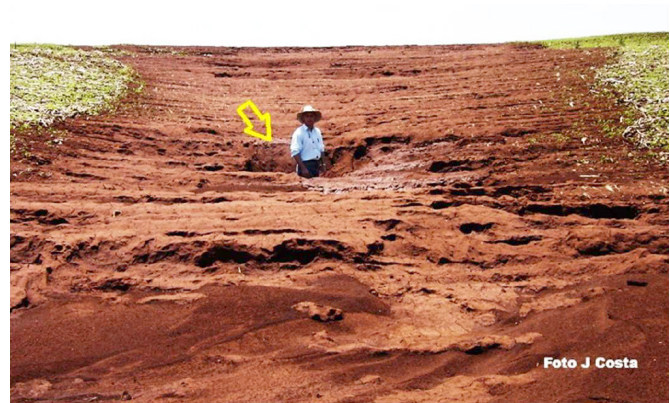


Foto P Alba

Eventos erosivos como esse (município de Guapuva, 15/07/2016) deixam prejuízos imediatos e de longo prazo ao produtor e à comunidade.

Com o aumento da área de contribuição para a enxurrada, portanto aumento da sua energia, nas partes mais baixas da paisagem, com ou sem contribuição extra de uma estrada, começam a apare-

cer pontos de turbulência da água em partes do canal de erosão, formando cabeceiras (setas amarelas nas imagens abaixo), e o canal também começa a aprofundar, dando início à erosão em voçoroca. Esses, com o tempo, formam canais intransponíveis e retiram de produção aquela faixa de terreno, com grande prejuízo ao produtor a longo prazo.



Estratégia 6

A prevenção à formação de voçorocas inicia nas partes mais altas das glebas, principalmente mantendo uma boa taxa infiltração de água no solo (cobertura e ausência de compactação), em alguns casos criando obstáculos ao livre fluxo da água (terraços, por exemplo).



Ao falarmos de erosão em canal e em voçoroca, é essencial abordar a interação lavoura-estrada. Nos trechos que a estrada mais ou menos acompanha a inclinação do terreno, nas partes altas é comum a lavoura contribuir com enxurrada para a estrada (setas azuis na imagem abaixo), enquanto nas partes baixas da estrada acontece ao contrário, a enxurrada acumulada entra na lavoura pelas vias

de drenagem natural do terreno (setas amarelas). Considerando a baixa permeabilidade da faixa ocupada pela estrada, mais a contribuição da lavoura, dependente da topografia, a vazão da enxurrada que sai da estrada para entrar na lavoura pode ser muito alta e, se não controlada, fatalmente resulta em voçorocas.

Estratégia 7

Para os controle da erosão em sulcos e, principalmente, em voçorocas, deve ser considerado todo o caminho da enxurrada, da parte mais alta do terreno até o leito de rio estável, independente de fronteiras artificiais ou divisas entre proprietários, ou seja, é um esforço comunitário, sem o qual qualquer tentativa de controle de longo prazo esta destinada a falhar.

Agora que a questão da erosão está contextualizada, vamos analisar como os fatores que a controlam interagem, para identificar como concretizar as estratégias de controle.

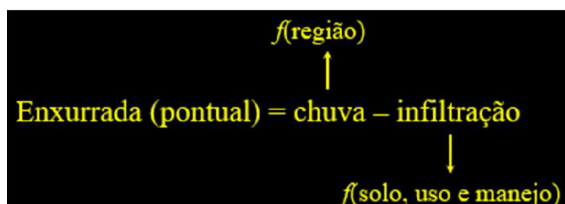
A vazão da enxurrada, portanto a sua energia, em qualquer ponto da paisagem é função (f) de diversos fatores. O fator individual de maior impacto proporcional na erosão é a chuva, que na região tem volumes que variam de 100 a 140 mm/dia, isso com probabilidade de acontecer uma vez em cada 10 anos. Sua erosividade (poder de causar erosão) é intermediária em relação ao Estado do Paraná. Portanto, são chuvas com energia o suficiente para causar danos relevantes. Importante lembrar que as chuvas que causam os maiores danos são episódicas, mas o produtor e a comunidade não podem se tornar complacentes por eventuais períodos de chuvas menos erosivas. E, olhando para o futuro, existem evidências que ocorrências do fenômeno El Niño fortes serão mais frequentes. Sabemos que a região sofre de chuvas mais intensas durante esse fenômeno, que certamente elevarão os riscos de episódios de erosão de grande magnitude.

As evidências científicas e fenômenos recentes (enchentes no Rio Grande do Sul em 2024, tornados na região em 2025) demonstram que a atmosfera está ficando mais instável, com mais energia, resultando em tempestades mais frequentes e mais severas: as comunidades regionais precisam investir na prevenção da erosão agora!

Os solos agrícolas regionais, predominantemente Latossolos Bruno e Cambissolos, ambos argilosos, tem naturalmente boa resistência a desagregação pela gota ou enxurrada. A taxa de infiltração natural do Latossolo é relativamente alta, devido a sua permeabilidade e profundidade, mas sujeita a ser reduzida pela ausência de cobertura ou compactação excessiva. Já os Cambissolos tendem a ter infiltração menor, principalmente pela menor profundidade, também similarmente sofrendo pelo manejo inadequado.

Mas não bastam solos relativamente resistentes à erosão, se o conjunto uso e manejo não for adequado à prevenção da erosão. A cultura regional de maior risco é a batata inglesa, com plantio em solo revolvido (parcialmente desagregado) e sem cobertura. A degradação e prejuízo em um episódio de erosão são grandes.

Por seu lado, a cobertura por palhada tem controle grande na erosão pelo impacto da gota, por ser uma capa de proteção sobre o solo, e na erosão em sulcos por reduzir a velocidade da enxurrada,



reduzindo a sua energia. Estudo clássico³ demonstrou que a taxa de erosão pelo impacto e sulcos é de até 10 vezes menor na presença de palhada que recubra praticamente toda a superfície. Além disso, a vazão da enxurrada foi cerca de 2,5 vezes menor com essa palhada.

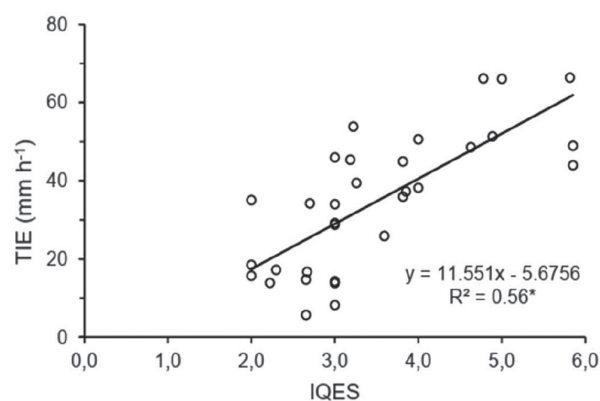
A infiltração de água é fortemente influenciada pela qualidade estrutural do solo, a qual, por sua vez, é degradada pela compactação excessiva e redução da matéria orgânica. Um trabalho da EMBRAPA⁴ demonstrou que a taxa de infiltração estável (TIE), aquela na qual apenas os macroporos estão permitindo a passagem da água, é fortemente controlada pelo índice de qualidade estrutural do solo (IQES), um índice de determinação simples e de baixo custo. Na região são poucos os estudos envolvendo a qualidade estrutural do solo mas, podemos afirmar intuitivamente que aquelas glebas com pouca compactação, com rotações envolvendo 3 a 4 espécies em um período de 2 a 3 anos podem ter TIEs próximos dos mais altos apresentados nesse estudo, em torno de 60 mm/h.

Este TIE, para a maioria das chuvas (intensidades <60 mm/h), resultaria praticamente em zero enxurrada, portanto zero erosão. Apenas as tormentas mais raras (>60 mm/h sobre solo saturado) poderiam causar danos por erosão, mas de comparativamente menor magnitude do que sobre solos com TIEs menores.

Mas o poder erosivo da enxurrada também é uma função da topografia. A enxurrada que passa em determinado ponto da encosta é o acumulado das partes mais altas da área de contribuição.

$$\text{Enxurrada (paisagem)} = \sum \text{enxurrada da área de contribuição}$$

Em uma paisagem típica dos Cambissolos, com rampas mais curtas e declividades mais altas, as áreas de contribuição da enxurrada em pontos das vias de drenagem naturais são menores. Contudo, isso não significa menos erosão porque a permeabilidade menor desses solos aliada às maiores declividades geram enxurradas erosivas. Por seu lado, a topografia típica dos Latossolos, com declividades mais baixas mas rampas mais longas, resulta em áreas de contribuição muito maiores. Então, apesar da melhor permeabilidade e menores declividades, as maiores áreas de contribuição resultam também em enxurradas erosivas. Portanto, no contexto da encosta, unidade ideal para o planejamento das ações de prevenção da erosão,

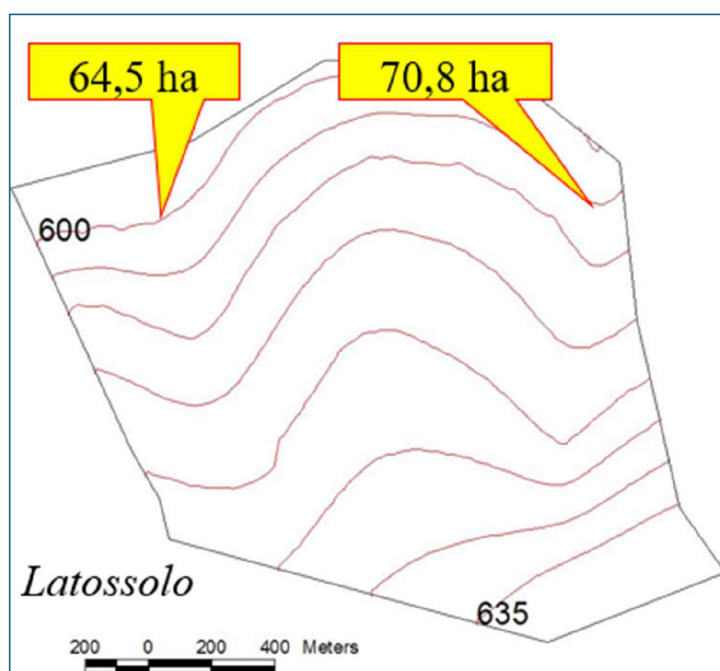
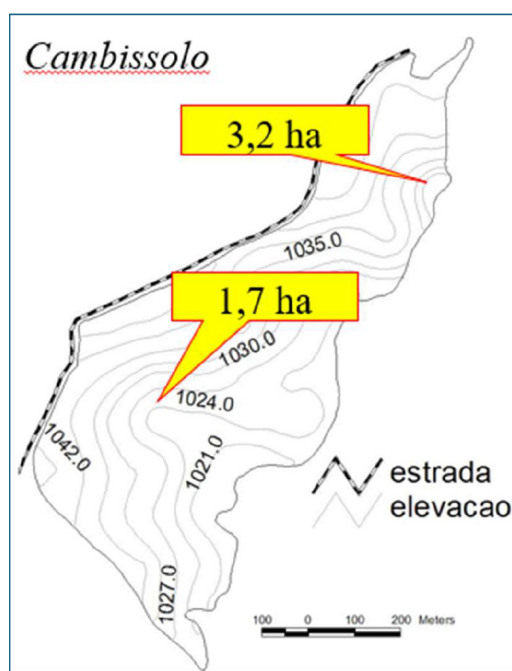


em ambas topografias típicas da região, poderão ocorrer enxurradas excessivas, causando erosão. Sua magnitude, contudo, vai depender da chuva, uso e manejo.

Em conclusão, a definição das estratégias de combate a erosão parte do conhecimento dos mecanismos que levam aos eventos erosivos. Por isso, não existem soluções simples e universais. A partir disso, as estratégias regionais devem focar nestes itens:

- As ações devem ser planejadas usando a encosta (do topo ao fundo de vale) como unidade de planejamento, independente de segmentações artificiais como limites de glebas ou de propriedades, um esforço comunitário, portanto.

- A compactação do solo deve ser sempre prevenida, com o uso de raízes pivotantes agressivas nas rotações, pneus adequados ou esteiras de borracha nas colhedoras, tratores e carretas para reduzir as pressões sobre a superfície, evitando o tráfego aleatório de caminhões.



- Todas as operações, especialmente a semeadura e uma eventual subsolagem ou escarificação, devem ser feitas cortando as águas para reduzir a velocidade da enxurrada, idealmente a partir de um planejamento para que estas operações sejam efetivadas através dos sistemas de piloto automático dos tratores.

- As rotações de culturas devem considerar a ação das diferentes espécies, de modo a maximizar a área de solo coberta por planta viva ou palhada e a ação dos diferentes tipos de sistema radicular para melhorar a qualidade estrutural do solo.

- O uso de estruturas de retenção ou transporte

de água (terraços, caixas de retenção, canais escoadouros) devem ser planejados com visão de longo prazo e levando em consideração o aumento dos riscos trazidos pela mudança climática em curso, mesmo a custos mais altos, sob pena de ineficiência nata e desperdício de recursos.

Episódios de erosão extrema assustam e serão mais corriqueiros... mas estratégias bem planejadas com ações devidamente custeadas podem reduzir em muito os prejuízos.

¹Landgraf, L. Erosão causa prejuízos econômicos e ambientais no Paraná. EMBRAPA News 04/09/18.

²Dechen, S.C.F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. Bragantia, Campinas, v. 74, n. 2, p.224-233, 2015.

³Braida, J.A & Cassol, E.A. Relações da erosão em entre sulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. R. Bras. Ci. Solo, 23:711-721, 1999.

⁴De Biasi, H. et al. Qualidade estrutural do solo e taxa de infiltração estável influenciadas por culturas de entressafra da soja. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Soja, ISSN : 2178-1680 ; n. 30). 2023.

Estradas Internas

Eng Agro Glaucio Roloff, PhD

Professor Titular aposentado (UFPR/UNILA), Técnico Sênior (Grupo Geosol)
roloffg@hotmail.com

Estradas rurais são geradoras e concentradoras de enxurrada a qual, em algum ponto, em função da topografia, entra nas vias de drenagem que cruzam áreas de lavouras, ou outros usos, a caminho do rio. Como na maioria dos casos estas vias não são preparadas para receber essa enxurrada adicional, em uma chuva mais extrema, ocorre o início de um processo de voçorocamento. O que acontece na sequência nós já sabemos...



