

Passo Fundo, RS / Julho, 2026

Estratégias de manejo para redução de perdas de produtividade da soja sob déficit hídrico

Alvadi Antonio Balbinot Junior⁽¹⁾, Paulo Fernando Bertagnolli⁽¹⁾, Marcelo André Klein⁽²⁾,
Giovani Stefani Faé⁽²⁾, Genei Antonio Dalmago⁽¹⁾

⁽¹⁾Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS. ⁽²⁾Analista, Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.



Introdução

O déficit hídrico é o principal estresse abiótico que limita a produtividade da soja no mundo. A diferença entre a produtividade potencial e a produtividade obtida (*yield gap*) da cultura da soja atribuída à estiagem nos Estados Unidos (Grassini et al., 2015), Brasil (Sentelhas et al., 2015) e China (Wang et al., 2022) é de, aproximadamente, 30, 42 e 50%, respectivamente. No Brasil, a Região Sul é a mais afetada por estiagens (Andrea et al., 2018; Battisti et al., 2018; Winck et al., 2023). Em trabalho desenvolvido por Sentelhas et al. (2015), constatou-se que o estado brasileiro que apresenta o maior *yield gap* na cultura da soja, decorrente do déficit hídrico, é o Rio Grande do Sul, chegando a valores superiores a 2.500 kg ha⁻¹.

Para exemplificar a dimensão dos danos decorrentes do déficit hídrico na cultura da soja, na safra 2021/2022 foram estimadas perdas de 1.680, 600 e 1.620 kg ha⁻¹ para o RS, SC e PR, respectivamente (Foloni et al., 2023). Portanto, estima-se que o déficit hídrico reduziu a produção de grãos de soja na Região Sul do país em 20,4 milhões de toneladas, em apenas uma safra. Nesta mesma safra, foram registradas perdas significativas de milho, feijão comum e outras culturas graníferas. Em uma análise mais ampla, observa-se que nas últimas 20 safras, a

produtividade média de soja nos estados da Região Sul do país foi menor que 3.000 kg ha⁻¹ em 11 safras (Companhia Nacional de Abastecimento, 2026), sendo o déficit hídrico o principal estresse responsável pelas baixas produtividades, aumentando os reportes de sinistros em lavouras (Foloni et al., 2023). Estas perdas impactaram não somente os produtores de grãos, mas todas as cadeias dependentes dessas matérias-primas, como as de aves, suínos, bovinocultura leiteira e piscicultura.

As condições de *El Niño* e *La Niña* são responsáveis por alterações climáticas que podem prejudicar a produção agropecuária. Cenários desfavoráveis elevam a demanda por seguros agrícolas em áreas mais expostas aos impactos desses fenômenos. Esse problema foi explorado por Guimarães e Igari (2019), que observaram aumento dos sinistros na Região Sul do país em anos de ocorrência do fenômeno *La Niña*. Em análise realizada por Torres et al. (2023), constatou-se que, no período de 2006 a 2021, o índice de sinistralidade da soja na Região Sul do país foi superior a 1,0 em cinco anos, indicando que o prêmio arrecadado pelas seguradoras foi inferior ao pagamento de indenizações decorrentes de sinistros, sobretudo por déficit hídrico. Esses dados alertam sobre a possível

insustentabilidade do seguro agrícola no Brasil frente aos riscos climáticos associados e reforçam a necessidade de novas abordagens de manejo dos sistemas de produção, visando aumentar a resiliência das lavouras aos estresses abióticos.

As perdas históricas por déficit hídrico demonstram a elevada vulnerabilidade climática presente na Região Sul do país, situação agravada pela vulnerabilidade dos solos em determinadas regiões, especialmente em áreas com solos de textura arenosa ou média e com baixa profundidade efetiva, como aquelas localizadas no Noroeste do PR e Sul do RS. Para agravar o desafio da produção de grãos em condições de vulnerabilidade climática e edáfica, evidências científicas indicam que a temperatura média do planeta poderá aumentar nos próximos anos, com implicações diretas em mudanças nos índices de risco que governam o desempenho das culturas de grãos, entre os quais se destaca a duração e a intensidade dos períodos de estiagem (Yang et al., 2024). Portanto, as perdas por déficit hídrico em culturas relevantes para diferentes cadeias produtivas do agronegócio da Região Sul são um problema alarmante e complexo. Somando-se a esse cenário de desafios ambientais, há uma pressão crescente sobre os sistemas agroalimentares no sentido de aumentar a produção de alimentos, em decorrência do aumento populacional. Assim, os sistemas agroalimentares precisam ser aprimorados para conciliar a resiliência das culturas com a intensificação da produção, a eficiência do uso de recursos e a rentabilidade por área (Garbelini et al., 2020, 2022), garantindo a segurança alimentar e de outros bens necessários à humanidade.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar e discutir as principais estratégias de manejo disponíveis aos agricultores para reduzir as perdas de produtividade da soja decorrentes de déficit hídrico. O presente trabalho contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 – Fome zero e agricultura sustentável e (ODS) 6 – Água potável e saneamento.

Principais estratégias para mitigar perdas decorrentes de déficit hídrico

Atualmente, já estão mapeadas várias abordagens para reduzir os danos do déficit hídrico na cultura da soja, principalmente relacionadas às práticas de manejo do solo e da cultura e o adequado posicionamento de cultivares (Foloni et al., 2023). A integração destas abordagens é fundamental para

o alcance de resultados significativos. É importante frisar que as estratégias apresentadas a seguir são relevantes para tornar a cultura da soja mais resiliente ao déficit hídrico, mas em situações extremas de seca, as perdas, inclusive totais, podem ser inevitáveis.

Um ponto que merece destaque é que, nos últimos anos, o cultivo da soja tem se expandido em áreas com solos de textura arenosa ou solos rasos. Essa situação aumenta significativamente os riscos de perdas por estresse hídrico. Adicionalmente, parte-se do princípio que a semeadura da cultura da soja atende ao que está indicado no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc). Um dos objetivos do Zarc é delimitar áreas e épocas de semeadura para que os agricultores tenham condições de cultivo com as menores probabilidades de perdas de produtividade por déficit hídrico. O Zarc determina a frequência de ocorrência de déficit hídrico no período mais crítico da soja, do florescimento ao enchimento de grãos, em função da época de semeadura, demanda evapotranspiratória da cultura, disponibilidade hídrica do solo e ciclo da cultivar. Ou seja, a semeadura da soja conforme o Zarc é fundamental para os reduzir riscos na sojicultura e pode ser considerada a primeira estratégia macrorregional para reduzir impactos negativos.

Manejo do solo e diversificação de espécies cultivadas

O manejo do solo orientado nos fundamentos do sistema plantio direto (SPD) é amplamente reconhecido como uma das principais estratégias para mitigação das perdas de produtividade da soja decorrentes de estiagem (Franchini et al., 2012). De forma simplificada, o adequado manejo do solo tem como focos: (1) aumento da taxa de infiltração de água no solo, reduzindo perdas de água via erosão e diminuição da evaporação da água, por meio de palhada sobre o solo; (2) aumento do aporte de matéria orgânica e da formação de bioporos contínuos e estáveis, a partir de sucessivos ciclos de rotação de culturas comerciais e de serviço; e (3) favorecimento da funcionalidade e do aprofundamento das raízes por meio de melhorias da qualidade química, física, biológica e fitossanitária do solo (Debiasi et al., 2022).

