

## Diagnóstico da qualidade do manejo e impacto de modelos de produção aprimorados sobre a fertilidade do solo nas regiões Norte e Noroeste do Paraná



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Soja  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

## **DOCUMENTOS 441**

# Diagnóstico da qualidade do manejo e impacto de modelos de produção aprimorados sobre a fertilidade do solo nas regiões Norte e Noroeste do Paraná

*Henrique Debiasi  
Julio Cezar Franchini  
Esmael Lopes dos Santos  
Smaylla El Kadri Ceccatto  
Alvadi Antônio Balbinot Junior  
Osmar Conte  
Emerson da Silva Nunes  
Rafael Herrig Furlanetto*

**Embrapa Soja**  
Londrina, PR  
2021

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Soja**  
Rod. Carlos João Strass, s/n  
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta  
CEP 86001-970  
Caixa Postal 231  
Londrina, PR  
Fone: (43) 3371 6000  
www.embrapa.br/soja  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Comitê Local de Publicações  
da Embrapa Soja**

Presidente  
*Alvadi Antonio Balbinot Junior*

Secretária-Executiva  
*Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite*

Membros  
*Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos Seixas, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Liliâne Márcia Mertz-Henning, Marco Antônio Nogueira, Mariangela Hungria da Cunha, Mônica Juliani Zavaglia Pereira e Norman Neumaier*

Supervisão editorial  
*Vanessa Fuzinato Dall'Agnol*

Normalização bibliográfica  
*Valéria de Fátima Cardoso*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica e capa  
*Vanessa Fuzinato Dall'Agnol*

**1ª edição**  
PDF digitalizado (2021).

**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)**

Embrapa Soja

---

Diagnóstico da qualidade do manejo e impacto de modelos de produção aprimorados sobre a fertilidade do solo nas regiões Norte e Noroeste do Paraná / Henrique Debiasi ... [et al.]. – Londrina : Embrapa Soja, 2021.

69 p. - (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 441).

1. Manejo do solo. 2. Diagnóstico pedológico. 3. Fertilidade do solo. I. Debiasi, Henrique. II. Franchini, Julio Cezar. III. Santos, Esmael Lopes dos. IV. Ceccatto, Smaylla El Kadri. V. Balbinot Junior, Alvadi Antônio. VI. Conte, Osmar. VII. Nunes, Emerson da Silva. VIII. Furlanetto, Rafael Herrig. IX. Série.

CDD: 631.8 (21. ed.)

## Autores

### **Henrique Debiasi**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

### **Julio Cezar Franchini**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

### **Esmael Lopes dos Santos**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor doutor do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz (FAG), Cascavel, PR.

### **Smaylla El Kadri Ceccatto**

Engenheira-agrônoma, mestre em Agronomia, doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR.

### **Alvadi Antônio Balbinot Junior**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

### **Osmar Conte**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

### **Emerson da Silva Nunes**

Engenheiro-agrônomo, Cocamar Cooperativa Agroindustrial, Maringá, PR.

### **Rafael Herrig Furlanetto**

Engenheiro-agrônomo, Cocamar Cooperativa Agroindustrial, Maringá, PR.

## Apresentação

A manutenção do protagonismo brasileiro no cenário do agronegócio mundial passa pelo desenvolvimento e adoção de tecnologias que aumentem a produtividade e a eficiência de uso dos insumos e dos recursos ambientais. Com isso, será possível atender a crescente demanda mundial por alimentos, com sustentabilidade ambiental, econômica e social. Entre essas tecnologias, aquelas relacionadas ao manejo e conservação do solo merecem atenção especial, tanto pelo seu papel na preservação da água e do ar, quanto por determinarem, em grande parte, o potencial produtivo das culturas e a sua resposta a estresses bióticos e abióticos, como as doenças radiculares e a seca.

O desenvolvimento de metodologias que permitam avaliar a qualidade do manejo nas glebas agrícolas é essencial para identificar fatores relacionados ao solo que limitam a sustentabilidade da produção agrícola em escala regional, balizando assim ações de transferência de tecnologia, políticas públicas e empresariais, bem como futuras pesquisas científicas. Adicionalmente, tais metodologias permitem quantificar o impacto de tecnologias desenvolvidas e validadas pela pesquisa, mostrando seus benefícios potenciais nas diferentes regiões produtoras, o que é de grande utilidade no fomento da adoção das mesmas por meio de ações de comunicação e transferência de tecnologias.

Nesse contexto, a presente publicação traz uma proposta de metodologia de diagnóstico da qualidade do manejo e de avaliação de impacto de tecnologias relacionados a esse tema, embasada em indicadores determinados nas glebas agrícolas e que, no seu conjunto, permite inferir em escala regional.

A abordagem desenvolvida neste estudo pode ser reproduzida por cooperativas, órgãos de assistência técnica e empresas para fazer uma análise ampla da qualidade do solo, identificando gargalos que dificultam o aumento da produtividade, da estabilidade de produção face à ocorrência de adversidades climáticas e da rentabilidade nas diferentes regiões em que atuam. A metodologia proposta foi validada em glebas agrícolas das regiões Norte e Noroeste do Paraná, Estado que se destaca como um dos maiores produtores de grãos brasileiro, o que somente foi possível em função da parceria com o Cocamar Cooperativa Agroindustrial.

A Embrapa Soja espera que as informações disponibilizadas nesta publicação contribuam para o aprimoramento do manejo do solo nos sistemas de produção em que a soja está inserida, visando a sustentabilidade da cultura e manutenção do protagonismo do agronegócio brasileiro.

*Alvadi Antonio Balbinot Junior*

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Embrapa Soja

## Sumário

Introdução.....	9
Metodologia .....	15
Caracterização do manejo e índice de qualidade participativo do plantio direto (IQP) .....	26
Intepretação dos indicadores de qualidade de manejo e fertilidade do solo .....	31
Avaliação do impacto de práticas de manejo sobre indicadores de fertilidade do solo, em áreas consolidadas de produção de grãos .....	49
Considerações finais .....	61
Referências .....	63



## Introdução

Nas últimas duas décadas, o Paraná se consolidou como uma potência no contexto agrícola brasileiro e mundial, sobretudo na produção de grãos. A produção de grãos do Estado saltou de 15,2 milhões de t na safra 1999/2000 para 36,7 milhões t na média das safras, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020 (Conab, 2021), o que representa um incremento médio de 140%. Dentre as culturas com maior crescimento nesse período, destacam-se a soja (7,1 para 18,7 milhões de t) e o milho (7,0 para 14,6 milhões de t), esta última impulsionada pelo aumento da produção na 2ª safra. O expressivo crescimento da produção de grãos no Estado pode ser atribuído ao incremento da área explorada e, principalmente, ao aumento da produtividade e à intensificação dos sistemas de produção, com a expansão do cultivo do milho na 2ª safra.

Parte considerável da produção de grãos do Paraná é proveniente de áreas localizadas no Norte e o Noroeste do Estado. Tomando como exemplo a safra 2019/2020, essas regiões foram responsáveis por aproximadamente 28%; 31% e 38% da produção estadual de soja, trigo e milho 2ª safra, respectivamente (Deral, 2021). Além disso, as regiões Norte e Noroeste comportam uma área de cerca de 520 mil hectares de cana-de-açúcar (Deral, 2021) e 2 milhões de hectares de pastagens (IBGE, 2021), parte da qual apresenta potencial para expansão da área de produção com grãos no Estado, sobretudo por meio da utilização da soja na reforma de canaviais e em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta.

As regiões Norte e Noroeste apresentam ampla variação de clima, tipo de solo e altitude, o que proporciona grande diversidade de ambientes e determina a composição dos sistemas de produção, o potencial produtivo das culturas e a estabilidade de produção ao longo do tempo. Conforme a Secretaria de Agricultura e do Abastecimento do Estado do PR (Seab, 2021), a região Noroeste compreende 61 municípios agrupados nas regionais de Cianorte, Umuarama e Paranaíba. Essa região é caracterizada por solos arenosos e franco-arenosos (Latosolos e Argissolos) (Bhering et al., 2007) formados a partir do Arenito Caiuá, com altitudes entre 230 e 540 m (IAT, 2021). Já o Norte do Estado engloba 122 municípios, distribuídos nos núcleos regionais de Apucarana, Cornélio Procopio, Ivaiporã, Jacarezinho, Londrina e Maringá. Na região predominam solos de origem basáltica, portanto, de textura argi-

losa a muito argilosa (Latossolos, Nitossolos e Cambissolos) (Bhering et al., 2007). Porém, parte da região apresenta solos de textura arenosa a média, incluindo solos derivados do Arenito Caiuiá (Latossolos e Argissolos). A altitude varia de aproximadamente 350 a 1100 m (IAT, 2021), o que proporciona grande variabilidade espacial de temperaturas mínimas, médias e máximas na região.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima das regiões Norte e Noroeste é do tipo subtropical úmido (Cfa) (Nitsche et al., 2019). Apesar de pertencerem à mesma classificação, as regiões apresentam diferenças marcantes de clima, ilustrada pela comparação de algumas variáveis climáticas entre os municípios de Umuarama (Noroeste) e Londrina (Norte) (Tabela 1). Os dados coletados na rede de estações meteorológicas do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - Iapar-Emater (IDR-Paraná, 2021a; 2021b) mostram que Umuarama e Londrina apresentam precipitação média anual similar, correspondente a 1670 e 1632 mm, respectivamente. Porém, a distribuição é diferente; nos meses de dezembro a março (verão), chove mais em Londrina (755 mm) do que em Umuarama (650 mm), enquanto que, no acumulado dos demais meses, ocorre o contrário (877 mm contra 1020 mm, respectivamente). Umuarama é mais quente do que Londrina ao longo de todo o ano, sendo a temperatura média anual 1° C mais elevada. Nos meses do verão, essa diferença é maior, de 1,2°C. Da mesma forma, a maior diferença ocorre na média das temperaturas mínimas, que é 1,7° C mais elevada em Umuarama.

Conforme o Atlas Climático do Estado do Paraná (Nitsche et al., 2019), as menores precipitações médias anuais e maiores temperaturas, tanto no Noroeste quanto no Norte, ocorrem nas regiões de menor altitude, próximas aos rios Paranapanema e Paraná. Nessas regiões, os valores médios de precipitação anual e temperatura média variam entre 1200 a 1400 mm e 23 a 24° C, respectivamente. Por outro lado, as regiões de maior altitude do Norte paranaense (acima de 700 m) apresentam menor temperatura média (18 a 21° C) e maior precipitação anual (1600 a 1800 mm).

**Tabela 1.** Valores médios mensais de precipitação pluviométrica e temperaturas máxima (Tmax), mínima (Tmin) e média (Tmed), nos municípios de Umuarama/PR e Londrina/PR.

Mês	Umuarama/PR				Londrina/PR			
	Tmax	Tmin	Tmed	P	Tmax	Tmin	Tmed	P
	°C			mm	°C			mm
Janeiro	30,8	21,2	25,2	180,1	29,5	19,7	23,9	223,9
Fevereiro	30,7	21,1	25,1	164,4	29,8	19,7	24,0	187,1
Março	30,4	20,5	24,7	125,5	29,6	18,9	23,5	137,6
Abril	28,5	18,4	22,7	120,2	28,0	16,8	21,7	108,0
Maio	24,9	15,5	19,4	152,2	24,4	13,7	18,4	116,6
Junho	23,7	14,2	18,2	111,8	23,1	12,1	17,0	94,5
Julho	24,2	13,9	18,2	76,0	23,6	11,7	17,0	71,3
Agosto	26,1	15,2	19,9	75,0	25,9	12,9	18,8	54,1
Setembro	27,0	16,5	21,1	130,7	26,9	14,7	20,3	115,1
Outubro	28,7	18,5	23,1	184,4	28,8	16,9	22,3	152,2
Novembro	29,8	19,5	24,1	169,2	29,4	18,0	23,2	165,6
Dezembro	30,5	20,6	24,9	180,2	29,5	19,2	23,8	205,8
Ano	27,9	17,9	22,2	1670	27,4	16,2	21,2	1632

Fonte: Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – Iapar - Emater (*IDR-Paraná, 2021a; 2021b*).

Contrastando com o crescimento expressivo da produção agrícola no Paraná, os elevados custos de produção e a volatilidade dos preços das *commodities* agrícolas têm aumentado o risco associado à atividade econômica, ameaçando assim a sustentabilidade do agronegócio. Além da racionalização dos custos de produção, este cenário exige do produtor a adoção de tecnologias que aumentem a produtividade e, acima de tudo, reduzam os impactos de estresses que causam instabilidade na produção ao longo do tempo.

Pesquisas têm demonstrado que a produtividade média das duas principais espécies graníferas cultivadas no Paraná (soja e milho 2ª safra) encontra-

se aquém do potencial genético (Nóia Junior; Sentelhas, 2019). Conforme Sentelhas et al. (2015), aproximadamente 85% da diferença entre a produtividade potencial e a observada deve-se ao não atendimento pleno das necessidades hídricas das plantas. Isso significa que, mesmo em safras consideradas “normais” do ponto vista climático, a produtividade das culturas de grãos no Paraná tem sido limitada pela ocorrência de déficit hídrico.

Além de limitar a produtividade potencial, a ocorrência de secas tem frequentemente levado a reduções drásticas na produtividade das culturas em relação à média das safras consideradas “normais”. Franchini et al. (2016) estimaram que a ocorrência de secas ocasionou perdas de 20,8 milhões de toneladas de grãos de soja em 16 safras (1999/2000 a 2014/2015). A aplicação desta metodologia aos dados de histórico de produção do milho 2ª safra, publicados pela Conab (2021), indicam perdas acumuladas, em função de seca no Estado do Paraná, de 13,1 milhões de t entre as safras de 1999/2000 e 2014/2015. As regiões Norte e, sobretudo, Noroeste do Estado, foram as que apresentaram as maiores perdas, com maior variabilidade temporal da produtividade. Isso decorre do predomínio de baixas altitudes, temperaturas médias mais altas, distribuição irregular de chuvas (Tabela 1) e, no caso específico da região noroeste (Arenito Caiuiá), de solos de textura média a arenosa.

Diante do exposto, fica evidente que o aumento da produtividade e da estabilidade de produção está associado, em grande parte, à adoção de tecnologias que aumentem a disponibilidade de água às plantas. Isso envolve a construção de um perfil de solo sem impedimentos físicos (compactação), químicos (acidez excessiva, com baixos teores de cálcio, fósforo e presença de alumínio tóxico) e/ou biológicos (nematoides e fungos fitopatogênicos) ao crescimento radicular, possibilitando assim um maior volume de solo explorado em busca de água, sobretudo nas camadas mais profundas. A melhoria da estrutura do solo, além de favorecer o crescimento radicular (Bertollo et al., 2021), proporciona maior taxa de infiltração e armazenamento de água disponível às plantas, bem como otimiza os fluxos de água, oxigênio e nutrientes do solo para as raízes (Moraes et al., 2016; 2018).

Tanto o crescimento das raízes quanto os fluxos e o armazenamento de água disponível são beneficiados pela cobertura do solo com palha. Em clima tro-

pical, a temperatura máxima das camadas superficiais do solo sem cobertura pode chegar a mais de 50 °C, o que paralisa o crescimento e o funcionamento das raízes, principalmente nos estádios iniciais da cultura. Em trabalho realizado sob condições controladas em casa-de-vegetação, Pushkala e Yagarajarao (1988) encontraram que o máximo crescimento radicular e área foliar de plantas de soja aos 40 dias após a semeadura ocorreu com temperatura média do solo de 28 °C. O aumento para 34 °C reduziu em cerca de 40% tanto o crescimento radicular quanto a área foliar das plantas. Adicionalmente, a cobertura com palha reduz as perdas de água por evaporação até o fechamento das entrelinhas da cultura, aumentando a disponibilidade hídrica às plantas em até 40% durante esse período (Andrade, 2008).

Em conjunto com a adoção de práticas mecânicas de controle da enxurrada, como o terraceamento e o cultivo em nível, o aumento da taxa de infiltração de água e a cobertura do solo desempenham papel-chave na conservação do solo, minimizando os processos erosivos. Ressalta-se que a frequência de ocorrência e a magnitude das perdas de água e solo por erosão hídrica têm aumentado nos últimos cinco anos em todo o Estado (Franchini et al., 2018). Além de resultar em impactos negativos sobre o ambiente, como a poluição de águas superficiais (Lipiec et al., 2003), a perda da camada mais fértil do solo por erosão diminui a produtividade das culturas (Gaertner et al., 2003) e, considerando apenas a reposição dos nutrientes perdidos, representa prejuízos financeiros de até US\$ 108 ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Dechen et al., 2015).

Alguns problemas fitossanitários também têm se intensificado no Paraná nas últimas safras, entre os quais se destacam o aumento da infestação de plantas daninhas de difícil controle, como a buva (*Conyza* spp.) e o capim-amargoso (*Digitaria insularis*), bem como da ocorrência e dos danos de doenças radiculares ocasionadas por nematoides e fungos. Tais problemas têm resultado em perdas de produtividade, aumento dos custos de produção e do impacto ambiental associado às aplicações de agrotóxicos. Para exemplificar, a competição com plantas daninhas pode ocasionar reduções de até 40% na produtividade da soja (Gazziero et al., 2012a), enquanto que, para doenças radiculares ocasionadas por nematoides, as perdas médias podem chegar a 50% (Franchini et al., 2014). Trabalhos de pesquisa demonstram que a melhoria da fertilidade física, química e biológica do solo, associada à cobertura permanente com palha, aumentam a habilidade competitiva das

culturas em relação às plantas daninhas (Rizzardi et al., 2001) e reduzem os danos ocasionados por doenças radiculares (Torres et al., 2010; Franchini et al., 2014). Adicionalmente, reduções na infestação de plantas daninhas resistentes variando de 35 a 99% têm sido atribuídas ao aumento da cobertura do solo (Gazziero et al., 2012b; Lamego et al., 2013).

Desse modo, a melhoria da fertilidade integral do solo (física, química e biológica), a cobertura permanente e a adoção de outras práticas conservacionistas, como o terraceamento e o cultivo em nível, são aspectos essenciais para aumentar a produtividade e a estabilidade de produção, reduzindo os impactos ambientais decorrentes das atividades agrícolas e racionalizando os custos. Para fins de estruturação de projetos de pesquisa, de estratégias de transferência de tecnologia e até mesmo de políticas públicas nesta linha, é muito importante conhecer a qualidade do manejo e a fertilidade integral do solo em escala regional, por meio da determinação de indicadores e da identificação das práticas utilizadas em glebas agrícolas sob diferentes manejos e condições de clima e solo. Ao longo do tempo, essas informações podem ser sistematizadas em uma base de dados georreferenciada, permitindo mapear as potencialidades e limitações de cada região. Salienta-se que a realização de eventos de transferência de tecnologia para produtores, com conteúdo embasado na comparação de indicadores de fertilidade do solo e de qualidade de manejo entre glebas com diferentes níveis tecnológicos, localizadas na mesma região do público-alvo, mostra-se uma ferramenta com alta eficiência na sensibilização dos participantes em relação à importância da adoção de práticas de manejo que melhorem e preservem a fertilidade do solo.