Também acontece em áreas acima da estrada, nas quais as vias de drenagem naturais direcionam a enxurrada e os sedimentos para a estrada, causando danos nessa, somando à enxurrada da própria estrada, agravando as consequências no caminho dessa enxurrada concentrada até o rio.

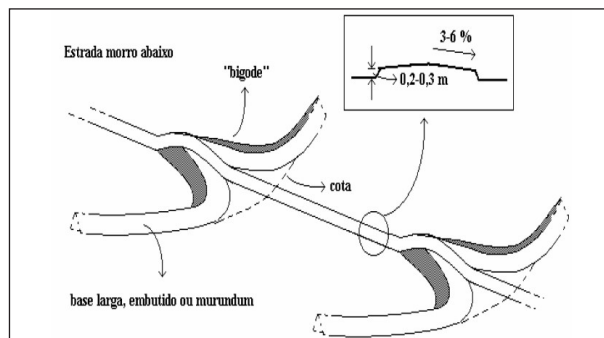
O tema estradas ou vias de acesso, portanto, deve ser tratado em conjunto com outras ações visando a redução da erosão nas encostas. Porém, estradas de conexão são de responsabilidade comunitária ou governamental e não serão tratadas

aqui, cujo foco é apenas as estradas internas ou vias de acesso interiores à propriedade.

Provavelmente o maior problema com as estradas internas é a sua localização na paisagem. Na maior parte dos casos, seu traçado não foi feito considerando a sua relação com a concentração de enxurrada ou seu papel no contexto da erosão. Assim, resta ao produtor tentar reduzir o potencial de problemas através de algumas estratégias específicas.

A situação ideal é uma lavoura com terraços na





qual a estrada interna, quando precisa mudar de elevação no terreno, é locada paralela à direção da declividade (seta azul na imagem acima à esquerda), sempre com lombadas (até declividade 8%) ou desaguadouros para impedir o fluxo da enxurrada no sentido do declive e desviá-la para uma estrutura de transporte ou retenção segura.

Quando a estrada precisa mais ou menos manter a elevação, ela é locada imediatamente abaixo do camalhão de um terraço (seta vermelha). Além disso, a estrada deve estar sempre mais elevada que a lavoura, de modo que a enxurrada extra produzida pela baixa infiltração da faixa da estrada seja conduzida para a área de lavoura, com maior infiltração, e retida ou transportada de forma segura pelos terraços.

Contudo, na região central do Paraná existe a ausência quase total de terraços nas lavouras e

pastagens, em razão da topografia irregular e declividades comumente entre 5 e 15%, as quais, na percepção dos produtores e técnicos, resultariam em terraços que parcial ou totalmente seriam impeditivos ao trânsito livre de maquinários, assim reduzindo fortemente a eficiência da mecanização. Então, sem terraços, como fica a interação da estrada com a lavoura?

A solução mais comum é a construção de caixas de retenção, sem critérios nítidos de espaçamento e capacidade. Podem até funcionar por algumas chuvas após a construção, mas o assoreamento e/ou a capacidade inferior ao necessário resultam em extravasamentos e a geração de voçorocas a jusante. Nem precisa mostrar imagens, quem já não viu isso antes na região??

Certamente é possível construir caixas de retenção dentro de critérios técnicos, dimensiona-



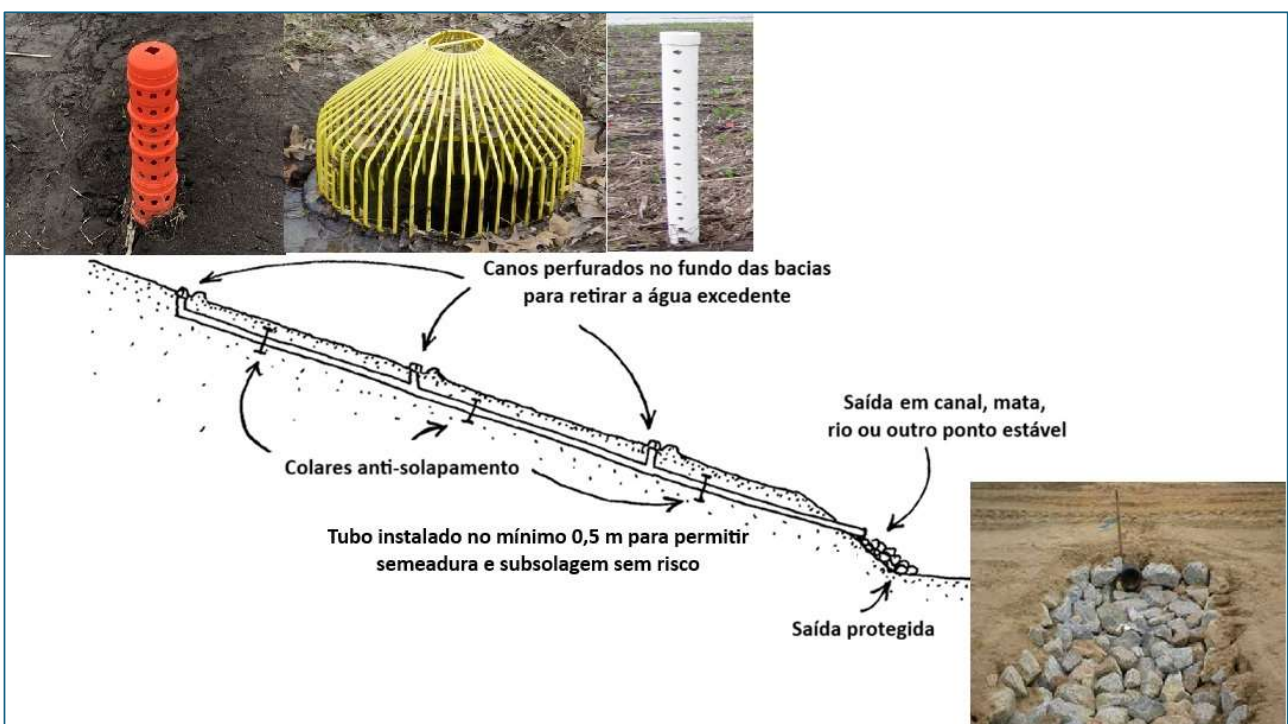
Foto J Almeida



das em função da área de captação, tipo de piso da estrada e chuva regional com probabilidade de ocorrência de uma vez em 10 anos, usando as metodologias usuais da hidrologia de superfície de pequenas áreas de contribuição. Tais caixas normalmente ocupam área significativa, no somatório de uma encosta, que não pode ser utilizada para la-

voura e exigem manutenção frequente para manter as dimensões de projeto.

Mesmo assim, estas estruturas têm um problema grave inerente à sua concepção, porque são de retenção, ou seja, a água que ali chega fica retida sobre um solo de baixa permeabilidade, levando dias ou semanas para drenar. Em uma época de



chuvas mais frequentes, por exemplo em ano de El Niño, pode haver tormentas fortes em dias seguidos, causando o extravasamento das caixas mesmo quando corretamente dimensionadas.

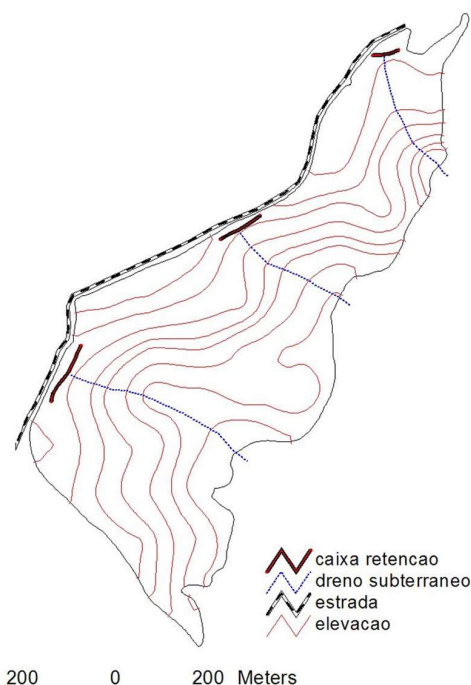
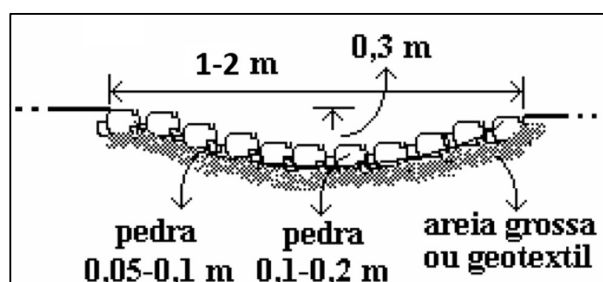
Caixas de retenção devem ser consideradas soluções emergenciais, enquanto obras definitivas de drenagem segura não são executadas.

Uma solução, comum em países com maior consciência comunitária sobre os problemas de erosão, é o estabelecimento de caixas de retenção com drenagem controlada, planejadas para esvaziarem em 24 h após uma chuva de projeto. Ainda requer o dimensionamento adequado, mas resulta em caixas com volume menor e o sistema fica intrinsecamente mais seguro. O custo é certamente maior, contudo, é obra de longo prazo, cuja amortização deve ser encarada com um horizonte de planejamento similar à construção de um novo silo, por exemplo.

O desenho acima pode se aplicar a uma estrada em pendente, com caixas de retenção conectadas em série. Cuidados essenciais para a sua eficácia são também (a) a prevenção da entrada de pedaços

de palha ou galhos maiores, que possam causar entupimentos, (b) a prevenção do solapamento subterrâneo com o uso de colares espaçados de alguns metros, e (c) a proteção da saída para prevenir erosão, com o uso de pedras e manta geotêxtil.

Para casos de estrada na parte mais alta da gleba, não em nível, como o exemplo na imagem ao lado, as caixas de retenção podem ter uma saída exclusiva até a parte mais baixa, junto à mata ciliar. Para proteger a estrada, que não terá desaguadouros frequentes, um canal de pedras junto a estrada deve ser construído para levar a enxurrada de maneira segura até a caixa de retenção. Este canal tem que ser protegido por pedras e manta geotêxtil para evitar a erosão no seu interior.



Uma alternativa aos canos de desague é o estabelecimento de canais vegetados nas vias de drenagem natural do terreno. Estes canais, largos e rasos para dissipar adequadamente a energia da enxurrada, não são obstáculos ao trânsito de máquinas, contudo são área perdida para a produção. Além disso, conforme o volume da enxurrada e a topografia local, pode ser necessário construir dissipadores de energia similares àqueles usados para estabilizar o

fundo de voçorocas (veja o capítulo sobre o tema).

As medidas para evitar problemas com erosão nas, e das, estradas internas não são simples nem baratas e exigem técnicos treinados para o correto dimensionamento, mas são a única maneira de

enfrentar um futuro marcado pelo aumento na frequência e intensidade das chuvas. Mas, como outros exemplos, nada vai mudar se não houver determinação da comunidade em investir nisso!!

Referências

¹Manual de Drenagem Urbana – Região Metropolitana de Curitiba-PR. Versão 1.0. Cap. 4. https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf

Prevenção e estabilização de pequenas voçorocas

Eng Agro Glaucio Roloff, PhD

Professor Titular aposentado (UFPR/UNILA), Técnico Sênior (Grupo Geosol)
roloffg@hotmail.com

Voçoroca é uma forma de erosão que ocorre na via de drenagem natural artificial do terreno, onde se formam enxurradas com poder erosivo para desagregar e transportar o solo, gerando canais ou valetas normalmente intransponíveis por equipamentos agrícolas ou veículos leves. Aqui, a “pequena voçoroca” é aquela com no máximo 3 m de profundidade, algumas dezenas de hectares de área de contribuição para a cabeceira e sem o afloramento do lençol freático no fundo do seu canal. Esta é uma distinção importantes porque a recuperação ou estabilização de voçorocas maiores, que fogem dessas características, exige trabalho de dimensionamento e engenharia mais sofisticados e custosos, fora do escopo desse artigo.



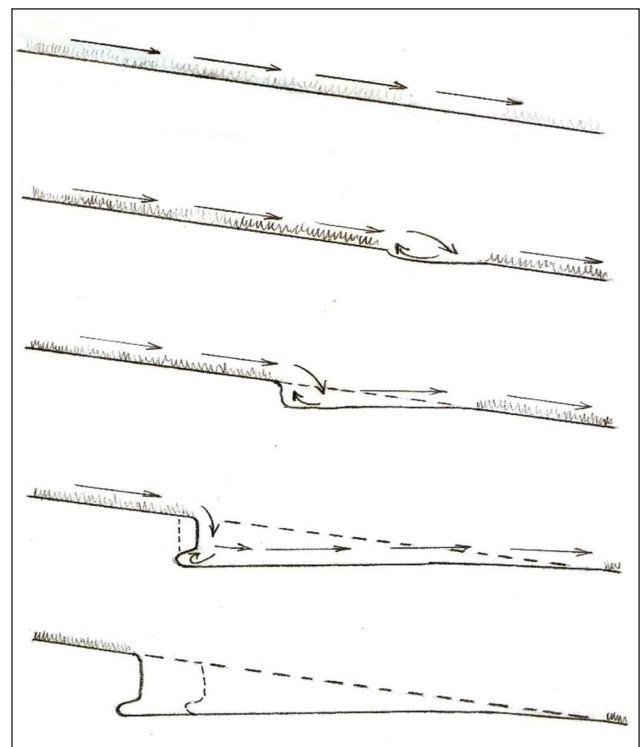
O aparecimento e o desenvolvimento dessas voçorocas são controlados essencialmente pela morfologia da paisagem, pelas características do solo que controlam sua infiltração, incluindo a sua permeabilidade, a resistência do solo à erosão (erodibilidade), e pelo padrão de intensidade das chuvas regionais. Mesmo considerando a variação das chuvas que ocorrem na região central do Paraná, nenhuma paisagem antropizada está livre do risco de voçorocas. Uma voçoroca se formará sempre em uma via de drenagem natural, um talvegue, ou, eventualmente, artificial como saídas de terraço, laterais não protegidas de estradas ou saídas de tubulação desprotegidas.