A maioria das áreas agricultáveis do Brasil apresenta atributos químicos inadequados, como elevada acidez, concentrações de alumínio (Al) em níveis tóxicos e deficiência de nutrientes que restringem a produtividade da soja (Oliveira Junior et al., 2020). No tocante ao enraizamento das plantas, as

limitações no perfil do solo estão associadas principalmente a elevados teores de Al e baixos teores de cálcio (Ca). A toxidez de Al inibe o desenvolvimento das raízes e os baixos teores de Ca também restringem o crescimento radicular (Foloni et al., 2023). A calagem é uma prática relevante para o manejo de solos ácidos no Brasil, pois, além de reduzir a acidez, incrementa a atividade microbiana e a disponibilidade de vários nutrientes como o Ca, magnésio (Mg), enxofre (S), fósforo (P) e potássio (K), com retorno econômico positivo (Oliveira Junior et al., 2020; Foloni et al., 2023). A gessagem é outra prática que confere aumentos dos teores de Ca em subsuperfície, estimulando o crescimento de raízes. Portanto, a correção química do solo é condição essencial para o crescimento de raízes e, consequentemente, maior tolerância à estiagem.

Os atributos físico-hídricos relacionados ao crescimento radicular da soja são a disponibilidade hídrica, resistência mecânica à penetração, temperatura e porosidade. Contudo, do ponto de vista de estratégias de manejo, o monitoramento do estado de estruturação do solo é fator chave para se ter diagnóstico adequado da qualidade física porque este atributo é passível de ser rapidamente melhorado por meio de práticas agronômicas (Ralisch et al., 2017; Debiasi et al., 2022). Nesse contexto, áreas com elevado grau de compactação precisam ser corrigidas via cultivo de plantas de serviço, também chamadas de plantas de cobertura, com elevado crescimento de raízes, formando bioporos em profundidade e em grande quantidade, ou práticas mecânicas, quando necessárias.

Alguns problemas fitossanitários podem prejudicar o crescimento radicular da soja, os quais, quando acontecem simultaneamente ao déficit hídrico, ocasionam perdas expressivas de produtividade de grãos. Essa situação é corriqueiramente observada em lavouras de soja no Brasil. As raízes da soja podem ser danificadas principalmente por fungos, oomicetos e nematoides, além de insetos-praga. As principais doenças radiculares da soja são as podridões de *Fusarium* spp., *Macrophomina phaseolina*, *Phytophthora sojae* e *Corynespora cassiicola*, além das que são causadas por nematoides-de-cisto (*Heterodera glycines*), nematoides-de-galhas (*Meloidogyne javanica* e *Meloidogyne incognita*), nematoides-reniforme (*Rotylenchulus reniformis*) e nematoides-das-lesões-radiculares (*Pratylenchus* spp.) (Seixas et al., 2020). A utilização de sistemas de produção diversificados, com a inclusão de culturas comerciais ou de serviços não hospedeiras das pragas ora citadas, é uma estratégia indicada para preservar o sistema radicular da

soja, maximizando a capacidade de absorção da água presente no solo.

A adequada qualidade do solo, aliada a menor pressão de fitopatógenos de solo, propicia o crescimento vigoroso de raízes, incrementando a profundidade efetiva do sistema radicular (Ze). A Ze diz respeito à profundidade do perfil do solo que as raízes das culturas podem efetivamente extrair água e nutrientes para o seu crescimento. É um dos fatores que influencia a produtividade dos cultivos e um parâmetro fundamental em modelos usados para estimar a capacidade de água disponível no solo (CAD) para a cultura. O aumento da Ze resulta em maior CAD, o que, evidentemente, reduz o risco de perdas de produtividade por deficiência hídrica (Debiasi et al., 2022).

O cultivo de plantas de serviço ou forrageiras bem manejadas, nos períodos não cultivados com as culturas de grãos, em SPD, tem elevado potencial de aumentar a resiliência dos sistemas de produção frente ao déficit hídrico (Franchini et al., 2012; Balbinot Junior et al., 2024; Debiasi et al., 2025). Isso ocorre porque essas plantas conferem elevado crescimento de raízes, fundamental para a estruturação do solo e formação de bioporos contínuos e estáveis em SPD, incrementando a infiltração e a retenção de água no solo (Bertollo et al., 2021) e os estoques de carbono orgânico no perfil do solo (Besen et al., 2024), além da formação de palhada, que reduz picos de temperatura do solo e as perdas de água por evaporação (Li et al., 2022). Os bioporos contínuos formados após a decomposição das raízes das plantas de serviço e forrageiras facilitam o crescimento das raízes das plantas de culturas de grãos em camadas subsuperficiais, aumentando a profundidade efetiva radicular e, consequentemente, a CAD, sendo o principal fator para a tolerância ao déficit hídrico, desde que não haja impedimentos físicos e químicos (Ullah et al., 2019; Bertollo et al., 2021; Debiasi et al., 2022).

Na região Norte do Paraná foi realizada uma pesquisa para avaliar o impacto do cultivo de braquiária ruziziensis como planta de serviço no outono/inverno, milho segunda safra e pousio sobre o crescimento de raízes de soja cultivada em sucessão, até dois metros de profundidade. Neste trabalho, Pereira (2025) observou maior crescimento de raízes de soja no perfil do solo quando cultivada após braquiária ruziziensis, comparativamente ao milho e ao pousio (Figura 1). O maior crescimento de raízes em profundidade impactou na maior lâmina de água disponível à soja cultivada após a braquiária (Figura 2). Isso explica, em parte, a maior produtividade e estabilidade produtiva da soja após a

braquiária *ruziziensis* em relação ao milho e ao pousio (Balbinot Junior et al., 2024). Adicionalmente, Pereira et al. (2025) verificaram os efeitos positivos da braquiária *ruziziensis*, utilizada como planta de serviço, sobre indicadores de qualidade biológica do solo. É importante salientar que os resultados apresentados se referem ao milho segunda safra, que apresenta menor produção de biomassa, comparativamente ao milho de safra, que apresenta elevado

impacto positivo na qualidade do solo, sendo altamente recomendado em rotação com a soja.