Assim, os objetivos deste trabalho foram: 1) diagnosticar a qualidade do manejo e a fertilidade do solo (indicadores físicos e químicos) em glebas agrícolas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, buscando identificar fatores relacionados ao solo que limitam a produtividade, a estabilidade de produção e a lucratividade; 2) desenvolver e propor nova metodologia técnico-científica para avaliação da fertilidade do solo em escala de gleba agrícola; e 3) avaliar o impacto de modelos de produção aprimorados, com maior diversidade de espécies vegetais e aporte de palha e raízes, sobre a fertilidade do solo em glebas agrícolas das regiões Norte e Noroeste do Paraná, utilizando a metodologia aqui desenvolvida.

## Metodologia

Foram selecionadas 24 áreas agrícolas pertencentes a 11 municípios das regiões Norte e Noroeste do Paraná (Figura 1), agrupadas em quatro sub-regiões definidas tendo como base a localização geográfica, a altitude e o material de origem e textura do solo (Tabelas 2 e 3), características que determinam, em grande parte, os sistemas de produção adotados e o potencial de produtividade: (1) Noroeste arenito: seis áreas nos municípios de Ângulo, Floraí, Iporã, Cafezal do Sul e Jussara, com altitude < 500 m e solos de textura franco-arenosa; (2) Noroeste basalto: seis áreas nos municípios de Floraí, Jussara, Mandaguaçu e São Jorge do Ivaí, com altitude < 600 m e solos de textura argilosa; (3) Norte baixo: seis áreas localizadas em Primeiro de Maio e Sertanópolis, com altitude < 500 m e solos de textura muito argilosa; e (4) Norte alto: seis áreas nos municípios de São Sebastião da Amoreira e Santa Cecília do Pavão, com altitude > 650 m e solos muito argilosos. Das 24 áreas amostradas, 22 vem sendo utilizadas para produção de grãos há mais de 15 anos (áreas consolidadas, Tabela 2), enquanto que duas foram convertidas de pastagem degradada ou cana-de-açúcar para produção de grãos recentemente, há menos de quatro anos (áreas de expansão, Tabela 2).

A seleção das 22 áreas consolidadas foi planejada de modo a incluir glebas sob plantio direto (PD) com diferentes modelos de produção (Tabela 2), variáveis em termos de diversidade de espécies vegetais e potencial de aporte de palha e raízes. Neste contexto, o termo “modelo de produção” compreende o arranjo temporal e espacial das espécies vegetais e/ou animais que compõem os sistemas agrícolas (Denardin; Kochhann, 2006).



**Figura 1.** Localização das áreas agrícolas amostradas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná.

**Tabela 2.** Localização e caracterização dos modelos de produção (últimas três safras) utilizados nas 24 áreas agrícolas avaliadas no Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

Área (A)	Município	Sequência de culturas <sup>(1)</sup>		Histórico <sup>(3)</sup>	Modelo de produção
		Inverno <sup>(2)</sup>	Verão		
<i>Noroeste Arenito</i>					
A1	Ângulo	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A2	Floraí	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A3	Iporã	Ruz	Soja	Consolidada	Aprimorado
A4	Iporã	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A5	Cafezal do Sul	Pasto degradado	Soja	Expansão	-
A6	Jussara	Milho (16/17 e 17/18) Milho + Ruz (18/19)	Soja	Consolidada	Aprimorado

Continua...

**Tabela 2.** Continuação.

Noroeste Basalto					
A7	Floraí	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A8	Floraí	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A9	Floraí	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A10	Jussara	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A11	Mandaguaçu	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A12	São Jorge do Ivaí	Milho (16/17) Milho + Ruz (17/18) Aveia preta (18/19)	Soja	Consolidada	Aprimorado
Norte Baixo					
A13	Primeiro de Maio	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A14	Primeiro de Maio	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A15	Primeiro de Maio	Milho (16/17) Milho + Ruz (17/18 e 18/19)	Soja	Consolidada	Aprimorado
A16	Sertanópolis	Milho (16/17 e 17/18) Milho/Milheto (18/19)	Soja	Consolidada	Aprimorado
A17	Sertanópolis	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
A18	Sertanópolis	Milho	Soja	Consolidada	Padrão
Norte Alto					
A19	Santa Cecília Pavão	Trigo	Soja	Consolidada	Padrão
A20	Santa Cecília Pavão	Trigo	Soja	Consolidada	Padrão
A21	Santa Cecília Pavão	Trigo	Soja	Consolidada	Padrão
A22	São Sebastião da Amoreira	Cana (15/16) Milho + Ruz (16/17 a 18/19)	Soja	Expansão	-
A23	São Sebastião da Amoreira	Trigo	Soja	Consolidada	Padrão
A24	São Sebastião da Amoreira	Milho (16/17) Milho + Ruz (17/18 e 18/19)	Soja	Consolidada	Aprimorado

(1) Refere-se à sequência de culturas nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019, com exceção da área (A) 22, que incluiu a safra 2015/2016, para explicar sua caracterização como área de expansão. Entre parêntesis, são indicadas as safras de cultivo da(s) espécie(s) componentes do modelo produção. A ausência de parêntesis indica o cultivo da(s) espécie(s) em todas as três safras avaliadas. (2) Ruz = braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*); (3) Consolidada: área sob produção de grãos há mais de 15 anos; Expansão: área convertida para produção de grãos há quatro ou menos anos.

**Tabela 3.** Classe textural, declividade média e teores de areia, silte e argila na camada de 0-20 cm de profundidade, em 24 áreas agrícolas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

Área (A)	Areia	Silte	Argila	Declividade	Classe textural
	%			m m <sup>-1</sup>	
A1	69	4	27	0,07	Franco-argilo-arenosa
A2	80	2	18	0,02	Areia franca
A3	90	2	8	0,09	Areia
A4	78	4	18	0,07	Areia franca
A5	85	2	13	0,07	Areia franca
A6	76	5	20	0,03	Franco-arenoso
A7	47	10	43	0,07	Argila
A8	38	8	54	0,04	Argila
A9	23	27	50	0,04	Argila
A10	25	18	57	0,05	Argila
A11	26	14	60	0,05	Argila
A12	31	19	50	0,07	Argila
A13	14	9	74	0,07	Muito argilosa
A14	16	12	72	0,05	Muito argilosa
A15	15	13	72	0,05	Muito argilosa
A16	15	14	71	0,05	Muito argilosa
A17	18	14	68	0,05	Muito argilosa
A18	18	12	70	0,07	Muito argilosa
A19	12	16	72	0,08	Muito argilosa
A20	18	19	63	0,14	Muito argilosa
A21	15	18	67	0,05	Muito argilosa
A22	8	14	78	0,05	Muito argilosa
A23	12	11	77	0,04	Muito argilosa
A24	7	13	80	0,02	Muito argilosa

Para possibilitar as análises e comparações, as áreas consolidadas foram classificadas em dois grupos (Tabela 2), conforme o modelo de produção adotado nas últimas três safras que antecederam à amostragem (2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019):

**(1) Padrão:** modelos de produção caracterizados pelas sucessões milho 2<sup>a</sup> safra/soja e trigo/soja, sem cultivo de espécies vegetais para cobertura do solo.

**(2) Aprimorado:** modelos de produção com maior diversidade de espécies vegetais e/ou maior potencial de produção e persistência de palha e raízes. Salienta-se que a principal espécie de cobertura utilizada nos modelos aprimorados envolvidos neste trabalho foi a braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*), solteira ou consorciada com o milho 2<sup>a</sup> safra (Tabela 2).

A caracterização das glebas e das práticas de manejo utilizadas foi realizada por meio da aplicação de questionário ao produtor ou ao responsável técnico da gleba, associada à observação *in loco* das características da área pela equipe de campo. O questionário englobou, de forma resumida, os seguintes pontos:

- a) Município, coordenadas geográficas, altitude e área cultivada.
- b) Tempo de utilização do PD.
- c) Presença ou não de terraços na área.
- d) Existência ou não de sinais de erosão (escoamento superficial de água, arraste de palha, sulcos e/ou acúmulo de terra) e gleba na qual o problema se origina (gleba avaliada, glebas em cota superior ou estrada).
- e) Presença ou não de compactação do solo; em caso positivo, localização do problema na gleba (área total ou de manobras – “cabeceiras”).
- f) Realização ou não das operações de pulverização e/ou semeadura em nível.
- g) Frequência de transbordamentos de água nos terraços.
- h) Realização ou não de preparo do solo nos últimos três anos; em caso positivo, identificação do implemento utilizado e abrangência da operação (área total, canal dos terraços ou área de manobras – “cabeceiras”).
- i) Utilização de adubação orgânica e critérios técnicos para definição das doses aplicadas (balanço de nutrientes e análise química do solo).

- j) Realização ou não de análises químicas de solo.
- k) Espécies vegetais cultivadas nas três safras que antecederam a avaliação, seu arranjo espaço-temporal, e épocas aproximadas de semeadura e colheita ou manejo.

Com base nas respostas ao questionário e na observação das glebas *in loco*, foi determinado o índice de qualidade participativo do plantio direto (IQP), proposto originalmente por Roloff et al. (2011), e atualizado em sua 2ª versão (IQP2) por Grupo de Trabalho constituído por diversas instituições e liderado pela Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto (FEBRAPDP). O IQP2 é expresso por um valor variável de 0 a 10, calculado pela soma da pontuação (0 a 1) atribuída a oito indicadores de acordo com critérios específicos (Tabela 4), multiplicada por um fator de ponderação (1 ou 1,5) que reflete a importância de cada indicador, conforme equação (1). Quanto maior o valor obtido, melhor é a qualidade do manejo do solo no PD. Maiores detalhes sobre o IQP2 podem ser obtidos em Martins et al. (2018).

$$IQP2 = [1,5 \times (IR + DR + PR + FP)] + [1,0 \times (TE + AC + FE + TA)] \quad (1)$$

em que:

- IR, DR, PR, FP, TE, AC, FE e TA representam os indicadores descritos na Tabela 4, que podem assumir valores entre 0 e 1;
- Os valores “1,5” e “1,0” referem-se aos fatores de ponderação, que representam a importância relativa de cada grupo de indicadores.

As avaliações e amostragens referentes à qualidade do manejo e da fertilidade química e física do solo foram realizadas durante os meses de outubro e novembro de 2018, quando a soja se encontrava no início do subperíodo vegetativo (estádios V3 a V5). Os pontos amostrais foram georreferenciados e sua distribuição dentro das glebas foi feita de modo que todos ficassem aproximadamente na mesma cota e equidistantes ao longo de toda a largura da gleba, excluindo-se regiões não representativas da área, como bordaduras, terraços e locais de manobras e/ou concentração de tráfego de máquinas agrícolas.

**Tabela 4.** Descrição e metodologia de cálculo dos indicadores utilizados para a determinação do índice de qualidade participativo do plantio direto versão 2 (IQP2).

Indicador	Dados de entrada	Critérios e Fórmulas	Valores críticos <sup>(1)</sup>
Intensidade da rotação (IR)	NM = número de meses com cobertura viva (exceto pousio e plantas espontâneas) em 36 meses (3 anos)	$IR = NM/36$	NM = 27 meses IR = 0,75
Diversidade da rotação (DR)	FD = número famílias botânicas diferentes utilizadas na rotação	$DR = FD/3$	FD = 2 famílias DR = 0,67
Persistência da palhada (PR)	GR = número de gramíneas utilizadas em 3 anos na rotação <sup>(2)</sup>	$PR = GR/6$	GR = 3 gramíneas PR = 0,5
Frequência de preparo do solo (FP)	IEP = intervalo entre operações de preparo do solo (anos)	<b>Preparo em área total</b> IEP 0 a 2 anos: FP = 0 IEP 3 a 6 anos: FP = 0,25 IEP 7 a 8 anos: FP = 0,50 IEP 9 a 11 anos: FP = 0,75 IEP ≥ 12 anos: FP = 1,0 <b>Preparo somente nas cabeceiras</b> FP = 0,8	IEP = 7 anos FP = 0,5
Terraceamento (TE)	Presença de terraços  Frequência de transbordamentos em 5 anos (FT)	<b>Sem terraços</b> TE = 0 <b>Com terraços</b> FT 0 a 1 vezes: TE = 1 FT 2 a 3 vezes: TE = 0,5 FT > 3 vezes: TE = 0	TE = 0,5
Conservação do solo (CS)	Operações em nível  Solo compactado  Sinais visíveis de erosão	<b>Operações em nível:</b> Não: ICi <sup>(3)</sup> = 0 Pulverização: ICi = 0,3 Semeadura: ICi = 0,7 <b>Solo compactado:</b> Não: ICi = 2 Cabeceiras: ICi = 1,0 Área total: ICi = 0 <b>Sinais visíveis de erosão:</b> Sim: ICi = 0 Não: ICi = 1,0  $AC = (\sum ICi)/4$	CS = 0,5

Continua...

Tabela 4. Continuação...

Indicador	Dados de entrada	Crítérios e Fórmulas	Valores críticos <sup>(1)</sup>
Fertilização equilibrada (FE)	- Realização e critérios para adubação orgânica; - Análise química de solo para calagem e adubação	<b>Adubação orgânica:</b> Não: IFi <sup>(4)</sup> = 0 Sim, com base em balanço de nutrientes: IFi = 1,0 Sim, aplicação em dose controlada: IFi=0,5 Sim, sem controle algum de dose: IFi = 0 <b>Análise química de solo</b> Não: IFi = 0 Calagem: IFi =0,5 Adubação: IFi =0,5 Calagem + adubação: IFi = 1,0 <b>Com adubação orgânica<sup>(5)</sup></b> FE = $(\sum IFi)/2$ <b>Sem adubação orgânica</b> FE = $(\sum IFi)$	FE = 0,5
Tempo de adoção do sistema (TA)	T = tempo de adoção do sistema plantio direto (anos)	TA = T/25	T = 7 anos TA = 0,3

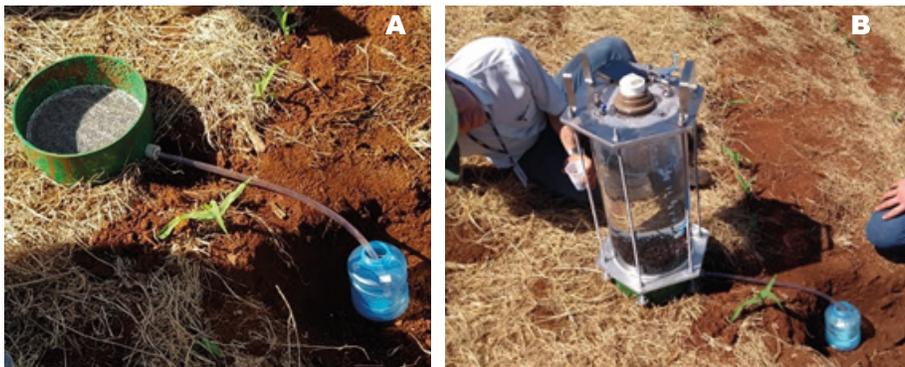
<sup>(1)</sup> O valor máximo de cada indicador é 1, mesmo que o valor obtido de acordo com as fórmulas seja numericamente maior. <sup>(2)</sup> Exceto gramíneas para fenação ou silagem. Para consórcios, considera-se o número total de gramíneas utilizadas (por exemplo, no consórcio milho + braquiária, GR = 2). <sup>(3)</sup> ICi = indicador de conservação i. <sup>(4)</sup> IFi = indicador fertilização i <sup>(5)</sup> A utilização de fórmulas para áreas que utilizam e não utilizam adubação orgânica foi realizada para não penalizar injustamente aquelas que não utilizam este tipo de fertilizante. Assim, em áreas que utilizam somente adubação química, o valor do indicador leva em consideração apenas a realização de análises químicas para calagem e adubação.

Para avaliação da fertilidade física do solo, os indicadores utilizados foram o índice de qualidade estrutural do solo (IQES), determinado por meio do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo - DRES (Ralisch et al., 2017), e a taxa de infiltração estável de água no solo (TIE), com o uso do infiltrômetro de aspersão modelo Cornell (Ogden et al., 1997) modificado por Seratto et al. (2019) (Figura 2), ajustado para simular uma chuva de aproximadamente 300 mm h<sup>-1</sup>. Esses indicadores foram quantificados em oito pontos por área. Em quatro desses oito pontos, foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 cm por meio de trado holandês, cada uma composta por cinco subamostras, para análises granulométricas (teores de areia, silte e argila total) e dos teores argila dispersa em água (Teixeira et al., 2017). A partir dos teores (%) de argila total (AT) e dispersa em água (ADA), foi obtido o grau de floculação (GF, %) das argilas, por meio da equação (2).

$$GF = \left( \frac{AT - ADA}{AT} \right) \times 100 \quad (2)$$

Com as mesmas amostras de solo utilizadas para as análises granulométricas, foram quantificados os seguintes indicadores químicos de fertilidade: pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M; acidez potencial (H+Al); teores de matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ); capacidade de troca de cátions (CTC); e saturação por bases (V%) (Teixeira et al., 2017).

A cobertura do solo com palha foi determinada em quatro pontos por área, coincidentes com os utilizados na coleta de amostras de solo para análises granulométricas e químicas. Em cada ponto, a superfície do solo delimitada por uma armação metálica de 0,5 m de lado ( $0,25 \text{ m}^2$  de área) foi primeiramente fotografada com câmera digital e, em seguida, a cobertura vegetal morta contida no interior da armação foi coletada e acondicionada em sacos de papel. As imagens digitais foram processadas por meio do software Siscob (Jorge; Silva, 2009), determinando-se assim a porcentagem de cobertura do solo com palha. Já as amostras de palha foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a  $65^\circ \text{ C}$  por 72 h e pesadas, sendo os valores convertidos em t/ha.



**Figura 2.** Infiltrômetro de aspersão modelo de Cornell, aperfeiçoado por Seratto et al. (2019): (A) Detalhe da base (inserida 7,5 cm no solo) sobre a qual o infiltrômetro (B) é disposto, com a mangueira que conduz a água que não infiltra até o recipiente onde a mesma é armazenada até medição do volume em proveta graduada.