Uma voçoroca se inicia, via de regra, na parte inferior de um talvegue no qual ocorreu alguma perturbação da vegetação de cobertura ou mesmo com cobertura, quando a energia da enxurrada em um determinado evento for maior que a resistência do solo naquele trecho. Esta perturbação pode ser um caminho de gado, uma estrada, um rastro de puerizador. Em glebas sob plantio direto, também pode acontecer no trecho do talvegue em que a cobertura por palha é arrastada pela enxurrada.

Em talvegues que deságuam diretamente em rios (sem ser dissipado por mata ciliar), com canais encaixados na paisagem, as cabeceiras iniciais se formam na barranca destes rios.

Uma vez iniciado o processo de desagregação do solo, a sua remoção acontece simultaneamente, uma vez que isto requer menos energia que o primeiro. Assim tem início o processo de avanço morro acima da cabeceira da voçoroca, com o crescimento longitudinal e lateral dela ocorrendo pelo solapamento da base do talude da cabeceira, ponto no qual se verifica a concentração da energia da enxurrada.

Com o deslocamento da cabeceira morro acima e o consequente aprofundamento da voçoroca, os taludes laterais se tornam instáveis e desmoronam durante eventos de chuva, o que acontece em partes aleatórias do talude. Enquanto o talude da cabeceira de uma voçoroca é normalmente vertical, os das laterais podem ser também verticais ou ter algum desvio disto, em função de deposição do material desmoronado e que não é removido pelo fluxo episódico, no fundo da voçoroca. A profundidade de uma voçoroca, alguns metros abaixo da



cabeceira, é controlada pela energia da enxurrada e pela ocorrência de uma camada mais resistente do solo ou a própria rocha de origem. Apenas um ou ambos os fatores podem estar atuando em uma determinada voçoroca.

É importante observar que, tanto o aparecimento de uma cabeceira quanto o crescimento de uma voçoroca, são episódicos, dependendo da ocorrência de chuvas com intensidade bem acima do normal, com menor probabilidade de ocorrência. Assim, mesmo após uma perturbação no talvegue que o torne potencialmente suscetível ao voçorocamento, pode levar anos até que isto ocorra, pela ausência de um evento de chuva com alta intensidade que cause enxurrada erosiva. Em razão disso, durante períodos de chuvas menos intensas, é comum o produtor rural e/ou o técnico se tornarem complacentes, porque a voçoroca aparentemente estabilizou “sozinha”. Basta uma chuva mais extrema retornar, para que seja retomado o crescimento da voçoroca e o aparecimento de novas, durante aquele evento.

Voçorocas surgem em uma tormenta excepcional e podem ficar quietinhas por um tempo até uma nova tormenta, mas não se estabilizam sozinhas e dão prejuízos permanentes.

Prevenção

Certamente, prevenção é sempre a melhor ação, por evitar ou minimizar a perda de área pro-



ductiva causada pelas voçorocas. A prevenção deve considerar sempre toda a área de contribuição que drena para a parte mais baixa do talvegue. O ponto chave desta prevenção é o estabelecimento de um conjunto de práticas implantadas nesta área, o qual, idealmente, resulte em forte redução da energia da enxurrada ou na ausência desta. Com isto, novas voçorocas são evitadas e as existentes têm seu crescimento retardado ou interrompido.

Estas práticas devem contemplar, individualmente ou em conjunto:

- Um sistema de terraços dimensionado adequadamente;

- Na ausência deste ou em complementação a este, canais escoadouros vegetados nos talvegues, com o devido dimensionamento hidrológico;

- Uso e manejo do solo da área de contribuição planejados para maximizar a infiltração de água no solo, reduzindo assim a vazão da enxurrada e, por conseguinte, a sua energia;

- Controle da enxurrada oriunda de estradas com estruturas específicas para reduzir a sua energia e evitar a erosão do talvegue.

Detalhes sobre estas práticas fogem do escopo desse artigo e podem ser encontrados em outros capítulos deste livro.

Basicamente, para prevenir o aparecimento de voçorocas, toda a área de contribuição deve ter seu uso e manejo planejado para maximizar a infiltração de água no solo e a enxurrada gerada ser retida ou transportada de forma segura. Portanto, todos os envolvidos nessa área de contribuição tem que participar, é uma missão comunitária.

Estabilização da cabeceira

A recuperação de uma voçoroca é um trabalho de custo alto, cuja relação custo:benefício deve ser bem estudada e cujo detalhamento esta fora do escopo deste artigo. Nas pequenas voçorocas isso envolve aterramento e a implantação simultânea de um conjunto de práticas que evite a formação de enxurrada erosiva naquele ponto. Pelas dificuldades, custo e risco, raramente é realizado, apenas em casos específicos, para proteger ou restaurar terras de alto valor.

Aqui nós vamos tratar da estabilização de voçorocas, entendido como um conjunto de práticas adicionais aos listados para a prevenção, que visam impedir o seu crescimento longitudinal, principalmente, possibilitando a revegetação natural ou induzida.

Material para as estruturas: geotêxtil e madeira, rocha, solo-cimento ou concreto?

Manta geotextil

- Manta de TNT (tecido não tecido) de poliéster, gramatura usual 130 g/m².

- Essencial para estruturas construídas com qualquer material, envelopando a interface entre o material e o solo, estrutura.

Madeira (in natura ou beneficiada)

- Opção mais acessível para as voçorocas menores que 1 m de profundidade, pelo custo do material e pela facilidade de transporte e instalação.

- Durabilidade bastante variável, sempre inferior às outras opções, necessitando reformas frequentes, as quais, se negligenciadas, podem resultar na reativação da voçoroca.

- Mais detalhes podem ser encontrados em algumas publicações².

Rocha

- As rochas devem estar disponíveis em duas classes de tamanho, uma aproximadamente entre 0,2 e 0,4 m de diâmetro equivalente (matacão), outra menor entre 0,05 e 0,1 m (rachão).

- Os matacões provêm os obstáculos principais ao fluxo, enquanto o rachão colocado entre os matacões reduz um pouco a vazão entre eles e força uma parte maior do fluxo por cima da estrutura.

- Rochas são difíceis de trabalhar, exigindo equipamentos específicos (pá carregadeira, caminhão tombeira) e acesso aos pontos de construção.

- Por outro lado, na região central do Paraná é material facilmente disponível nas várias pedreiras existentes.

Solo-cimento (SC)

- Os solos argilosos da região não são adequados para essa opção, como regra geral.

- Contudo, para pontos de difícil acesso que impossibilita o uso de rochas, é uma opção pela maior facilidade de transporte.

- Proporções aproximadas:

- 35% de solo argiloso seco e peneirado.
- 50% de areia grossa de construção.
- 15% cimento.

- Misturar bem, idealmente em betoneira, e encher sacos de polipropileno para criar bolas de 0,3-0,4 m de diâmetro.

- Usar essas bolas maleáveis, com solo seco, para montar a estrutura, sempre forçando que uma bola encaixe bem na outra.

- Nas primeiras chuvas a mistura vai endurecer, gerando estruturas resistentes, porém flexíveis.

- Com o tempo o tecido dos sacos degradará e poderá ser removido.

Concreto

- As estruturas também podem ser construídas em concreto, usando desenhos e métodos padrão da engenharia civil.

- Além do custo, por vezes maiores que outras opções, outra consideração importante para a escolha é a ausência de flexibilidade da estrutura e o fato de ser impermeável.

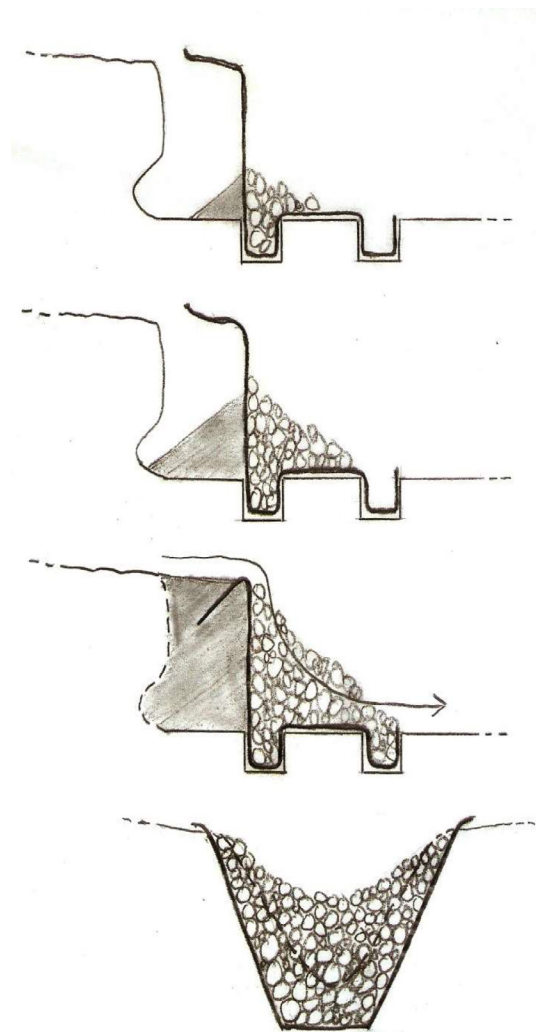
- A flexibilidade da estrutura é importante para facilitar a sua acomodação nos casos de seca forte, onde acontece um pouco de retração do solo, o que pode deixar fendas para a entrada de água, causando solapamento, com o consequente comprometimento da estrutura no futuro.

- A permeabilidade de uma estrutura é importante para facilitar a passagem de água para dentro dela, ao invés de forçar a passagem por baixo ou pelo lado, causando também solapamento.

O tipo da estrutura para a estabilização das cabeceiras depende da profundidade do canal da voçoroca, medido a poucos metros do ponto de solapamento.

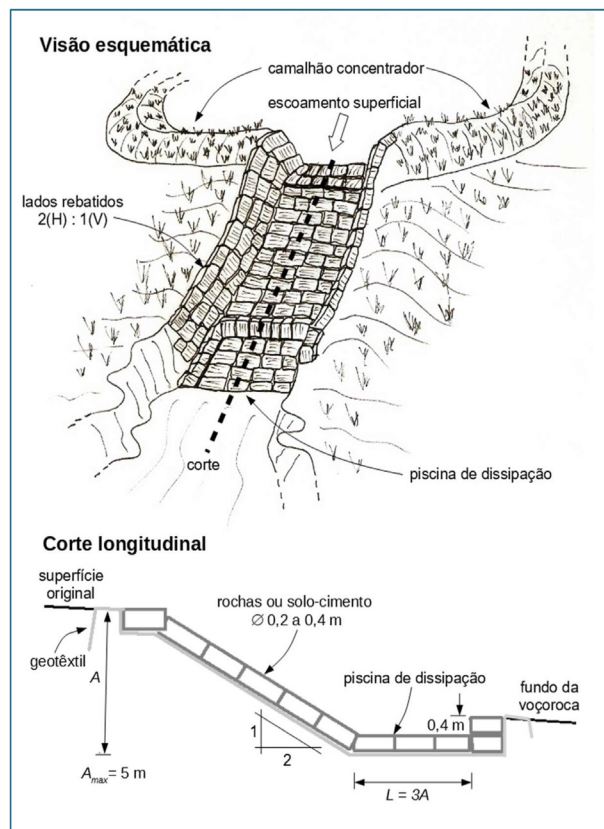
Para profundidades inferiores a 1 m:

- A estrutura deve proteger o ponto de solapamento, permitindo que o fluxo escorra por dentro da estrutura e tenha a sua energia dissipada.
- O geotêxtil deve ser usado liberalmente, envolvendo toda a parte inferior da estrutura, com sobras de cerca de 0,4 m de largura e cujas extremidades devem ser reenterradas.
- Compactar todos os aterramentos de modo a assegurar que não haja caminhos para a fácil penetração do fluxo de água por baixo ou pelo lado da estrutura.
- Usar matacões ou bolas de SC de tamanho relativamente uniforme, superiores a 0,2 m, para permitir que a água flua através da estrutura e não apenas por sua superfície.
- Montar a estrutura formando uma parte mais baixa no meio da seção transversal, no mínimo cerca de 0,4 m abaixo das bordas, para assegurar que o fluxo será preferencialmente nesta parte.
- As trincheiras devem ser de 0,2 a 0,4 m de profundidade abaixo do canal, para assegurar a ancoragem de toda a estrutura e de que não haverá solapamento pela água passando por baixo da mesma.
- Como esta estrutura é construída em cabeceira já existente, ela ocupa toda a seção transversal disponível e a água flui através dela, tornando desnecessário cálculos de vazão.



Para profundidades entre 1 e 3 m:

- Requer uma estrutura de dissipação com desenho mais elaborado para assegurar a proteção não só no ponto de solapamento, mas também assegurando a dissipação da energia do fluxo antes deste atingir a superfície desprotegida do fundo da voçoroca.
- Deve assegurar a concentração do escoamento superficial para a estrutura através de camalhões laterais concentradores, cujo canal deve ter gradiente máximo de 1%, em um comprimento máximo de 50 m; a terra para estes camalhões pode vir da escavação para o rebatimento da cabeceira e laterais.
- A necessidade de rebatimento das cabeceiras e laterais exige o uso de uma retroescavadeira para facilitar a construção, com o estaqueamento para guiar a construção feito com o auxílio de um nível ótico ou a laser.
- A seção transversal trapezoidal da entrada a montante da estrutura deve ser capaz de dar vazão a um chuveiro de projeto com probabilidade de 1:20 anos.



- As dimensões do trapezoide são encontradas por tentativa e erro, a partir da vazão calculada para a chuva de projeto, com a largura menor não podendo exceder a largura da voçoroca logo após a cabeceira.

- Métodos para estes cálculos são encontrados em outras publicações³.

- As dimensões e gradientes da estrutura devem ser rigorosamente seguidos para assegurar a sua correta funcionalidade, especialmente o comprimento da piscina de dissipação e sua profundidade.

- A elevação dos camalhões concentradores deve ser em torno de 0,2 m maior que a parte mais alta do trapezoide de entrada da estrutura, para assegurar que o fluxo nunca escoe por outras partes que não pelo canal trapezoidal.

- O geotêxtil deve ser usado liberalmente, envolvendo toda a parte inferior da estrutura, com sobras de cerca de 0,4 m de largura e cujas extremidades devem ser reenterradas.