Em uma análise dos efeitos das raízes e/ou da palhada de braquiárias, aveia preta e trigo antecedendo a soja, sobre a produtividade de grãos, Balbinot Junior et al. (2017, 2020) observaram que os efeitos positivos das raízes destas culturas foram mais relevantes do que o efeito da palhada sobre o desempenho da soja em sucessão, em SPD. Estes

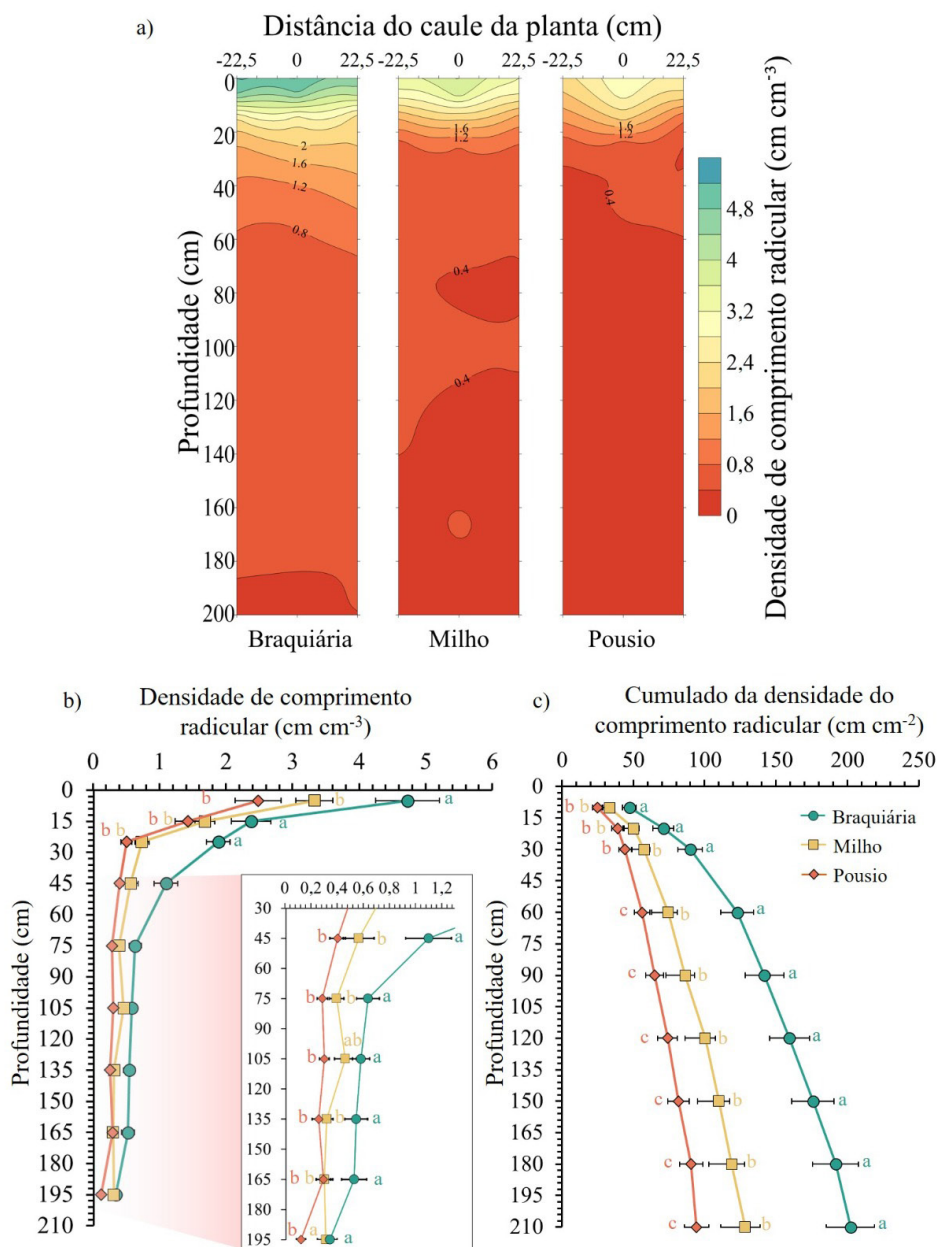


Figura 1. Distribuição da densidade de comprimento de raízes de soja no perfil do solo em função de cultivos prévios (a), densidade do comprimento radicular (b), e acumulado da densidade do comprimento radicular (c) da soja em diferentes profundidades do solo. As linhas horizontais representam o erro padrão da média. As médias foram comparadas pelo teste de Student-Newman-Keus ($p < 0,05$).

Adaptado de Pereira (2025).

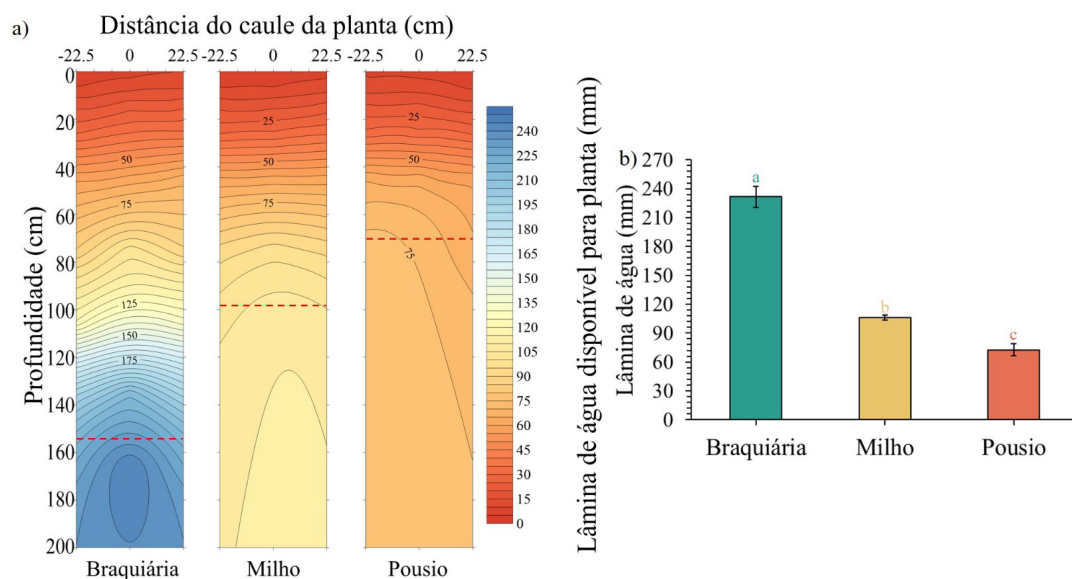


Figura 2. Distribuição da lâmina de água disponível para a soja no perfil do solo em função de cultivos prévios (a), onde as linhas horizontais tracejadas em vermelho equivalem a profundidade efetiva radicular. Lâmina de água disponível para a soja (b) em função das culturas antecessoras. As linhas verticais representam o erro padrão da média. As médias foram comparadas pelo teste de Student-Newman-Keus ($p < 0,05$).

Adaptado de Pereira (2025).

resultados demonstraram, de forma consistente, o papel dos bioporos e da estruturação do solo pelas raízes da aveia preta, do trigo e das braquiárias no favorecimento do crescimento das raízes da soja cultivada na sequência. Dessa forma, a utilização de parte da biomassa das plantas de serviço para confecção de silagem, quando possível, pode ser uma alternativa para conciliar resiliência a estresses, eficiência do uso de recursos e intensificação econômica dos modelos de produção de grãos. Enfatiza-se que o produtor pode vender a silagem para produção de carne ou leite, não necessariamente tendo que utilizá-la na própria propriedade. Entretanto, é importante considerar que a confecção de silagem implica na exportação de nutrientes e elevado tráfego de máquinas nas lavouras, o que pode aumentar a compactação e reduzir a disponibilidade de nutrientes no solo.