A fim de viabilizar o diagnóstico da qualidade do manejo e da fertilidade química e física do solo, bem como avaliações de impacto do uso de tecnologias indicadas pela pesquisa sobre esses aspectos em escala regional e de gleba agrícola, uma nova metodologia técnico-científica para análise conjunta de indicadores foi desenvolvida. Para isso, foram selecionados nove indicadores de qualidade do manejo e fertilidade do solo, utilizando as seguintes premissas: fácil execução a campo por baixo custo; capacidade de representar processos físicos e químicos importantes que ocorrem no solo; e alta sensibilidade às práticas de manejo adotadas.

Os indicadores selecionados foram então enquadrados em cinco classes de interpretação (muito bom, bom, regular, ruim e muito ruim), conforme critérios indicados na Tabela 5. À exceção do IQP, a interpretação de todos os demais indicadores constantes da Tabela 5 foi expressa conjuntamente por área agrícola avaliada, por meio da construção de gráficos do tipo “radar”, com o uso do programa Microsoft Excel®. Para elaborar esse tipo de gráfico, os indicadores envolvidos foram padronizados em um índice, variável de -2 a 3. Essa padronização foi realizada atribuindo-se números variáveis entre -2 e 3 para os limites inferior e superior de cada atributo em cada classe de interpretação (Tabela 5). Com base nessa Tabela, o índice padronizado ( $ID_p$ ) de cada indicador foi calculado pela equação (3).

**Tabela 5.** Limites inferiores e superiores das classes de interpretação estabelecidas para os principais indicadores de qualidade do manejo e fertilidade solo, em função do teor de argila na camada de 0-20 cm.

Classe de interpretação	Índice (ID)	V <sup>(1)</sup> %	MOS <sup>(1)</sup> g kg <sup>-1</sup>	P <sup>(1)</sup> mg dm <sup>-3</sup>	K <sup>(1)</sup> cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Cobertura morta <sup>(2)</sup>		TIE <sup>(2)</sup> mm/h	IQES <sup>(3)</sup>	GF % <sup>(4)</sup>	IQP2 <sup>(5)</sup>
						t/ha	%				
Argila < 40%											
Muito Ruim	- 2,00	Mín. <sup>(6)</sup>	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.
	- 1,01	30	10,0	6,0	0,05	1,9	35	19,9	1,9	20	5,0
Ruim	- 1,00	31	10,1	6,1	0,06	2,0	36	20,0	2,0	21	5,1
	- 0,01	40	15,0	12,0	0,10	3,9	50	39,9	2,9	40	6,0
Regular	0,00	41	15,1	12,1	0,11	4,0	51	40,0	3,0	41	6,1
	0,99	50	20,0	18,0	0,15	5,9	65	59,9	3,9	60	8,0
Bom	1,00	51	20,1	18,1	0,16	6,0	66	60,0	4,0	61	8,1
	1,99	60	30,0	24,0	0,20	7,9	80	79,9	4,9	80	9,0
Muito Bom	2,00	61	30,1	24,1	0,21	8,0	81	80,0	5,0	81	9,1
	3,00	Máx. <sup>(1)</sup>	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	100	Máx.	6,0	Máx.	10
Argila > 40%											
Muito Ruim	- 2,00	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.	Mín.
	- 1,01	40	20	3,0	0,10	1,9	35	19,9	1,9	20	5,0
Ruim	- 1,00	41	21	3,1	0,11	2,0	36	20,0	2,0	21	5,1
	- 0,01	50	28	6,0	0,15	3,9	50	39,9	2,9	40	6,0
Regular	0,00	51	34	6,1	0,16	4,0	51	40,0	3,0	41	6,1
	0,99	60	35	9,0	0,25	5,9	65	59,9	3,9	60	8,0
Bom	1,00	61	36	9,1	0,26	6,0	66	60,0	4,0	61	8,1
	1,99	70	42	12,0	0,35	7,9	80	79,9	4,9	80	9,0
Muito Bom	2,00	71	43	12,1	0,36	8,0	81	80,0	5,0	81	9,1
	3,00	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	100	Máx.	6,0	Máx.	10

<sup>(1)</sup> Critérios (limites inferior e superior) estabelecidos com base em Oliveira Junior et al. (2020), com algumas adaptações em função da amplitude de variação dos dados encontrados neste estudo; <sup>(2)</sup> Os critérios de interpretação para a cobertura do solo (t/ha e %) e a taxa de infiltração estável de água no solo (TIE) foram definidos com base na variação dos dados obtida neste estudo e, em seguida, validados pela comparação com resultados disponíveis na literatura; <sup>(3)</sup> IQES = índice de qualidade estrutural do solo, obtido a partir do diagnóstico rápido da estrutura do solo – DRES, cujos critérios para enquadramento nas classes de interpretação correspondem aos indicados por Ralisch et al. (2017); <sup>(4)</sup> GF = grau de flocculação das argilas, com critérios de interpretação estabelecidos em consonância com resultados obtidos por Melo (2019), adaptados à variabilidade dos dados encontrada no presente estudo; <sup>(5)</sup> IQP2 = índice de qualidade participativo do plantio direto (Roloff et al., 2011), atualizado em sua 2ª versão por Grupo de Trabalho constituído por diversas instituições e liderado pela Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto (FEBRAPDP). Os limites inferiores e superiores de cada classe de interpretação para o IQP2 foram adaptados a partir dos propostos por Roloff et al. (2011); <sup>(6)</sup> Valores médios mínimos (Mín.) e máximos (Máx.) do indicador entre todas as áreas avaliadas. Médias obtidas por área.

$$ID_p = (V_m - V_i) \times \left( \frac{ID_s - ID_i}{V_s - V_i} \right) \quad (3)$$

Em que:

- $ID_p$  = índice padronizado do indicador, variável entre -2 e 3.
- $V_m$  = valor médio não padronizado do indicador, obtido na gleba avaliada (Tabela 5).
- $V_i$  = valor referente ao limite inferior da classe de interpretação em que  $V_m$  se enquadra (Tabela 5).
- $V_s$  = valor referente ao limite superior da classe de interpretação em que  $V_m$  se enquadra (Tabela 5).
- $ID_i$  = índice referente ao limite inferior da classe de interpretação em que  $V_m$  se enquadra, correspondente a um número inteiro entre -2 e 3 (Tabela 5).
- $ID_s$  = índice referente ao limite superior da classe de interpretação em que  $V_m$  se enquadra, correspondente a um número inteiro entre -2 e 3 (Tabela 5).

Os dados foram primeiramente submetidos à análise estatística descritiva. Para comparação entre as médias de dois grupos de áreas (por exemplo, modelos padrão x modelos aprimorados), foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney (teste U), a 5% de probabilidade de erro. Quando a comparação envolveu três ou mais grupos de áreas, as médias foram comparadas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, a 5% de probabilidade de erro.

## Caracterização do manejo e índice de qualidade participativo do plantio direto (IQP)

A caracterização das práticas de manejo do solo adotadas nas áreas agrícolas avaliadas na safra 2018/2019 é apresentada na Tabela 6. Embora o PD seja adotado em 100% das 24 áreas que participaram do diagnóstico, em 11 (45,8%) houve pelo menos um preparo do solo em três safras anteriores ao estudo, com uso de escarificadores e/ou grades. A maior parte das áreas com histórico recente de preparo do solo está localizada nas regiões

Noroeste Basalto e Norte Baixo. Nessas regiões, 8 das 12 áreas (67%) foram submetidas a preparos do solo nas safras 2016/17, 2017/18 e 2018/19. A utilização de operações de preparo do solo sem critérios técnicos impõe sérios riscos à sustentabilidade dos sistemas de produção, relacionados à intensificação das perdas de água e solo por erosão (Dechen et al., 2015), bem como à redução da produtividade das culturas especialmente em anos secos (Franchini et al., 2012; Bertollo et al., 2021). Esses riscos, por sua vez, estão associados à eliminação da cobertura do solo, às perdas de MOS e a degradação da estrutura do solo, induzidas pelo preparo.

**Tabela 6.** Caracterização das áreas agrícolas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná (safra 2018/2019), quanto ao preparo do solo e a aspectos relacionados à conservação do solo.

Área (A)	Preparo do solo <sup>(1)</sup>	Terraceamento		Operações em nível		Sinais de erosão
		Presença	Falhas <sup>(2)</sup>	Semeadura	Cultivo	
A1	Não	Sim	> 3	Sim	Não	Sim
A2	Não	Sim	1	Sim	Sim	Não
A3	Não	Sim	0	Sim	Não	Não
A4	Gradagem	Sim	2	Sim	Não	Sim
A5	Não	Sim	0	Sim	Não	Não
A6	Não	Sim	1	Sim	Não	Não
A7	Gradagem	Sim	> 3	Sim	Não	Sim
A8	Gradagem	Sim	0	Sim	Não	Não
A9	Não	Sim	0	Sim	Não	Não
A10	Não	Sim	1	Sim	Não	Não
A11	Não	Sim	0	Sim	Não	Sim
A12	Gradagem	Sim	0	Sim	Não	Não
A13	Escarificação	Sim	0	Sim	Não	Não
A14	Escarificação	Sim	0	Sim	Não	Não
A15	Não	Sim	0	Sim	Não	Não

Continua...

**Tabela 6.** Continuação.

Área (A)	Preparo do solo <sup>(1)</sup>	Terraceamento		Operações em nível		Sinais de erosão
		Presença	Falhas <sup>(2)</sup>	Semeadura	Cultivo	
A16	Gradagem	Sim	3	Sim	Não	Não
A17	Gradagem	Sim	2	Sim	Não	Não
A18	Gradagem	Sim	1	Sim	Sim	Sim
A19	Gradagem	Não	-	Não	Não	Não
A20	Não	Não	-	Não	Não	Não
A21	Gradagem	Não	-	Não	Não	Sim
A22	Não	Não	-	Não	Não	Não
A23	Não	Não	-	Não	Não	Não
A24	Não	Não	-	Não	Não	Não

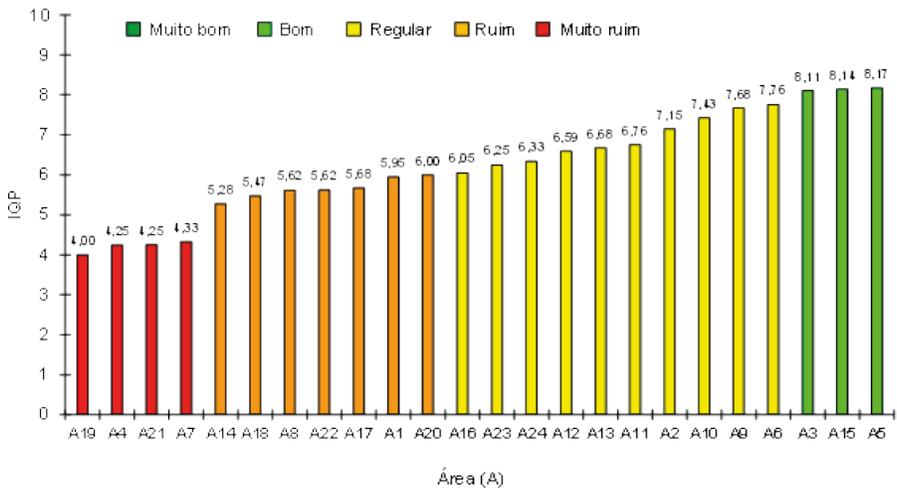
<sup>(1)</sup> Relativo às safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019. <sup>(2)</sup> Número de transbordamentos relatados em cinco safras (2014/2015, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019).

Considerando a ocorrência frequente de chuvas de alta intensidade nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, o uso de práticas de controle mecânico da erosão, com destaque para o terraceamento e a realização das operações de semeadura e cultivo em nível, é imprescindível mesmo em áreas sob PD. Nesse sentido, observa-se que todas as áreas avaliadas nas regiões Noroeste Arenito, Noroeste Basalto e Norte Baixo são terraceadas, com a semeadura sendo realizada em nível (Tabela 6). Em contrapartida, 100% das áreas monitoradas na região Norte Alto não apresentam terraços e, em consequência, a semeadura não é realizada em nível em nenhum caso avaliado. A pulverização e outras operações de cultivo são conduzidas em nível em apenas duas das 24 áreas avaliadas, considerando o conjunto das quatro regiões abrangidas pelo diagnóstico.

Das 18 áreas com terraços, 9 (50%) apresentaram pelo menos uma falha (transbordamento) em 3 safras. Dessas 9 áreas, 8 (90%) foram submetidas a gradagens e/ou adotam modelos de produção padrão. Tal constatação é coerente com a menor taxa de infiltração estável de água e cobertura do solo nas áreas preparadas com grade e/ou que utilizam modelos de produção padrão, o que implica aumento no volume de água escoado na superfície do solo a ponto de ultrapassar a capacidade de armazenamento dos canais dos terraços em caso de chuvas intensas. A falta de manutenção periódica dos terraços, a fim de manter a sua capacidade de contenção da enxurrada, é outro fator associado à ocorrência de transbordamentos.

A presença de sinais visíveis de erosão (sulcos, arraste de palha e acúmulo de solo nos canais dos terraços) é um indicador de maior gravidade dos problemas de conservação do solo (Tabela 6). Nesse sentido, sinais de erosão foram verificados em seis das 24 áreas avaliadas (25%). Todos os casos que apresentaram sinais visíveis de erosão referem-se a áreas submetidas a pelo menos uma gradagem em três safras e que utilizam modelos de produção padrão, o que novamente pode ser explicado pelos efeitos negativos dessas práticas na infiltração de água e na cobertura do solo.

Os valores do IQP2 calculados para as áreas monitoradas, e seu enquadramento nas classes de interpretação definidas neste trabalho (Tabela 5), são mostrados na Figura 3. Apenas 3 das 24 áreas (12,5%) avaliadas apresentaram IQP2 superior a 8, sendo assim enquadradas na classe “bom”. Por outro lado, o IQP2 foi classificado como “ruim” ou “muito ruim” em 11 áreas (45,8%), e “regular” em outras 10 (41,7%). Considerando os critérios de interpretação indicados por Roloff et al. (2011), nenhuma área obteve valor igual ou superior a 8,5, considerado desejável. A condição de “alerta”, quando os valores do IQP2 estão entre 7 e 8,49, foi observada em 7 áreas (29,2%). A grande maioria das áreas (17, ou 70,8%) obteve um IQP2 inferior a 7, o que caracteriza condição “crítica”. Portanto, os resultados obtidos neste estudo indicam que a qualidade do manejo do solo pode melhorar bastante nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, mediante a adoção de práticas e tecnologias amplamente validadas pela pesquisa e, em geral, conhecidas dos produtores.

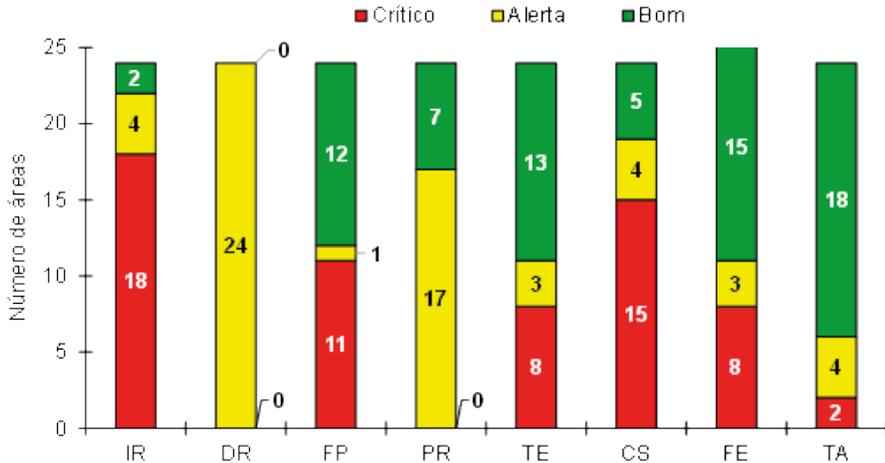


**Figura 3.** Índice de qualidade participativo do plantio direto versão 2 (IQP2) das áreas agrícolas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

A análise individual dos indicadores que compõem o IQP2 permite inferir a respeito dos fatores mais limitantes à qualidade do PD e que, portanto, necessitam de maior atenção. Conforme a Figura 4, os três indicadores com maior proporção de áreas na condição “crítica” foram, em ordem decrescente: IR>CS>FP. Esses resultados evidenciam que a intensificação dos modelos de produção, com a redução do tempo em que as áreas permanecem em pousio e consequente aumento da produção de palha e raízes, associada à eliminação de operações de preparo do solo sem critério técnico e à melhoria de aspectos relacionados à conservação do solo (redução do escoamento superficial e da compactação), são aspectos de fundamental importância para melhor a qualidade do PD nas regiões Norte e Noroeste do Estado.

Ressalta-se também que o indicador DR foi qualificado como “regular” em 100% áreas avaliadas (Figura 4), uma vez que o modelo de produção para todas elas está baseado em plantas de duas famílias botânicas (fabáceas e poáceas). Apesar de demonstrar que a diversificação de famílias nos modelos de produção é ponto importante a ser melhorado considerando o universo amostral deste diagnóstico, esse resultado evidencia também a baixa sensibilidade desse indicador em detectar diferenças entre as áreas. A utilização concomitante de outro critério para este indicador, relacionado ao número de

espécies diferentes nos modelos de produção, pode ser uma alternativa para melhorar a sensibilidade do mesmo, proporcionando maior diferenciação entre as áreas.



IR = intensidade da rotação; DR = diversidade da rotação; FP = frequência de preparo do solo; PR = persistência da palhada; TE = terraceamento; CS = conservação do solo; FE = fertilização equilibrada; TA = tempo de adoção do sistema plantio direto (SPD).

**Figura 4.** Número de áreas agrícolas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná (safra 2018/2019), enquadradas nas classes “Crítico”, “Alerta” e “Bom” para os indicadores componentes do índice de qualidade do plantio direto versão 2 (IQP2).

## Intepretação dos indicadores de qualidade de manejo e fertilidade do solo

A análise estatística descritiva para as principais variáveis deste estudo é resumida na Tabela 7. Em geral, os atributos avaliados apresentaram grande amplitude entre os valores mínimos e máximos, bem como elevados coeficientes de variação (CV). Essa variabilidade pode ser atribuída sobretudo às diferenças no histórico de manejo e nas características de solo e clima de cada área. Os maiores CVs foram observados para o  $Al^{3+}$ , a TIE e o teor de P, enquanto que os menores, para o pH em  $CaCl_2$  e o GF.