- Compactar todos os aterramentos de modo a assegurar que não haja caminhos para a fácil penetração do fluxo de água por baixo ou pelo lado da estrutura.

- Os matacões ou bolas com SC devem ser assentados como se fossem elementos de um piso ou calçada, para assegurar que a enxurrada flua por cima deste. Quando rocha for usada, pedaços menores ou lascas podem ser usadas em baixo ou entre os

matácões para facilitar o assentamento, porém não podem ficar livres na superfície porque serão transportados pelo fluxo.

- Evitar o eventual crescimento de vegetação arbustiva ou árvores entre os elementos da estrutura para evitar danos ou canais preferenciais para a água que as raízes possam causar.

Estabilização do canal

Quando pequenas cabeceiras secundárias existem dentro do canal da voçoroca, é indicativo de que a energia da enxurrada excede a resistência do solo. Por isto é necessário o estabelecimento de diques no fundo dela para reduzir esta energia.

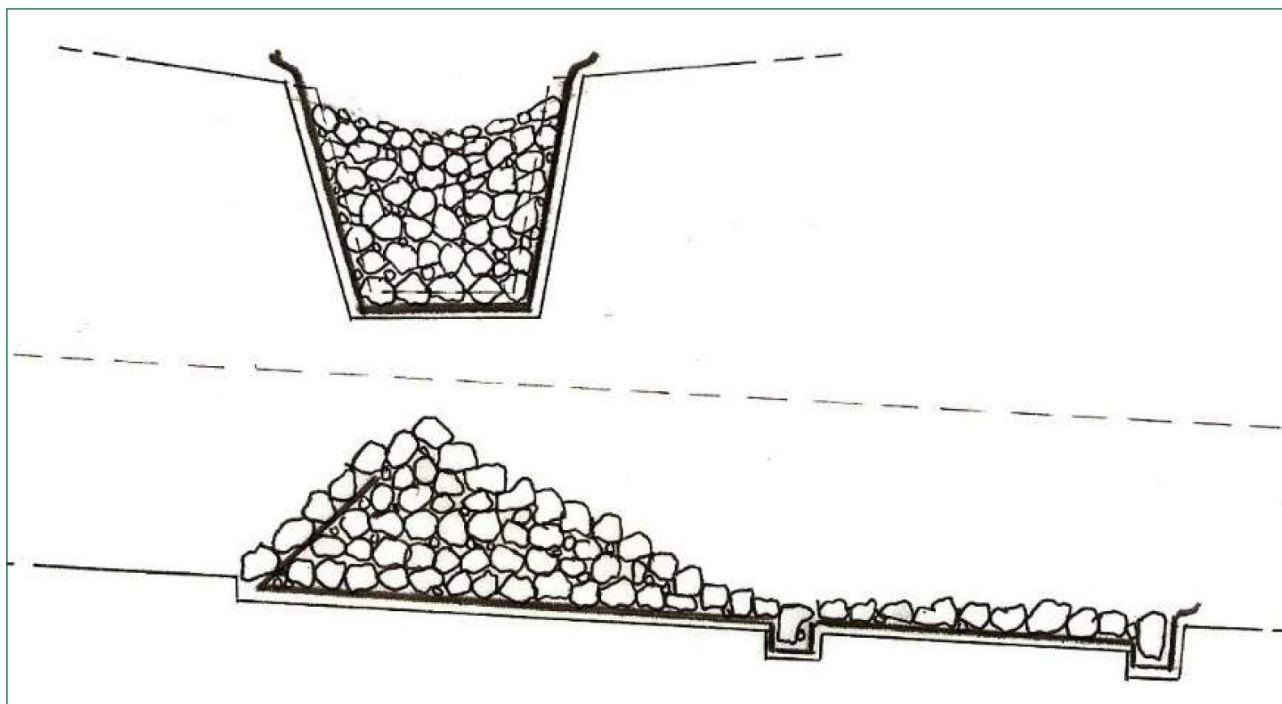
- Para o dimensionamento do sistema é necessário um levantamento altimétrico do fundo da voçoroca.

- Os diques, a partir da cabeceira, são espaçados de modo a ter um gradiente máximo de 1% entre o sopé do dique a montante em relação a crista do dique a jusante.

- As trincheiras devem ser preenchidas com os maiores matacões (até 0,4 m) ou com sacos de SC de volume similar, para assegurar a ancoragem da estrutura;

- É importante que a estrutura fique bem encravada no fundo (0,2 m abaixo da superfície do canal) e nas laterais (0,4 m para dentro), sempre assegurando que o reaterro esteja bem compactado para





evitar possível caminho preferencial para o fluxo.

- O geotêxtil deve ser usado liberalmente, envolvendo toda a parte inferior da estrutura e a face à montante, protegida por uma camada de material, com sobras de 0,4 m de largura e com as extremidades reenterradas.

- A saia de proteção a jusante é recomendável para evitar erosão pela turbulência na saída do dique.

Revegetação do canal

É essencial à completa estabilização da voçoroca, sendo a última fase do projeto de estabilização, devendo também envolver uma faixa no mínimo de 5 m no entorno da voçoroca. A revegetação pode ocorrer naturalmente, porém leva tempo e, na maioria dos casos, deve ser apressada para assegurar a estabilização a longo prazo.

- Usar uma mistura de vegetação rasteira, de crescimento rápido, arbustos e árvores.

- Espécies rústicas de gramíneas por semente podem ser espalhadas a lanço imediatamente depois da construção e, mais tarde, arbustos e árvores.

- Espécies de arbustos e árvores podem ser selecionados para, além da rusticidade, serem abrigos para fauna ou pasto apícola.

- Técnicas de plantio e espécies recomendadas são encontradas em diversas publicações^{2,4}.

Estabilizar voçorocas exige investimentos relativamente altos, treinamento da equipe, mas, acima de tudo, determinação da comunidade!

¹Uma versão mais longa desse tema pode ser encontrada em Roloff, G. VI.1. Estabilização de Voçorocas. Bertol et al. (eds.) Manual de manejo e conservação de solos para o Estado do Paraná – 1ª ed. Curitiba, NEPAR-SBCS. 2019.

²Machado, R.L. et al. (ed.) Recuperação de Voçorocas em áreas rurais. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2006. 63 p. (Embrapa Agrobiologia. Sistemas de Produção, 4).

³Manual de Drenagem Urbana – Região Metropolitana de Curitiba-PR. Versão 1.0. Cap. 4. https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf

⁴Couto, L. et al. Técnicas de Bioengenharia para Revegetação de Taludes no Brasil. Boletim Técnico CBCN No 001. Viçosa, MG: CBCN, 2010.

Manejo de Compactação

Vitor Muller Anunciato¹, Ricardo Ralisch²

¹Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. Rodovia PR 540, Km 9, Colônia Vitória, Distrito de Entre Rios, Guarapuava, Paraná, Brasil. CEP: 85.139-400. Email: vitor.anunciato@agraria.com.br

²Universidade Estadual de Londrina / Fundação Araucária. Rua João Gilberto Santos, 653, Tucanos, Londrina, Paraná, Brasil. CEP: 86047-150. Email: ricardoralisch@gmail.com

A compactação do solo é tão complexa como o próprio solo e constitui um dos principais entraves à produção agrícola sustentável no Brasil e no mundo. Este capítulo pretende esclarecer esta complexidade, abordando os mecanismos de formação, os diagnósticos, suas principais consequências, bem como sugerir as estratégias de manejo integrado disponíveis para minimizar seus efeitos negativos. São discutidos métodos mecânicos de redução da compactação, o papel das plantas com seus diferentes sistemas radiculares, a importância dos manejos conservacionistas e as perspectivas futuras para a redução da compactação do solo em sistemas agrícolas modernos. A compreensão desses processos é essencial para a tomada de decisão técnica racional e economicamente viável, visando ser sustentável.

Palavras-chave: estrutura do solo, resistência à penetração; descompactação mecânica; plantas descompactadoras; Sistema Plantio Direto; física do solo.

Introdução

O solo é o substrato fundamental da produção agrícola, desempenhando funções que vão muito além do simples suporte físico às plantas. Em sua estrutura porosa e biologicamente ativa, o solo interage com todos os recursos naturais do planeta. Regula o ciclo hidrológico e recalca os lençóis freáticos. Realiza uma permanente troca gasosa com a atmosfera, acumulando o carbono extraído pelas plantas, em forma de matéria orgânica. Fornece as condições necessárias ao desenvolvimento radicular e das plantas, reciclando e armazenando nutrientes essenciais. Finalmente, sustenta comunidades microbianas complexas, que favorecem o desenvolvimento de novas plantas, que alimentam a micro, meso e macro biologia do solo, tornando este meio o mais biodiverso do planeta.

Quando esse sistema equilibrado é perturbado, todo o edifício produtivo entra em colapso silencioso, reduzindo paulatinamente a fertilidade do solo.

A fertilidade do solo deve ser compreendida como a capacidade que o solo tem de propiciar vida, fornecendo oxigênio, água e alimento para toda sua biodiversidade. O alimento desta atividade biológica do solo são as plantas e suas raízes. O oxigênio e a água estão nos poros do solo. A porosidade do solo é uma consequência de sua atividade biológica e da organização e arranjo das partículas organominerais de sua constituição ou textura. A esta organização da textura do solo com sua porosidade chamamos de estrutura do solo. Portanto, a estrutura do solo é o fundamento de sua fertilidade,

A compactação do solo deve ser definida com a degradação da estrutura do solo, afetando o volume de poros totais, especialmente dos macroporos responsáveis pela aeração e pela condutividade hidráulica saturada. Esse processo resulta na reorganização das partículas sólidas em diferentes arranjos, com consequências diretas sobre a densidade global, a resistência mecânica à penetração e a dinâmica de gases e água no perfil do solo. Esta degradação da estrutura do solo pode ser pela redução da porosidade do solo, mas pode também ser pelo aumento desta porosidade, que também é prejudicial. A porosidade de um solo e, principalmente, a relação entre sua micro e macro porosidade, é fruto do equilíbrio comentado acima. Portanto, cada solo tem sua porosidade adequada, devendo ser preservada para manter sua fertilidade.

Em tese, a compactação do solo se refere a degradação de sua estrutura causada pela redução da porosidade e consequente aumento da densidade do solo e daremos ênfase a este efeito. Mas alertamos que o aumento indiscriminado da porosidade do solo é mais prejudicial à sua fertilidade e ainda torna o solo muito frágil, muito vulnerável às erosões e a própria compactação.

No contexto brasileiro, o problema da compactação assume dimensões preocupantes. Estimativas indicam que mais de 70% das áreas agrícolas apresentam algum grau de compactação subsuperficial, concentrada frequentemente na camada entre 10 e 30 cm de profundidade, onde o tráfego de máquinas e o preparo histórico de solo convergem para criar camadas de impedimento mecânico. Esse horizonte compactado pode redu-

zir a produtividade das culturas em até 30%, dependendo da intensidade da compactação e das condições edafoclimáticas do ciclo.

A identificação precoce, o diagnóstico preciso e a adoção de estratégias de manejo integrado são, portanto, imperativos técnicos e econômicos. Este capítulo apresenta de forma sistematizada o estado da arte no manejo da compactação, integrando fundamentos de física do solo, engenharia agrícola e manejo de culturas para oferecer ao leitor um referencial sólido e aplicável.

Contexto

A compactação do solo é controlável: é consequência direta das decisões de manejo. O conhecimento dos seus mecanismos é o primeiro passo para seu controle efetivo.

Fundamentos da Compactação do Solo

Definição e Mecanismos de Formação

Do ponto de vista mecânico, a compactação ocorre quando uma tensão aplicada sobre a superfície do solo supera sua resistência estrutural, promovendo a deformação plástica das agregações e a redução dos poros. A tensão resultante no solo é a função da carga aplicada pelas ferramentas e rodados dos equipamentos agrícolas, pela resistência do solo, que depende do teor de água, da textura e do tipo de argila, do teor de matéria orgânica e do histórico de manejo.

Se esta tensão for superior à resistência do solo, causando uma compressão, teremos uma redução da porosidade e a compactação clássica do solo.

Mas se esta tensão resultante for superior, causando uma desagregação por atrito, há um aumento acentuado da porosidade.

Fatores que determinam a suscetibilidade de um solo à compactação e à desagregação:

- Umidade do solo no momento da operação — solos úmidos, próximos à capacidade de campo, tem a consistência plástica e se deformam com facilidade, pois oferecem mínima resistência ao rearranjo das partículas, pois a água atua como lubrificante entre as faces dos agregados;

- Umidade do solo tendendo a seco, consistência dura, são mais resistentes a compressão, mas os

atritos causados pela maior coesão dos agregados, promovem a desagregação da estrutura. A consistência do solo adequada para as operações agrícolas é a friável.

- Carga aplicada e área de contato — pressões de inflação dos pneus elevadas concentram as tensões nos horizontes superficiais, enquanto cargas por eixo elevadas transmitem pressões a maiores profundidades, alcançando camadas que dificultam a descompactação;

- Velocidade operacional alta aumenta a carga aplicada ao solo de forma geométrica, em função do efeito galope dos tratores e aumenta a energia de cisalhamento das ferramentas que atuam no solo, aumentando o potencial de desagregação da estrutura do solo. Procurem trabalhar sempre em baixa velocidade.

- Estado inicial da estrutura do solo — solos previamente compactados e/ou com baixo teor de matéria orgânica apresentam menor capacidade de suporte de carga, sendo mais suscetíveis à compactação adicional por tráfego subsequente. Isto é consequência direta do manejo adotado.

Distribuição das Tensões no Perfil

A propagação das tensões no perfil do solo obedece a princípios da mecânica dos solos descritos por Söhne (1953) e posteriormente refinados por Gupta & Raper (1994). Segundo esses modelos, as tensões verticais diminuem exponencialmente com a profundidade, mas a taxa de atenuação depende diretamente das propriedades elásticas do solo. Em solos saturados ou próximos à saturação, a compressibilidade aumenta e as tensões penetram mais profundamente.

De especial importância para a agricultura é a compactação da subsuperfície do solo, que ocorre a mais de 0,30m de profundidade, gerada principalmente por tratores e equipamentos de grandes cargas operacionais, solos em condições inadequadas de umidade e equipamentos de preparo de solo profundos. Essa compactação em maiores profundidades dificulta as ações de mitigação, que são mais onerosas e com efeitos de recuperação mais demorados.