Na região Sul do país, além da oportunidade de melhorar a utilização das áreas agrícolas no outono/inverno, em condições mais desafiadoras para a produção de grãos, com maiores restrições de clima e/ou solo, as plantas forrageiras podem ser utilizadas em períodos mais longos, inclusive na primavera/verão, em rotação com as culturas de grãos estivais (Franchini et al., 2016). No Sul do RS há predominância de terras baixas, que são vulneráveis a períodos de excesso ou carência hídrica.

Uma das soluções para essa situação é a utilização do 'sistema sulco-camalhão', no qual as culturas são semeadas na parte superior de um pequeno camalhão de, aproximadamente, 30 cm de altura, que pode ser irrigado, com a água sendo conduzida por meio dos sulcos entre os camalhões. Esta técnica necessita de intenso preparo de solo para a confecção dos camalhões, carecendo de alternativas para reestruturar rapidamente o solo (Theisen et al., 2025). Sob essa ótica, a utilização de plantas de serviço no outono/inverno surge como uma prática que, potencialmente, atende essa necessidade.

Uma alternativa que vem ganhando destaque é a utilização de consórcios de espécies de plantas de serviço ou forrageiras como, por exemplo, a mistura de aveia-preta, nabo-forrageiro e ervilhaca. A base dessa técnica é que o uso de diferentes espécies, com características morfofisiológicas distintas, pode ampliar a utilização de nichos ecológicos, aumentando a produção de biomassa aérea e radicular e possibilitando ampla gama de funcionalidades, tanto no âmbito de melhoria da qualidade e da conservação do solo (Souza et al., 2025), quanto na redução de alguns problemas fitossanitários, notadamente a infestação de plantas daninhas, que podem competir com a soja por água, luz e nutrientes.

Cultivares de soja com crescimento vigoroso de raízes

Na literatura, há vários trabalhos que caracterizaram a tolerância ao déficit hídrico em cultivares de soja, por meio de variáveis fisiológicas, como a condutância estomática, a fotossíntese, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e a eficiência quântica, ou seja, a eficiência de conversão de luz em energia via fotossíntese (Poudel et al., 2023). Um dos primeiros processos fisiológicos afetados negativamente pelo déficit hídrico é a FBN. Portanto, o uso de cultivares que conseguem manter a FBN em restrição hídrica, associado ao uso de estipes melhoradas de *Bradyrhizobium* spp. é relevante para a manutenção da assimilação de nitrogênio nas plantas, contribuindo para a redução das perdas de produtividade.

O crescimento vigoroso de raízes, explorando o perfil do solo em camadas subsuperficiais é reconhecido como um importante mecanismo para maximizar a utilização da água presente no solo. Nesse contexto, na safra 2024/2025 constatou-se diferenças expressivas no crescimento radicular de cultivares de soja na camada de 0-100 cm (Figura 3). Dentre as cultivares investigadas, a que apresentou o menor comprimento radicular foi a BMX Zeus IPRO, na qual o crescimento de raízes foi baixo e restrito à camada superficial do solo. Por outro lado, observou-se quantidade expressiva de raízes nas demais cultivares até um metro de profundidade.

As cinco cultivares avaliadas quanto ao crescimento de raízes foram cultivadas em Passo Fundo, Gentil e Vacaria, RS, na safra 2024/2025. Nestes

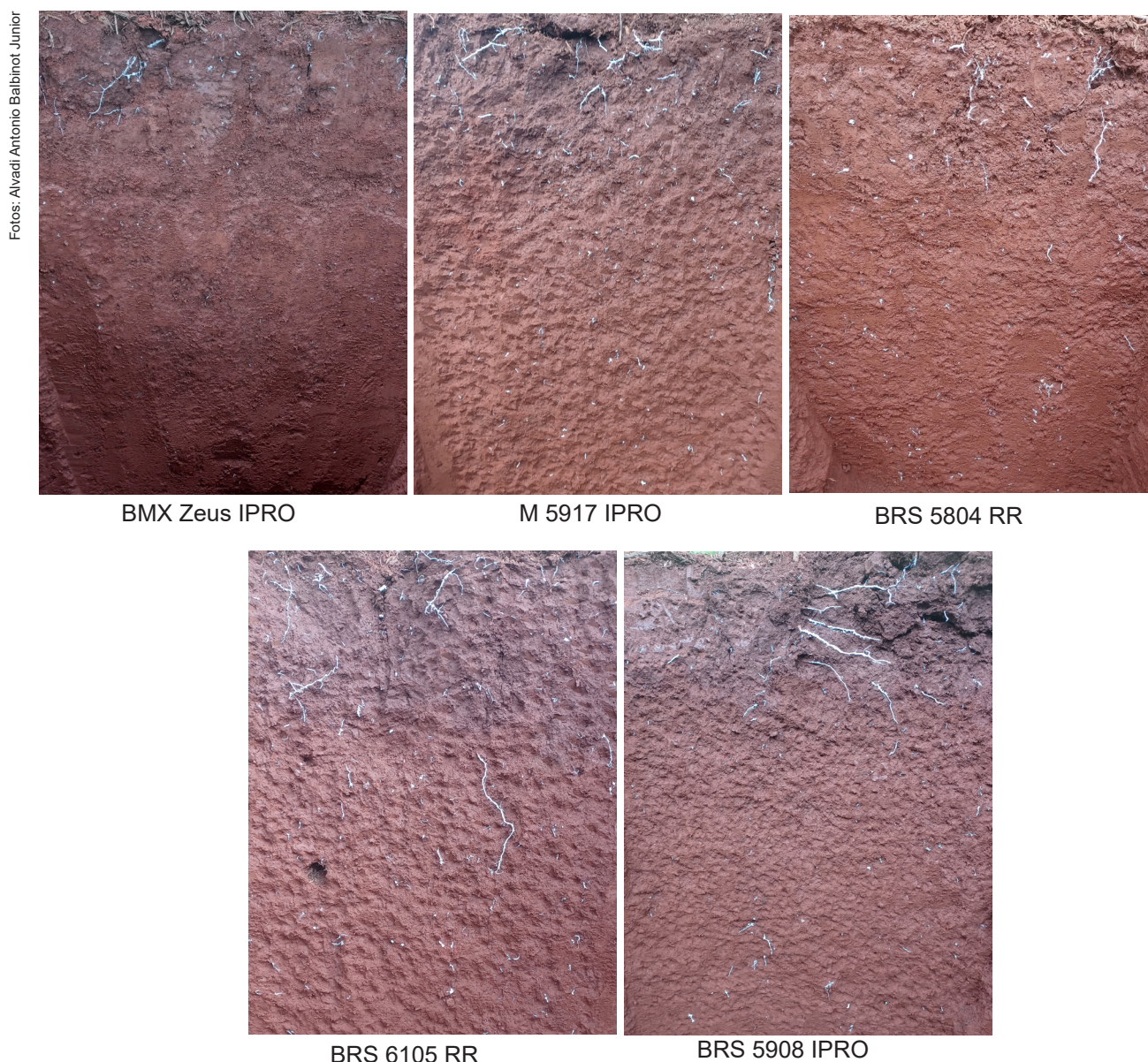


Figura 3. Crescimento de raízes de soja na camada de 0-100 cm de profundidade, em cinco cultivares, no final do enchimento de grãos. As raízes foram pintadas com tinta branca. Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, safra 2024/2025.