**Tabela 7.** Estatística descritiva das principais variáveis avaliadas em 24 áreas agrícolas das regiões Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

Indicador <sup>(1)</sup>	Número de pontos (n)	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)
pH CaCl <sub>2</sub>	96	5,06	4,20	6,00	0,41	8,1
P, mg dm <sup>-3</sup>	96	19	4	67	12	67,1
K <sup>+</sup> , cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	96	0,35	0,05	0,95	0,17	49,0
Ca <sup>2+</sup> , cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	96	4,3	0,8	9,9	2,2	51,6
Mg <sup>2+</sup> , cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	96	1,3	0,3	2,9	0,6	45,1
Al <sup>3+</sup> , cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	96	0,05	0,00	0,43	0,10	191,5
V, %	96	50	20	77	12	24,3
MOS, %	96	2,57	0,81	3,88	0,79	30,9
TIE, mm h <sup>-1</sup>	192	37,1	4,6	190,6	33,4	90,1
IQES	192	2,75	1,19	6,00	0,92	33,4
GF, %	96	70,3	50,0	88,1	8,16	11,6
Cobertura, %	96	66,1	24,0	100	18,8	28,4
Cobertura, t ha <sup>-1</sup>	96	4,3	0,4	17,1	2,4	55,7

<sup>(1)</sup> P = teor de fósforo no solo; K<sup>+</sup> = teor de potássio trocável no solo; Ca<sup>2+</sup> = teor de cálcio trocável no solo; Mg<sup>2+</sup> = teor de magnésio trocável no solo; Al<sup>3+</sup> = teor de alumínio trocável no solo; V = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de floculação da fração argila; Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm).

Os valores médios dos indicadores relacionados à cobertura e à fertilidade do solo mais representativos, por área avaliada, constam da Tabela 8. Com bases nesses valores e nos limites superiores e inferiores das classes de interpretação (Tabela 5), foram calculados os ID<sub>p</sub> (equação 3) e, então, elaborados os gráficos de radar para cada área, apresentados nas Figuras 5 a 8, os quais se referem, respectivamente, às regiões Noroeste Arenito, Noroeste

Basalto, Norte Baixo e Norte Alto. Os gráficos de radar permitem visualizar, de maneira simultânea, a interpretação para nove indicadores relacionados à cobertura do solo e à sua fertilidade química e física, possibilitando detectar os fatores mais limitantes à qualidade do manejo do solo e que, assim, devem ser o foco prioritário das ações para a melhoria da mesma. Nesse sentido, indicadores enquadrados nas classes “regular”, “ruim” ou “muito ruim” são considerados limitantes à fertilidade do solo, sendo o grau de limitação crescente da primeira para última dessas três classes.

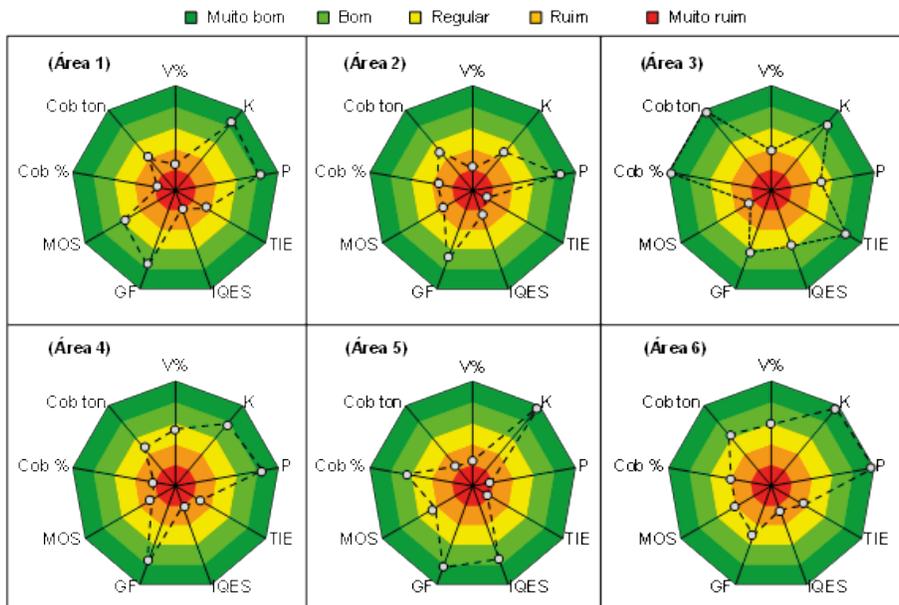
Nos gráficos de radar, o posicionamento do símbolo (círculo) nas faixas de diferentes cores evidencia a classe de interpretação a que um dado indicador pertence. O símbolo é posicionado no cruzamento entre as linhas sólidas que saem de cada indicador, com a linha pontilhada que passa pelo respectivo  $ID_p$ . A interpretação dos gráficos de radar pode ser ilustrada pela comparação de dois exemplos contrastantes, referentes às áreas 9 (Figura 6) e 15 (Figura 7), localizadas nas regiões Noroeste Basalto e Norte Baixo, respectivamente. Na área 9, que é manejada na sucessão milho 2ª safra/soja, observa-se que cinco indicadores (TIE, IQES, MOS, cob ton e cob %) foram enquadrados na classe “ruim” (faixa laranja do radar), ao passo que outros dois (V% e GF) foram interpretados como “regular” (faixa amarela). Apenas os teores de P e K ficaram na faixa verde claro (“bom”). Portanto, essa área apresenta sete indicadores limitantes à fertilidade do solo. Em contrapartida, na área 15, cujo modelo de produção envolve o cultivo de milho + braquiária *ruziziensis* em sucessão à soja, apenas dois indicadores (cob ton e V%) encontram-se na faixa amarela (“regular”), enquanto que os demais foram enquadrados nas classes “bom” (P, IQES, GF, MOS, cob %) ou “muito bom” (K e TIE). Essa comparação revela também a importância da utilização de modelos de produção mais diversificados e com maior aporte de palha e raízes na melhoria da qualidade do manejo, sobretudo na fertilidade física e na cobertura do solo.

**Tabela 8.** Valores médios de indicadores relacionados à cobertura e à fertilidade do solo, em 24 áreas agrícolas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

Área (A)	P	K <sup>+</sup>	V	MOS	Cobertura		TIE	IQES	GF
	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	%		t ha <sup>-1</sup>	mm h <sup>-1</sup>	%		
A1	26,71	0,22	32	1,96	43,2	4,0	34,6	1,93	78,0
A2	33,28	0,12	30	1,30	64,8	5,0	14,8	2,27	73,6
A3	14,37	0,22	39	1,07	100	11,3	81,5	3,84	67,2
A4	30,91	0,20	47	1,15	50,8	4,7	27,7	2,01	80,2
A5	5,34	0,27	32	1,54	82,5	2,4	16,2	4,72	83,1
A6	52,84	0,25	49	1,48	69,1	6,4	36,3	2,22	57,6
A7	27,38	0,30	51	2,46	72,3	4,0	19,8	1,81	61,6
A8	17,30	0,30	57	2,61	70,8	5,7	25,3	2,42	77,2
A9	9,09	0,34	54	2,78	43,5	3,2	28,0	2,65	54,6
A10	27,57	0,44	60	2,80	67,5	6,2	12,0	2,27	67,7
A11	16,50	0,33	44	2,58	75,7	4,1	22,4	2,34	74,6
A12	13,27	0,64	68	3,22	75,7	4,8	18,1	3,00	62,3
A13	25,86	0,61	58	2,78	40,5	3,4	73,8	2,56	71,7
A14	7,80	0,34	63	2,81	65,3	4,4	81,7	2,47	67,9
A15	8,94	0,51	49	3,56	73,2	5,0	87,9	4,90	71,2
A16	15,78	0,38	51	3,03	78,6	3,2	20,8	2,79	73,0
A17	13,88	0,63	58	3,29	70,06	3,8	26,3	1,92	70,6
A18	9,32	0,31	60	3,17	43,2	4,1	35,6	2,39	73,4
A19	12,02	0,21	52	2,76	63,8	3,3	23,4	2,28	68,2
A20	13,06	0,51	51	3,52	56,0	1,1	47,7	2,95	65,4
A21	11,73	0,39	64	3,01	40,8	1,4	29,9	2,50	64,1
A22	7,29	0,18	44	2,43	87,7	4,5	17,8	3,25	80,1
A23	22,88	0,44	39	3,46	68,5	2,5	42,1	2,80	71,7
A24	32,12	0,31	46	2,94	82,9	4,8	65,6	3,74	71,3

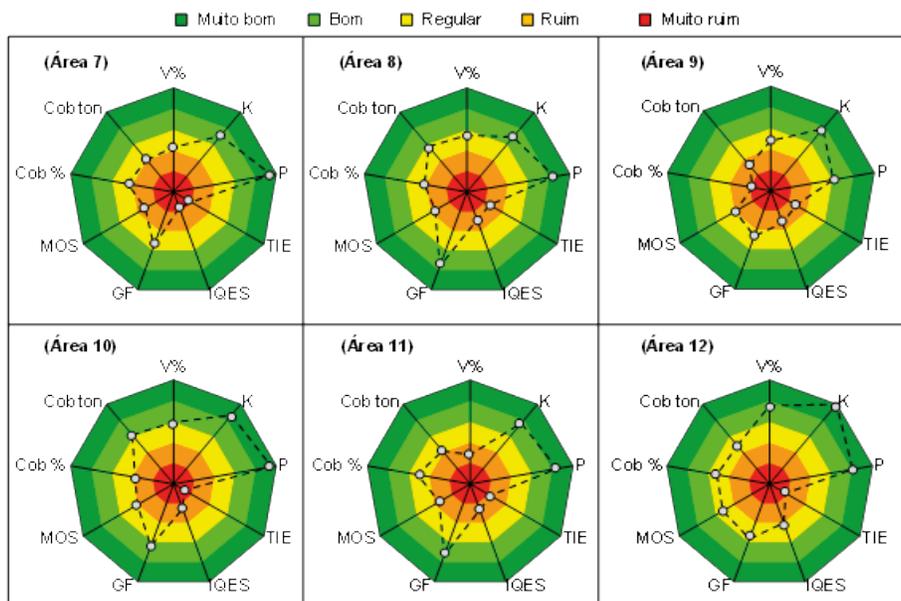
P = teor de fósforo; K<sup>+</sup> = teor de potássio; V = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES. Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm).

As limitações e sua magnitude variaram amplamente entre as áreas estudadas (Figuras 5 a 8). Isso reforça a importância da realização de diagnósticos precisos e individualizados para a correta tomada de decisão, focados não somente em análises químicas de solo, mas também em atributos físicos e biológicos. Nesse sentido, o desenvolvimento de novas ferramentas para avaliação da fertilidade do solo aplicáveis à realidade do produtor, como o DRES (Ralisch et al., 2017) e a bioanálise de solos (Lopes et al., 2018; Mendes et al., 2019), tem contribuindo para sanar as dificuldades tradicionalmente encontradas no diagnóstico da parte física e biológica do solo. Aliado a essas novas ferramentas, tem-se o aperfeiçoamento e desenvolvimento da agricultura de precisão, envolvendo a geração de mapas de produtividade e de atributos de solo, bem como o crescente uso de imagens aéreas (Franchini et al., 2018), cuja adoção certamente representará um grande avanço para o diagnóstico da qualidade do manejo e fertilidade do solo.



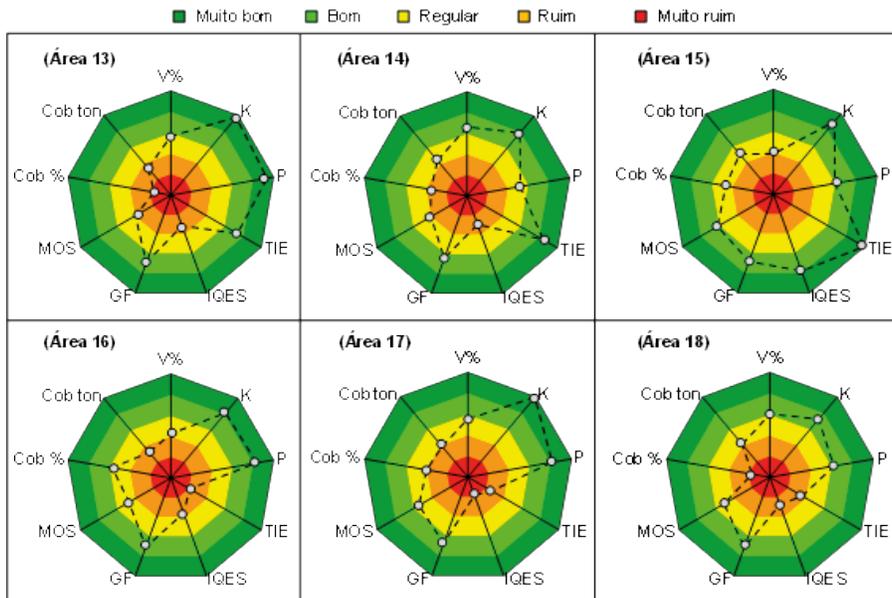
V% = saturação por bases; K = teor de potássio; P = teor de fósforo; TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de flocculação da fração argila; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha). Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 5.** Índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo ( $ID_p$ ) por área agrícola avaliada na região Noroeste Arenito (safra 2018/2019), municípios de Ângulo (A1), Florai (A2), Iporã (A3 e A4), Cafezal do Sul (A5) e Jussara (Área 6).



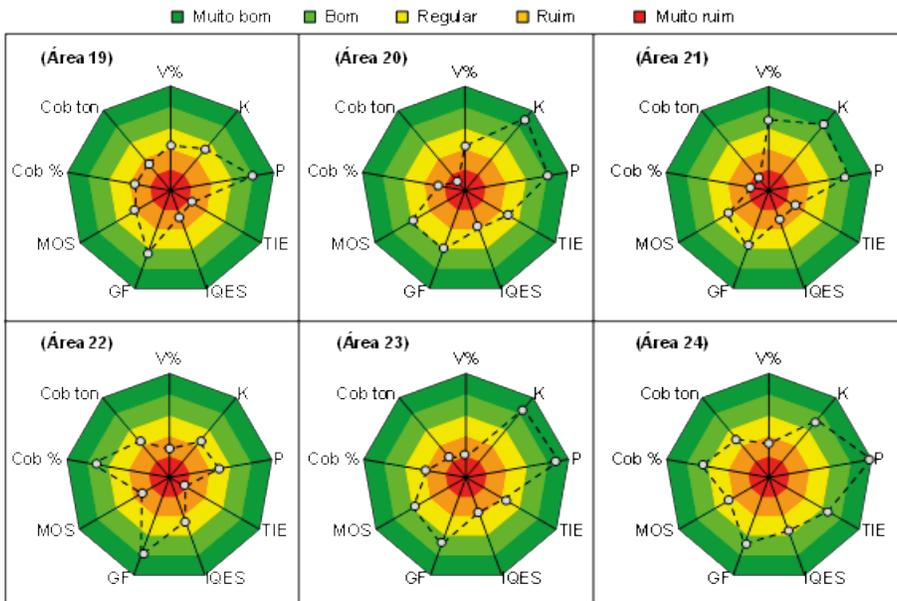
V% = saturação por bases; K = teor de potássio; P = teor de fósforo; TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de flocculação da fração argila; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha). Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 6.** Índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo ( $ID_p$ ) por área agrícola (A) avaliada na região Noroeste Basalto (safra 2018/2019), municípios de Floráí (A7, A8 e A9), Jussara (A10), Mandaguaçu (A11) e São Jorge do Ivaí (A12).



V% = saturação por bases; K = teor de potássio; P = teor de fósforo; TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de flocculação da fração argila; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha). Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 7.** Índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo ( $ID_p$ ) por área agrícola avaliada na região Norte Baixo (safra 2018/2019), municípios de Primeiro de Maio (A13, A14 e A15) e Sertanópolis (A16, A17 e A18).



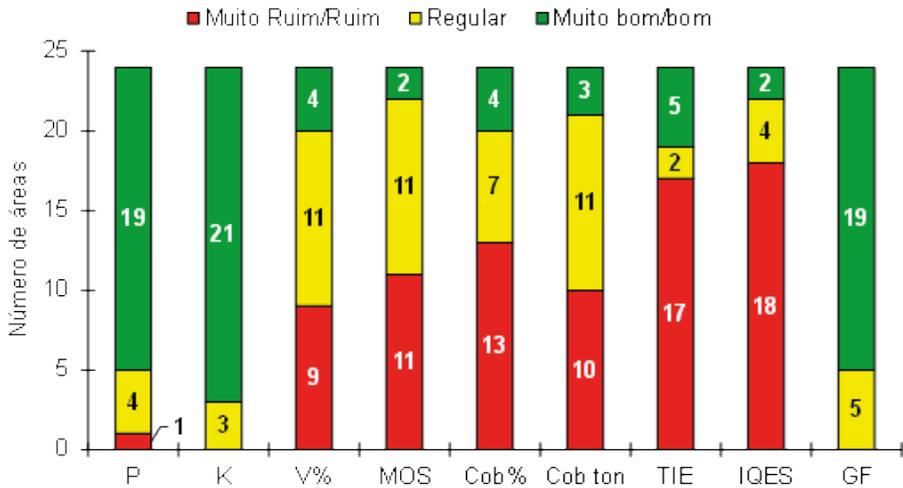
V% = saturação por bases; K = teor de potássio; P = teor de fósforo; TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de flocculação da fração argila; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha). Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 8.** Índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo ( $ID_p$ ) por área agrícola (A) avaliada na região Norte Alto (safra 2018/2019), municípios de Santa Cecília do Pavão (A19, A20 e A21) e São Sebastião da Amoreira (A22, A23 e A24).

Em uma análise mais geral, os gráficos de radar (Figuras 5 a 8) mostram que todas as áreas apresentaram dois ou mais indicadores limitantes à fertilidade do solo e, assim, ao desempenho do sistema de produção, independentemente da região. Das 24 áreas avaliadas, em apenas uma (área 15, Figura 7), nenhum indicador foi classificado como “ruim” ou “muito ruim”. Juntando os indicadores em grupos (físicos, químicos, MOS e cobertura), verifica-se ainda que 17 das 24 áreas apresentaram algum grau de limitação simultaneamente em todos os grupos. Esses resultados revelam a existência de muitas oportunidades de melhorias na qualidade do manejo do solo e, conseqüentemente, em sua fertilidade. Essas melhorias envolvem práticas já validadas pela pesquisa e amplamente conhecidas pelos produtores, como a calagem com base nos laudos de análise química de solo, e a utilização de modelos de produção com maior diversidade de plantas e aporte de palha e

raízes. Ressalta-se que o aumento da fertilidade do solo possibilita maior produtividade de grãos e estabilidade de produção face à ocorrência de períodos de seca ou excesso de chuvas, além de otimizar os custos de produção e reduzir os impactos ambientais da agricultura.