Diagnóstico da Compactação

Métodos de Avaliação em Campo

O diagnóstico correto da compactação precede qualquer decisão de manejo. A literatura científica e a prática agrônoma consolidaram um conjunto

Tabela 7.1. Camadas de compactação, agentes causadores e limites críticos de densidade global para solos argilosos.

Camada (cm)	Agente Principal	Densidade Crítica (g cm ⁻³)	Impacto na Cultura
0 – 10	Pneus, pisoteio	> 1,55 (argila)	Emergência, aeração
10 – 30	Tráfego repetido, preparo profundo	> 1,60 (argila)	Crescimento radicular, absorção de água
30 – 60	Cargas por eixo pesadas	> 1,65 (argila)	Acesso a água e nutrientes profundos
> 60	Compactação herdada / natural	Variável	Ancoragem e resiliência à seca

de métodos complementares, cada qual com vantagens e limitações específicas.

Penetrometria

O penetrômetro de impacto ou de pressão constante é o método mais amplamente utilizado na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. O resultado, expresso em kPa ou MPa, reflete a força necessária para inserir um cone padronizado no solo a uma velocidade constante. Valores acima de 2,0 MPa são tradicionalmente considerados críticos para a maioria das culturas, embora esse limiar seja dependente do teor de água do solo no momento da medição.

A grande vantagem da penetrometria é a rapidez e o baixo custo operacional, que permitem amostragens em grande número de pontos e, conseqüentemente, análises geoestatísticas para a produção de mapas de resistência à penetração. Permite também um bom monitoramento da área, comparando áreas distintas ou uma mesma área com manejo diferente. A principal limitação é não distinguir se a variação da resistência à penetração foi causada por motivos naturais, como variação de textura nos horizontes do solo ou variação de umidade do solo. Para minimizar estes efeitos convém fazer um reconhecimento prévio do solo e fazer sempre a determinação simultânea da umidade volumétrica das diferentes camadas do solo no momento da penetrometria.

Densidade Global e Porosidade Total

A coleta de amostras indeformadas com anel volumétrico e posterior determinação da densidade global e da porosidade total constitui o método de referência para a avaliação da compactação. A densidade global acima de 1,55 g cm⁻³ para solos argilosos e acima de 1,75 g cm⁻³ para solos arenosos indica compactação com potencial de limitação ao desenvolvimento radicular. A porosidade total abaixo de 10% de macroporos compromete a aeração e a drenagem interna.

Avaliação Visual do Perfil Cultural

Métodos VESS e DRES

O método de Avaliação Visual da Estrutura do Solo (Visual Evaluation of Soil Structure — VESS) proposto por Guimarães et al. (2011) consiste na escavação de um bloco de solo e na análise morfológica dos torrões resultantes quanto à forma, tamanho, porosidade interna e resistência à fragmentação. A escala de avaliação varia de Sq1 (estrutura muito boa) a Sq5 (estrutura muito ruim/compactada), com boa correlação com atributos físicos mensurados laboratorialmente.

O DRES (Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo) tem o mesmo princípio, porém foi concebido para os solos tropicais e considera a desagregação como ruim, as notas variam de 1 (muito ruim) a 6 (excelente).

Ambos tem a vantagem de ser de baixo custo, intuitivo e capaz de revelar camadas compactadas que a penetrometria isolada poderia não identificar com precisão. Sua adoção tem crescido em programas de extensão rural como ferramenta de diagnóstico participativo.

Boas Práticas de Diagnóstico

Nenhum método isolado é suficiente. A combinação de penetrometria (distribuição espacial), densidade global (confirmação quantitativa) e VESS ou DRES (diagnóstico morfológico) oferece o diagnóstico mais completo e confiável da compactação.

Indicadores Biológicos de Compactação

Além dos atributos físicos clássicos, indicadores biológicos têm sido utilizados como integradores da qualidade estrutural do solo. A abundância e a diversidade da macrofauna edáfica, especialmente minhocas (Oligochaeta), diminuem significativamente em solos compactados, em função da redu-

ção da porosidade e da aeração que limitam a movimentação desses organismos.

Sob condições de compactação, o crescimento radicular é severamente restringido. Raízes que encontram resistência mecânica elevada tendem a crescer horizontalmente, acumulando-se nas camadas mais superficiais, o que torna a planta mais suscetível a déficits hídricos e menos eficiente na absorção de nutrientes de camadas mais profundas. A análise do perfil radicular — por meio de escavação monolítica ou uso de minirizotrons — constitui, portanto, um indicador direto e ecologicamente relevante da compactação.

Consequências da Compactação sobre o Sistema Solo-Planta

Atributos Físicos

A compactação altera profundamente a distribuição e a continuidade dos poros do solo. A redução de macroporos afeta a taxa de infiltração de água, a condutividade hidráulica saturada e a capacidade de aeração. Em eventos de chuva de alta intensidade, solos compactados apresentam maior escoamento superficial, favorecendo a erosão hídrica e reduzindo a recarga dos lençóis freáticos. Em condições de sequência seca, a menor capacidade de armazenamento de água nos poros médios e graúdos aumenta o estresse hídrico das culturas.

A temperatura do solo na camada compactada tende a ser mais baixa e mais variável, pois o solo compactado tem maior condutividade térmica mas menor capacidade calorífica volumétrica — características que aceleram o resfriamento noturno e retardam o aquecimento diurno. Esse efeito pode atrasar a germinação e o estabelecimento das plântulas em períodos frios, especialmente em culturas de outono-inverno como trigo e cevada.

Atributos Químicos

A compactação influencia a química do solo por meio de mudanças na aeração, na umidade e no movimento de solutos. Condições de baixa porosidade de aeração favorecem a anaerobiose, com consequências como a redução de nitratos (desnitrificação), a mobilização de manganês e ferro para formas solúveis potencialmente tóxicas às raízes, e a inibição de processos como a nitrificação e a fixação biológica de nitrogênio.

A menor exploração radicular de camadas compactadas implica menor absorção de fósforo, potás-

sio e micronutrientes que apresentam mobilidade restrita no solo. A eficiência de uso de fertilizantes é comprometida, pois parte dos nutrientes aplicados permanece inacessível às raízes concentradas nas camadas superficiais menos compactadas.

Atributos Biológicos

A biota do solo é altamente sensível às modificações estruturais causadas pela compactação. Estudos conduzidos em solos sob plantio direto de longa duração demonstram que a compactação reduz a biomassa microbiana, a atividade enzimática e a diversidade funcional dos microrganismos do solo, com impactos na ciclagem de nutrientes e na decomposição de resíduos culturais.

A fauna invertebrada — em especial os engenheiros do ecossistema como minhocas e cupins — tem sua densidade e diversidade reduzidas em solos compactados. Essas espécies são responsáveis pela criação de bioporos verticais que facilitam o crescimento radicular e a condutividade hidráulica do solo, de modo que sua eliminação retroalimenta negativamente o ciclo de degradação estrutural.

Estratégias de Manejo da Compactação

Prevenção: A Primeira e Melhor Estratégia

Do ponto de vista técnico e econômico, a prevenção da compactação é sempre mais eficiente que a correção. Uma vez instalada, especialmente em camadas subsuperficiais, a remediação da compactação exige investimentos expressivos em energia, maquinário e tempo. Além disso, a eficácia das intervenções mecânicas é temporária se as causas do problema não forem controladas.

As principais medidas preventivas incluem:

- Respeitar a capacidade de suporte de carga do solo, realizando operações de campo apenas quando o teor de água está abaixo da umidade crítica de compactação, determinada pela curva de compressão do solo;
- Reduzir a frequência e a intensidade do tráfego por meio de sistemas de tráfego controlado (Controlled Traffic Farming — CTF), nos quais as rodas das máquinas sempre trafegam nas mesmas faixas permanentes, preservando o restante da área sem compactação;
- Utilizar pneus de baixa pressão de inflação ou sistemas de ajuste de pressão em movimento (CTIS — Central Tire Inflation System), que permitem reduzir a pressão de contato solo-pneu em condições de campo;

- Usar as pressões de inflação dos pneus recomendada;
- Evitar operações em velocidades mais altas;
- Evitar as operações de preparo de solo;
- Manter cobertura vegetal permanente sobre o solo para reduzir o impacto das gotas de chuva e aumentar a resistência superficial ao tráfego de maquinário leve;
- Maximizar o aporte de matéria orgânica ao solo, pois a matéria orgânica aumenta a elasticidade dos agregados e a resiliência do solo às forças compressivas.
- Adotar rotações de cultura para aumentar a diversidade de plantas e da atividade biológica do solo.

Descompactação Mecânica

Quando a compactação já está estabelecida em intensidade que compromete a penetração das raízes, a intervenção mecânica pode ser necessária para realizar a primeira fissuração na camada compactada, para que as raízes possam penetrar e iniciar a recuperação da estrutura do solo. Os principais implementos utilizados são o escarificador e o subsolador e devem ser empregados como operação única e corretiva (preparo inicial). Não devem ser empregados como preparo periódico, a ser realizado repetidamente

Escarificação

O escarificador é o implemento de descompactação mais utilizado na agricultura brasileira. Composto por hastes com ponteiros sulcadoras que atuam na camada de 20 a 35 cm de profundidade, o equipamento promove a fragmentação da camada compactada por meio de tensões de tração e torção. O escarificador é eficaz na fissuração da camada arável ou superficial do solo, mas deve ser operado em umidade do solo adequada — solos muito úmidos tendem a ser plásticos e deformam-se sem fraturar, enquanto solos muito secos

exigem energia excessiva e podem promover a estrutura desagregada, além de causar danos desnecessários à estrutura. É fundamental que a operação seja feita lentamente.

O efeito da escarificação é temporário se não houver mudança nas práticas de manejo que originaram a compactação e não houver a introdução imediata de plantas com sistema radicular abundante para colonizar e proteger as fissuras do solo. Estudos de longa duração indicam que, em solos com tráfego não controlado, a compactação retorna a níveis críticos após dois a quatro anos do procedimento de descompactação mecânica.

Subsolagem

O subsolador difere do escarificador por atuar em profundidades maiores, geralmente entre 40 e 70 cm. É indicado para romper as camadas subsuperficiais resultantes de tráfego pesado de colheadoras ou caminhões graneleiros, por exemplo. A demanda energética da subsolagem é substancialmente maior que a da escarificação, exigindo tratores com maior potência e consumo de combustível significativamente superior.

A eficácia da subsolagem é ainda mais dependente da umidade do solo no momento da operação. A profundidade e o espaçamento entre hastes devem ser calibrados em função da textura do solo e da espessura da camada compactada. Em solos argilosos, o espaçamento entre hastes recomendado é de 0,4 a 0,6 m, enquanto em solos arenosos pode-se trabalhar com espaçamentos maiores. Da mesma forma que a escarificação, a subsolagem deve ser feita lentamente.

Descompactação Biológica:

Plantas Descompactadoras

O uso de plantas com sistema radicular pivotante profundo e de alta força de penetração para a melhoria da estrutura do solo é denominado descompactação biológica. Esse conceito ganhou expressão no Brasil a partir dos trabalhos de Kiehl

Tabela 2. Comparativo dos principais implementos de descompactação mecânica e suas indicações.

Implemento	Profundidade (cm)	Situação Indicada	Limitação Principal
Grade aradora	10 – 20	Preparo convencional	Cria camada compactada abaixo
Escarificador	20 – 35	Compactação moderada na camada arável	Efeito temporário sem mudança de manejo
Subsolador	40 – 70	Compactação subsuperficial severa	Alta demanda energética; umidade crítica
Escarificador + rolo	20 – 30	Dessecação e preparo para semeadura	Destrói cobertura superficial

(1979) e foi consolidado na prática agrônômica com a popularização do Sistema Plantio Direto e do sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e das plantas de cobertura.

O mecanismo da descompactação biológica envolve:

- Força mecânica direta das raízes, que penetram nas camadas compactadas criando canais (bioporos) que persistem após a decomposição das raízes;
- Exsudatos radiculares que solubilizam componentes minerais e aumentam a agregação nas imediações das raízes;
- Atividade de microrganismos rizosféricos que produzem substâncias polissacarídicas estabilizadoras de agregados;
- Ciclos de umedecimento e secagem na zona de influência radicular, que promovem a contração diferenciada das argilas e a abertura de planos de fratura naturais.

Dentre as espécies mais utilizadas no Brasil, destacam-se:

- Nabo forrageiro (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*): raiz pivotante que pode atingir mais de 60 cm de profundidade; alta produção de biomassa em outono-inverno;
- Tremoço-branco (*Lupinus albus*): raiz pivotante com alta capacidade de penetração em solos compactados; excelente adubação verde nitrogenada;
- Crotalária juncea (*Crotalaria juncea*): raiz profunda, alta produção de biomassa, ciclo de verão;
- Braquiária (*Urochloa* spp.): sistema radicular fasciculado denso com excelente cobertura das camadas superficiais; muito utilizada em pastagens de braquiária consorciadas com lavouras;
- Girassol (*Helianthus annuus*): raiz pivotante com força de penetração expressiva e papel duplo como cultura principal ou de cobertura.

Integração de Estratégias

A descompactação biológica não substitui a mecânica em solos com compactação severa, mas é a estratégia mais sustentável para a manutenção da qualidade estrutural a longo prazo. Idealmente, ambas as abordagens são integradas num sistema de manejo que inclui rotação de culturas, cobertura permanente e controle de tráfego.

Sistemas de Preparo Conservacionistas

O Sistema Plantio Direto (SPD), quando bem manejado, é considerado a melhor estratégia de longo prazo para a manutenção e a melhoria da qualidade estrutural do solo. A ausência de revolvimento do solo, a manutenção permanente de cobertura vegetal morta sobre a superfície e a rotação de culturas criam condições favoráveis à atividade biológica intensa, que é o grande motor da regeneração estrutural.

No entanto, o SPD mal manejado — com alta frequência de tráfego, ausência de rotação e cobertura insuficiente — pode resultar em compactação progressiva das camadas superficiais, especialmente em solos argilosos. A consolidação do SPD como sistema de manejo completo, e não apenas como ausência de aração, é fundamental para que seus benefícios estruturais se manifestem plenamente.

O sistema de preparo mínimo ou reduzido é uma alternativa intermediária que preserva a cobertura vegetal e limita o revolvimento do solo às linhas de semeadura. Nesse sistema, a escarificação periódica — a cada três a cinco anos — pode ser incorporada ao plano de manejo como intervenção corretiva de baixo impacto, especialmente quando indicada pelo monitoramento da resistência à penetração.

Monitoramento e Tomada de Decisão

Quando Intervir Mecanicamente

A decisão de realizar a descompactação mecânica deve ser baseada em critérios técnicos objetivos, e não em calendário fixo ou intuição. O monitoramento sistemático da resistência à penetração, da densidade global e do desenvolvimento radicular é a base racional para a tomada de decisão.

De forma geral, a intervenção mecânica é recomendada quando:

A resistência à penetração supera 2,0 MPa em umidade próxima à capacidade de campo em camadas entre 10 e 40 cm de profundidade;

A densidade global supera 1,55 g cm⁻³ em solos argilosos ou 1,65 g cm⁻³ em solos de textura média, acompanhada de redução do volume de macroporos abaixo de 10%;

O sistema radicular das culturas apresenta deformações morfológicas visíveis, como raízes achatadas, horizontalizadas ou com crescimento em L, indicativas de barreira mecânica;

A infiltração básica de água é inferior a 15 mm

h⁻¹ em solos argilosos ou 25 mm h⁻¹ em solos de textura média;

Há queda de produtividade documentada e não explicada por outros fatores como fertilidade, déficit hídrico ou doenças.

Agricultura de Precisão Aplicada ao Manejo da Compactação

Os avanços em geotecnologias e em sensoriamento remoto têm aberto novas perspectivas para o diagnóstico e o manejo espacializado da compactação. Sensores de condutividade elétrica aparente do solo (CEa), como o EM38 e o Veris 3100, permitem o mapeamento indireto de atributos correlacionados com a compactação, como textura, teor de água e salinidade, em alta densidade amostral e com grande velocidade operacional.

A resistência à penetração pode ser monitorada com penetrômetros eletrônicos equipados com GPS, que geram mapas georreferenciados da variabilidade espacial da compactação. Esses mapas podem ser utilizados para a prescrição de descompactação em taxa variável, concentrando as intervenções nas áreas mais problemáticas e evitando operações desnecessárias nas áreas com estrutura adequada.

Veículos aéreos não tripulados (VANTS) equipados com câmeras multiespectrais permitem a identificação indireta de zonas de compactação a partir de respostas espectrais das culturas relacionadas ao estresse hídrico e ao crescimento diferenciado — uma abordagem promissora para o monitoramento em escala de lavoura.

Aspectos Econômicos do Manejo da Compactação

A avaliação econômica do manejo da compactação deve considerar tanto os custos das intervenções quanto as perdas de produtividade associadas ao problema não tratado. A análise de custo-benefício de cada estratégia depende de variáveis como

preço de commodity, custo de combustível e mão de obra, tipo de solo e grau de compactação.

Estudos conduzidos no Paraná e no Rio Grande do Sul indicam que a perda de produtividade em áreas compactadas varia de 5 a 30% para a soja e de 8 a 35% para o milho, dependendo da intensidade da compactação e das condições climáticas do ciclo. O custo de uma escarificação com trator de 180 CV situa-se entre R\$ 450 e R\$ 700 ha⁻¹, incluindo depreciação do implemento e consumo de combustível — custo que se amortiza em uma única safra de soja ou milho com ganhos de produtividade modestos.

A descompactação biológica, por meio de plantas de cobertura, tem custo substancialmente menor e, além do benefício estrutural, contribui com fixação biológica de nitrogênio, supressão de plantas daninhas e manutenção da cobertura do solo. A análise econômica de longo prazo tende a favorecer essa abordagem, especialmente quando integrada à rotação de culturas e ao sistema plantio direto.

Perspectivas Futuras

O manejo da compactação do solo está em franca evolução, impulsionado por avanços tecnológicos em sensoriamento, modelagem e biotecnologia. Três frentes emergentes merecem atenção especial:

Modelagem Computacional e Inteligência Artificial

Modelos numéricos de propagação de tensões no solo, como o SoilFlex e o SOCOMO, já permitem simular o efeito de diferentes configurações de maquinário e condições de solo sobre a distribuição de compactação no perfil. A integração desses modelos com sistemas de suporte à decisão baseados em inteligência artificial — capazes de processar dados históricos de tráfego, precipitação

Tabela 3. Análise comparativa das estratégias de manejo da compactação quanto a custo, durabilidade e sustentabilidade.

Estratégia	Custo Estimado (R\$ ha ⁻¹)	Durabilidade do Efeito	Sustentabilidade
Escarificação	450 – 700	2 – 4 anos	Média
Subsolagem	700 – 1.200	3 – 6 anos	Média
Plantas descompactadoras	150 – 350	Progressivo	Alta
Tráfego controlado (CTF)	Alto (infraestrutura)	Permanente	Muito alta
Manejo integrado	Variável	Longo prazo	Muito alta

e propriedades do solo — representa um avanço qualitativo na prevenção da compactação.

Melhoramento Genético para Tolerância à Compactação

A seleção de genótipos com maior capacidade de penetrar em solos compactados — seja por maior força de crescimento da raiz primária, por maior produção de exsudatos que solubilizam a compactação ou por arquiteturas radiculares mais eficientes — é uma área promissora do melhoramento genético. Variedades de milho e soja com sistema radicular adaptado a condições restritivas já estão em fase avançada de desenvolvimento em programas de melhoramento nacionais e internacionais.

Automação e Veículos Autônomos

O desenvolvimento de plataformas agrícolas autônomas de menor massa — capazes de realizar operações de semeadura, aplicação de insumos e colheita com carga por eixo significativamente menor que os equipamentos convencionais — representa a ruptura conceitual mais profunda no paradigma do manejo da compactação. Veículos robóticos com 500 a 2.000 kg de massa operacional, em substituição a colhedoras e pulverizadores com mais de 20.000 kg, poderiam virtualmente eliminar a compactação causada por tráfego, representando uma solução estrutural definitiva para o problema.

7.9 Considerações Finais

A compactação do solo é um problema multidimensional que não admite soluções simplistas ou pontuais. Sua correção duradoura exige a compre-

ensão dos mecanismos que a originam, o diagnóstico preciso das camadas afetadas, a escolha criteriosa dos métodos de intervenção e, sobretudo, a mudança estrutural das práticas de manejo que permitem que o problema se perpetue.

O manejo integrado da compactação — que combina prevenção pelo controle do tráfego e manutenção da cobertura, intervenção mecânica criteriosa e fundamentada em diagnóstico, e descompactação biológica por meio de rotação e diversidade de espécies — é a abordagem que a ciência do solo recomenda para sistemas de produção de alta eficiência e sustentabilidade.

A agricultura brasileira, por sua escala, pela diversidade de seus solos e pela pressão competitiva que a obriga à eficiência permanente, tem muito a ganhar com a incorporação desses princípios à rotina de manejo. O engenheiro agrônomo, o técnico agrícola e o produtor rural têm, neste campo, uma responsabilidade técnica e ambiental que transcende o ciclo da safra e projeta seus efeitos sobre gerações futuras de agricultores e sobre a capacidade produtiva dos solos que nos foram confiados.

Mensagem Final

A qualidade estrutural do solo é um patrimônio coletivo. Preservá-la com conhecimento técnico e responsabilidade é o compromisso de todo profissional das ciências agrárias.

Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, p. 115–119, 1995.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação e qualificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 975–983, 2008.
- GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, v. 27, p. 395–403, 2011.
- GUPTA, S. C.; RAPER, R. L. Prediction of soil compaction under vehicles. In: SOANE, B. D.; van OUWERKERK, C. (Ed.). *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 71–90.
- KIEHL, E. J. *Manual de Edafologia*. São Paulo: Ceres, 1979. 264 p.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e sem escarificação. *Ciência Rural*, v. 42, p. 291–297, 2012.
- PASSIOURA, J. B. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell & Environment*, v. 25, p. 311–318, 2002.
- RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 381–384, 2008.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, n. 27, p. 29–48, 2003.
- SÖHNE, W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik*, v. 5, p. 49–63, 1953.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 573–581, 1998.
- WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science*, v. 49, p. 73–84, 1998.

Semear Cortando Água: Plantio em Nível e Controle da Erosão

Vitor Muller Anunciato¹, Wilson Shoji Arikita²

¹Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. Rodovia PR 540, Km 9, Colônia Vitória, Distrito de Entre Rios, Guarapuava, Paraná, Brasil.

CEP: 85.139-400. Email: vitor.anunciato@agraria.com.br

²WSA Tecnologia de conservação de solo e água. Avenida Brasil. Qd10. Lt4. Santo Antônio de Goiás, Bairro. Setor Sul, Goiás. Cep 75.375-000.

Email: wil.arikita@icloud.com

O plantio em nível — popularmente chamado de ‘semear cortando água’ — consiste na orientação das linhas de semeadura perpendiculares à declividade do terreno, de modo que o sulco de plantio intercepte e retenha o escoamento superficial, favorecendo a infiltração da água no solo e reduzindo drasticamente a energia cinética responsável pelo transporte de sedimentos. Esta prática constitui uma das bases do manejo conservacionista do solo no Brasil e é reconhecida como uma das medidas de controle da erosão hídrica de maior relação custo-benefício disponíveis ao produtor rural. Este capítulo aborda os fundamentos físicos da erosão hídrica, os princípios técnicos do plantio em nível, os métodos de implantação no campo, a sinergia com outras práticas conservacionistas, as limitações da técnica e as perspectivas para sua integração a sistemas de produção modernos e digitalizados.

Palavras-chave: erosão hídrica; plantio em nível; curvas de nível; conservação do solo; escoamento superficial; manejo conservacionista.

Introdução

O solo é o recurso natural de maior importância para a civilização agrícola — e um dos mais silenciosamente ameaçados. No Brasil, estimativas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) indicam que as perdas anuais de solo por erosão hídrica superam 500 milhões de toneladas, número que coloca o país entre os maiores geradores de sedimentos agrícolas do mundo. Esse processo, invisível no curto prazo mas devastador no horizonte de décadas, compromete irreversivelmente a capacidade produtiva dos solos, assoando cursos d’água, contaminando mananciais e destruindo a infraestrutura de drenagem.

A expressão ‘semear cortando água’ sintetiza com precisão poética a lógica do plantio em nível: as linhas de semeadura são orientadas perpendicularmente à inclinação do terreno, formando sulcos que funcionam como pequenas barreiras horizontais ao fluxo da água da chuva morro abaixo. Em vez de escoar livremente pela encosta, carregando partículas de solo, a água é interceptada, retida temporariamente e infiltrada — alimentando o lençol freático, reduzindo o pico de enxurrada e preservando os nutrientes e a matéria orgânica que, de outra forma, seriam transportados para fora da lavoura.

O princípio é antigo — civilizações pré-colombianas nas montanhas andinas já praticavam o plantio em terraços em curvas de nível há milênios — mas sua aplicação sistemática na agricultura mecanizada brasileira é relativamente recente. Foi a partir da década de 1970, com a expansão do plantio direto e das práticas conservacionistas no

Sul do Brasil, que o plantio em nível se consolidou como componente indispensável de qualquer sistema de manejo responsável em áreas com declividade.

Este capítulo apresenta os fundamentos científicos e práticos do plantio em nível, as ferramentas e os métodos para sua implantação no campo, sua sinergia com outras práticas conservacionistas e as perspectivas para sua integração a sistemas de produção de precisão.

Perspectiva Conservacionista

Cada sulco aberto em nível é uma decisão de conservação. Semear cortando água não é apenas uma técnica agronômica — é um compromisso com a permanência do solo como recurso produtivo para as gerações futuras.

Fundamentos da Erosão Hídrica

Processos e Tipos de Erosão

A erosão hídrica é o processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas de solo pela ação da água. Compreender os mecanismos físicos desse processo é o ponto de partida para dimensionar corretamente as práticas de controle e avaliar a eficácia de intervenções como o plantio em nível.

O processo erosivo inicia com o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo — fenôme-

no denominado erosão por salpico ou erosão por impacto. Quando uma gota de chuva atinge o solo desprotegido, ela libera energia cinética suficiente para desagregar partículas e lançá-las a distâncias de até 60 cm do ponto de impacto. Esse processo de salpico desagrega os agregados superficiais, cria partículas individuais em suspensão e contribui para o selamento da superfície do solo — processo que reduz a taxa de infiltração e aumenta o escoamento superficial.

À medida que o escoamento superficial se intensifica, a erosão evolui por estágios progressivos:

- Erosão laminar: remoção de camadas finas e uniformes do solo em toda a superfície. É o tipo mais insidioso, pois ocorre de forma tão gradual que frequentemente não é percebida pelo produtor até que a perda de solo seja já significativa;

- Erosão em sulcos: concentração do escoamento em linhas preferenciais de fluxo, formando incisões rasas (sulcos) que removem quantidades expressivas de solo. Os sulcos de erosão frequentemente se formam exatamente nas linhas de semeadura quando estas estão orientadas no sentido da declividade, funcionando como canais condutores do escoamento;

- Erosão em ravinas: aprofundamento progressivo dos sulcos para além de 30 cm, criando canais de erosão que não podem ser apagados por operações normais de preparo do solo. Ravinas representam o estágio avançado de degradação erosiva e podem inviabilizar economicamente áreas produtivas inteiras;

- Erosão em voçorocas: forma extrema de erosão, com canais profundos, paredes verticais e ramos que avançam morro acima. Frequentemente associada a condições geológicas específicas e à concentração de escoamento de grandes áreas.

Fatores que Controlam a Erosão

A Equação Universal de Perda de Solo

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978) e amplamente calibrada para as condições brasileiras por pesquisadores como Bertoni & Lombardi Neto, expressa matematicamente os fatores que determinam a quantidade de solo perdida por erosão hídrica em uma determinada área:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

(Equação 8.1 — Equação Universal de Perda de Solo)

onde A é a perda média anual de solo ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), R é a erosividade da chuva ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$), K é a erodibilidade do solo ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$), L é o fator comprimento de rampa, S é o fator declividade, C é o fator uso e manejo do solo e P é o fator prática conservacionista.

O plantio em nível atua diretamente sobre o fator P — o fator de práticas conservacionistas. Valores de P para o plantio em nível variam entre 0,25 e 0,60, dependendo da declividade do terreno, indicando que essa prática pode reduzir as perdas de solo em 40 a 75% em relação ao cultivo em sentido da pendente. Quando combinado com outras práticas conservacionistas — como o plantio direto (que reduz o fator C) e o terraceamento (que reduz os fatores L e S) — o efeito é multiplicativo, podendo reduzir as perdas a uma fração mínima do potencial erosivo natural.

Impactos Econômicos e Ambientais da Erosão

As consequências econômicas da erosão hídrica operam em duas dimensões: os impactos no local (on-site), que afetam diretamente a produtividade

Tabela 8.1. Valores do fator P (práticas conservacionistas) da EUPS para diferentes sistemas de manejo e faixas de declividade.

Prática Conservacionista	Fator P (declividade 3–8%)	Fator P (declividade 9–20%)	Mecanismo Principal
Cultivo morro abaixo (referência)	1,00	1,00	Nenhum — máxima erosão
Plantio em nível	0,25 – 0,35	0,40 – 0,60	Interceptação do escoamento superficial
Plantio em faixas em nível	0,15 – 0,25	0,25 – 0,40	Interceptação + dissipação de energia
Terraceamento + plantio em nível	0,05 – 0,10	0,10 – 0,15	Redução do comprimento de rampa e interceptação
Plantio direto em nível com cobertura	0,03 – 0,08	0,05 – 0,12	Proteção superficial + interceptação + infiltração

da área atingida, e os impactos fora do local (off-site), que se distribuem ao longo da bacia hidrográfica a jusante.

Nos impactos no local, a erosão promove a perda dos horizontes superficiais do solo — exatamente os de maior fertilidade e maior teor de matéria orgânica. Estima-se que cada tonelada de solo perdida por erosão carrega, em média, 1,5 a 3,0 kg de nitrogênio, 0,4 a 0,8 kg de fósforo e volumes expressivos de potássio, micronutrientes e matéria orgânica. A reposição desses nutrientes por fertilizantes industriais representa um custo direto ao produtor que raramente é contabilizado na análise econômica da produção.

Nos impactos fora do local, os sedimentos carregados pelo escoamento superficial assoreiam reservatórios de abastecimento e de geração de energia hidrelétrica, destroem a biota de cursos d'água, colmatam sistemas de drenagem e elevam os custos de tratamento de água potável. No Brasil, o custo anual dos impactos off-site da erosão agrícola foi estimado em bilhões de reais — uma externalidade negativa que raramente é internalizada nas decisões de manejo.

Custo Invisível da Erosão

A erosão cobra seu preço de forma difusa e lenta, mas inexorável. Cada safra cultivada no sentido da pendente é, em alguma medida, uma antecipação do potencial produtivo das safras futuras. O plantio em nível é a forma mais elementar de honrar esse compromisso com a continuidade.

Princípios Técnicos do Plantio em Nível

Como o Plantio em Nível Funciona

O princípio físico do plantio em nível é elegantemente simples: ao orientar os sulcos de semeadura ao longo das linhas de mesma altitude — as curvas de nível — cria-se uma série de pequenas barreiras horizontais à direção de fluxo preferencial da água, que é sempre no sentido da maior declividade. A água que escoar pela encosta encontra o sulco perpendicular ao seu fluxo, perde velocidade, é temporariamente retida e, com o tempo adicional de contato com o solo, tem maior oportunidade de se infiltrar.

Esse mecanismo produz três efeitos conserva-

cionistas simultâneos e sinérgicos:

- Redução da velocidade de escoamento: o escoamento superficial que deveria percorrer toda a extensão da encosta é interceptado a intervalos regulares pelos sulcos em nível, tendo sua velocidade reduzida a cada interceptação. Como a energia cinética do escoamento é proporcional ao quadrado da velocidade, reduções modestas na velocidade resultam em reduções expressivas na capacidade de transporte de sedimentos;

- Aumento da infiltração de água: o tempo adicional de contato entre a lâmina d'água e a superfície do solo, proporcionado pela barreira do sulco, aumenta o volume de água infiltrado. Esse efeito é especialmente importante em solos com boa macroporosidade e em regiões com déficit hídrico estacional, onde a maximização da infiltração é duplamente benéfica — tanto para o controle da erosão quanto para a recarga do perfil do solo disponível para as culturas;

- Redução da concentração de fluxo: ao manter o escoamento distribuído de forma mais uniforme pela encosta — em vez de permitir sua concentração em linhas preferenciais de fluxo — o plantio em nível reduz a probabilidade de formação de sulcos e ravinas de erosão.

Limites de Declividade para o Plantio em Nível

O plantio em nível é indicado para declividades entre 2% e 12% na maioria dos solos agrícolas brasileiros. Abaixo de 2%, o terreno é praticamente plano e o risco de erosão é baixo, tornando a prática menos necessária. Acima de 12% a 15%, dependendo do tipo de solo e da erosividade das chuvas locais, o plantio em nível isolado é insuficiente para controlar a erosão, sendo necessária a complementação com terraceamento ou outras estruturas físicas de controle.

Em declividades elevadas, o volume de água acumulado nos sulcos em nível pode superar a capacidade de retenção e infiltração, gerando transbordamento lateral e concentração de fluxo que pode ser mais destrutiva que o escoamento difuso original. Por isso, o dimensionamento correto do espaçamento entre terraços — que definem o comprimento de rampa sobre o qual o plantio em nível atua — é uma condição necessária para que a técnica funcione adequadamente.

Tabela 8.2. Classes de declividade, risco de erosão e recomendações de manejo conservacionista.

Declividade (%)	Risco de Erosão	Recomendação	Práticas Complementares
0 – 2	Muito baixo	Plantio em qualquer direção; atenção à drenagem interna	Drenagem subsuperficial
2 – 5	Baixo a moderado	Plantio em nível obrigatório	Cobertura do solo
5 – 12	Moderado a alto	Plantio em nível + cobertura permanente	Terraços de retenção
12 – 20	Alto a muito alto	Plantio em nível + terraceamento denso	Terraços + faixas de vegetação permanente
> 20	Muito alto / severo	Reconsiderar uso agrícola mecanizado	Reflorestamento ou pastagem permanente

Implantação do Plantio em Nível no Campo

Levantamento Topográfico e Marcação de Curvas de Nível

A implantação correta do plantio em nível começa com o levantamento topográfico da área e a marcação das curvas de nível no campo. Uma curva de nível é o conjunto de pontos de mesma altitude — ou seja, uma linha que, se percorrida, não sobe nem desce. Ao orientar as linhas de semeadura ao longo dessas curvas, garante-se que os sulcos estejam horizontais e, portanto, que a água retida não escoará ao longo do sulco para se concentrar em um ponto.

Nível de Cantoneiro (Nível em A)

O nível em A, também chamado de nível de cantoneiro ou nível de pernas, é o instrumento mais tradicional e acessível para a marcação de curvas de nível em pequenas e médias propriedades. Consiste em duas pernas de madeira ou alumínio unidas por um travessão no ápice, com um prumo ou nível d'água suspenso do ápice. Quando as duas pernas do instrumento são posicionadas no solo e o prumo encontra-se no centro da marcação do travessão, os dois pontos de apoio estão no mesmo nível.

A marcação com o nível em A é feita por caminhamento: uma perna permanece fixa enquanto a outra gira em arco até que o prumo indique novamente o ponto central. O ponto onde a perna móvel toca o solo é marcado com uma estaca, e o processo se repete ao longo de toda a extensão da encosta até que a curva de nível esteja completamente marcada. O método é de baixo custo, não requer equipamentos sofisticados e pode ser operado por qualquer técnico ou produtor treinado.

Nível de Mangueira

O nível de mangueira (ou nível d'água) utiliza o princípio físico dos vasos comunicantes: em uma mangueira transparente preenchida com água,

ambas as extremidades livres sempre apresentam o nível d'água na mesma altitude. Dois operadores — um em cada extremidade da mangueira — posicionam as extremidades no solo e registram os pontos onde o nível d'água coincide com uma marcação de referência. O método é mais rápido que o nível em A para levantamentos de maior comprimento, porém exige dois operadores e cuidado para evitar bolhas de ar na mangueira, que introduzem erros de leitura.

Receptores GNSS e Topografia Digital

Em propriedades com maior nível de tecnificação, receptores GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) de precisão — incluindo sistemas RTK e receptores diferenciais — permitem o levantamento topográfico com precisão centimétrica. Os dados coletados alimentam softwares de topografia que geram modelos digitais do terreno (MDT) e calculam automaticamente as curvas de nível em qualquer intervalo desejado. Esses modelos podem ser exportados como linhas-guia para sistemas de piloto automático instalados nos tratores e semeadoras, garantindo que as linhas de semeadura sigam exatamente as curvas de nível calculadas.

A topografia digital integrada ao piloto automático representa o estado da arte na implantação do plantio em nível, eliminando os erros de marcação manual, reduzindo o tempo de preparação e permitindo o registro e o monitoramento da operação ao longo das safras. Em regiões com topografia complexa e alta variabilidade de declividade, essa tecnologia é particularmente valiosa.

Linhas-Guia e Condução das Linhas de Semeadura

Uma vez marcadas as curvas de nível no campo — seja por métodos manuais ou digitais — o produtor precisa conduzir a semeadora ao longo dessas linhas com precisão suficiente para garantir a eficácia conservacionista da prática. A linha-guia é a curva de nível materializada no campo (por esta-

cas, giz agrícola ou por sinal eletrônico no monitor do trator) que o operador segue durante a semeadura.

Em topografias com declividade variável e irregular, é impossível que todas as linhas de semeadura sejam perfeitas curvas de nível simultâneas. Na prática, trabalha-se com linhas-guia mestras — marcadas com rigor topográfico a intervalos regulares — e linhas intermediárias que seguem aproximadamente o nível entre duas linhas-guia. O critério de aceitabilidade é que nenhum ponto de qualquer linha intermediária desvie mais de 1–2% do nível em relação à linha-guia adjacente, evitando a formação de pontos baixos onde o escoamento possa se concentrar.

Sentido de Semeadura e Manobras

A orientação das linhas em nível implica que a semeadora percorre trajetórias curvas ao longo da encosta, o que exige manobras mais frequentes que no plantio no sentido da pendente. Nos extremos da lavoura — as cabeceiras — formam-se áreas de manobra (headlands) onde a semeadora gira para retornar à faixa seguinte. Essas áreas de manobra são pontos críticos do ponto de vista da compactação e da erosão, pois concentram o tráfego e frequentemente interrompem a continuidade das linhas em nível.

O manejo correto das cabeceiras inclui a manutenção de cobertura vegetal permanente nessas faixas, a limitação do tráfego de veículos pesados aos caminhos de cabeceira já estabelecidos e, quando possível, a instalação de faixas vegetadas perpendiculares ao sentido de escoamento para interceptar o escoamento proveniente das cabeceiras antes que ele alcance as linhas de semeadura.

Sinergia com Outras Práticas Conservacionistas

Plantio em Nível e Sistema Plantio Direto

O plantio em nível e o sistema plantio direto (SPD) são práticas conservacionistas naturalmente complementares, e sua combinação produz efeitos sinérgicos que superam amplamente o que cada uma alcança isoladamente. O SPD mantém os resíduos culturais sobre a superfície do solo, protegendo-o do impacto das gotas de chuva e reduzindo o coeficiente de escoamento superficial. O plantio em nível intercepta o escoamento que, mesmo reduzido pela cobertura, ainda ocorre em eventos de chuva de alta intensidade.

Estudos de longa duração conduzidos no Sul do Brasil demonstram que a combinação de plantio direto em nível com cobertura de 4 t ha⁻¹ ou mais de palhada reduz as perdas de solo a valores inferiores a 1 t ha⁻¹ ano⁻¹ — abaixo da taxa de formação de solo nos horizontes superficiais, o que caracteriza um sistema de produção verdadeiramente sustentável do ponto de vista edáfico. Em contraste, o cultivo convencional no sentido da pendente, sem cobertura, pode gerar perdas de 30 a 80 t ha⁻¹ ano⁻¹ em solos argilosos com declividades de 8 a 12%.

Terraceamento

O terraceamento consiste na construção de estruturas físicas (terraços) no sentido horizontal da encosta, que subdividem o comprimento de rampa em segmentos menores, reduzindo a velocidade e o volume de escoamento que chega a cada terraço. O terraceamento e o plantio em nível são práticas complementares: o terraceamento define o limite superior de comprimento de rampa dentro do qual o plantio em nível pode funcionar eficientemente, e o plantio em nível distribui uniformemente o escoamento entre os terraços, evitando a concentração de fluxo.

Existem dois tipos principais de terraços:

- Terraços de retenção: construídos com um canal horizontal que retém toda a água proveniente da faixa de encosta a montante, forçando sua infiltração. São indicados para regiões com déficit hídrico, onde a retenção de água no perfil é desejável, mas exigem solos com boa permeabilidade para que não ocorra o transbordamento e o rompimento do terraço;
- Terraços de gradiente ou escoadouros: construídos com o canal levemente inclinado, conduzindo o excesso de água para um escoadouro vegetado de forma controlada, sem velocidade erosiva. São indicados para regiões de alta pluviosidade, onde a retenção total é inviável.

Faixas de Vegetação Permanente

As faixas de vegetação permanente — também chamadas de faixas de contenção ou barreiras vivas — são tiras de vegetação densa e perene, geralmente gramíneas de porte elevado como o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ou o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), instaladas transversalmente à declividade do terreno. Essas faixas funcionam como filtros que retêm sedimentos, reduzem a velocidade do escoamento superfi-

cial e aumentam a infiltração no ponto de contato.

Quando instaladas em conjunto com o plantio em nível, as faixas de vegetação permanente atuam como a última linha de defesa do sistema conservacionista: o plantio em nível reduz a velocidade e o volume do escoamento; os terraços subdividem o comprimento de rampa; e as faixas vegetadas retêm os sedimentos que, eventualmente, transpassam os sulcos em nível em eventos de chuva excepcional.

Rotação de Culturas e Cobertura do Solo

A diversidade de espécies cultivadas ao longo do ciclo anual tem impacto direto sobre a erodibilidade do solo e sobre a eficácia do plantio em nível. Culturas com dossel denso e fechamento rápido — como a soja e o trigo — oferecem maior proteção à superfície do solo durante sua fase vegetativa. Culturas de cobertura no período de entressafra, como o nabo forrageiro, o tremoço e a aveia-preta, mantêm a superfície protegida nos meses de maior risco erosivo e contribuem com biomassa para a formação de cobertura morta sobre o solo.

A presença de cobertura do solo — seja ela cultura em crescimento ou palhada — reduz diretamente o fator C da EUPS, multiplicando o efeito conservacionista do plantio em nível. Um solo coberto com 80% ou mais de palhada pode ter seu fator C reduzido para menos de 0,10 — o que significa que apenas 10% do potencial erosivo natural se efetiva, independentemente das condições de declividade e erosividade da chuva.

Manejo Integrado

O plantio em nível é mais eficaz como parte de um sistema conservacionista integrado. Isolado, ele pode ser insuficiente em solos muito erodíveis ou sob chuvas de alta intensidade. Em combinação com cobertura permanente, rotação de culturas e terraceamento adequado, transforma-se em um sistema quase impenetrável à erosão.

Benefícios Além do Controle da Erosão Conservação da Água no Solo

Um dos benefícios mais expressivos do plantio em nível — frequentemente subestimado em relação ao controle da erosão — é o aumento da quantidade de água armazenada no perfil do solo. Ao

interceptar o escoamento superficial e forçar sua infiltração, os sulcos em nível funcionam como sistemas de captação de água in situ, aumentando a recarga da camada explorável pelas raízes das culturas.

Em regiões com distribuição irregular de chuvas — como o Sul do Brasil, onde veranicos de 15 a 30 dias sem precipitação são frequentes durante o ciclo da soja — a água adicional retida pelo plantio em nível pode ser decisiva para que as culturas atravessem os períodos de déficit hídrico sem perdas expressivas de rendimento. Estudos conduzidos no Paraná estimam que o plantio em nível pode aumentar em 15 a 30 mm o teor de água disponível no perfil do solo após eventos de chuva, valor que representa de 7 a 15 dias adicionais de disponibilidade hídrica para as culturas.

Manutenção da Fertilidade do Solo

Como já mencionado, cada tonelada de solo perdida por erosão carrega consigo quantidades expressivas de nutrientes e matéria orgânica. Ao reduzir as perdas de solo, o plantio em nível conserva indiretamente a fertilidade natural do solo — especialmente os horizontes superficiais, onde a matéria orgânica e os nutrientes se concentram.

O fósforo, nutriente de baixíssima mobilidade no solo e de alto custo de reposição por fertilizantes, é um dos principais beneficiários do controle da erosão. O fósforo se associa preferencialmente às partículas finas do solo (argila e silte), que são exatamente as primeiras a ser transportadas pela erosão laminar. A redução da erosão pelo plantio em nível é, portanto, também uma estratégia de eficiência no uso de fertilizantes fosfatados.

Qualidade da Água e Serviços Ambientais

Os benefícios do plantio em nível se estendem além dos limites da propriedade. A redução do aporte de sedimentos, nutrientes e agrotóxicos aos corpos d'água melhora a qualidade da água superficial e reduz os custos de tratamento para abastecimento humano. Em bacias hidrográficas com alta proporção de áreas agrícolas em plantio em nível, a regularização da vazão dos cursos d'água é documentada — com menor pico de cheia e maior manutenção de vazão em períodos secos, resultado da maior infiltração e recarga do lençol freático.

Esses benefícios ambientais têm sido reconhecidos em instrumentos de política pública, como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que remunerou produtores que adotam práticas con-

servacionistas em função dos serviços hidrológicos e de conservação de biodiversidade que seus sistemas de manejo proporcionam. O plantio em nível é uma das práticas mais citadas nesses programas como condicionalidade para o recebimento do pagamento.

Limitações e Desafios da Implantação

Topografia Complexa e Solos Irregulares

A principal limitação operacional do plantio em nível é a dificuldade de condução das linhas de semeadura em terrenos com topografia muito irregular — com mudanças frequentes de declividade, morros convexos ou côncavos, ou áreas com microrrelevo acentuado. Nesses casos, as linhas em nível tendem a se fechar (convergir) em áreas côncavas e a se abrir (divergir) em áreas convexas, criando situações onde a manutenção do paralelismo entre as linhas exige ajustes frequentes que complicam a operação e reduzem a eficiência do sistema.

A solução técnica para esse desafio é a divisão da área em talhões com topografia mais homogênea, separados por faixas de vegetação permanente ou por estradas internas, e o levantamento topográfico detalhado de cada talhão para a marcação individualizada das linhas-guia. Em propriedades com piloto automático e modelos digitais do terreno, esse ajuste pode ser feito com grande precisão e sem custo adicional de marcação.

Logística Operacional e Resistência Cultural

O plantio em nível implica trajetórias curvilíneas para a semeadora e o trator, o que reduz a eficiência operacional em comparação ao plantio em linhas retas paralelas ao limite da área. O operador precisa de maior atenção para acompanhar as linhas-guia, as manobras nas cabeceiras são mais frequentes e complexas, e o rendimento operacional (hectares por hora) pode ser 10 a 20% inferior ao do plantio convencional.

Além do aspecto operacional, existe um componente cultural de resistência à prática em algumas regiões. O plantio em linhas retas, no sentido da pendente, é visualmente mais ordenado e facilita algumas operações subsequentes — como a pulverização e a colheita — que também beneficiam da trajetória reta. A transição para o plantio em nível frequentemente exige um trabalho de convencimento técnico junto ao produtor, demonstrando com dados locais os benefícios da prática em com-

paração com os custos operacionais ligeiramente superiores.

Manutenção das Estruturas

As estruturas de controle da erosão — especialmente os terraços — exigem manutenção periódica para que permaneçam funcionais ao longo do tempo. O crescimento de plantas daninhas nos canais dos terraços, o assoreamento por sedimentos e os danos causados pelo tráfego de máquinas são as principais causas de degradação das estruturas físicas. A manutenção negligenciada pode transformar um terraço de retenção em um canal de concentração de fluxo — exatamente o oposto do efeito desejado.

O planejamento da manutenção das estruturas conservacionistas deve ser incorporado ao calendário agrícola da propriedade, com inspeção anual antes do início da estação chuvosa e intervenção imediata em pontos de dano identificados.

Tecnologias Digitais Aplicadas ao Plantio em Nível

Modelos Digitais do Terreno e Planejamento de Curvas de Nível

A disponibilidade crescente de modelos digitais do terreno (MDT) de alta resolução — obtidos por levantamentos com VANT (drone) equipado com câmera fotogramétrica ou com scanner LiDAR — revolucionou o planejamento do plantio em nível. A partir de um MDT com resolução de 0,5 a 1,0 m, é possível calcular as curvas de nível com precisão centimétrica, identificar os pontos de concentração de fluxo, dimensionar os terraços e planejar a localização das faixas de vegetação permanente — tudo em ambiente de geoprocessamento, antes mesmo de ir ao campo.

Softwares de planejamento agrícola integram esses dados topográficos com análises de solo, histórico de erosão e modelos climáticos para produzir recomendações de manejo conservacionista espacialmente diferenciadas — indicando, para cada talhão, a combinação ótima de práticas conservacionistas em função do risco erosivo local.

Piloto Automático e Condução em Nível

A integração de sistemas de piloto automático com correção RTK às linhas-guia de plantio em nível importadas de MDT representa a convergência entre duas tecnologias que individualmente já transformaram a agricultura de precisão. O trator

guiado por RTK segue a curva de nível com precisão de 2 a 3 cm, eliminando os desvios causados pela fadiga do operador, pelas condições de visibilidade ou pela complexidade do terreno. O resultado é uma semeadura em nível de qualidade superior à que qualquer operador humano poderia alcançar de forma consistente ao longo de uma jornada de trabalho.

Essa tecnologia reduz também o tempo de planejamento de campo: em vez de marcar fisicamente as curvas de nível com estacas, o técnico converte os dados do MDT em linhas-guia no formato compatível com o monitor de piloto automático e transmite ao trator. O produtor pode iniciar a semeadura em nível com a precisão de um levantamento topográfico sem nenhuma estaca no campo.

**Monitoramento da Erosão
por Sensoriamento Remoto**

O monitoramento da erosão em escala de propriedade e de bacia hidrográfica foi enormemente facilitado pelo avanço das técnicas de sensoriamento remoto. Imagens de satélite de alta resolução temporal permitem detectar mudanças na reflectância do solo associadas à exposição dos horizontes subsuperficiais — um indicador indireto de erosão laminar avançada. A análise multitemporal dessas imagens permite identificar as áreas mais vulneráveis e monitorar a evolução do processo erosivo ao longo de múltiplas safras.

VANTs equipados com câmeras RGB ou multiespectrais podem realizar levantamentos de alta resolução espacial em escala de talhão, detectando sulcos de erosão nascentes, áreas com cobertura insuficiente e pontos de concentração de escoamento

— informações que orientam a manutenção das estruturas conservacionistas e o ajuste do plantio em nível antes que os danos se tornem severos.

Análise Econômica do Plantio em Nível

A adoção do plantio em nível é frequentemente avaliada sob a ótica dos custos adicionais — levantamento topográfico, marcação de curvas, redução da eficiência operacional — sem que os benefícios econômicos de longo prazo sejam adequadamente contabilizados. Uma análise completa precisa considerar ambos os lados da equação.

Os custos diretos de implantação do plantio em nível incluem o levantamento topográfico (estimado em R\$ 50 a R\$ 200 ha⁻¹ dependendo do método e da escala), a marcação das curvas de nível (R\$ 20 a R\$ 60 ha⁻¹ para marcação manual com nível em A, praticamente zero para sistemas com RTK) e a eventual construção de terraços (R\$ 300 a R\$ 800 ha⁻¹ dependendo da declividade e da extensão). Esses investimentos, amortizados ao longo de 10 a 20 anos de vida útil das estruturas, representam menos de R\$ 50 ha⁻¹ ano⁻¹.

Os benefícios econômicos incluem a redução de perdas de solo e nutrientes — estimada em equivalência de R\$ 80 a R\$ 200 ha⁻¹ ano⁻¹ em fertilizantes não exportados da lavoura — e os ganhos de produtividade associados à maior disponibilidade hídrica no perfil, estimados em 3 a 8% por safra em regiões com veranicos frequentes. Em uma lavoura de soja com produtividade de 60 sc ha⁻¹, esse ganho representa 2 a 5 sc ha⁻¹ adicionais — valor suficiente para amortizar integralmente o investimento em conservação em uma única safra.

Tabela 8.3. Tecnologias digitais aplicadas ao planejamento e à condução do plantio em nível e ao monitoramento da erosão.

Tecnologia	Aplicação no Plantio em Nível	Benefício Principal
GNSS / RTK	Condução automática das linhas de semeadura em curvas de nível	Precisão centimétrica; eliminação de erros do operador
VANT + fotogrametria	Levantamento topográfico de alta resolução para geração de MDT	Planejamento preciso sem marcação física em campo
LiDAR	MDT de ultra-alta precisão em áreas com vegetação densa	Deteção de microrelevo sob cobertura vegetal
Sensoriamento remoto orbital	Monitoramento temporal da erosão em escala de bacia	Deteção precoce de áreas degradadas
Softwares de planejamento agrícola	Dimensionamento de terraços, faixas vegetadas e linhas-guia	Otimização do sistema conservacionista por talhão

Retorno do Investimento

O plantio em nível não tem custo: tem investimento. A diferença é que o investimento retorna em fertilidade preservada, água conservada e produtividade sustentada ao longo de décadas. O custo real é o de não adotar a prática — pago em solo perdido, nutrientes exportados e produtividade em declínio.

Considerações Finais

O plantio em nível — semear cortando água — é uma das práticas agronômicas de maior impacto e menor custo disponíveis ao produtor brasileiro. Sua lógica é ao mesmo tempo simples e profunda: respeitar a topografia do terreno e trabalhar com a física da água em vez de contra ela. O sulco horizontal que intercepta o escoamento, retém a água e promove sua infiltração é uma solução elegante para um problema complexo — a erosão hídrica — que compromete a sustentabilidade de sistemas de produção em escala global.

A combinação do plantio em nível com o sistema plantio direto, com a manutenção de cobertura do solo, com o terraceamento adequado e com as tecnologias digitais de precisão forma um sistema conservacionista de alta eficiência que permite produzir em solos declivosos com mínimas perdas

— aproximando a agricultura de grãos do conceito de sustentabilidade edáfica real, onde a taxa de perda de solo não supera a taxa de sua formação.

O desafio que permanece é de escala e de cultura. A cobertura do plantio em nível nas áreas agrícolas brasileiras ainda é insuficiente, especialmente em regiões de colonização mais recente onde a pressão sobre os recursos naturais é mais intensa. A universalização dessa prática — por meio da educação agronômica, da assistência técnica qualificada, dos instrumentos de política agrícola e do reconhecimento econômico dos serviços ambientais — é uma tarefa que compete a toda a cadeia do agronegócio, do produtor ao consumidor final.

Semear cortando água é, no fim, uma escolha de civilização. É decidir que o solo que nos alimenta hoje vai continuar alimentando quem vier depois.

Mensagem Final

Cada curva de nível traçada no campo é uma linha do tempo: ela marca o presente e protege o futuro. O agricultor que semeia em nível não está apenas plantando uma safra — está plantando décadas de produtividade no mesmo solo.

Referências

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.
- DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A. J.; DUIKER, S. W.; REICOSKY, D. C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C. M.; WEISS, K. Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil & Tillage Research*, v. 137, p. 16–22, 2014.
- ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 243–252, 2001.
- FOSTER, G. R.; WISCHMEIER, W. H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 17, p. 305–309, 1974.
- HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 145–154, 1999.
- LANDERS, J. N. Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture: the Brazilian experience. Roma: FAO, 2007. 92 p. (Integrated Crop Management, v. 5).
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, v. 19, p. 189–196, 1992.
- PRUSKI, F. F. Conservação de Solo e Água: Práticas Mecânicas para o Controle da Erosão Hídrica. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009. 279 p.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, n. 27, p. 29–48, 2003.
- SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1811–1820, 2009.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook, 537).
- YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D.; ANDERSON, W. P. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 44, p. 168–173, 1989.