locais, foi estimado o balanço hídrico climático sequencial diário durante o ciclo de desenvolvimento da soja. Dados de temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa máxima (%), umidade relativa mínima (%) do ar, velocidade do vento (m s^{-1}), precipitação pluvial (mm) e radiação solar global incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) foram compilados de estações meteorológicas automáticas para simular o balanço hídrico. Para os municípios de Passo Fundo e Vacaria no RS foram utilizadas as estações do Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia) localizadas nos mesmos municípios, enquanto para o município de Gentil, RS, foi utilizada a estação meteorológica pertencente ao Simagro (Sistema de Monitoramento e Alertas Agroclimáticos) da Secretaria de Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação, do estado do Rio Grande do Sul, localizada no município de David Canabarro, RS, a qual é a mais próxima de Gentil, RS.

O método do balanço hídrico (BH) aplicado foi adaptado de Thornthwaite e Mather (1955), conforme descrito por Pereira (2005), utilizando a CAD fixa de 75 mm. A evapotranspiração de referência foi calculada pelo modelo de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO. O armazenamento diário de água no solo (Armaz, mm) foi extraído do BH e utilizado para caracterizar o déficit hídrico durante o ciclo da soja. Considerou-se o limite de 80% da CAD como início da restrição de água no solo que causa impacto negativo na produtividade de grãos da cultura.

Em Passo Fundo ocorreu déficit hídrico intenso durante o período de formação de vagens e enchimento dos grãos, notadamente dos 60 dias após a semeadura (DAS) até o final do ciclo de desenvolvimento (Figura 4). Nesta condição de restrição hídrica, a cultivar BRS 5804 RR se destacou na primeira época de semeadura, superando a cultivar BMX Zeus IPRO (Figura 5). Na segunda época, a cultivar

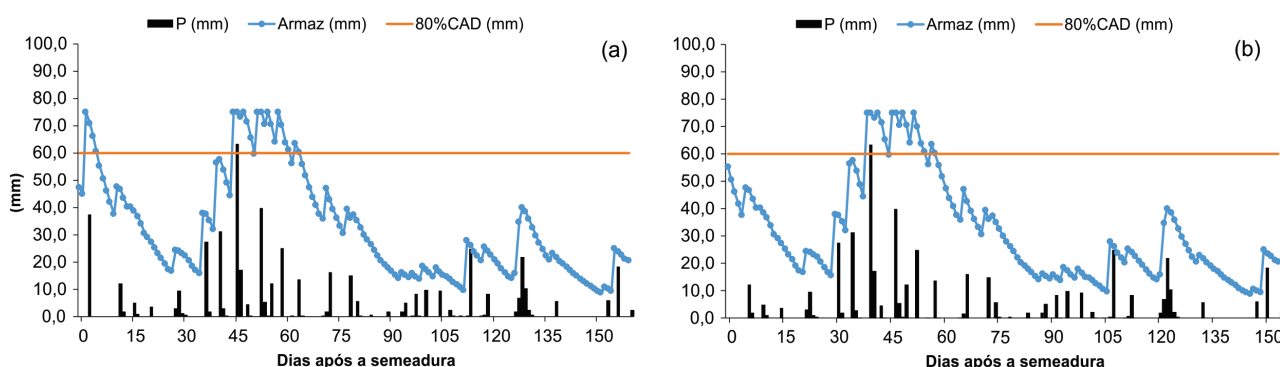


Figura 4. Armazenamento de água no solo (Armaz) extraído da simulação do balanço hídrico climático diário para a capacidade de água disponível (CAD) de 75 mm, com os respectivos limites de 80% da CAD e a precipitação pluvial (P) ocorrida no ciclo da soja em duas épocas de semeadura, 22/10/2024 (a) e 28/10/2024 (b). Passo Fundo, RS.

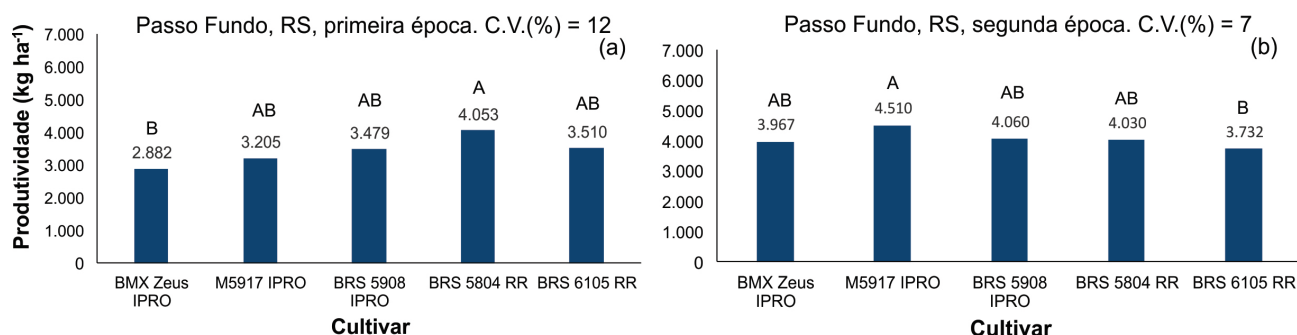


Figura 5. Produtividade de cinco cultivares de soja em duas épocas de semeadura, 22/10/2024 (a) e 28/10/2024 (b). Médias comparadas pelo teste Tukey ($p<0,05$). Passo Fundo, RS.

M5917 IPRO apresentou maior produtividade em relação à BRS 6105 RR, não diferindo das demais cultivares.

Em Gentil também ocorreu restrição hídrica durante as fases de formação de vagens e enchimento dos grãos de soja, embora em menor intensidade do que em Passo Fundo (Figura 6). Nessa condição, a cultivar que se destacou com maior produtividade foi a BRS 5804 RR (Figura 7). É importante mencionar que a cultivar BMX Zeus IPRO, apesar de apresentar alto potencial de produtividade de grãos, nas condições de déficit hídrico observadas em Passo Fundo e Gentil, apresentou menor produtividade, corroborando a observação de que apresenta sistema radicular pouco vigoroso, o que restringe a absorção de água presente abaixo dos 20 cm de

profundidade, aumentando as perdas de produtividade de grãos na presença de déficit hídrico.