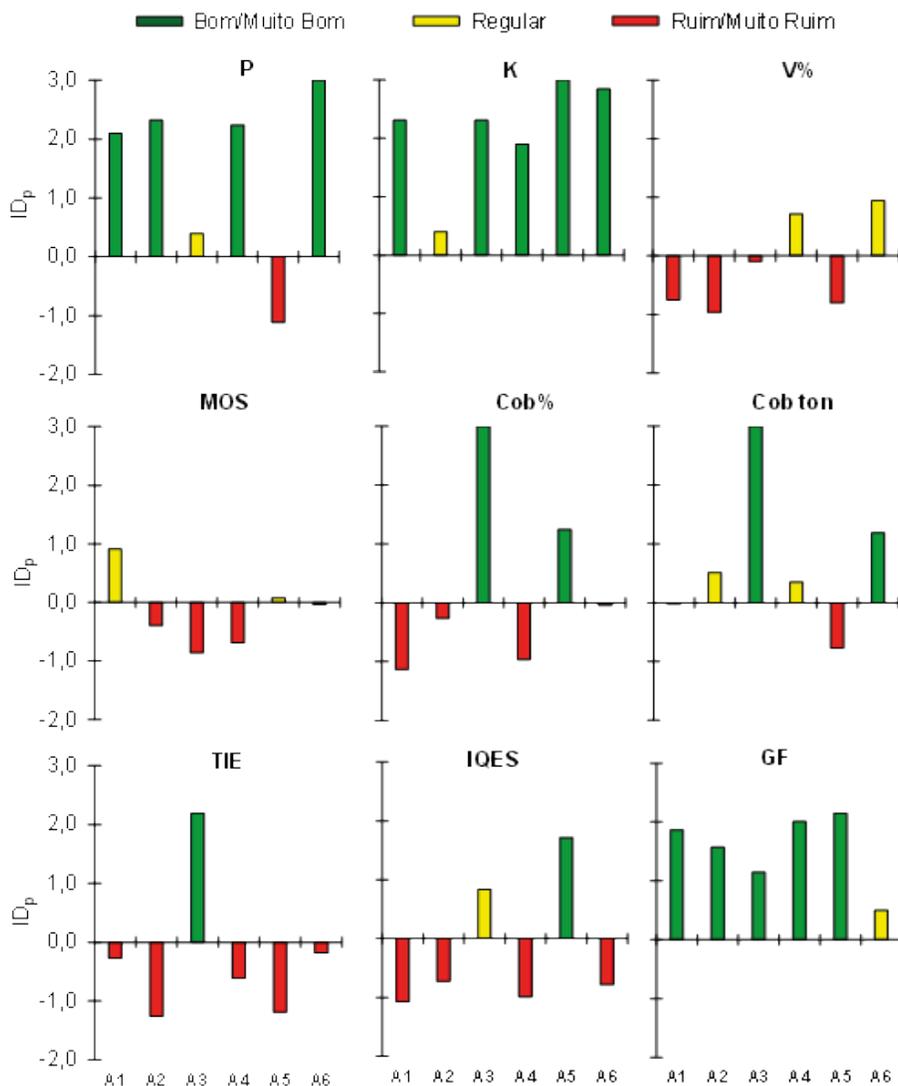
A proporção de áreas enquadradas nas classes de interpretação “muito ruim/ruim”, “regular” e “muito bom/bom”, para os nove indicadores mais representativos da qualidade do manejo do solo e de sua fertilidade, é mostrada na Figura 9. Por sua vez, os valores de  $ID_p$  obtidos para cada área e indicador, e a respectiva interpretação, são apresentados nas Figuras 10 a 13.



P = teor de fósforo; K = teor de potássio; V% = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha); TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de floculação das argilas. Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 9.** Número de áreas agrícolas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná (safra 2018/2019), enquadradas nas classes muito ruim/ruim, regular e bom/muito bom, para diferentes indicadores de cobertura e qualidade do solo.

Com relação aos indicadores de fertilidade química, os teores de P e K na camada de 0-20 cm foram classificados como adequados (muito bom/bom) em 19 (79,2%) e 21 (87,5%) áreas, respectivamente (Figura 9). Dentre todas as áreas amostradas, em apenas uma (área 5, recém convertida de pastagem para lavoura de grãos), o teor de P foi considerado muito ruim/ruim (Figura 10), o que não foi observado em nenhum caso para o teor de K.



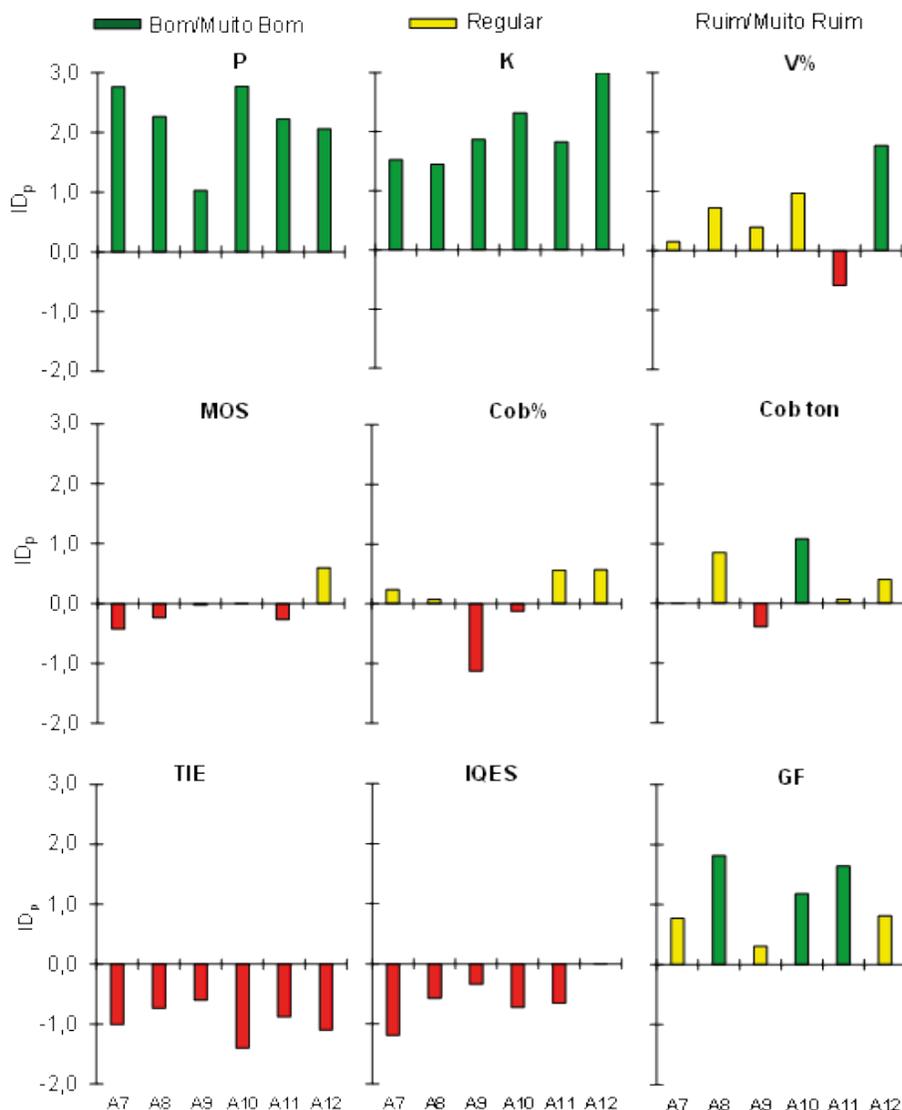
P = teor de fósforo; K = teor de potássio; V% = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha); TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de floculação da fração argila. Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm).

**Figura 10.** Comparação dos índices padronizados ( $ID_p$ ) de cobertura e de qualidade do solo entre as áreas agrícolas (A) avaliadas na região Noroeste Arenito (safra 2018/2019), municípios de Ângulo (Área 1), Florai (Área 2), Iporã (Áreas 3 e 4), Cafetal do Sul (Área 5) e Jussara (Área 6).

Por outro lado, o valor médio de V% foi classificado como “muito bom” ou “bom” somente em quatro áreas (16,7%), indicando que as demais 20 áreas (83,3%) necessitam de calagem para correção da acidez na camada de 0-20 cm. Considerando o critério da V% (Oliveira Junior et al., 2020) e o uso de calcário com PRNT de 100%, a necessidade de média de calagem nessas áreas foi de 2,25 t/ha, variando entre 1,29 a 3,97 t/ha.

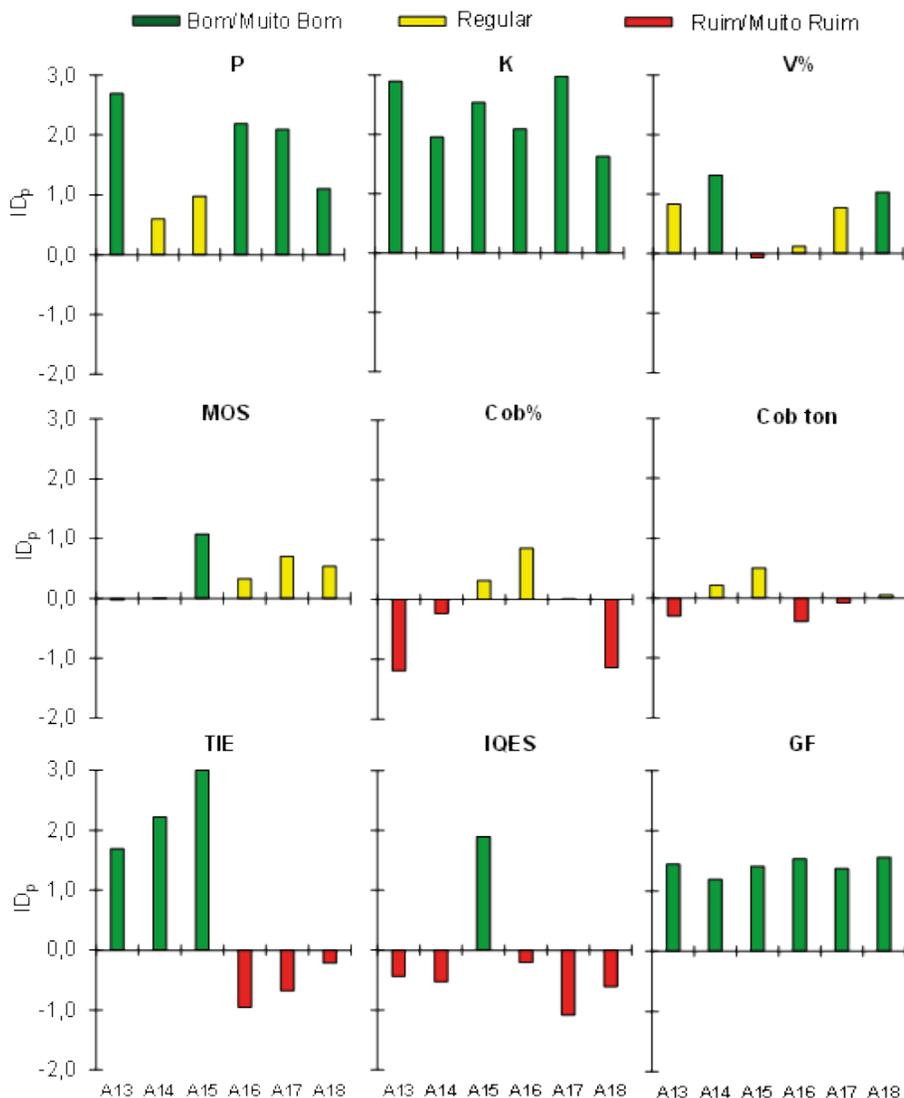
Os problemas mais graves de acidez do solo foram observados nos solos de textura arenosa, provenientes das áreas localizadas no Noroeste Arenito (Figura 10). Nessa região, todas as seis áreas amostradas apresentaram indicação técnica para calagem, sendo quatro delas com V% na classe “muito ruim” ou “ruim”, com necessidade média de 2,4 t/ha de calcário PRNT 100%.

Outra região problemática em termos de acidez do solo foi o Norte Alto, onde os valores de V% foram enquadrados nas classes “muito ruim” ou “ruim” em três das seis áreas avaliadas (Figura 13). Nessas três áreas, a necessidade média de calagem (PRNT 100%) foi de 3,3 t/ha.



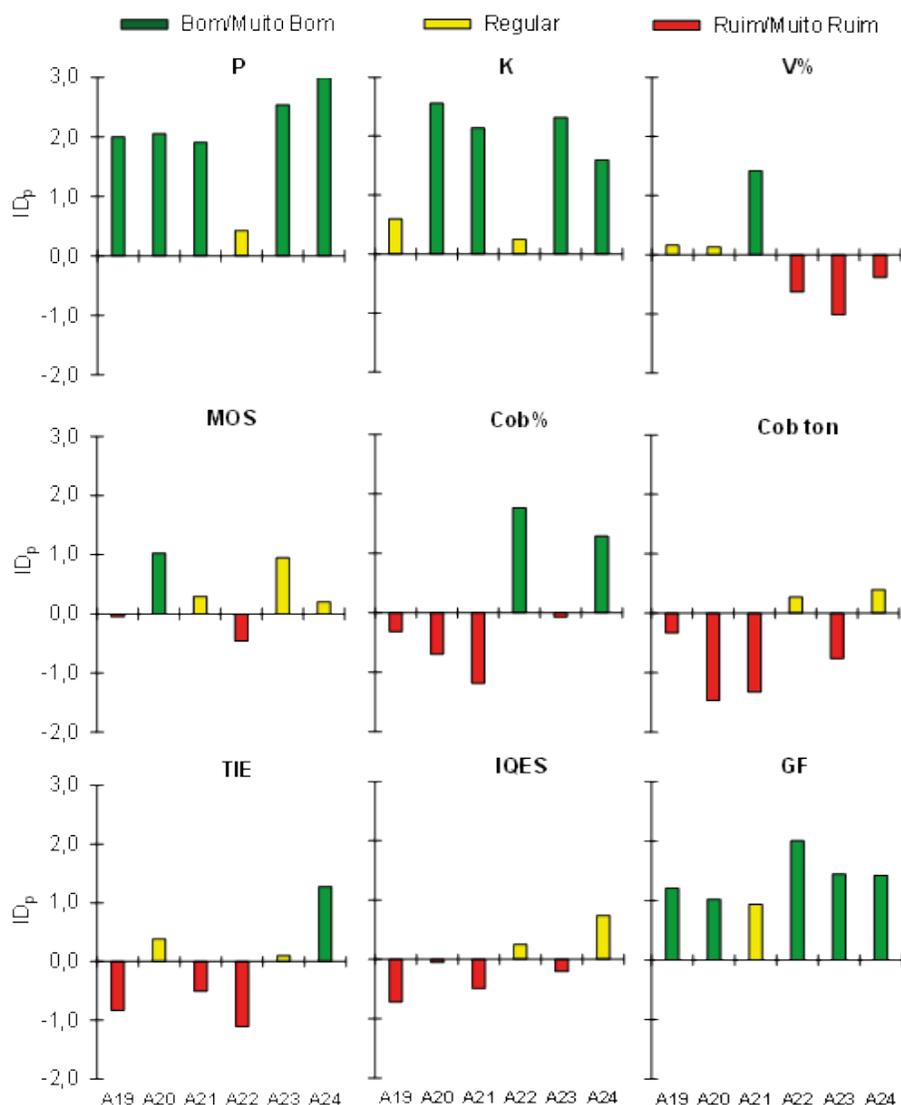
P = teor de fósforo; K = teor de potássio; V% = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha); TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de floculação das argilas. Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 11.** Comparação dos índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo ( $ID_p$ ) entre as áreas agrícolas (A) avaliadas na região Noroeste Basalto (safra 2018/2019), municípios de Florai (A7, A8 e A9), Jussara (A10), Mandaguaçu (A11) e São Jorge do Ivaí (A12).



P = teor de fósforo; K = teor de potássio; V% = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha); TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de flocculação das argilas. Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm).

**Figura 12.** Comparação dos índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo ( $ID_p$ ) entre as áreas agrícolas (A) avaliadas na região Norte Baixo (safra 2018/2019), municípios de Primeiro de Maio (A13, A14 e A15) e Sertãoópolis (A16, 17 e 18).



P = teor de fósforo; K = teor de potássio; V% = saturação por bases; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Cob % = porcentagem de cobertura do solo; Cob ton = cobertura do solo (massa de palha); TIE = taxa de infiltração estável de água; IQES = índice de qualidade estrutural do solo, pelo método DRES; GF = grau de floculação das argilas. Todos os indicadores de qualidade do solo referem-se à camada de 0-20 cm, com exceção do IQES (0-25 cm) e da TIE (superfície do solo).

**Figura 13.** Comparação dos índices padronizados de cobertura e de qualidade do solo (ID<sub>p</sub>) entre as áreas agrícolas (A) avaliadas na região Norte Alto (safra 2018/2019), municípios de Santa Cecília do Pavão (A19, 20 e 21) e São Sebastião da Amoreira (A22, 23 e 24).

A acidez do solo é um dos principais fatores que determinam a disponibilidade e a eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes, bem como a solubilização de elementos tóxicos, como o alumínio. Portanto, a sua correção por meio da calagem é fundamental para garantir altas produtividades de grãos com estabilidade e otimização dos custos de produção. Pela elevada relação benefício/custo da calagem, e por se tratar de uma prática amplamente conhecida pelos produtores, a alta proporção de lavouras com necessidade de calagem nas regiões norte e noroeste do Paraná é surpreendente, e exige da assistência técnica um forte trabalho de conscientização dos produtores a respeito da sua importância. A realização de análises químicas do solo, buscando verificar a necessidade ou não de calagem e embasar doses e métodos de aplicação, é outro aspecto que deve ser observado pelos técnicos e produtores.

Teores adequados de MOS na camada de 0-20 cm foram observados em apenas duas áreas, o que equivale a cerca de 8% do total amostrado (Figura 9). Os maiores teores de MOS foram observados nas áreas A15 e A20, caracterizadas por solos de textura muito argilosa, sem preparo de solo mecanizado e sem sinais de erosão (Tabela 6). Adicionalmente, 11 áreas (quase 50%) foram enquadradas nas classes “muito ruim” ou “ruim”. Similarmente ao observado para a V%, os teores de MOS foram mais limitantes nas áreas localizadas no Noroeste Arenito (Figura 10) e, em sequência, na região Noroeste Basalto (Figura 11). Tendo como base a variação da textura do solo das áreas avaliadas entre as regiões (Tabela 3), nota-se uma relação inversa entre os teores de argila e a MOS. Assim, os menores teores de argila na região Noroeste, sobretudo nos solos originados do Arenito Caiuá, conferem ao solo menor capacidade de estabilização química e física da MOS, resultando em maiores perdas na forma de gases (Six et al., 2002). Cabe salientar que, mesmo nos solos de textura muito argilosa das regiões Norte Baixo e Norte Alto, que naturalmente se caracterizam por um elevado potencial de estabilização e armazenamento de compostos orgânicos, os teores de MOS estão abaixo do mínimo considerado ideal (“regular”, “ruim” ou “muito ruim”) em 10 das 12 áreas avaliadas (Figuras 12 e 13). Além da relação da MOS com a textura, esses resultados indicam que a adição de material orgânico vegetal (palha e raízes) pelos modelos de produção predominantes nessas regiões não tem sido suficiente para proporcionar acúmulo de MOS. E o preparo do

solo, sobretudo por meio de gradagem, é fator determinante para reduções de teores de MOS, em geral, classificados como ruim/muito ruim nesse estudo.

A MOS se constitui em dos principais componentes da fertilidade do solo, por determinar diversos atributos e processos físicos, químicos e biológicos (Bayer; Mielniczuk, 2008): formação e estabilização de agregados, essencial para a qualidade estrutural do solo; fornecimento de nutrientes para as plantas; aumento da disponibilidade de alguns nutrientes, como o P; aumento da CTC; complexação de elementos tóxicos às culturas, como o alumínio; e aumento da biomassa e atividade biológica do solo. Em decorrência desses efeitos, aumentos de produtividade das culturas são frequentemente associados a teores mais elevados de MOS (Nicolodi et al., 2008; Costa et al., 2014; Debiasi et al., 2015; Lopes et al., 2018; Mendes et al., 2019). Portanto, o fato de 22 das 24 áreas avaliadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná (92%) apresentarem teores de MOS inferiores ao ideal é preocupante, apontando para a necessidade de utilização de modelos de produção que proporcionem maior diversidade biológica e aporte de palha e raízes, juntamente com eliminação de operações de preparo do solo sem critério técnico. Salienta-se ainda que o aporte de N ao sistema, preferencialmente via fixação biológica (FBN), é outra prática essencial para sustentar o acúmulo de MOS (Diekow et al., 2005).

A cobertura do solo por palha, medida logo após a emergência da soja, foi outro fator limitante na maioria das áreas avaliadas, reforçando a necessidade de fomento à adoção de modelos de produção com maior aporte de fitomassa da parte aérea. A Figura 9 mostra que a massa (cob ton) e a porcentagem (cob %) de cobertura foram consideradas adequadas (classes “bom” e “muito bom”) em somente quatro (12,5%) e três (16,7%) áreas, respectivamente. Por sua vez, as classes “ruim” e “muito ruim” englobaram 13 (54,2%) e 10 (41,7%) áreas para a porcentagem e massa de cobertura, respectivamente. Não foi observada relação entre a porcentagem de cobertura e a região, sendo o grau de limitação desse fator, expresso pelo  $ID_p$ , similar entre elas (Figuras 10 a 13). Porém, a massa de cobertura foi mais limitante no Norte Alto, em virtude da utilização do trigo antecedendo a soja em quatro das seis áreas avaliadas nessa região. Devido às suas características, a palha do trigo apresenta capacidade relativamente alta de cobertura do solo em termos percentuais, porém, a massa é em geral pequena, inferior ao milho 2ª safra (Debiasi et al., 2015).

No presente estudo, optou-se por avaliar a cobertura do solo por meio de dois indicadores (porcentagem e massa), uma vez que a relação entre o potencial da palha em cobrir o solo e a sua massa é amplamente variável conforme a espécie vegetal. Em geral, a capacidade da palha em cobrir o solo (% de cobertura por tonelada de palha) é menor nas espécies que apresentam caules ou colmos mais grossos e/ou resistentes, com folhas de decomposição relativamente rápida, como o milho, o sorgo, as crotalárias e o guandu. Além disso, cada um desses indicadores apresenta relação mais estreita com determinados processos associados à qualidade do manejo e à fertilidade do solo. Nesse sentido, a porcentagem de cobertura é mais relacionada à dissipação da energia da gota de chuva e, assim, ao controle da erosão, enquanto que a massa é determinante para o aumento dos teores de MOS. Por sua vez, processos como a redução da temperatura do solo e das perdas de água por evaporação, a supressão física de plantas daninhas e o controle de algumas doenças (mofo-branco, por exemplo), têm associação com os dois indicadores. De qualquer modo, os resultados deste trabalho mostraram que ambos os indicadores apresentaram valores limitantes na ampla maioria das áreas avaliadas, o que compromete todos os aspectos anteriormente enumerados e, em consequência, a conservação do solo e a produtividade das culturas. Trabalhos conduzidos na Embrapa Soja demonstraram que a cobertura do solo com palha, em valores próximos a 100%, resultou em aumentos de produtividade na soja comparativamente à ausência total de cobertura variáveis entre 6 e 34%, dependendo da espécie vegetal e da disponibilidade hídrica de cada safra (Balbinot Junior et al., 2017; 2020).

A TIE e o IQES foram enquadrados nas classes “ruim” ou “muito ruim” em 17 e 18 áreas, respectivamente, o que representa cerca de 73% dos casos (Figura 9). Como a TIE e o IQES são indicadores que se complementam, a proporção de áreas em que pelo menos um deles foi interpretado como sendo crítico à fertilidade do solo é a informação chave para um panorama mais realístico a respeito do grau de limitação imposto por esses indicadores nas regiões Norte e Noroeste do Paraná. Nesse contexto, das 24 áreas avaliadas, em 21 (87,5%) pelo menos um dos dois indicadores foi classificado como “ruim” ou “muito ruim”, evidenciando assim degradação da estrutura e, conseqüentemente, comprometimento dos processos físicos que ocorrem no solo. Os dados mostram ainda que as diferenças entre as regiões foram, em geral, pequenas para os três indicadores de fertilidade física (Figuras 10 a 13).

Diante desses resultados, fica evidente que a degradação da estrutura do solo é o problema mais grave relacionado ao manejo do solo nas regiões Norte e Noroeste do Paraná. Essa condição diminui o crescimento radicular, reduz a eficiência de uso dos fertilizantes e limita a disponibilidade de água e oxigênio às raízes, o que se reflete negativamente sobre a produtividade das culturas especialmente em anos secos e/ou com excesso de chuvas (Torres; Saraiva, 1999; Bertollo et al., 2021). A degradação estrutural também favorece as perdas de água e solo por erosão (Richart et al., 2005), com impactos negativos sobre o ambiente e a produtividade (Gaertner et al., 2003; Didoné et al., 2015). O predomínio de modelos de produção pouco diversificados, com baixa adição de fitomassa da parte aérea e raízes, em alguns casos associados a operações de preparo do solo sem critério técnico, são as principais razões que explicam a baixa fertilidade física nas regiões Norte e Noroeste do Paraná. O tráfego de máquinas pesadas, muitas vezes em condições de umidade excessiva do solo, é outro fator importante que justifica a degradação da estrutura nas áreas estudadas.

A união entre as partículas de argila, processo esse conhecido como “floculação”, é base para a formação dos microagregados e, conseqüentemente, de uma estrutura de solo favorável ao crescimento das plantas (Dexter, 1988). A argila não floculada (dispersa) preenche os espaços entre as partículas minerais maiores (silte e areia) e os agregados, diminuindo a porosidade e aumentando a densidade do solo. Na superfície do solo, o aumento na dispersão das argilas potencializa a formação de crostas superficiais, o que reduz a capacidade de infiltração, a condutividade hidráulica e, conseqüentemente, favorece a erosão (Reichert et al., 1992; Spera et al., 2008; Igwe; Obalum, 2013). As argilas dispersas em água também podem ser deslocadas no perfil de solo, formando camadas de impedimento físico por adensamento (Spera et al., 2008), bem como são mais facilmente transportadas pela enxurrada durante o processo de erosão (Igwe; Obalum, 2013).

Resumidamente, os processos de floculação ou dispersão são determinados pelo balanço de cargas do solo, pela valência dos cátions e a concentração eletrolítica da solução (Azevedo; Bonuma, 2004). Assim, a magnitude desses processos depende primariamente da textura, da composição mineralógica da fração argila e do manejo adotado. Com relação ao último fator, valores de pH excessivamente altos, e a presença de elevados teores de cátions mono-

valentes e/ou com grande raio hidratado, como o sódio e o potássio, provenientes de água da irrigação ou altas doses de fertilizantes, contribuem para a dispersão das argilas (Roth; Pavan, 1991; Azevedo; Bonuma, 2004; Spera et al., 2008; Almeida Neto et al., 2009; Figueiredo et al., 2021). Da mesma forma, a redução dos teores de MOS tende a favorecer a dispersão das argilas (Albuquerque et al., 2003; Costa et al., 2004; Gasparetto et al., 2009).

A proporção de argilas floculadas em relação ao seu teor total no solo corresponde ao grau de floculação (GF). No caso deste trabalho, o GF apresentou valores abaixo do ideal em apenas cinco áreas (20,8%), todas elas correspondendo à classe “regular” (Figura 9). Não foi possível estabelecer relação entre a região, o manejo adotado e o grau de limitação imposto pelo GF (Figuras 10 a 13). Embora a dispersão das argilas não tenha se mostrado um problema generalizado nas regiões Norte e Noroeste do Estado, a ocorrência de limitações em cerca de 20% das áreas evidencia a necessidade de atenção para esse fator, que pode levar à degradação da fertilidade estrutural do solo e aumento da erosão.

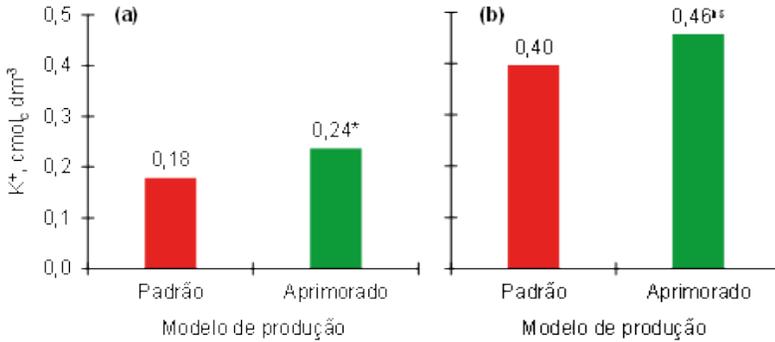
## Avaliação do impacto de práticas de manejo sobre indicadores de fertilidade do solo, em áreas consolidadas de produção de grãos

A ampla maioria dos indicadores químicos de fertilidade do solo não foi pelos modelos de produção (padrão ou aprimorados), independentemente da região (dados não apresentados). Esses resultados podem ser explicados por dois fatores principais: 1) variações na textura, na composição mineralógica e nas práticas de adubação e correção do solo entre as glebas, o que dificulta o estabelecimento de comparações diretas entre os modelos de produção; e 2) em todos os casos avaliados, os modelos aprimorados vêm sendo adotados há menos de cinco anos, prazo muito curto para que alterações em alguns atributos sejam detectadas, como por exemplo, na MOS. No caso específico da MOS, as adições de material orgânico mesmo nos modelos aprimorados ficaram abaixo do desejado na maioria das áreas, o que contribui, ao menos em parte, para a falta de resposta desse indicador ao manejo.

O teor de  $K^+$  na camada de 0-20 cm foi o único indicador químico de fertilidade do solo alterado significativamente pelos modelos de produção, o que ocorreu apenas na região Noroeste Arenito (Figura 14). Nessa região, com solos originalmente pobres em  $K^+$ , a utilização de modelos de produção aprimorados, com a inclusão da braquiária *ruziziensis* em cultivo solteiro ou consorciado ao milho 2ª safra (Tabela 2), proporcionou um incremento de 33% no teor de  $K^+$  em comparação aos modelos “padrão” o que, no longo prazo, pode reduzir os custos de produção relacionados aos fertilizantes potássicos. Os maiores teores de  $K^+$  nos modelos aprimorados estão provavelmente relacionados à redução das perdas por erosão (Dechen et al., 2015) e à ciclagem do nutriente das camadas subsuperficiais pelas braquiárias, associada à sua rápida liberação da palhada para o solo (Pacheco et al., 2013; Werner et al., 2020). Nas demais regiões, com solos de textura argilosa ou muito argilosa, os teores de  $K^+$  não foram influenciados significativamente pelos modelos de produção, o que pode ser explicado pela “diluição” dos efeitos do manejo em consequência dos teores originalmente elevados do nutriente no solo dessas regiões.

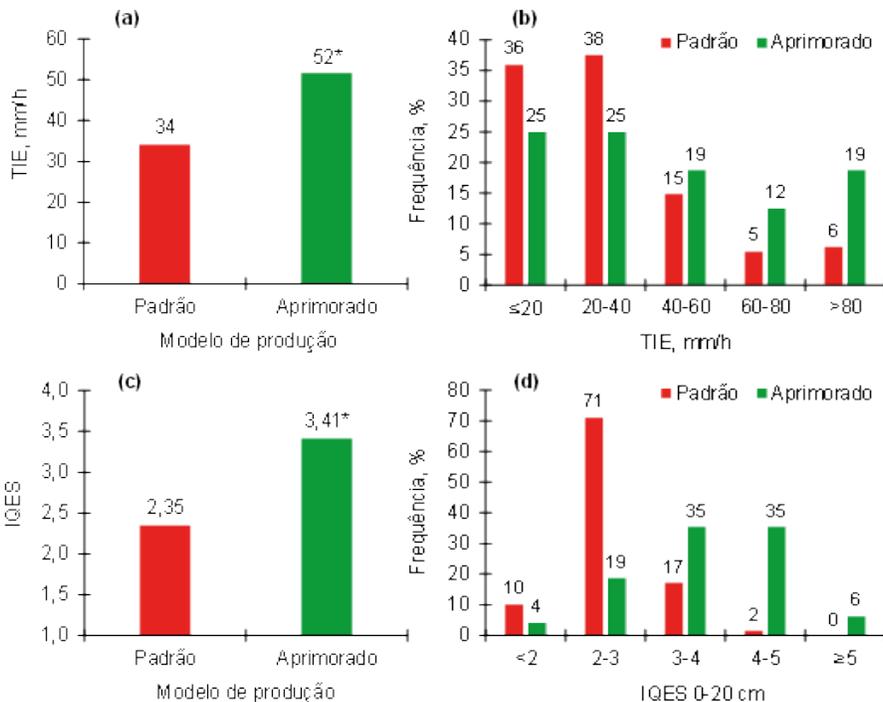
O efeito dos modelos de produção (padrão e aprimorados) sobre a fertilidade estrutural do solo, sem diferenciar as glebas em relação à realização ou não de operações de preparo do solo (gradagens e/ou escarificações), é apresentado na Figura 15. Em média, a TIE foi 53% superior nas áreas com maior diversidade de espécies vegetais e maior aporte de palha e raízes (modelos aprimorados), comparativamente às que utilizam as sucessões trigo/soja ou milho 2ª safra/soja (padrão) (Figura 15a). Os valores médios de TIE foram classificados como ruins nos modelos padrão e regulares nos aprimorados. Verifica-se, ainda, que 74% das áreas manejadas nos modelos padrão apresentaram valores de TIE baixos, inferiores a 40 mm/h (classes de interpretação “ruim” ou “muito ruim”), ao passo que, nos aprimorados, essa proporção foi reduzida para 50% (Figura 15b). Da mesma forma, valores altos de TIE (>60 mm/h) foram observados em 31% das glebas sob modelos aprimorados; nos modelos padrão, a TIE foi superior a 60 mm/h em apenas 11% das áreas.

\* Diferenças estatisticamente significativas pelo teste U de Mann-Whitney ( $p < 0,01$ ); ns = diferenças não



significativas pelo mesmo teste.

**Figura 14.** Teores médios de potássio trocável ( $K^+$ ) no solo (camada de 0-20 cm) nos modelos de produção padrão e aprimorado, em áreas agrícolas consolidadas da região Noroeste Arenito (a) e das regiões Noroeste Basalto, Norte Baixo e Norte Alto (b), safra 2018/2019.

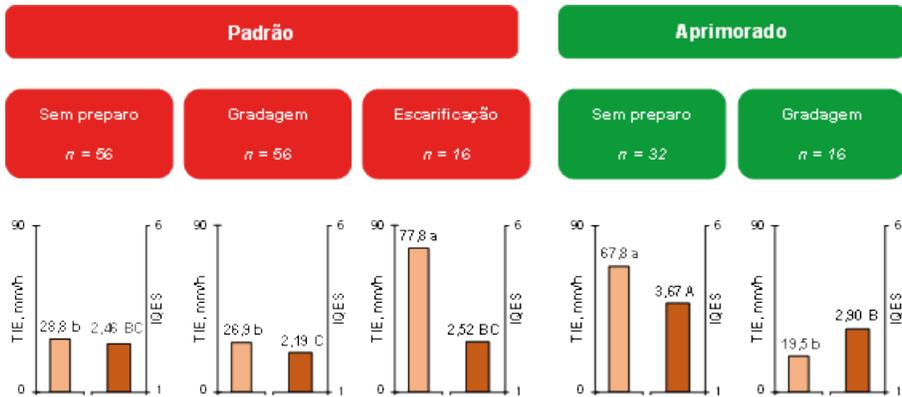


\* Diferenças estatisticamente significativas pelo teste U de Mann-Whitney ( $p < 0,01$ ).

**Figura 15.** Médias (a, c) e frequência relativa das amostras por classe de valores (b, d) nos modelos de produção padrão e aprimorados, para a taxa de infiltração estável de água (TIE) (a,b) e o índice de qualidade estrutural do solo (IQES) (c,d), em áreas agrícolas consolidadas das regiões Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

Similarmente à TIE, o IQES médio foi classificado como “ruim” nos modelos de produção padrão, e “regular” nos aprimorados (Figura 15c), o que indica melhoria da estrutura do solo nas glebas que utilizam modelos com maior diversidade de plantas e aporte de fitomassa da parte aérea e raízes. Adicionalmente, 81% das amostras provenientes de áreas manejadas sob modelos padrão apresentaram valores de IQES inferiores a 3, equivalendo às classes de interpretação “ruim” ou “muito ruim”, enquanto que apenas 2% obtiveram valores iguais ou maiores que 4 (“bom” ou “muito bom”) (Figura 15d). Em contrapartida, a proporção de amostras com IQES ruim ou muito ruim foi de 23% nos modelos aprimorados, com 41% dos casos apresentando valores considerados bons ou muito bons. Esses resultados evidenciam que o IQES foi mais sensível às alterações na estrutura do solo ocasionadas pelos modelos de produção avaliados, em comparação à TIE.

As diferenças na estrutura do solo entre os modelos padrão e aprimorados ficam mais evidentes quando os efeitos da realização ou não de operações de preparo do solo são considerados na análise (Figura 16). Nos modelos padrão, a TIE nas áreas submetidas a pelo menos uma escarificação nos três anos que antecederam a avaliação foi cerca de 2,7 vezes maior do que nas áreas sem preparo ou com realização de pelo menos uma gradagem, no mesmo período. Contudo, o IQES das áreas escarificadas não diferiu daquelas sem preparo ou submetidas à gradagem (Figura 16), o que pode ser atribuído à desagregação excessiva do solo promovida pela escarificação, característica considerada como evidência de degradação estrutural pela metodologia DRES (Ralisch et al., 2017).



n = número de amostras por manejo. Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas para a TIE e maiúsculas para o IQES, não diferem significativamente pelo teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ).