Em Vacaria, ocorreu déficit hídrico moderado no início do ciclo da soja e na fase de formação de vagens (Figura 8). Contudo, após 90 DAS voltou a chover significativamente. Em função de ser um ambiente de produção favorável à soja, em razão de temperaturas mais amenas e menor déficit hídrico, a produtividade média observada em Vacaria foi alta, ao redor de 6.500 kg ha⁻¹, sem diferenças entre as cultivares avaliadas (Figura 9), diferentemente do que foi constatado em Passo Fundo e Gentil. Nesse contexto, em ambiente com pouca restrição hídrica houve nivelamento do desempenho das cultivares avaliadas, sendo as diferenças observadas somente quando o estresse foi mais intenso. Esse resultado indica que, de forma geral, a cultivar BRS 5804

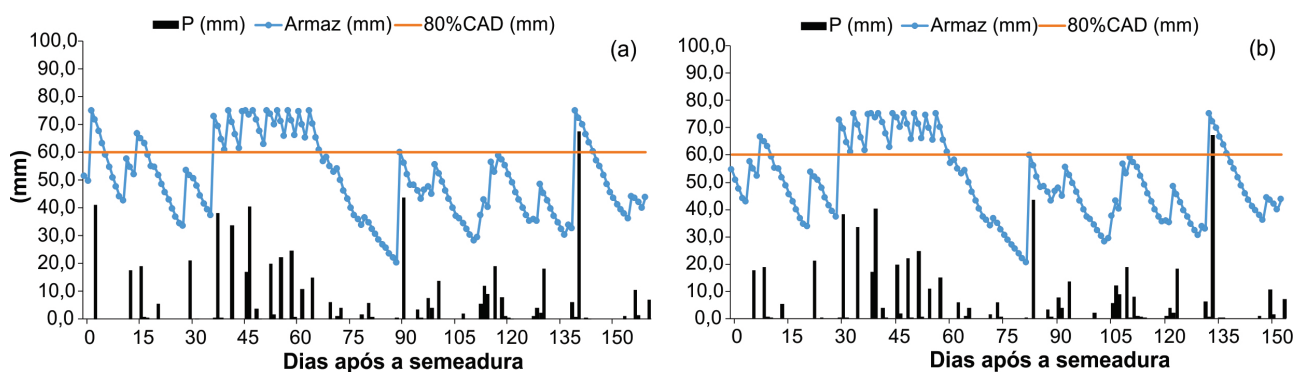


Figura 6. Armazenamento de água no solo (Armaz) extraído da simulação do balanço hídrico climatológico diário para a capacidade de água disponível (CAD) de 75 mm, com os respectivos limites de 80% da CAD e a precipitação pluvial (P) ocorrida no ciclo da soja em duas épocas de semeadura, 22/10/2024 (a) e 29/10/2024 (b). Gentil, RS.

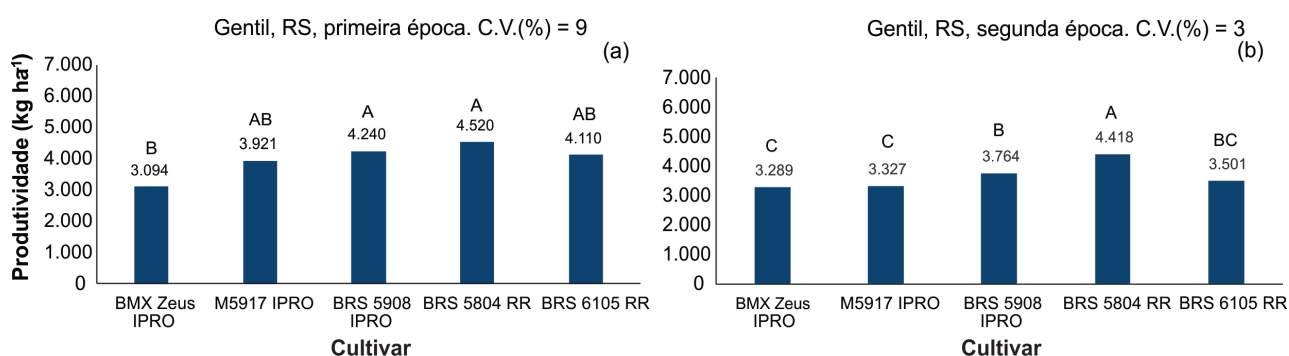


Figura 7. Produtividade de cinco cultivares de soja em duas épocas de semeadura, 22/10/2024 (a) e 29/10/2024 (b). Médias comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Gentil, RS.

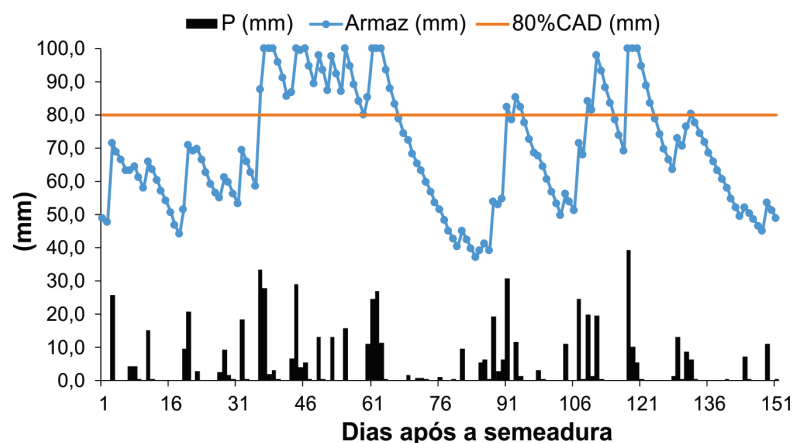


Figura 8. Armazenamento de água no solo (Armaz) extraído da simulação do balanço hídrico climatológico diário para a capacidade de água disponível (CAD) de 75 mm, com os respectivos limites de 80% da CAD e a precipitação pluvial (P) ocorrida no ciclo da soja, Vacaria, RS.

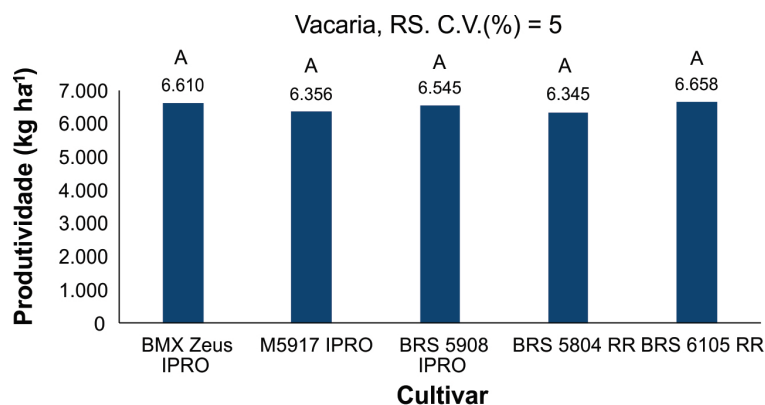


Figura 9. Produtividade de cinco cultivares de soja, em Vacaria, RS, safra 2024/2025.

RR se destacou em condições de deficiência hídrica e, por outro lado, apresentou alto teto produtivo em ambiente mais favorável, conciliando potencial produtivo com resiliência.

Escalonamento de semeadura com cultivares de ciclo distintos

Outra estratégia relevante é escalonar a semeadura com cultivares de soja com ciclos distintos, em diferentes épocas de semeadura, o que reduz o risco de se ter dano de produção generalizado devido ao déficit hídrico, atingindo toda a lavoura de soja justamente na fase mais crítica da cultura (estádio fenológico que engloba do florescimento ao final do enchimento dos grãos). Na prática, esse escalonamento também é importante para viabilizar no tempo as operações de semeadura, pulverizações

e colheita com as máquinas disponíveis na propriedade rural. Porém, para agricultores que apresentem pouca área de cultivo e dependem de serviço terceirizado, o escalonamento é mais complexo de ser efetivado.

Irrigação

Uma das formas mais lógicas para reduzir as perdas de produtividade de sistemas de produção em que a soja esteja inserida é a irrigação. Especialistas ressaltam que no Brasil deve haver expansão da irrigação em sistemas de produção de grãos, a fim de atender a demanda mundial por alimentos e, concomitantemente, minimizar a pressão por abertura de novas áreas de cultivo (Foloni et al., 2023). Oliveira et al. (2020) concluíram que a implantação de um sistema de irrigação por pivô central é viável

para o cultivo de milho grão, feijão, soja e milho para silagem, considerando um horizonte de cinco anos de retorno do investimento. É evidente que a análise econômica da viabilidade de sistemas de irrigação vai depender das características de cada empreendimento e o retorno do investimento é maior em culturas altamente responsivas à irrigação, como o milho.

Para que a expansão dos sistemas irrigados seja ambientalmente sustentável, enfatiza-se que é imprescindível a gestão eficiente dos recursos hídricos, pois a água é geograficamente e temporalmente limitada (Rodrigues et al., 2022; França et al., 2024). Portanto, considerando a grande extensão de cultivo de soja no Brasil, aproximadamente 48,4 milhões de hectares na safra 2025/2026 (Companhia Nacional de Abastecimento, 2026), é evidente que a viabilidade de irrigação se restringe a uma parcela restrita desta área, seja pela carência de água ou restrições ambientais, de energia e recursos financeiros para instalação de equipamentos de irrigação.

Os custos de instalação de equipamentos de irrigação e de energia para o seu funcionamento são elevados, exigindo gestão eficiente do uso para maximizar os retornos financeiros do sistema implantado (Gava et al., 2023). Há várias metodologias que podem ser usados rotineiramente para definir o momento de irrigar e a quantidade de água a ser aplicada, os quais podem ser agrupados da seguinte forma: (1) indicadores do nível de estresse por déficit hídrico nas plantas; (2) indicadores da capacidade de água disponível no perfil do solo; e (3) indicadores de variáveis atmosféricas que influenciam a condição hídrica da cultura (Marouelli et al., 2011). Com o intuito de buscar constantes incrementos de eficiência de uso da água nas lavouras irrigadas, a recomendação agrônômica é que se tenha um conjunto de vários indicadores para que haja elevada precisão de medição da água no sistema solo-planta-atmosfera para tornar a rotina de manejo mais assertiva e evitar desperdícios dos recursos hídricos e energéticos.

No que se refere aos avanços tecnológicos para aumentar a eficiência de uso da água nos sistemas irrigados de produção de soja, em estudo de Rodrigues et al. (2022) foram definidas as principais demandas para os programas de pesquisa e desenvolvimento, a saber: (1) automação de processos; (2) modelos de simulação para auxiliar no dimensionamento e no manejo de diferentes sistemas irrigados; (3) equipamentos de alta performance munidos de sensores para evitar desperdícios de água; (4) melhoramento genético para se ter cultivares

mais adaptadas ao ambiente irrigado; (5) sensores e softwares para manejo dos equipamentos de irrigação; (6) acesso e análise de bancos de dados em tempo real; (7) instrumentos para monitoramento e previsão climática; e (8) sensoriamento remoto para mensurar o desenvolvimento de lavouras irrigadas.

Outra abordagem que merece destaque é a necessidade de integrar a irrigação com o adequado manejo do solo e do sistema de produção, a fim de potencializar os efeitos positivos sobre a produtividade e rentabilidade da soja e outras culturas presentes nos sistemas de produção, ou seja, a utilização da irrigação não dispensa as demais estratégias de manejo apresentadas anteriormente.

Considerações finais

O aumento da resiliência da cultura da soja diante do déficit hídrico constitui um desafio complexo, demandando a integração de diferentes práticas de manejo para atenuar os prejuízos econômicos. Atualmente, entre as principais estratégias disponíveis aos agricultores destacam-se o adequado manejo do solo em sistema plantio direto, o uso de cultivares com crescimento radicular vigoroso e com tolerância a veranicos, o escalonamento da semeadura com cultivares de diferentes ciclos e, quando viável técnica e economicamente, o uso da irrigação.

A adoção integrada dessas estratégias contribui para aumentar a resiliência dos sistemas produtivos, reduzir riscos climáticos e promover maior estabilidade produtiva da sojicultura, especialmente em regiões com elevada vulnerabilidade ao déficit hídrico.

Referências

- ANDREA, M. C. da S.; BOOTE, K. J.; SENTELHAS, P. C.; ROMANELLI, T. L. Variability and limitations of maize production in Brazil: potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264-273, Sept. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.004>.
- 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, n. 8, p. 592-598, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800004>.
- 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, art. 01654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01654>.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; OLIVEIRA, M. A. de; COELHO, A. E.; MORAES, M. T. de. Soybean yield, seed protein and oil concentration, and soil fertility affected by off-season crops. **European Journal of Agronomy**, v. 153, art. 127039, Feb. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127039>.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DANTAS, J. P. de S.; MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159-168, June 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>.

BERTOLLO, A. M.; MORAES, M. T. de; 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, art. 104820, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104820>.

BESSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L.; SCHMITT, D. E.; PIVA, J. T. Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 242, p. 106162, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106162>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Soja**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/series-historicas/graos/soja>. Acesso em: 25 maio 2026.

DEBIASI, H.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; FRANCHINI, J. C.; FARIAS, J. R. B.; CONTE, O.; CUNHA, G. R. da; MORAES, M. T. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M. da; EVANGELISTA, B. A.; MARAFON, A. C. **Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 137 p. (Embrapa Soja. Documentos, 447).

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; COELHO, A. E.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Cover crops increase the yield and profitability of soybean-wheat cropping systems in Southern Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 19, p. 183-195, June 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-025-00336-4>.

FOLONI, J. S. S.; NEPOMUCENO, A. L.; MERTZ-HENNING, L. M.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; GONÇALVES, S. L.; MORAES, L. A. C.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BINNECK, E.; MORAES, A. S.; OLIVEIRA, F. A. de; CASTRO, C.; HENNING, F. A.; OLIVEIRA, M. A. de;

CARNEIRO, G. E. de S.; PRANDO, A. M.; OLIVEIRA, A. C. B. de; PEREIRA, A. F.; OLIVEIRA, M. C. N. de. **Programa de tecnologias para enfrentamento da seca na soja- TESS**. Londrina: Embrapa Soja, 2023. 24 p. (Comunicado técnico, 106).

FRANÇA, A. C. F.; COELHO, R. D.; GUNDIM, A. da S.; COSTA, J. de O.; QUILOANGO-CHIMARRO, C. A. Effects of different irrigation scheduling methods on physiology, yield, and irrigation water productivity of soybean varieties, **Agricultural Water Management**, v. 293, art. 108709, Mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108709>.