**Figura 16.** Valores médios de taxa de infiltração estável de água (TIE) e do índice de qualidade estrutural do solo (IQES) em áreas agrícolas consolidadas das regiões Norte e Noroeste do Paraná (safra 2018/2019), agrupadas em função dos modelos de produção e dos sistemas de preparo do solo adotados.

A desagregação do solo resultante da escarificação se reflete no aumento da TIE, em função do incremento do volume de macroporos, mas esse efeito apresenta curta duração, sobretudo em modelos de produção com baixa adição de material vegetal (Nicoloso et al., 2008; Girardello et al., 2011; Nunes et al., 2014; Drescher et al., 2016). Adicionalmente, o aumento excessivo do volume de macroporos, aliado à quebra da continuidade dos poros, pode reduzir o volume de água disponível às plantas (Moraes et al., 2018) e, em consequência, diminuir a produtividade de grãos de culturas como a soja e o milho (Debiasi et al., 2010; Bertollo et al., 2021). Por sua vez, o rompimento dos agregados diminui a capacidade de suporte de carga do solo, tornando-o mais suscetível à deformação pelo tráfego, o que explica, em grande parte, a curta duração dos efeitos da escarificação (Debiasi et al., 2008; Ortigara et al., 2015). Assim, elevados valores de TIE nem sempre indicam adequada fertilidade estrutural, demonstrando a importância dessa variável ser determinada em conjunto com métodos visuais de avaliação da estrutura, como o DRES.

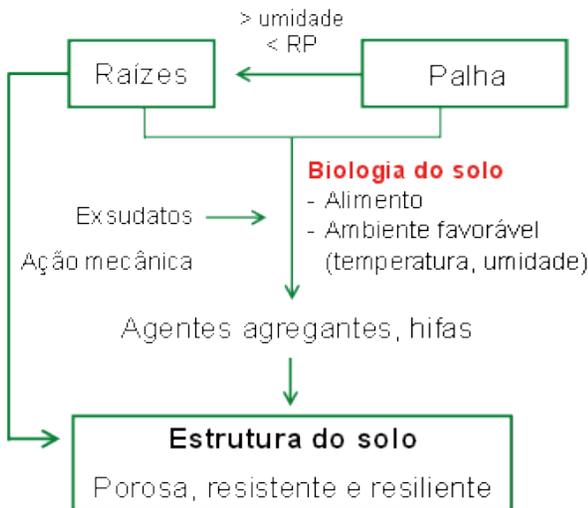
No caso dos modelos aprimorados, foram incluídas no diagnóstico apenas áreas sem preparo ou submetidas a pelo menos uma gradagem nas três safras anteriores à avaliação (Figura 16). Tanto a TIE quanto o IQES foram

significativamente menores nas áreas com histórico de gradagem, indicando que essa prática colabora para a degradação da fertilidade estrutural do solo, mesmo em modelos de produção mais diversificados e com maior aporte de palha e raízes. No caso específico da TIE, destaca-se que os valores foram 3,5 vezes maiores nas áreas sem preparo recente. Além de reduzir a cobertura e acelerar a mineralização da matéria orgânica na superfície do solo (Sá et al., 2008), a gradagem favorece a formação de camadas compactadas abaixo da revolvida (pé-de-grade) (Moraes et al., 2016), contribuindo assim para a degradação da estrutura do solo. A combinação de uma camada desagregada superficial com outra compactada imediatamente abaixo favorece a erosão e prejudica os fluxos internos de água, sobretudo os ascendentes, diminuindo assim a disponibilidade de água (Ortigara, 2017; Ralisch et al., 2017).

Na ausência de preparo do solo, os maiores valores de TIE e IQES foram observados nos modelos de produção aprimorados (Figura 16). Para a TIE, as diferenças entre os modelos de produção foram maiores quando as áreas submetidas a preparos do solo foram excluídas da análise, sendo os valores 2,4 vezes maiores nos modelos aprimorados. Por outro lado, o impacto da separação dos efeitos do preparo do solo sobre as diferenças de IQES entre os modelos de produção foi pequeno, indicando mais uma vez a capacidade desse indicador em detectar a degradação estrutural tanto por compactação quanto por pulverização excessiva.

Os resultados obtidos nesse diagnóstico comprovam que a construção de um perfil de solo com adequada fertilidade estrutural está associada à adoção de modelos de produção com maior diversidade de espécies vegetais e aporte de material vegetal (palha e raiz). Conforme esquematizado na Figura 17 (Debiasi et al., 2015), a utilização do material orgânico (palha e raízes) adicionado ao solo como fonte de energia para a biota, resulta na formação de bioporos e na produção de agentes agregantes (mucilagens, polissacarídeos e hifas fúngicas, entre outros), levando à formação e estabilização de agregados que conferem ao solo uma estrutura porosa, resistente às forças externas (por exemplo, pressão de rodados) e capaz de se recuperar rapidamente quando submetida a tais forças (resiliente). Simultaneamente, o crescimento das raízes das culturas forma e estabiliza bioporos e agregados, por

meio da ação mecânica, liberação de exsudatos e formação de um ambiente (rizosfera) favorável à proliferação de microrganismos. Da mesma forma, a cobertura proporcionada pela palha conserva a umidade e modula a temperatura do solo, proporcionando um ambiente adequado à atividade biológica e, assim, à produção de agentes agregantes e à formação de bioporos pela meso e macrofauna. A maior umidade decorrente da cobertura, por sua vez, diminui a resistência mecânica do solo (RP) favorecendo o crescimento das raízes e, conseqüentemente, aumentando os efeitos das mesmas sobre a estrutura do solo.



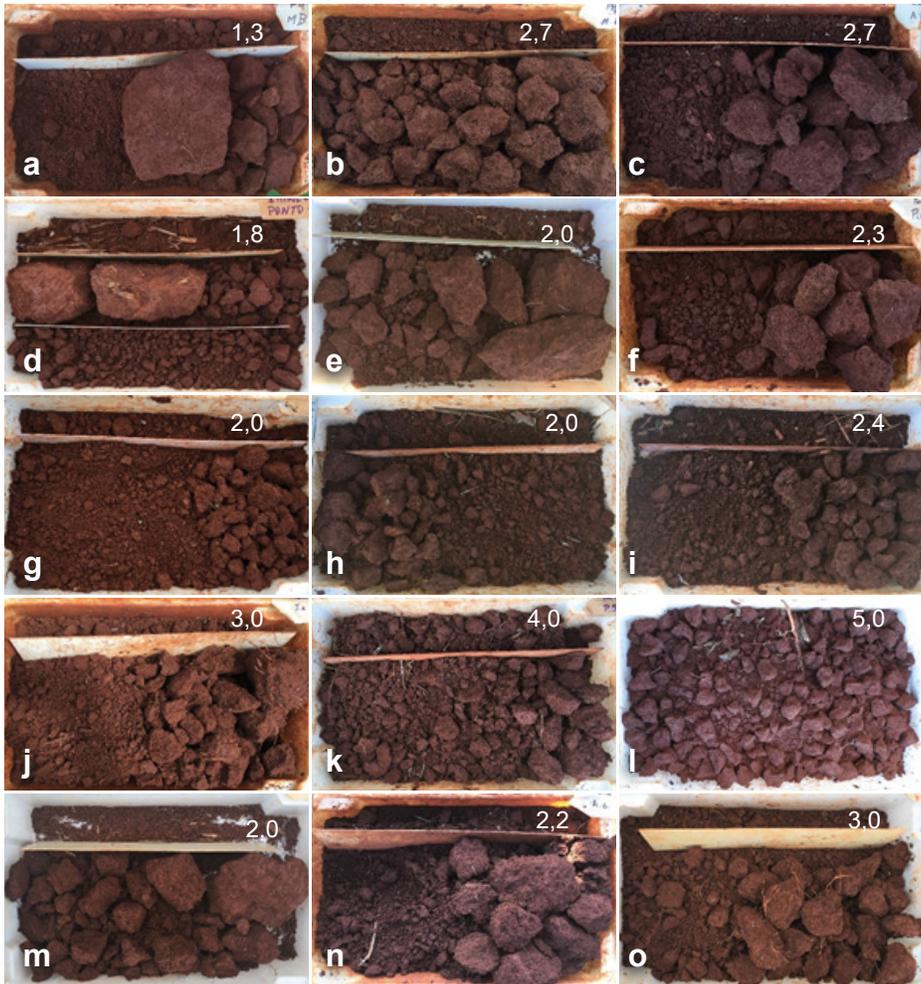
Adaptado de Debiasi et al. (2015).

**Figura 17.** Modelo conceitual simplificado do papel exercido pela diversificação de culturas na fertilidade estrutural do solo.

É importante ressaltar que os principais agentes agregantes são transitórios (Goldchin et al., 1997), de modo que os modelos de produção devem ser planejados para que a adição de fitomassa e a presença de raízes seja contínua ao longo do tempo e em quantidade e qualidade compatíveis com a demanda biológica (Denardin; Kochhann, 2006). Nesse estudo, das seis áreas manejadas com modelos de produção aprimorados, cinco utilizam a braquiária em cultivo solteiro ou consorciado ao milho 2ª safra (Tabela 2). Além da alta produção de palha e raízes, essa forrageira tem potencial para vegetar na área por mais tempo do que, por exemplo, o trigo e o milho dos modelos padrão da região, proporcionando assim maior constância na disponibilização de agentes agregantes e ambiente favorável à atividade biológica.

Imagens de amostras coletadas para avaliação do IQES pelo DRES, representativas dos diferentes manejos utilizados nas áreas monitoradas, são apresentadas na Figura 18. Nos modelos padrão sem preparo ou com gradagem, a análise visual das amostras indica degradação por compactação excessiva a partir de 8 cm de profundidade (Figura 18a-18f), evidenciada pelo predomínio de agregados/torrões grandes com superfícies de ruptura planas e em ângulo, além de poucas raízes. Na camada superficial dessas mesmas amostras, percebe-se a existência de estrutura degradada por pulverização excessiva, com maior intensidade nas áreas submetidas à gradagem (Figuras 18d, 18e e 18f). Além da ação mecânica dos discos da grade, essa pulverização pode ser atribuída à desagregação de estruturas compactadas pela ação dos mecanismos sulcadores das semeadoras e por ciclos de secagem e umedecimento, na ausência de quantidade significativa de material orgânico e raízes que promovam a formação e estabilização de agregados. Pela mesma razão, solo pulverizado esteve presente também na camada inferior em algumas amostras, entremeando os torrões compactados (Figuras 18a, 18c e 18f).

Já nos modelos padrão com escarificação, as imagens comprovam a degradação estrutural do solo por pulverização excessiva em ambas as camadas (Figuras 18g, 18h e 18i). Isso pode ser explicado principalmente pelo atrito das hastes e ponteiros em agregados/torrões compactados, em uma situação de baixa presença de raízes. Salienta-se que o efeito de pulverização do solo por hastes sulcadoras é favorecido quando a operação é realizada sob umidade excessivamente baixa e velocidades acima das recomendadas, (Ralisch et al., 2017). Adicionalmente, a escarificação reduz a estabilidade dos agregados (Nunes et al., 2014), tornando o solo mais suscetível à pulverização e/ou compactação, dependendo da natureza do distúrbio mecânico ao qual é submetido na sequência.



**Figura 18.** Aspecto visual de amostras diagnósticas da qualidade estrutural do solo (DRES), em áreas agrícolas avaliadas no Norte e Noroeste do Paraná (safra 2018/2019) sob diferentes manejos: modelo de produção padrão sem preparo (a, b, c), com gradagem (d, e, f) e com escarificação (g, h, i); e modelos de produção aprimorados, sem preparo (j, k, l) e com gradagem (m, n, o). Em cada foto, os números indicam o índice de qualidade estrutural da amostra (IQEA) pelo DRES.

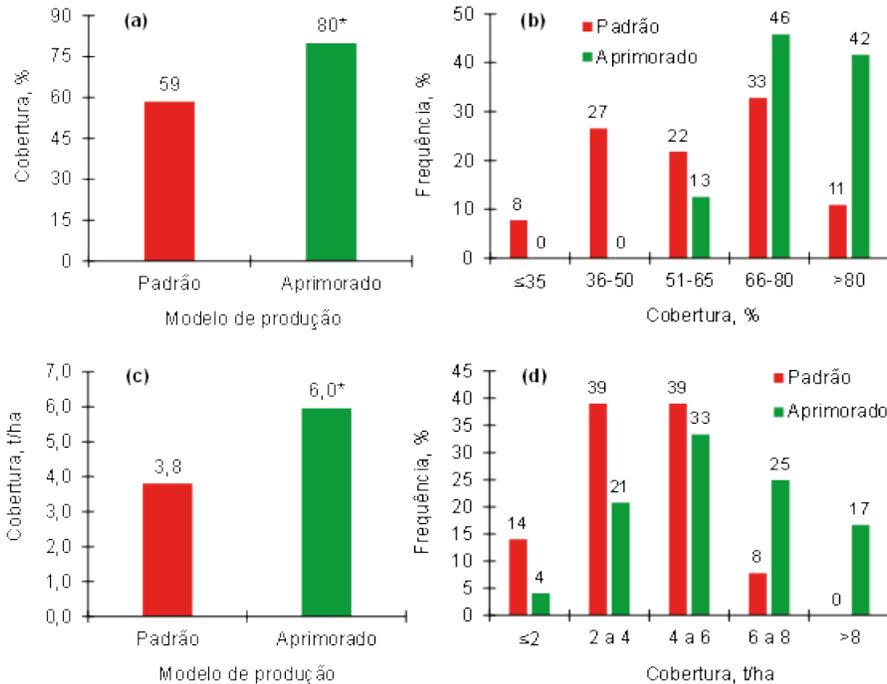
A presença de uma camada de solo pulverizado sobrepondo outra com compactação excessiva também pode ser observada nos modelos aprimorados com gradagem (Figuras 18m, 18n e 18o), indicando que o aumento da diversidade biológica e do aporte de palha e raiz não foi suficiente para contrabalançar os efeitos negativos do preparo do solo com esse implemento.

Por outro lado, nas amostras representativas de modelos aprimorados sem preparo do solo recente, é possível observar o predomínio de feições que indicam adequada estrutura do solo, com presença significativa de agregados arredondados e com tamanho entre 1 e 4 cm, além de maior homogeneidade morfológica entre as camadas detectadas (Figuras 18j, 18k e 18l). Entretanto, algumas áreas sob os modelos aprimorados apresentaram algum nível de degradação estrutural (Figura 18j), o que pode ser explicado principalmente pela adoção recente de tais modelos, bem como a problemas climáticos que prejudicaram o estabelecimento das espécies vegetais de outono-inverno.

Os modelos aprimorados proporcionaram maior porcentagem de cobertura e de massa de palha sobre o solo comparativamente aos modelos padrão (Figuras 19a e 19c), por envolveram o cultivo de espécies que produzem fitomassa em maior quantidade e/ou com maior persistência em relação ao trigo e ao milho. No caso da porcentagem de cobertura, 88% dos pontos avaliados nos modelos aprimorados apresentaram valores classificados como bons ou muito bons, proporção essa que foi reduzida pela metade (44%) nas áreas que adotam os modelos padrão (Figura 19b). A frequência relativa de pontos nas classes “bom” ou “muito bom” foi menor para a variável massa de palha, sendo os valores equivalentes a 8% e 42% para os modelos padrão e aprimorados, respectivamente. Em consequência, a proporção de pontos nas classes “ruim” e “muito ruim” foi mais alta para a massa de palha em comparação à porcentagem de cobertura, correspondendo a 53% e 25% nos modelos padrão e aprimorados, respectivamente.

A maior cobertura do solo nos modelos aprimorados proporciona diversos benefícios ao sistema de produção, tais como: redução da infestação de plantas daninhas e dos danos de determinadas doenças, como o mofo-branco; menor risco de erosão hídrica; modulação da temperatura do solo; e diminuição das perdas de água por evaporação, com o consequente aumento da disponibilidade de água às plantas. Isso se reflete em aumento de produtividade, redução dos custos de produção e melhor conservação do solo e da água (Debiasi et al., 2017; Balbinot Junior et al., 2017; 2020; Garbelini et al., 2020). Entretanto, é importante destacar que, mesmo nos modelos aprimorados, a massa de palha presente na superfície do solo foi inferior ao desejado (classes “regular”, “ruim” e “muito ruim”) na maioria das amostras (58%). Isso pode ser atribuído à baixa precipitação média no período de julho a setembro

nas regiões Norte e Noroeste do Paraná (Tabela 1), o que pode limitar o acúmulo de massa seca da braquiária quando em consórcio com o milho 2ª safra, principal alternativa utilizada pelos produtores para aprimoramento dos modelos de produção (Tabela 2).



\* Médias estatisticamente diferentes, pelo teste U de Mann-Whitney ( $p < 0,05$ ).

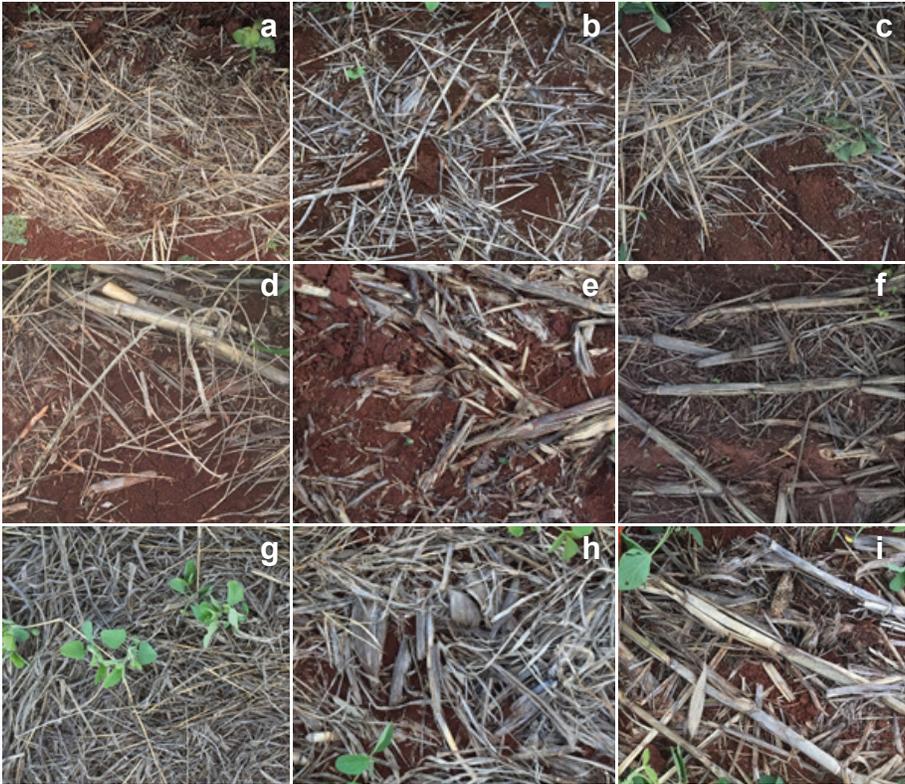
**Figura 19.** Médias (a, c) e freqüência relativa das amostras por classe de valores (b, d) nos modelos de produção padrão e aprimorado, para a porcentagem de cobertura (a,b) e a massa de palha (c,d) na superfície do solo, em áreas agrícolas consolidadas das regiões Norte e Noroeste do Paraná, safra 2018/2019.