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, Oct. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.003>.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; COSTA, J. M.; SICHIERI, F. R.; TEIXEIRA, L. C. **Soja em solos arenosos: papel do sistema plantio direto e da integração lavoura-pecuária**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 10 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 116).

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, n. 5, p. 4092-4103, Sept./Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20308>.

GARBELINI, L. G.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; COELHO, A. E.; TELLES, T. S. Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems. **European Journal of Agronomy**, v. 137, art. 126528, July 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126528>.

GAVA, R.; CAMPOS, F. H.; COELHO, R. D.; OLIVEIRA, J. T. de; BARROS, T. H. da S. Economic analysis of irrigation in the production system of soybean and second-season maize in sandy soil areas in Brazil. **Irrigation and Drainage**, v. 72, n. 1, p. 213-223, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2767>.

GRASSINI, P.; TORRION, J. A.; YANG, H. S.; REES, J.; ANDERSEN, D.; CASSMAN, K. G.; SPECHT, J. E. Soybean yield gaps and water productivity in the western US Corn Belt. **Field Crops Research**, v. 179, p. 150-163, Aug. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>.

GUIMARÃES, T. C.; IGARI, A. T. Mudança do clima e seus impactos no seguro agrícola no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**,

v. 12, n. 4, p. 1583-1604, out./dez. 2019. DOI: 10.17765/2176-9168.2019v12n4p1583-1604.

LI, H.; ZHANG, Y.; SUN, Y.; ZHANG, Q.; LIU, P.; WANG, X.; LI, J.; WANG, R. No-tillage with straw mulching improved grain yield by reducing soil water evaporation in the fallow period: A 12-year study on the Loess Plateau. **Soil & Tillage Research**, v. 224, art. 105504, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105504>.

MARQUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S. de; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUZA, V. F. de. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V. F. de; MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 158-232.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; 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.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 17).

OLIVEIRA, J. T.; OLIVEIRA, R. M.; OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, E. M.; BOTELHO, M. E.; FERREIRA, P. M. Viabilidade econômica de irrigação por pivô central em pequenas áreas cultivadas com feijão, soja e milho. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4171-4179, 2020. DOI: 10.7127/rbai.v14n401189.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000200019>.

PEREIRA, M. B. N. **Contribuição do uso de braquiária na fertilidade de um Latossolo Vermelho para o aprofundamento radicular de soja**. 2025. 83 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

PEREIRA, M. B. N.; SILVA, L. H. A. da; SANTOS, J. K. dos; GRANDE, L. H. Q.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; ANDREOTE, F. D.; MORAES, M. T. de. Ruzigrass as cover crop enhances enzymatic activity linked to soybean rooting in deep soil layers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 22 Dec. 2025. Published online. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02914-x>.

POUDEL, S.; VENNAM, R. R.; SHRESTHA, A.; REDDY, K. R.; WIJEWARDANE, N. K.; REDDY, K. N.; BHEEMANAHALLI, R. Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting

stages. **Scientific Reports**, v. 13, art. 1277, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28354-0>.

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).

RODRIGUES, L. N.; ALVES, M. E. B.; ZOBY, J. L. G.; BELÉM, F. C.; ITABORAHY, C. R.; AUGUSTO, V. A. **Uso eficiente de água na agricultura irrigada bases para elaboração de estratégias e programas**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. 105 p.

SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; GODOY, C. V.; MEYER, M. C.; COSTAMILAN, L. M.; DIAS, W. P.; ALMEIDA, A. M. R. Manejo de doenças. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 227-263. (Embrapa Soja. Sistemas de produção, 17).

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. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>.

SOUZA, V. S.; CANISARES, L. P.; SCHIEBELBEIN, B. E.; SANTOS, D. de C.; MENILLO, R. B.; PINHEIRO JUNIOR, C. R.; CHERUBIN, M. R. Cover crops enhance soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystem, **Field Crops Research**, v. 322, art. 109755, Mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109755>.

THEISEN, G.; PARFITT, J. M. B.; SCIVITTARO, W. B.; BORTOLINI, F.; MITTELMANN, A. Plantas de cobertura hibernais antecipando o cultivo do arroz irrigado em sistema sulco-camalhão.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 13., 2025, Pelotas. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2025. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1179362/1/Plantas-de-cobertura-hibernais-antecipando-o-cultivo-do-arroz-irrigado.pdf>. Acesso em: 25 maio 2026.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

TORRES, R.; ZORZI, A.L.; ALMEIDA, G.S.; OZAKI, V.A. Avaliação do seguro agrícola, riscos sistêmicos e diversificação. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 21, n. 2, p. 1-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25070/rea.v21i2.15372>.

ULLAH, H.; SANTIAGO-ARENAS, R.; FERDOUS, Z.; ATTIA, A.; DATTA, A. Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: a review. **Advances in Agronomy**, v. 156, p. 109-157, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.002>.

WANG, X.; WU, Z.; ZHOU, Q.; WANG, X.; SONG, S.; DONG, S. Physiological response of soybean plants to water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, art. 809692, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.809692>.

WINCK, J. E. M.; TAGLIAPIETRA, E. L.; SCHNEIDER, R. A.; INKLMAN, V. B.; NORA, M. D.; SAVEGNAGO, C.; PAULA, L. S.; SILVA, M. R. da; ZANON, A. J.;

STRECK, N. A. Decomposition of yield gap of soybean in environment $\times$ genetics $\times$ management in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 145, art. 126795, Apr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126795>.

YANG, Y.; TILMAN, D.; JIN, Z.; SMITH, P.; BARRET, C. B.; ZHU, Y. -G.; BURNEY, J.; D'ODORICO, P.; FANTKE, P.; FARGIONE, J.; FINLAY, J. C.; RULLI, M. C.; SLOAT, L.; GROENIGEN, K. J. V.; WEST, P. C.; ZISKA, L.; MICHALAK, A. M.; LOBELL, D.B. CLIMATE CHANGE EXACERBATES THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF AGRICULTURE. **Science**, v. 385, n. 6713, art. 3747, Sept. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adn3747>.

Embrapa Trigo

Rodovia BR-285, km 294
Caixa Postal 78
99001-970 Passo Fundo, RS
www.embrapa.br/trigo
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Daniel Augusto Schurt

Membros

Alaerto Luiz Marcolan, Alexandre Ferreira do Nascimento, Alvadi Antonio Balbinot Junior, Gilberto Rocca da Cunha, João Leonardo Fernandes Pires, Jorge Alberto de Gouvêa, Joseani Mesquita Antunes e Sandra Maria Mansur Scagliusi

Circular Técnica 85

ISSN 1516-571x / e-ISSN 1518-6490
Julho, 2026

Edição executiva: *Daniel Augusto Schurt*

Normalização bibliográfica: *Graciela Olivella Oliveira* (CRB-10/1434)

Projeto gráfico: *Leandro Sousa Fazio*

Diagramação: *Márcia Barrocas Moreira Pimentel*

Publicação digital: PDF



Ministério da
Agricultura e Pecuária

Todos os direitos reservados à Embrapa.