Ressalta-se que a massa de material orgânico aportado ao solo, por meio da palha e das raízes das culturas que compõe o modelo de produção, é diretamente relacionada ao balanço de carbono no solo, determinando assim o teor de MOS ao longo do tempo. Nesse sentido, baixas adições de palha e raízes podem resultar em perda de MOS, com impactos econômicos e ambientais negativos (Bayer et al., 2016; Lopes et al., 2018; Mendes et al., 2019). Na prática, esses resultados apontam para a necessidade de adoção de modelos de produção que proporcionem aumento na massa de palha e

raízes adicionada ao solo, o que representaria assim um passo adiante no aprimoramento dos modelos.

O efeito das culturas de outono-inverno/2ª safra sobre a cobertura do solo é melhor exemplificado pelas imagens da Figura 20. Observa-se que a porcentagem de cobertura do solo proporcionada pelos restos culturais do trigo foi similar à do milho 2ª safra, apesar de a massa de palha do cereal de inverno ter sido cerca de 53% inferior (2,1 t/ha, contra 4,4 t/ha do milho 2ª safra). Isso demonstra que os restos culturais do trigo apresentam maior eficiência de cobertura comparativamente ao milho, equivalente a 27,1% e 13,4% de cobertura por tonelada de palha, respectivamente. Pressupondo uma relação linear entre % de cobertura e massa, tem-se que a cobertura total do solo (100%) ocorreria com 3,7 e 7,5 t/ha de palha de trigo e milho, respectivamente. A baixa eficiência de cobertura da palha do milho (%/t) deve-se ao fato de que a maior parte da massa de palha dessa espécie se concentra em colmos grossos e densos e, assim, com baixa capacidade de cobertura. Além disso, as folhas do milho decompõem-se rapidamente, diminuindo assim a eficiência e a persistência da cobertura. Adicionalmente, o espaçamento entrelinhas reduzido e o uso de picadores/espalhadores de palha na colheita resultam em melhor distribuição dos restos culturais do trigo, melhorando a eficiência de cobertura. Vale lembrar que a avaliação da cobertura do solo foi realizada, em geral, cerca de 21 dias após a emergência da soja, de forma que a decomposição ocorrida desde a colheita das culturas provavelmente influenciou os dados aqui relatados.

Por sua vez, as Figuras 20g a 20i comprovam visualmente a maior cobertura do solo proporcionada pela braquiária *ruziziensis*, em cultivo solteiro ou consorciado com o milho 2ª safra. Para essas duas opções de uso do solo no outono-inverno, a massa de palha média presente na superfície do solo no momento da avaliação foi de 6,5 t/ha, com uma porcentagem de cobertura média de 83%. Assim, a eficiência de cobertura para essas opções foi semelhante ao milho, equivalendo a 12,7%/t de palha. No caso da braquiária em cultivo solteiro (Figura 20g), a porcentagem de cobertura do solo foi de 100%, com uma massa de cerca 10 t/ha no momento da avaliação.



**Figura 20.** Aspecto visual da cobertura do solo em áreas agrícolas avaliadas no Norte e Noroeste do Paraná (safra 2018/2019) sob diferentes modelos de produção: padrão trigo/soja (a, b, c); padrão milho 2ª safra/soja (d, e, f); e aprimorado braquiária ruziziensis solteira (g) e consorciada com milho 2ª safra (h, i).

## Considerações finais

Não obstante as limitações impostas pelo pequeno número de áreas amostradas, o presente estudo indica que a qualidade do manejo do solo em sistemas de produção de grãos nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, inferida a partir do levantamento das práticas adotadas e da determinação de indicadores de fertilidade química e física do solo, está abaixo do desejado ante o conjunto de tecnologias e informações disponíveis ao produtor. Entre outras consequências, essa condição limita a produtividade de grãos e a estabilidade da produção, aumenta os custos e intensifica as perdas de água e solo por erosão.

Em ordem decrescente de importância, os principais fatores críticos à qualidade do manejo do solo na região do estudo são: 1) degradação da estrutura do solo, por compactação e desagregação excessivas; 2) baixa cobertura do solo; e 3) acidez do solo. Isso decorre do predomínio de modelos de produção com baixa diversidade biológica e aporte insuficiente de fitomassa da parte aérea e raízes; do uso frequente de operações de preparo do solo sem obedecer a critérios técnicos; e da ausência da realização de calagem e gessagem de acordo com recomendações embasadas em análises químicas do solo. A semeadura em desnível, a falta de manutenção dos terraços e, em alguns casos, ausência dos mesmos, também são aspectos que requerem atenção nas regiões Norte e Noroeste do Paraná.

Assim, é possível inferir que grandes avanços em termos de qualidade do manejo do solo nessas regiões são possíveis de serem obtidos mediante a utilização de práticas e tecnologias já validadas pela pesquisa e amplamente conhecidas pelos produtores. Entre elas, destacam-se a calagem com base nos laudos de análise química de solo, a utilização de modelos de produção com maior diversidade de plantas e aporte de palha e raízes, o mínimo revolvimento e a adoção correta de práticas de controle mecânico da erosão, como o terraceamento e o cultivo em nível. Neste contexto, as grandes inovações tecnológicas que vem sendo desenvolvidas e implementadas no âmbito da agricultura de precisão e digital são de grande importância para viabilizar avanços em aspectos básicos do manejo, como os aqui apontados.

Os resultados deste trabalho mostram claramente os impactos positivos proporcionados pela ausência de mobilização do solo e utilização de modelos de produção aprimorados, com maior diversidade biológica e adição de palha e raízes, em escala de lavoura. Além da maior cobertura do solo (porcentagem e massa), a adoção de tais modelos proporciona melhorias significativas na fertilidade estrutural do solo, com a formação de um ambiente favorável ao crescimento das raízes e com maior disponibilidade de água, o que certamente contribui para mitigar as perdas de produtividade por seca. Esses resultados têm sido utilizados como base de ações de comunicação e transferência de tecnologias regionalizadas, com foco na sensibilização dos produtores a respeito da importância de adotar tecnologias de manejo do solo já desenvolvidas e validadas pela pesquisa, que melhoram a estrutura e cobertura do solo e, dessa forma, favorecem o crescimento radicular da soja e proporcionam mais água disponível para a cultura.

A metodologia desenvolvida e utilizada neste estudo, envolvendo o levantamento das práticas de manejo adotadas pelos produtores, a determinação do IQP e a quantificação de indicadores de fertilidade do solo, em conjunto com o enquadramento dos dados em classes de interpretação, mostra-se de grande utilidade para avaliar o impacto de tecnologias e diagnosticar a qualidade do manejo em escala regional, permitindo identificar fatores relacionados ao solo que limitam a sustentabilidade da produção agrícola. Neste contexto, destaca-se a o cálculo de índices padronizados ( $ID_p$ ) para os indicadores de fertilidade do solo e sua apresentação em gráficos do tipo radar, o que permite a análise e interpretação simultânea dos mesmos eliminando distorções geradas por diferenças na escala de variação numérica.

A abordagem desenvolvida neste estudo pode ser reproduzida por cooperativas, órgãos de assistência técnica e empresas para fazer uma análise ampla da qualidade do solo, identificando gargalos no aumento da produtividade e rentabilidade nas diferentes regiões em que atuam. Também é relevante mencionar que o acompanhamento no tempo das variáveis avaliadas, nas mesmas áreas, fornece informações preciosas sobre a qualidade do manejo do sistema de produção, uma vez que o solo é a memória das práticas usadas no decorrer do tempo.

## Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 799-806, 2003.
- ALMEIDA NETO, O. B. de; MATOS, A. T. de; ABRAHÃO, A. P.; COSTA, L. M. da; DUARTE, A. Influência da qualidade da água de irrigação na dispersão da argila de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1571-1581, 2009.
- ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- AZEVEDO, A. C. de A.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, p. 609-617, 2004.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; COELHO, A. E.; SAPUCAY, M. J. L. da C.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L. Performance of soybean grown in succession to black oat and wheat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01654, 2020.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; YOKOYAMA, A. H. Contribution of roots and shoots of *Brachiaria* species to soybean performance in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 592-598, 2017.

BAYER, C.; GOMES, J.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; DIECKOW, J. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 161, p. 86-94, 2016.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da Matéria Orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. de O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 7-18.

BERTOLLO, A. M.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; SOLTANGHEISI, A.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; LEVIEN, R.; DEBIASI, H. Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 206, 104820, 2021.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G.; MANZATTO, C. V.; BOGNOLA, I. A.; FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P. de; POTTER, R. O.; CURCIO, G. R. **Mapa de solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 73 p. (Embrapa Solos, Documentos, 96).

CONAB. **Séries históricas das safras: grãos - por produto**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 4 maio 2021.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 281-284, 2004.

COSTA, M. J. N. da; PASQUALLI, R. M.; PREVEDELLO, R. Efeito do teor de matéria orgânica do solo, cultura de cobertura e sistema de plantio no controle de *Pratylenchus brachyurus* em soja. **Summa Phytopathologica**, v. 40, p. 63-70, 2014.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; NUNES, E. da S.; FURLANETTO, R. H.; MENDES, M. R. P. **Alternativas para diversificação de sistemas de produção envolvendo a soja no norte do Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 55 p. (Embrapa Soja. Documentos, 398).

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O. **Diversificação de espécies vegetais como fundamento para a sustentabilidade da cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 60 p. (Embrapa Soja. Documentos, 366).

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 603-612, 2010.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2629-2637, 2008.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. de F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, p. 224-233, 2015.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006, Passo Fundo. **Fertilidade em solo... (re) emergindo sistêmica**: resumos e palestras. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 8 p. 1 CD-ROM.

DERAL - DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. **Estimativa de safra**. 2021. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/safra>. Acesso em: 14 jun. 2021.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, v. 11, p. 199-238, 1988.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation. **Journal of Soil and Sediments**, v. 15, p. 2334-2346, 2015.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, v. 81, p. 87-95, 2005.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 159-168, 2016.

FIGUEIREDO, A.; MELO, T. R. de; OLIVEIRA, J. C. S. de; MACHADO, W.; OLIVEIRA, J. F. de; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; GUIMARÃES, M. de F. The no-tillage, with crop rotation or succession, can increase the degree of clay dispersion in the superficial layer of highly weathered soils after 24 years. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, p. 57-70, 2021.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; NITSCHKE, P. R.; DEBIASI, H.; LOPES, I. de O. N. **Variabilidade espacial e temporal da produção de soja no Paraná e definição de ambientes de produção**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 42 p. (Embrapa Soja. Documentos, 374).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RAMOS JR. E. U.; SILVA, J. F. V. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 274-278.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; JORGE, L. A. de C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; GODOY, C. V.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CORREA, F. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de. **Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 408).

GAERTNER, C.; DEDECEK, R. A.; BISCAIA, R. M. Produtividade de trigo e soja em Latossolo Vermelho distrófico sob erosão simulada e causada pela chuva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 1443-1449, 2003.

GARBELINI, L. G.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; TELLES, T. S. Profitability of soybean production models with diversified crops in the autumn-winter. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 4092-4103, 2020.

GASPARETTO, E. C.; BRAIDA, J. A.; CARNEIRO, M.; SCARIOT, J. J.; TABOLKA, C. L. Grau de floculação da argila de um Latossolo Vermelho utilizado com lavoura e mata nativa. **Sinergismus Scientifica UTFPR**, v. 04, n.1, 2009. 3 p.

GAZZIERO, D. L. P.; ADEGAS, F. S.; FORNAROLLI, D.; KARAM, D.; VARGAS, L.; VOLL, E.; PROCOPIO, S. O. Efeito da palhada de trigo na emergência de *Digitaria insularis* (capim-amargoso). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 6., 2012, Cuiabá. **Soja: integração nacional e desenvolvimento sustentável: resumos**. Brasília, DF: Embrapa, 2012b. p. 212, res. 374.

GAZZIERO, D. L. P.; VOLL, E.; FORNAROLLI, D.; VARGAS, L.; ADEGAS, F. S. Efeitos da convivência do capim-amargoso na produtividade da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 28., 2012, Campo Grande. **A ciência das plantas daninhas na era da biotecnologia: anais**. Campo Grande: SBCPD, 2012a. 6 p. Trab. 733. 1 CD-ROM. CBCPD.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. da S.; HÖRBE, T. de A. N.; FERREIRA, A. de O.; TABALDI, F. M.; LANZANOVA, M. E. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2115-2126, 2011.

GOLDCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, an aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. **Soil process and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

IAT – INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Folhas topográficas do Estado do Paraná 1:50.000**. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Dados-geoespaciais-de-referencia>. Acesso em: 12 maio 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017 - Tabela 6783**: Número de estabelecimentos agropecuários com bovinos, efetivos, venda e produção de leite, por grupos de área de pastagem e grupos de área total - resultados preliminares. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6783>. Acesso em: 11 jun. 2021.

IDR-PARANÁ - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ – IAPAR - EMATER. **Médias históricas em estações do IDR-Paraná**: estação de Londrina. [2021a]. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/medias-historicas/Londrina.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2021.

IDR-PARANÁ - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ – IAPAR - EMATER. **Médias históricas em estações do IDR-Paraná**: estação de Umuarama. [2021b]. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/medias-historicas/Umuarama.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2021.

IGWE, C. A.; OBALUM, S. E. Microaggregate stability of tropical soils and its roles on soil erosion hazard prediction. In: GRUNDAS, S.; STEPNIIEWSKY, A. **Advances in Agrophysical Research**. London: Intechopen, 2013. p. 175-192.

JORGE, L. A. de C.; SILVA, D. J. da C. B. **SisCob**: manual de utilização. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 18 p.

LAMEGO, F. P.; KASPARY, T. E.; RUCHEL, Q.; GALLON, M.; BASSO, C. J.; SANTI, A. L. Manejo de *Conyza bonariensis* resistente ao glyphosate: coberturas de inverno e herbicidas em pré-semeadura da soja. **Planta Daninha**, v. 31, p. 433-442, 2013.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 145-170, 2003.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; FIGUEIREDO, C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma**, v. 12, p. 72-82, 2018.

MARTINS, A. L. da S.; CONTE, O.; OLIVEIRA, P. de; DOSSA, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; HERNANI, L. C.; RALISCH, R.; LEONARDO, H. C. L.; LUNARDI, L.; SALTON, J. C.; TOMAZI, M.; PITOL, C.; DE BONA, F. D.; BOEIRA, R. C. **Avaliação ex ante do Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto (IQP) com produtores do Centro-Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 52 p. il. color. (Embrapa Solos. Documentos, 203).

MELO, T. R. de. **Argila mecanicamente dispersável em água: sugestão metodológica e comportamento em solos**. 2019. 102 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

MENDES, I. de C.; SOUZA, L. M. de; SOUSA, D. M. G. de; LOPES, A. A. de C.; REIS JUNIOR, F. B. dos; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, n. 155, p. 351-362, 2016.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Modelagem da dinâmica da água em sistemas de preparo de um Latossolo Vermelho. **Scientia Agraria** (online), v. 19, p. 142-152, 2018.

NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; MARRÉ, J.; MIELNICZUK, J. Insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2735-2744, 2008.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1723-1734, 2008.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 2019. 210 p.

NÓIA JUNIOR, R. de S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 140-151, 2019.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 531-539, 2014.

- OGDEN, C. B.; van ES, H. M.; SCHINDELBECK R. R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Science Society of American Journal**, v. 61, p. 1041-1043, 1997.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (Ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17). p. 133-184.
- ORTIGARA, C. **Propriedades físicas e hídricas de um Latossolo em diferentes sistemas de cultivo de longa duração**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen.
- ORTIGARA, C.; MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; SILVA, V. R.; FRANCHINI, J. C.; LUZ, F. B. Modeling of soil load-bearing capacity as a function of soil mechanical resistance to penetration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1036-1047, 2015.
- PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. de A.; ASSIS, R. L. de; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 1228-1236, 2013.
- PUSHKALA, S.; YAGARAJARAO, Y. Influence of different soil temperatures on water use, growth and internal water status of soybean. **Plant and Soil**, v. 109, p. 288-290, 1988.
- RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; DE BONA, F. D. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).
- REICHERT, J. M.; CABEDA, M. S. V.; VEIGA, M. da. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 289-298, 1992.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005.
- RIZZARDI, M. A.; FLECK, N. G.; VIDAL, R. A.; MEROTTO JR, A.; AGOSTINETTO, D. Competição por recursos do solo entre ervas daninhas e culturas. **Ciência Rural**, v. 31, p. 707-714, 2001.
- ROLOFF, G.; LUTZ, R. A. T.; MELLO, I. **Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto**. Ponta Grossa: FEBRAPD, 2011. 27 p. (FEBRAPDP. Boletim Técnico, 2).
- ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, p. 351-361, 1991.

SÁ, J. C. M.; SÁ, M. F. M.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, A. O. Dinâmica da matéria orgânica nos campos gerais. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. de O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole 1, 2008. p. 443-461.

SEAB – Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado do Paraná. **Núcleos Regionais**. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Nucleos-Regionais>. Acesso em: 11 jun. 2021.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8. p. 1394-1411, 2015.

SERATTO, C. D.; FRANCHINI, J. C.; SERATTO, F. R.; DEBIASI, H. SANTOS, E. L.; CONTE, O.; NETO, S. M.; BRISCHILIARI, V. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 67 p. (Embrapa Soja. Documentos, 424).

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P. dos; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2613-2620, 2008.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. P. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TORRES, E.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SARAIVA, O. F.; ALMEIDA, A. M. R. Manejo do solo na prevenção de doenças radiculares. In: ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. (Eds.). **Soja: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. p. 207-279.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).

WERNER, F.; FERREIRA, A. S.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SILVA, M. A. de A. Nitrogen, phosphorus, and potassium released by decomposition of palisade grass to soybean in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01853, 2020.

**Embrapa**

---

**Soja**

Parceria:

