

Documentos

Londrina, PR / Maio, 2026

Tópicos agronômicos sobre enfrentamento da seca na soja



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

ISSN 2176-2937

Documentos 486

Maio, 2026

Tópicos agronômicos sobre enfrentamento da seca na soja

José Salvador Simonetto Foloni

Liliane Márcia Mertz-Henning

José Renato Bouças Farias

Luís Guilherme Teixeira Crusiol

Editores Técnicos

Embrapa Soja

Londrina, PR

2026

Embrapa Soja

Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta
CEP 86065-981
Caixa Postal 4006
Londrina, PR
Fone: (43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Embrapa Soja

Presidente

Roberta Aparecida Carnevalli

Secretária-executiva

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Membros

Adônis Moreira, Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos Seixas, Claudio Guilherme Portela de Carvalho, Fernando Augusto Henning, Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Liliane Márcia Mertz-Henning, Maria Cristina Neves de Oliveira

Edição executiva

Vanessa Fuzinatto Dall' Agnol

Revisão de texto

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Normalização

Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Marisa Yuri Horikawa

Foto da capa

José Salvador Simonetto Foloni

Publicação digital: PDF

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

Tópicos agronômicos sobre enfrentamento da seca na soja / José Salvador Simonetto

Foloni ... [et al.] editores técnicos - Londrina : Embrapa Soja, 2026.

91 p. - (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 486).

1. Soja. 2. Seca. I. Foloni, José Salvador Simonetto. II. Mertz-Henning, Liliane Márcia. III. Farias, José Renato Bouças. IV. Crusiol, Luís Guilherme Teixeira. V. Série

CDD: 633.85 (21. ed.)

Valéria de Fátima Cardoso (CRB-9/1188)

© Embrapa 2026

Editores técnicos e autores

Alexandre Lima Nepomuceno

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Molecular Biology and Plant Physiology, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

Alvadi Antonio Balbinot Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

Carlos Lásaro Pereira de Melo

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

Henrique Debiasi

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

José Renato Bouças Farias

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

José Salvador Simonetto Foloni

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

Julio Cezar Franchini

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

Larissa Alexandra Cardoso Moraes

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

Liliane Márcia Mertz-Henning

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência e Tecnologia de Sementes, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

Luís Guilherme Teixeira Crusiol

Geógrafo, doutor em Agronomia, pesquisador visitante, bolsista FAPED/Embrapa Soja, Londrina, PR

Norman Neumaier

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Agronomy, pesquisador aposentado da Embrapa Soja, Londrina, PR

Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli

Matemático, especialista em Estatística, Londrina, PR

Sergio Luiz Gonçalves

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

Silvana Regina Rockenbach Marin

Química, doutora em Genética e Biologia Molecular, analista da Embrapa Soja, Londrina, PR

Apresentação

Os estresses climáticos de déficit hídrico e altas temperaturas (tecnicamente denominados de seca) têm longo histórico de fortes prejuízos em lavouras de soja na grande maioria das regiões do Brasil.

Além das rotineiras perdas, as projeções futuras para a soja brasileira, no contexto do aquecimento global, apontam para um cenário de intensificação dos danos por seca nas próximas décadas com impactos ainda mais severos às lavouras.

O objetivo desta publicação é disponibilizar textos sobre diferentes tópicos agrônômicos que vêm sendo trabalhados por especialistas nos últimos anos, contemplando informações compiladas e/ou geradas em programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da Embrapa para o enfrentamento da seca na soja.

Alexandre Lima Nepomuceno
Chefe-Geral da Embrapa Soja

Prefácio

Pesquisadores de diferentes áreas da ciência agrônômica são unânimes em afirmar que a seca é o principal fator de risco à sojicultura brasileira, podendo comprometer gravemente a segurança alimentar e os amplos setores agroindustriais que dependem da proteína e óleo sojícolas no Brasil e em países parceiros.

A seca é um problema complexo e de ampla abrangência territorial no Brasil, o que demanda estratégias agrônômicas combinadas. Diante disso, a Embrapa tem mantido equipes multidisciplinares trabalhando em diferentes programações de P&D para enfrentamento da seca na soja.

A presente publicação contempla os seguintes tópicos:

- Estudos socioeconômicos sobre impactos da seca em microrregiões sojícolas;
- Agrometeorologia para zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) e distinção de ambientes de produção;
- Sensoriamento remoto para fenotipagem e aferição de tecnologias mitigadoras da seca;
- Edição gênica para obtenção de cultivares mais tolerantes à seca.
- Manejo conservacionista do solo e da água visando maior oferta hídrica para as lavouras.

Os editores e autores desta obra desejam que a mesma seja esclarecedora aos diferentes públicos leitores, pertencentes ou não ao sistema de produção que a soja está presente, inclusive formuladores de políticas públicas, lideranças públicas e privadas, professores, estudantes e demais cidadãos brasileiros com interesse na temática das mudanças climáticas.

Os editores técnicos

Sumário

Capítulo 1 - Impactos econômicos decorrentes da seca na produção de soja no Brasil	9
Capítulo 2 - Zoneamento agrícola de risco climático na cultura da soja	23
Capítulo 3 - Sensoriamento remoto para enfrentamento da seca na soja	31
Capítulo 4 - Biotecnologia aplicada ao melhoramento genético para tolerância à seca da soja.....	45
Capítulo 5 - Manejo do solo para reduzir perdas por seca na soja	68

Capítulo 1 - Impactos econômicos decorrentes da seca na produção de soja no Brasil

*José Renato Bouças Farias
Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli
Luís Guilherme Teixeira Crusiol*

O objetivo deste capítulo é discutir impactos da seca na produção brasileira de soja, com foco na quantificação de variações de produção e de receitas econômicas que deixaram de ser auferidas aos agricultores em função da penalização da produtividade causada por déficit hídrico no decorrer do desenvolvimento das lavouras.

O Brasil é líder mundial na produção de soja, responsável por aproximadamente 40% do total de grãos produzidos mundialmente por essa oleaginosa. Na safra 2023/2024 a cultura da soja ocupou cerca de 140 milhões de hectares em todo o mundo, com produção total de grãos da ordem de 378 milhões de toneladas. Além do Brasil, responsável por mais de 147 milhões de toneladas produzidos na safra 2023/2024, destacam-se os Estados Unidos da América (30% da produção mundial; 113 milhões de toneladas), Argentina (13% da produção mundial; 50 milhões de toneladas), China (5% da produção mundial; 21 milhões de toneladas), Índia (3% da produção mundial; 12 milhões de toneladas) e Paraguai (2,8% da produção mundial; 10,5 milhões de toneladas). Juntos, esses seis países responderam na safra 2023/2024 por mais de 94% da produção mundial de soja (Conab, 2024; Estados Unidos, 2024).

Embora a soja venha sendo cultivada na região Sul do Brasil desde o início do século 20, somente na década de 1970 a produção brasileira dessa oleaginosa passou a ter destaque socioeconômico nacional e mundial. A partir das décadas de 1980 e 1990, com o advento de tecnologias agronômicas de alta performance em condições edafoclimáticas tropicais, a sojicultura avançou amplamente para as regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do País.

Atualmente, as áreas agrícolas dedicadas à produção de soja representam cerca de 5% de todo o território brasileiro (Seixas et al., 2020; Conab, 2024).

Nas últimas cinco décadas o Brasil teve sua produtividade média de soja aumentada de 1.500 kg ha⁻¹ para 3.500 kg ha⁻¹, o que evitou que cerca de 60 milhões de hectares fossem convertidos em lavouras sojícolas, isso tudo devido aos expressivos ganhos de produtividade impulsionados por vários avanços tecnológicos consolidados nas rotinas dos agricultores (Gazzoni; Dall'Agnol, 2018; Seixas et al., 2020). No entanto, apesar de os sojicultores brasileiros serem considerados mundialmente bastante competentes em termos tecnológicos e operacionais, os frequentes estresses por seca têm afetado fortemente a produtividade das lavouras na grande maioria das regiões produtoras do Brasil.

Eventos climáticos de seca acontecem quando os volumes de chuva são insuficientes e mal distribuídos em termos espaciais e temporais, associados a elevadas demandas por água da cultura, incapazes de amparar o pleno crescimento e desenvolvimento das plantas, os quais, em maior ou menor grau de intensidade e duração, acarretam prejuízos à produtividade e/ou à qualidade do produto a ser colhido (no caso da soja, grãos ou sementes). Além disso, a distribuição temporal da chuva ao longo do ciclo da cultura desempenha papel relevante no impacto da seca, ou seja, especialmente nas lavouras de soja, os déficits hídricos incidentes durante o período reprodutivo (fases de florescimento, formação de vagens e enchimento de grãos) têm efeito expressivamente mais danoso ao rendimento de grãos do que os déficits hídricos que ocorrem na fase vegetativa (Farias et al., 2007).

Os procedimentos para quantificação das perdas de produtividade da soja, exclusivamente associadas aos eventos de seca, requerem monitoramento de variáveis como a dinâmica temporal da água no sistema solo-planta-atmosfera ao longo dos estágios fenológicos da cultura, capacidade de retenção de água no solo, datas de semeadura recomendadas para cada região sojícola, precipitação pluvial, temperatura, déficit de pressão de vapor, radiação solar e práticas de manejo (Leng; Hall, 2019). Somado a isso, dada a elevada variabilidade das características edafoclimáticas dos diferentes ambientes de

produção de soja no Brasil, associada à deficitária distribuição espacial das estações meteorológicas pelo território nacional, são necessários métodos alternativos para monitorização em larga escala dos prejuízos agrícolas causados pela seca (Cunha et al., 2019; Assad et al., 2022).

No presente trabalho, os dados oficiais de produção de grãos de soja, área cultivada e produtividade média disponibilizados pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) foram sistematizados para quantificar o montante de grãos que deixou de ser colhido e prejuízos financeiros gerados pela seca aos agricultores. Essa mensuração foi realizada para dez safras de soja (2014/2015 a 2023/2024) nos cinco estados maiores produtores da oleaginosa no Brasil (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul), ponderando os percentuais de perda em função da área plantada em cada safra. Juntos, os estados de MT, MS, GO, PR e RS responderam na safra 2023/2024 por mais de 70% de toda a soja produzida no território nacional (Conab, 2024).

A metodologia utilizada neste trabalho para mensurar os prejuízos financeiros da seca foi a seguinte: (1) Os dados oficiais gerados pela Conab (2024) foram separados por períodos de cinco safras para definir os máximos rendimentos de grãos alcançados em cada quinquênio; (2) Esses máximos rendimentos registrados por períodos de cinco safras foram considerados como valores de referência, ou seja, foram as máximas produtividades regionais obtidas pelos sojicultores de acordo com as tecnológicas agrônômicas vigentes; (3) Por fim, foram calculados os montantes de soja que deixaram de ser colhidos em cada safra em comparação aos máximos rendimentos alcançados a cada cinco safras, para todas as regiões estudadas.

Na metodologia, os valores financeiros dos montantes de soja que deixaram de ser colhidos por causa da seca foram convertidos em dólar, conforme o valor médio da cotação internacional da soja no Chicago Board of Trader, considerando a média anual de 2023 cujo valor foi de US\$ 519,19 (USD) por tonelada de grãos (University of Illinois Urbana-Champaign, 2024).

Na Figura 1 estão apresentados os dados de área cultivada (Figura 1A) e de produção total de grãos de soja (Figura 1B) dos estados de MT, MS, GO, PR e RS, em comparação à área total e produção total do Brasil (Conab, 2024). Nas dez safras analisadas (2014/2015 a 2023/2024), houve incremento de aproximadamente 8 milhões de hectares na área dedicada à produção de soja nos estados do MT, MS, GO, PR e RS. Porém, nesses estados houve diminuição percentual da área cultivada em comparação ao total ocupado pela cultura em todo o território nacional, evidenciando a forte expansão das lavouras sojícolas em outras unidades da federação como, por exemplo, na macrorregião denominada MATOPIBA (Estados: MA, TO, PI e BA).

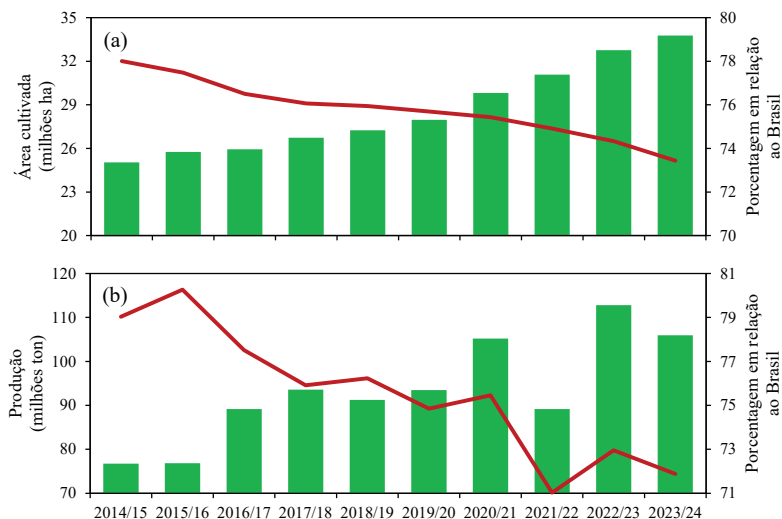


Figura 1. Área total cultivada (A) e produção total de grãos de soja (B) do somatório das lavouras dos estados de MT, MS, GO, PR e RS, em comparação ao total alcançado na safra 2023/2024 em todo o Brasil. Colunas em verde representam milhões de hectares de lavouras e milhões de toneladas de grãos de soja produzidos, e linhas em vermelho são as porcentagens de área cultivada e produção total de grãos de soja desses estados em relação ao obtido em todo o território nacional.

Fonte: Conab (2024).

De maneira geral, houve recorrentes perdas de produção de grãos de soja nos estados de MT, MS, GO, PR e RS em comparação ao total produzido no Brasil (Figura 1). É preciso destacar que mesmo havendo incrementos da área de cultivo dessa oleaginosa nos últimos anos, os montantes produzidos não tiveram aumentos na mesma magnitude, ou seja, houve períodos de estabilização da produção como observado nas safras 2016/2017 e 2019/2020, e até mesmo de redução da produção de soja como aconteceu na safra 2021/2022 (Conab, 2024).

Variações de produtividade das lavouras de soja foram constatadas nos cinco estados estudados (Figura 2). No MT e GO, houve maior estabilidade de produtividade no decorrer das 10 safras analisadas, porém, no MS e PR ocorreram fortes perdas de produtividade na safra 2021/2022. Concomitantemente, é preciso destacar que o RS foi o estado mais penalizado pela seca, com severas reduções de produtividade da soja nas safras 2019/2020, 2021/2022 e 2022/2023. Apesar de ter havido essas três safras no RS com fortes prejuízos, para exemplificar a expressiva variação de fatores climáticos e seus impactos no desempenho da soja, no RS houve recorde de produtividade da oleaginosa na safra 2020/2021 em condições favoráveis de chuva.

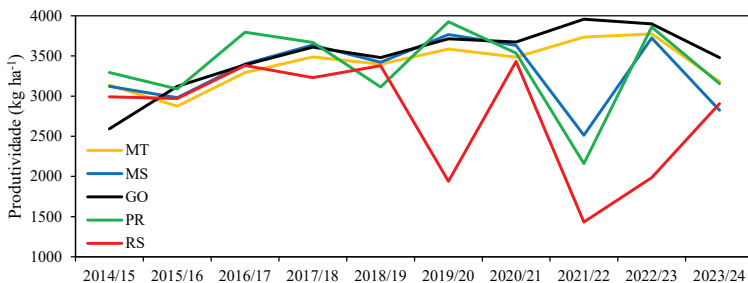


Figura 2. Produtividade média de grãos de soja nos estados de MT, MS, GO, PR e RS, nas safras de 2014/2015 a 2023/2024.

Fonte: Conab (2024).

Há diferentes fatores que causam perdas de produtividade da soja no Brasil como, por exemplo, problemas fitossanitários, manejo inadequado do solo, adversidades climáticas, entre outros. Contudo, dentre todos os fatores que impactam negativamente o rendimento da soja, o clima é o único com impossibilidade de interferência humana. Logo, ao passo que incrementos de produtividade são decorrentes de avanços tecnológicos adotados pelos agricultores, as recorrentes perdas de produtividade observadas em várias safras em grande parte das regiões produtoras do Brasil acontecem, principalmente, por causa de variações do clima, em especial, devido aos estresses da seca (déficit hídrico associado a altas temperaturas).

A Figura 3 apresenta o mapa do MT, MS, GO, PR e RS com as perdas acumuladas de produtividade de soja em função da seca nas dez safras avaliadas (2014/2015 a 2023/2024), e seus impactos econômicos também acumulados em bilhões de dólares (Conab, 2024; University of Illinois Urbana-Champaign, 2024). No RS, PR e MS, houve as maiores perdas percentuais de rendimento. Por outro lado, no MT e GO, houve estabilidade relativamente maior de produção no decorrer dos anos.

No MT e GO, as perdas acumuladas de rendimento da soja em função da seca em dez safras foram de 6,82 e 7,99%, respectivamente (Figura 3). Por sua vez, no MS, PR e RS as perdas acumuladas causadas pela seca em dez safras foram de 12,65%, 15,41% e 22,37%, respectivamente. De maneira geral, o cenário de prejuízos tem sido demasiadamente negativo para toda a cadeia de produção sojícola em diferentes regiões do Brasil, com destaque para a forte oneração de alimentos proteicos que comumente afetam a segurança alimentar dos brasileiros e de outros países. No caso do RS, os dados apresentados na Figura 3 evidenciam que, infelizmente, perde-se quase uma safra a cada quatro, com desdobramentos socioeconômicos demasiadamente severos.

No MT, deixou-se de colher nas dez safras avaliadas aproximadamente 24 milhões de toneladas de grãos de soja por causa da seca, o que representa mais de 60% do total produzido no mesmo estado na safra 2023/2024. No PR e RS, foram perdidos em torno de 28 e

36 milhões de toneladas de soja, respectivamente, em decorrência da seca em dez safras (2014/2015 a 2023/2024). Esses prejuízos ocorridos no PR e RS por causa da seca representam aproximadamente 45% do total da soja produzida em todo o Brasil na safra 2023/2024. Juntos, os cinco estados líderes nacionais na produção de soja (MT, GO, MS, PR e RS) tiveram perdas de 112 milhões de toneladas nas dez safras, número que representa 76% da produção total brasileira gerada na safra 2023/2024, ou ainda 28% de toda a soja produzida mundialmente nesta mesma safra.

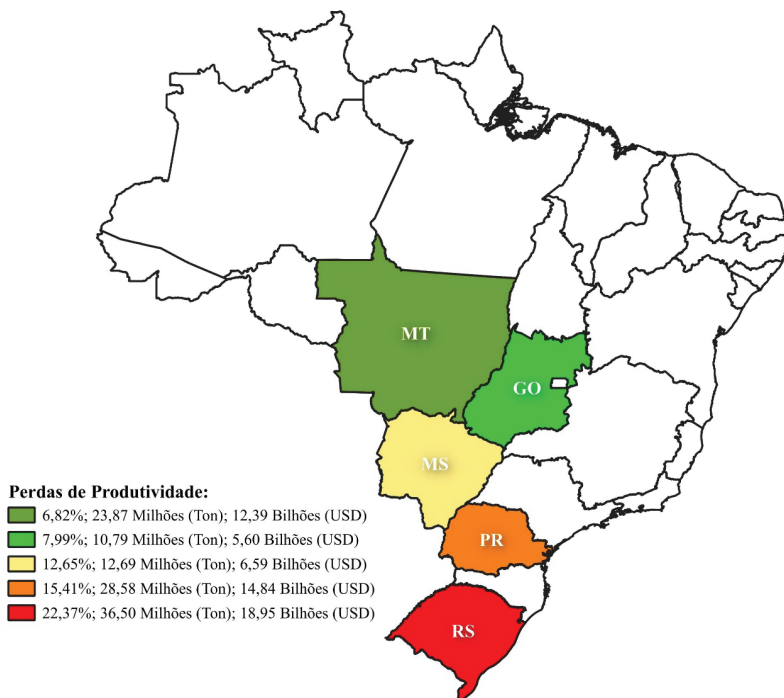


Figura 3. Perdas de soja expressas em porcentagem, milhões de toneladas de grãos e bilhões de dólares (USD) que deixaram de ser pagos aos agricultores dos estados de MT, MS, GO, PR e RS por causa da seca, em valores acumulados em dez safras (2014/2015 a 2023/2024).

Fonte: Conab (2024); University of Illinois Urbana-Champaign (2024).

Os prejuízos na produção de soja decorrentes da seca são imensos e impactam diretamente toda a sociedade brasileira. Nessa quantificação, são consideradas apenas as receitas financeiras que deixaram de ser contabilizadas para os produtores rurais. O prejuízo, com toda certeza, é muito maior se fossem considerados seus desdobramentos sobre a economia local e regional e seus impactos sobre outras cadeias e setores que dependem dos produtos sojícolas.

Nos estados da região Sul do Brasil (PR e RS), ocorreram os maiores impactos econômicos decorrentes das perdas de produtividade da soja em função da seca. O PR, segundo estado mais vulnerável às perdas por seca, acumulou, nas dez safras avaliadas, prejuízos de aproximadamente 15 bilhões de dólares. No RS, principal estado prejudicado pela seca, aproximadamente 19 bilhões de dólares deixaram de ser incorporados aos ganhos dos sojicultores nas dez safras. Nessas dez safras (2014/2015 a 2023/2024), os cinco maiores produtores nacionais (MT, GO, MS, PR e RS) acumulam prejuízos de aproximadamente 58 bilhões de dólares por causa da seca.

Na Figura 4, são apresentadas as perdas percentuais de produção de soja devido à seca nas safras de 2014/2015 a 2023/2024 nos cinco estados líderes da produção sojícola (MT, GO, MS, PR e RS) em todo o Brasil (Conab, 2024). As perdas de produtividade em milhões de toneladas estão apresentadas na Figura 5, enquanto os impactos econômicos dessas perdas, expressos em bilhões de dólares, estão apresentados na Figura 6.

A maior estabilidade na produção de soja foi observada no MT e GO, com perdas variando de 3% a 23%. Entretanto, no PR e RS, houve elevada instabilidade da produção em decorrência de adversidades climáticas. Para exemplificar, no PR houve perda de 45% da produção de soja na safra 2021/2022 e, no RS, a perda total de soja foi de 58% nesta mesma safra. O MS demonstrou comportamento intermediário, com perda de 33% da produção de soja na safra 2021/2022. É importante destacar que os prejuízos de maior magnitude comumente não ocorrem numa mesma safra em todas as regiões do Brasil. Por exemplo, no RS, PR e MS houve fortes perdas de produção de soja na safra 2021/2022; por outro lado, nessa mesma

safras, no MT e GO foram colhidas safras consideradas normais em termos de produtividade de grãos.

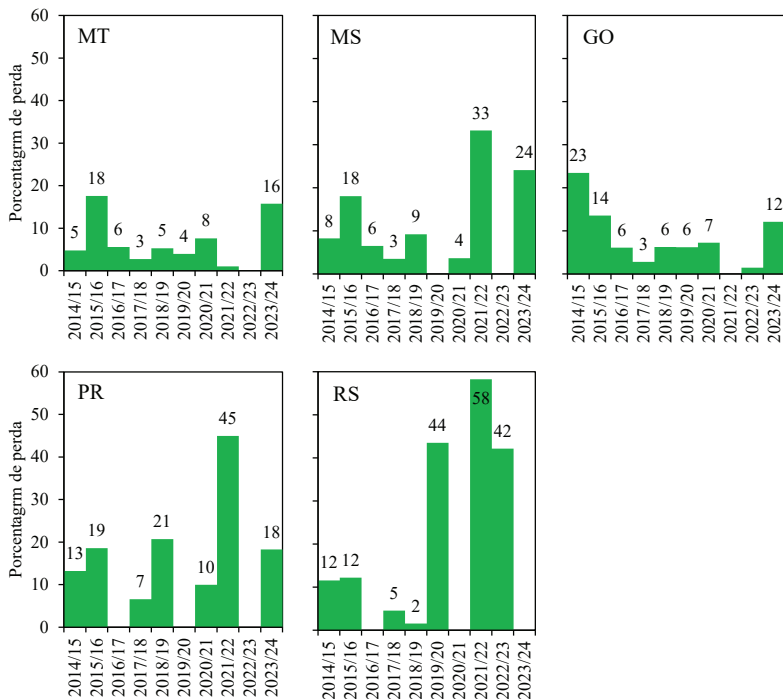


Figura 4. Perdas percentuais de produção de soja nas safras de 2014/2015 a 2023/2024 nos estados de MT, MS, GO, PR e RS.

Fonte: Conab (2024).

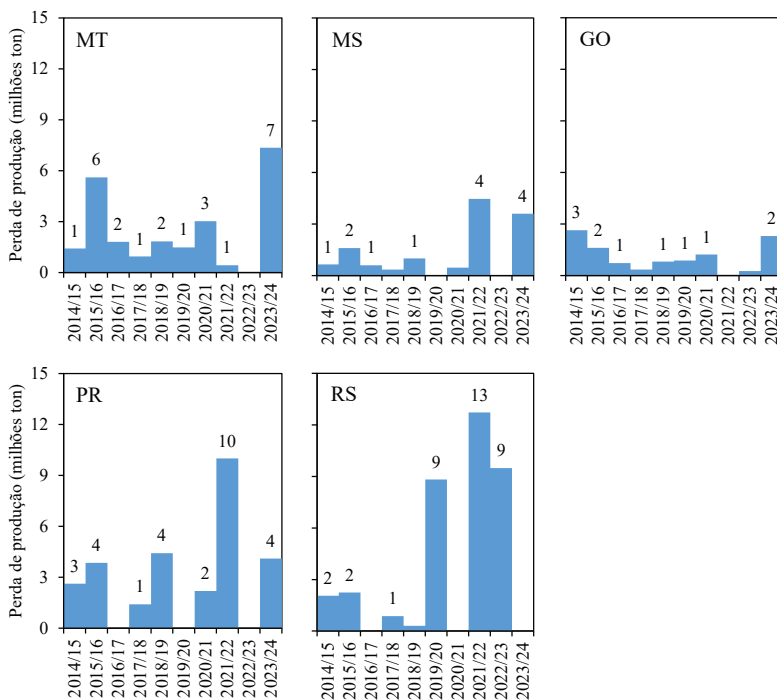


Figura 5. Perdas de soja expressas em milhões de toneladas, nos estados MT, MS, GO, PR e RS.

Fonte: Conab (2024).

A análise percentual das perdas de produtividade da soja devido à seca demonstra que a distribuição espacial desse evento climático não ocorre de maneira uniforme, sendo os estados da região Sul mais penalizados do que os estados da região Centro-Oeste. Quando analisado o montante que deixou de ser produzido em termos financeiros (Figura 5), esses resultados negativos assumem impactos ainda mais severos, pois representam o impacto direto das perdas na oferta de derivados sojícolas (óleo e proteína) para toda a cadeia produtiva nacional e mundial.

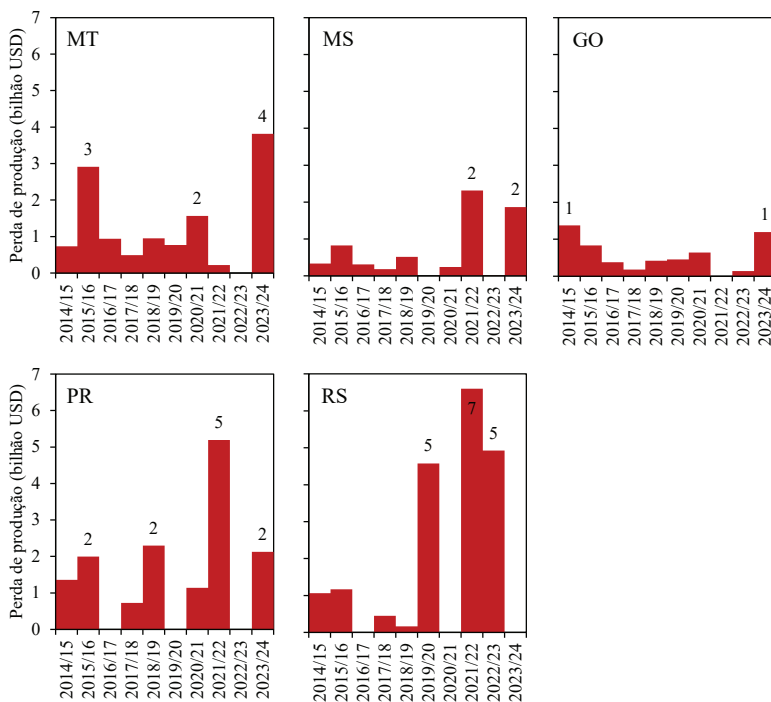


Figura 6. Perdas de soja expressas em bilhões de dólares (USD), nos estados MT, MS, GO, PR e RS.

Fonte: Conab (2024).

Embora o MT apresente relativa estabilidade em produtividade das lavouras sojícolas, os desdobramentos econômicos nos anos de frustração da safra são imensos dado o elevado volume de produção desse estado. Destaca-se a safra 2023/2024 no MT, em que a perda de produção foi de 7,35 milhões de toneladas de grãos por causa da seca. Ainda que, na safra 2015/2016, o MT tenha apresentado quebra de 18% na produção de soja (Figura 4), os efeitos econômicos foram relativamente inferiores aos da safra 2023/2024, dada a menor área cultivada com a oleaginosa. Na safra 2023/2024 houve quebra de 16% na soja do MT, ou seja, 7,35 milhões de toneladas de grãos

deixaram de ser produzidas com prejuízos da ordem de 4 bilhões de dólares (Figuras 5 e 6).

No PR, na safra 2021/2022, houve um dos maiores prejuízos na soja devido à seca em comparação aos últimos anos, somando mais de 5 bilhões de dólares. O RS foi o estado com maiores impactos na produtividade devido à seca nas dez safras analisadas. No RS destacam-se negativamente as safras de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, quando houve perdas acentuadas de produção de soja. Somente nessas quatro safras o RS deixou de colher mais de 30 milhões de toneladas de grãos de soja que representaram desfalque de 17 bilhões de dólares (Figuras 5 e 6). Contudo, na safra 2020/2021 teve recorde de produtividade de soja no RS. Porém, na safra 2021/2022 novamente houve forte perda de produção de 58%, e na safra 2022/2023 também houve prejuízo de 42% nesse estado.

Dada a magnitude dos prejuízos causados pela seca sobre a produtividade da soja nos estados maiores produtores dessa oleaginosa no Brasil, são necessários fortes investimentos em tecnologias agrônômicas para minimizar os impactos negativos da seca sobre toda a cadeia agroindustrial dependente dos produtos sojícolas. A compreensão da distribuição de tais perdas no território nacional visa subsidiar políticas públicas e corporativas relacionadas ao planejamento e zoneamento agrícola de risco climático (ZARC), programas de financiamento e seguro agrícolas, segurança alimentar e estabilidade econômica e social.

Essa avaliação da perda de rendimento da soja por seca fornece importantes informações para aprimorar o planejamento de todos os setores que compõem a cadeia de produção dependente dos produtos sojícolas, buscando ampliar a sua sustentabilidade por meio de três principais diretrizes: (1) ambiental, preservando a capacidade produtiva da cultura para que não haja necessidade de expansão de novas áreas agrícolas; (2) econômica, com maior rentabilidade e estabilidade financeira em toda cadeia produtiva; e (3) social, com maior segurança alimentar no Brasil e no mundo.

Referências

ASSAD, E. D.; CALMON, M.; LOPES-ASSAD, M. L.; FELTRAN-BARBIERI, R.; POMPEU, J.; DOMINGUES, L. M.; NOBRE, C. A. Adaptation and resilience of agricultural systems to local climate change and extreme events: an integrative review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e72899, 2022. DOI: 10.1590/1983-40632022v5272899.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos, v. 2, safra 2023/24, 12º levantamento. set. 2024. 116 p. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2023-2024/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 10 set. 2024.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J. V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, article 642, 2019. 20 p. DOI: 10.3390/atmos10110642.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **World Agricultural Production**. Washington, DC: USDA, jun. 2024. 40 p. (WAP. Circular Series, 6-24). Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2024-06/production.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 48).

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja**: de 1050 a.C. a 2050 d.C. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 199 p.

LENG, G.; HALL, J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 811-821, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.434.

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. 347 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

UNIVERSITY OF ILLINOIS URBANA-CHAMPAIGN. **Average farm price received database**. 2024. Disponível em: <https://farmdoc.illinois.edu/decision-tools/illinois-average-farm-price-received-database>. Acesso em: 10 ago. 2024.

Capítulo 2 - Zoneamento agrícola de risco climático na cultura da soja

José Renato Bouças Farias

Sergio Luiz Gonçalves

Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli

Luis Guilherme Teixeira Crusiol

José Salvador Simonetto Foloni

Norman Neumaier

Estudos apontam que as adversidades climáticas comumente causam perdas superiores a 60% do rendimento das lavouras na maioria das regiões agrícolas do mundo, visto que os agricultores, com exceção de cultivos em ambientes protegidos (estufas, casa de vegetação, etc.), exercem pouco ou nenhum controle sobre intempéries como seca, geada, excesso de chuva na colheita, entre outros. No caso do Brasil, dependendo da região, perdas da ordem de 75% têm sido recorrentes em diferentes culturas agrícolas devido a problemas do clima (Arias et al., 2015).

Diante das expressivas perdas, é consenso entre especialistas que a gestão dos riscos climáticos é fundamental para o sucesso da agricultura mundial em busca de crescimento e sustentabilidade. Porém, há lacunas tecnológicas que dificultam a mensuração e previsão das variabilidades do clima, aumentando a frequência de insucesso na condução das lavouras.

No que se refere à aptidão ecofisiológica das culturas, são imprescindíveis os estudos de viabilidade econômica para microrregiões e épocas do ano em função de fatores limitantes do clima (Avila et al., 2013). Adicionalmente aos estudos de risco, são muito importantes os trabalhos sobre potencial produtivo das culturas em razão de variáveis climáticas.

É consenso entre especialistas que a seca causa os maiores prejuízos à soja brasileira, entre todos os fatores abióticos (acidez do solo, deficiência de nutrientes, entre outros) e bióticos (doenças e pragas) que impactam negativamente a cultura. As perdas de produtividade da soja por causa da seca variam em função da duração e intensidade do estresse, assim como, do estágio fenológico das plantas em que o estresse acontece.

A necessidade de água na cultura da soja aumenta à medida em que as plantas crescem, atingindo o patamar máximo entre as fases de formação das vagens (estádios: R3 a R4) e enchimento de grãos (estádios: R5.1 a R6), podendo ter picos de perda de água por evapotranspiração acima de 8 mm/dia. E no final do ciclo, na fase de maturação dos grãos (estádios: R6 a R8), há expressivo declínio da demanda por água na soja (Farias et al., 2007, 2009).

O consumo total de água na cultura da soja para obtenção de máximas produtividades varia de 450 a 800 mm (da semeadura à maturação plena dos grãos), dependendo das condições edafoclimáticas (ambiente), genótipo e manejo. Além da quantidade de água, a soja necessita de distribuição apropriada de chuvas ao longo de todas as fases que definem o seu potencial produtivo, principalmente nos períodos críticos de maior impacto da seca (Farias et al., 2007, 2009).

A soja tem dois períodos críticos em que há elevadas perdas quando ocorre déficit hídrico: (1) na instalação da cultura, entre a semeadura e o início do desenvolvimento das plantas (estádio V2); e (2) no período reprodutivo, desde o florescimento pleno (R2) até o estágio final de enchimento de grãos (R6). Contudo, no período reprodutivo, os prejuízos são relativamente mais severos quando a seca acontece na fase de enchimento de grãos (Estádios: R5.1 a R6) (Farias et al., 2001).

No que se refere ao zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) da soja, o objetivo é delimitar áreas e épocas de semeadura menos sujeitas à incidência de eventos climáticos adversos, entre os quais, a seca é o principal fator limitante para a cultura na grande maioria das regiões e épocas de semeadura em todo o Brasil (Brasil, 2023).

O ZARC constitui tecnologia imprescindível para a sustentabilidade socioeconômica da soja brasileira, porque é amplamente usado para definir políticas públicas (seguro agrícola, financiamentos de custeio e investimento, entre outras), assim como, para auxiliar gestores a estabelecer planejamento de logística, operações mecanizadas, programas de rotação de culturas e controle fitossanitário.

Ressalta-se que o ZARC tem ampla capilaridade regional em todos os municípios onde se cultiva soja, com base em levantamentos de riscos climáticos registrados junto ao Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), em grande parte dos 44 milhões de hectares de lavouras sojícolas conduzidas na safra 2023/2024 em todo o Brasil (Brasil, 2023; Conab, 2024).

A metodologia do ZARC da soja distingue áreas com maior ou menor frequência de ocorrência de déficit hídrico durante a fase mais crítica da cultura (florescimento ao enchimento de grãos) em função da época de semeadura, demanda evapotranspiratória, disponibilidade hídrica do solo e ciclo da cultivar.

Para elaborar o ZARC da soja são utilizadas bases de dados climáticos (séries históricas) preferencialmente com 30 anos de apontamentos diários, obtidas a partir de redes de estações meteorológicas e pluviométricas, convencionais e automatizadas, oriundas da Embrapa e de diversas instituições parceiras (empresas privadas, cooperativas, universidades e instituições estaduais de pesquisa).

Somado aos dados do clima, o ZARC contempla informações de todas as cultivares de soja registradas no MAPA, as quais têm indicação para uma ou mais regiões edafoclimáticas (RECs) aptas para a cultura da soja. Atualmente são definidas 20 RECs distribuídas em cinco macrorregiões sojícolas (MRS) em todo o Brasil: MRS 1 (Sul), 2 (Centro-Sul), 3 (Sudeste), 4 (Centro-Oeste) e 5 (Norte/Nordeste) (Kaster; Farias, 2012; Brasil, 2023).

A partir das redes de experimentação de Valor de Cultivo e Uso (VCU), que são conduzidas conforme metodologia oficial do MAPA, são gerados dados de caracterização agronômica (ciclo, acamamento, reação a doenças, entre outros), aptidão ecofisiológica (interação: genótipo x ambiente) e potencial produtivo das cultivares de soja

registradas no Mapa, as quais são usadas no ZARC (Kaster; Farias, 2012; Brasil, 2023).

As informações das cultivares de soja para compor o ZARC são ajustadas da seguinte forma: (1) classificação das cultivares em três grupos quanto ao ciclo: precoce, médio e tardio; (2) definição do número de dias para os estádios fenológicos das cultivares, e divisão do ciclo em quatro fases fenológicas; e (3) determinação dos coeficientes da cultura (K_c) para estimar o consumo hídrico para cada período de dez dias de ciclo.

O modelo para calcular o balanço hídrico utilizado no ZARC da soja é o SARRA (*Systeme d'Analyse Regionale des Risques Agroclimatiques*), descrito por Baron et al. (1996). Esse modelo define o índice de satisfação da necessidade de água da cultura (ISNA), o qual é calculado a partir da relação entre evapotranspiração real (ET_r) e evapotranspiração máxima ou potencial da cultura (ET_m).

São feitas análises para verificar a probabilidade de ocorrência de valores de ISNA abaixo do limite crítico estabelecido para a cultura da soja, em cada fase fenológica de interesse. A condição adversa é identificada quando o valor de ISNA fica abaixo do limite crítico para um dado local e época de semeadura específica.

Os valores de ISNA correspondentes aos percentis de 20%, 30% e 40% de risco climático são georreferenciados para compor os mapas do ZARC. Além da disponibilidade hídrica, outros fatores climáticos podem ser considerados em algumas regiões e épocas de semeadura da soja como, por exemplo, a probabilidade de ocorrência de geadas e/ou de temperaturas restritivas.

Em suma, o ZARC da soja tem as seguintes etapas: (1) são feitas simulações para vários decêndios (períodos de dez dias) de semeadura da soja para todas as regiões produtoras do Brasil; (2) em seguida, são obtidos os valores de ISNA para cada local e decêndio de semeadura para diferentes safras simuladas; (3) a partir dos valores de ISNA, são definidas as datas de semeadura de menor risco climático recomendadas pela pesquisa e normatizadas por portarias da Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA) do Mapa; e (4) as portarias da SDA/Mapa estabelecem os calendários oficiais de semeadura da

soja, respeitando os períodos de vazio sanitário da ferrugem asiática para cada Estado.

Os parâmetros e metodologias para compor o ZARC da soja precisam de constantes avanços. Atualmente, há um importante programa de pesquisa da Embrapa denominado de ZARC Níveis de Manejo, cujo objetivo é aprimorar os parâmetros para avaliar a disponibilidade hídrica do solo para as lavouras sojícolas considerando outros atributos do perfil pedológico para além da classe de textura, como por exemplo: teor de matéria orgânica, nível de acidez, taxa de infiltração de água, profundidade efetiva de raízes, etc.

Há casos em que áreas classificadas, em um primeiro momento, como de alto risco para a soja por apresentarem solos com texturas mais arenosas, puderam ser reclassificadas como favoráveis devido à adoção de práticas de manejo conservacionista no âmbito do sistema plantio direto, que possibilitaram maior crescimento radicular em profundidades abaixo de 50 cm no perfil, assim como, aumentaram a capacidade de armazenamento de água para as plantas.

Em 2021, foi estabelecida uma nova versão do ZARC da soja com base em nova metodologia para mensurar a água disponível no solo, que passou a ser estimada por meio de equações de pedotransferência hídrica definidas em razão dos teores de silte, areia e argila do solo. Portanto, atualmente o ZARC da soja contempla seis níveis de água disponível no solo calculados a partir de diferentes composições de classes texturais (Teixeira et al., 2021).

Outro ponto relevante do ZARC da soja diz respeito à interação entre genótipos e épocas de semeadura. Devido à sensibilidade da soja ao fotoperíodo e temperatura (variações foto-térmicas), nas épocas de semeadura relativamente mais antecipadas ou mais tardias, em condições foto-térmicas menos propícias à cultura, comumente as plantas têm dossel menos desenvolvido (menor porte e baixa ramificação), quando comparadas às lavouras instaladas em época de semeadura cujas condições foto-térmicas são mais favoráveis à soja.

Além disso, de maneira geral, cultivares de soja com ciclos relativamente mais longos têm suas épocas de semeadura mais amplas em comparação às de ciclos mais curtos, para uma determinada

região. Isso acontece porque, comumente, as variações foto-térmicas causam alterações mais acentuadas nas cultivares de ciclos mais precoces em relação às de ciclos mais tardios.

Somado aos efeitos ecofisiológicos, nas épocas de semeadura mais tardias frequentemente a soja apresenta maiores incidências de percevejos e doenças fúngicas foliares (notadamente ferrugem asiática), e esses problemas fitossanitários, quando combinados a um ou mais fatores ambientais limitantes (fototérmico e/ou déficit hídrico), intensificam as perdas de rendimento de grãos.

Nem sempre as épocas de semeadura definidas no ZARC para ter menor risco de seca na soja, equivalem às épocas de semeadura de maior potencial produtivo em uma determinada região. Em alguns casos, há outros fatores ambientais mais problemáticos como, por exemplo, elevada umidade relativa do ar que favorece doenças fúngicas (ferrugem asiática, mofo branco, por exemplo), e/ou maior probabilidade de haver excesso de chuva na colheita.

Todos os bancos de dados utilizados para constituir o ZARC da soja são gerados em redes de experimentos conduzidos conforme procedimentos agronômicos recomendados para a sojicultura (Seixas et al., 2020). Assim, falhas técnicas como adubação deficiente, controle ineficaz de doenças ou indicação errada de cultivar resultam em perdas de produtividade, que podem ser agravadas caso ocorram períodos de seca. Portanto, a efetividade do ZARC é dependente do uso correto das tecnologias agronômicas estabelecidas para cada região sojícola do Brasil.

Os resultados do ZARC estão disponíveis e podem ser acessados no website do Mapa (Embrapa Informática Agropecuária, 2021). As Portarias do ZARC emitidas pelo Mapa estão disponíveis na internet (Brasil, 2026). Os mapas e tabelas regionais do ZARC também podem ser consultados via aplicativo para smartphones denominado “ZARC Plantio Certo”, disponível nas versões iOS e Android.

Referências

ARIAS, D.; MENDES, P.; ABEL, P. **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil**: caminhos para uma visão integrada. Brasília, DF: Banco Mundial, 2015. 76 p.

AVILA, A. M. H. de; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; PILAU, F. G. Climatic restrictions for maximizing soybean yields. In: BOARD, J. E. (ed.). **A comprehensive survey of international soybean research - genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships**. Rijeka: InTech, 2013. p. 367-375.

BARON, C.; CLOPES, A.; PEREZ, P.; MULLER, B.; MARAUX, F. **Manuels d'utilisation de**: SARRAMET, SARRABIL et SARRAZON. Montpellier: CIRAD, 1996. 109 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Portarias**: metodologia de estudos e lista de cultivares indicadas para cada região. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias>. Acesso em: 30 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/zoneamento-agricola>. Acesso em: 02 nov. 2023.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos, v. 2, safra 2023/24, 12º levantamento. set. 2024. 116 p. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2023-2024/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 10 set. 2024.

EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA. **ZARC**: Zoneamento Agrícola de Risco Climático: mapeando riscos e reduzindo perdas, desde 1996. Campinas, 2021. 1 folder. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1132134>. Acesso em: 02 set. 2022.

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília DF: INMET, 2009. p. 261-278.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 48).

KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. **Regionalização dos testes de Valor de Cultivo e Uso e da indicação de cultivares de soja - terceira Aproximação**. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 70 p. (Embrapa Soja. Documentos, 330).

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. 347 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

TEIXEIRA, W. C.; VICTORIA, D. C.; BARROS, A. H. C.; LIMBRERAS, J. F.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M.; LIMA, E. P.; BUENO FILHO, J. S. S.; MONTEIRO, J. E. B. A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no ZARC**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. 38 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 272).

Capítulo 3 - Sensoriamento remoto para enfrentamento da seca na soja

Luis Guilherme Teixeira Crusiol

José Renato Bouças Farias

Sergio Luiz Gonçalves

Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli

José Salvador Simonetto Foloni

Norman Neumaier

O sensoriamento remoto é fundamental para minimizar danos decorrentes de adversidades climáticas em culturas agrícolas, porque proporciona expressivos ganhos de tempo e custo nos processos de coleta de dados de lavouras comerciais e de experimentos científicos, assim como, contempla ampla diversidade de sensores para mensurar diferentes variáveis com elevada acurácia.

Este capítulo tem como objetivo discutir tópicos sobre sensoriamento remoto para o enfrentamento da seca na cultura da soja, abrangendo informações sobre conceitos teóricos, exemplos práticos, potencial de uso e limitações dessas ferramentas tecnológicas em trabalhos científicos e em sistemas de produção de soja.

Os eventos de seca (déficit hídrico combinado com altas temperaturas) são frequentes e causam fortes prejuízos à soja na grande maioria das regiões do Brasil. A seca tem elevada aleatoriedade temporal e espacial, dificultando sobremaneira os procedimentos técnicos para o seu enfrentamento. Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem permitido expressivos avanços para o planejamento e execução de ações práticas para minimizar danos econômicos gerados pela seca.

Quanto à condução de lavouras sojícolas, o sensoriamento remoto pode captar reações de estresses decorrentes de fatores bióticos (doenças e pragas) e abióticos (déficit hídrico, altas temperaturas, entre outros). No caso da soja, há trabalhos que associam modelagem e sensoriamento remoto para estimar prejuízos causados pela seca

em lavouras comerciais (Gonçalves et al., 2022). Concomitantemente, sensores multiespectrais e termais têm sido usados com elevada performance para captar respostas fisiológicas com o objetivo de quantificar ganhos agrônômicos de diferentes tecnologias como, por exemplo, na fenotipagem de larga escala para avaliar cultivares mais tolerantes à seca (Crusiol et al., 2021a).

O sensoriamento remoto avalia a interação entre a radiação eletromagnética (REM), o alvo de interesse (dossel vegetal) e o sensor. A REM, emitida por fontes de luz natural (sol) ou artificiais, se propaga em diferentes comprimentos de onda, os quais apresentam características singulares de interação com o dossel das plantas. Da interação entre REM e lavoura, resultam os fluxos de radiação absorvida, transmitida e refletida que constituem a aquisição da grandeza denominada reflectância, invariante às condições de iluminação (Florenzano, 2011).

Segundo Formaggio e Sanches (2017), a faixa do espectro óptico de 400 a 2500 nm é uma das mais importantes para o sensoriamento remoto, pois contempla os espectros desde a banda do visível à do infravermelho de ondas curtas, comumente separada da seguinte forma: (1) Visível: VIS = 400 a 700 nm; (2) Infravermelho próximo: NIR = 700 a 1100 nm; e (3) Infravermelho de ondas curtas: SWIR = 1100 a 2500 nm.

Outro intervalo espectral que merece destaque, principalmente nos estudos sobre culturas agrícolas, é o infravermelho termal com comprimentos de onda de 3000 a 14000 nm. Porém, neste caso a interação com o dossel das plantas não se dá pelo fluxo incidente e refletido da REM, mas sim pela sua emissividade que é a capacidade de emissão de energia por irradiação térmica (Lorenzetti, 2015).

A captação dos dados oriundos da interação REM-lavoura acontece de maneira remota por meio de sensores, os quais não têm contato direto com o alvo focado (dossel vegetal). Esses sensores são instalados em três tipos de plataformas, da seguinte forma: (1) terrestre (rover); (2) aérea suborbital (exemplo: vant = veículo aéreo não tripulado ou drone); e (3) aérea orbital (satélite) (Florenzano, 2011).

Cada sistema de aquisição de dados (terrestre, aéreos suborbital e orbital) apresenta vantagens e desvantagens, sendo que, quando devidamente aferidos, podem ser utilizados de forma conjugada para proporcionar incrementos de performance nos processos de mensuração das culturas. Sensores aerotransportados suborbitais e orbitais possibilitam avaliações em extensas áreas de lavouras comerciais. Por outro lado, sensores acoplados a sistemas terrestres têm maior precisão para detectar variações morfofisiológicas das plantas em resposta a estresses bióticos e abióticos, possibilitando coletas de dados com expressivo controle local, tais como em trabalhos científicos que demandam elevada precisão (Figura 1).

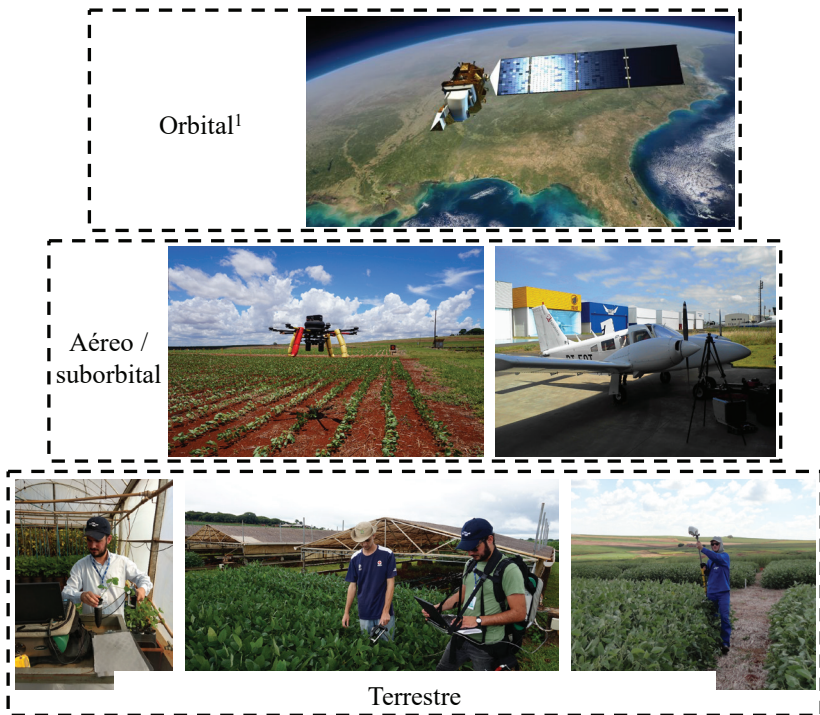


Figura 1. Níveis de aquisição de dados em sensoriamento remoto.

Fonte: adaptado de Crusiol (2021b); ¹Estados Unidos (2011).

Na prática, nos trabalhos de sensoriamento remoto tem-se adotado estratégias que abrangem sistemas terrestres para gerar modelos com elevada precisão a partir da aquisição de dados em nível de dossel das culturas e, posteriormente, esses modelos são utilizados para calibrar sensores para uso em equipamentos aéreos suborbital (drones) e orbital (satélites), possibilitando ampliar a escala territorial de monitoramento.

A reflectância é a proporção de luz refletida por uma superfície em relação à luz incidente, e a resolução espectral específica é a capacidade de um sensor de distinguir diferentes comprimentos de onda da luz. A reflectância, quando detectada por um sensor, é registrada em bandas de diferentes larguras posicionadas em diferentes faixas ao longo do espectro eletromagnético, constituindo a resolução espectral deste sensor (Formaggio; Sanches, 2017).

Há sensores multiespectrais e hiperespectrais classificados da seguinte forma: (1) Multiespectrais: captam bandas largas com aproximadamente 50 nm ou mais, e são usados em vants e satélites (Landsat, Cbers, Sentinel, etc.); e (2) Hiperespectrais: registram bandas estreitas com capacidade de detecção mais detalhada (maior resolução) de alvos, em comparação aos multiespectrais.

Existem três classes de sensores hiperespectrais: (1) Espectrorradiômetros usados em trabalhos científicos de laboratório, casa de vegetação e em experimentos de campo; (2) Espectrorradiômetros aerotransportados (vants) como o Aviris; e (3) Espectrorradiômetros orbitais (satélites) como o Hyperion e o Desis.

A reflectância na faixa do visível apresenta valores relativamente baixos por causa dos pigmentos fotossintetizantes (clorofilas) das folhas que absorvem a radiação eletromagnética incidente (Ponzoni et al., 2012). A reflectância com valores maiores ocorre na faixa do infravermelho próximo (NIR) devido ao espalhamento múltiplo da REM nas diferentes camadas dos tecidos que compõem as folhas. E na banda de ondas relativamente mais longas como, por exemplo, no infravermelho de SWIR ocorre nova queda dos valores de reflectância por causa da presença de água nos tecidos foliares (Ponzoni et al., 2012; Sano et al., 2019).

Os dados do sensoriamento remoto podem ser analisados de forma qualitativa e quantitativa. Para caracterizações qualitativas, comumente são utilizados índices de vegetação para mensurar a dinâmica de crescimento das plantas e para identificar anomalias (variabilidade) dentro das áreas monitoradas. Quanto às avaliações quantitativas, as análises de múltiplas bandas espectrais por meio de modelos multivariados e de aprendizado de máquina (machine learning) apresentam maior potencial para identificar e quantificar níveis de estresses (bióticos e abióticos) que causam anomalias nas áreas monitoradas (Crusiol et al., 2021b; Gonçalves et al., 2022).

Há diversos índices de vegetação (IVs) que são calculados a partir de bancos de dados gerados no sensoriamento remoto, os quais auxiliam na interpretação de imagens para definir ações agronômicas. Os IVs são gerados por meio de bandas espectrais e são expressos em medidas radiométricas adimensionais (Crusiol et al., 2021b).

O IV mais utilizado na atualidade para avaliações de lavouras de soja é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* = índice de vegetação da diferença normalizada). O NDVI foi desenvolvido por Rouse et al. (1974), sendo calculado a partir da diferença normalizada entre bandas espectrais com baixo e alto valor de reflectância da vegetação, como a banda do vermelho (620 a 700 nm) e do infravermelho próximo (NIR = 700 a 1100 nm) (Crusiol et al., 2021b; Gonçalves et al., 2022).

Assim como o NDVI, diversos outros IVs podem ser calculados a partir da diferença entre bandas do espectro eletromagnético, como é o caso do NDWI (*Normalized Difference Water Index* = índice de água de diferença normalizada) que possibilita inferências sobre a condição hídrica das lavouras (Crusiol et al., 2021b; Gonçalves et al., 2022).

É importante ressaltar que frequentemente no Brasil, em avaliações com sensores imageadores a bordo de drones ou satélites, faz-se o estabelecimento de IVs pela substituição de bandas espectrais sem avaliar a relação entre essas bandas e a resposta espectral da lavoura sob efeito de estresses (bióticos e abióticos). Isso leva a erros de interpretação da resposta espectral das plantas, porque não há

aferição do fator limitante (estresse) da área monitorada, prejudicando o potencial de predição dos IVs.

A termografia por infravermelho para caracterizar o estado hídrico das plantas tem sido reportada na literatura científica há algumas décadas. Atualmente tem havido expressivo aumento do uso de câmeras termais acopladas a vants para avaliar culturas agrícolas, cujos sensores têm precisão elevada e custo relativamente baixo, viabilizando o monitoramento em extensas áreas.

A relação entre a dinâmica da água no sistema solo-plantas-atmosfera e a temperatura no dossel das plantas é explicada da seguinte forma: (1) em condição de deficiência hídrica, na presença de luz, ocorre redução da abertura estomática para minimizar a perda de água por transpiração e, por consequência, há menor dissipação do calor via fluxo transpiratório; e (2) por outro lado, nas plantas com maior disponibilidade hídrica, na presença de luz, há maior abertura estomática para capturar CO_2 para a fotossíntese, aumentando o fluxo transpiratório (perda de água) que promove a redução da temperatura no dossel vegetal.

Na Figura 2 tem um exemplo de imagem termal obtida em área experimental com diferentes genótipos de soja submetidos a níveis distintos de oferta hídrica no solo (Crusiol et al., 2020), cujos tratamentos têm as seguintes descrições: (1) Parcelas IRR: plantas com temperaturas relativamente menores submetidas à irrigação plena para evitar estresse; (2) Parcelas NIRR: plantas com temperaturas relativamente intermediárias submetidas ao regime de chuva sem irrigação; e (3) Parcelas DHV: plantas com temperaturas relativamente maiores devido ao déficit hídrico severo no período vegetativo (sem chuva e sem irrigação).

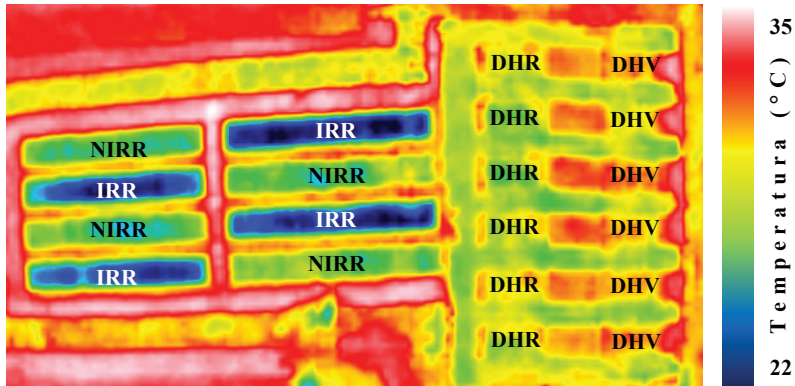


Figura 2. Imagem termal (°C) obtida por câmera infravermelho termal aco- plada a vant em sobrevoio de parcelas experimentais com diferentes genó- tipos submetidos a níveis distintos de disponibilidade de água no solo. IRR = irrigação plena para evitar estresse por déficit hídrico; NIRR = regime de chuva sem irrigação; DHV = déficit hídrico severo no período vegetativo (sem irrigação e sem chuva); DHR = déficit hídrico severo no período reprodutivo (sem irrigação e sem chuva). Observação: Imagem gerada na fase vegetativa da soja.

Fonte: adaptado de Crusiol et al. (2020).

Para efetuar análises de comportamento termal da soja em res- posta a diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo é impres- cindível considerar variáveis climáticas. No trabalho de Crusiol et al. (2020) foram estudadas interações entre variáveis climáticas e o comportamento termal em diferentes estádios de desenvolvimento da soja, e foi verificado, entre outros resultados, que houve correla- ção positiva significativa entre as variáveis temperatura do dossel das plantas e déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV). Segundo os autores, elevada variação de temperatura no dossel ocorreu sob maiores valores de DPV.

Quando as plantas estão estressadas por déficit hídrico, de ma- neira geral, as alterações termais no dossel ocorrem mais rápido do que as ópticas. Assim, o uso integrado de sensores termais e multies- pectrais amplia significativamente a precisão de mensuração da con- dição hídrica da lavoura. Somado a isso, é fundamental ter bancos de

dados detalhados de variáveis edafoclimáticas (clima e solo) das áreas monitoradas, buscando ampliar a assertividade dos procedimentos agrônômicos a serem indicados para o enfrentamento da seca.

Na Figura 3 apresenta-se o comportamento espectral da soja nas condições de plena irrigação e déficit hídrico (Crusiol, 2021a). Neste trabalho foi demonstrado que sensores hiperespectrais podem ser usados para efetuar caracterização de genótipos de soja por meio de modelos que associam faixas espectrais e respostas morfofisiológicas das plantas.

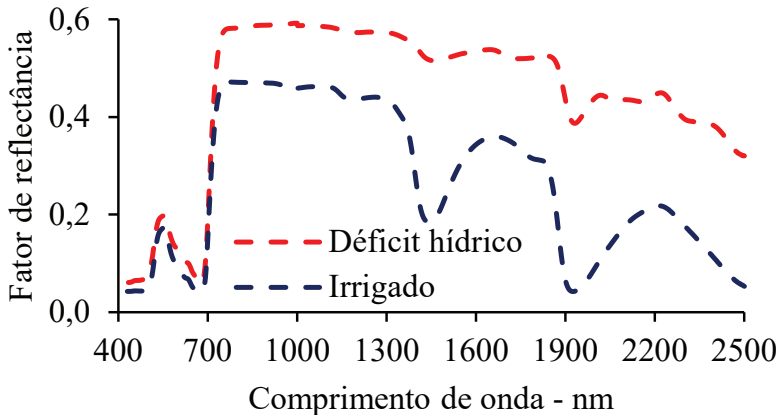


Figura 3. Comportamento espectral do dossel da soja no estágio V3, nas condições de plena irrigação e déficit hídrico.

Fonte: adaptado de Crusiol (2021a).

Observa-se na Figura 3 que o comportamento espectral da soja em resposta ao déficit hídrico foi mensurado em valores de reflectância que expressaram diferentes comprimentos de onda (Crusiol et al., 2021a).

Os valores de reflectância são categorizados entre efeitos primários e secundários (Carter, 1991; El-Hendawy et al., 2019), a saber: (1) os efeitos primários estão diretamente relacionados à absorção da REM pelo conteúdo de água das folhas, com forte abrangência no espectro infravermelho de ondas curtas (SWIR = 1100 a 2500 nm); e

(2) os efeitos secundários estão relacionados aos pigmentos foliares (clorofilas) que absorvem a radiação fotossinteticamente ativa, com elevado alcance no espectro visível (VIS = 400 a 700 nm). Além disso, os efeitos secundários têm relação com a estrutura celular com abrangência no espectro infravermelho próximo (NIR = 700 a 1100 nm).

Na Figura 4 estão apresentados resultados do trabalho de Crusiol et al. (2021a) sobre análise de componentes principais de respostas espectrais de cinco genótipos de soja aos 87 dias após a semeadura (DAS), submetidos a condições distintas de disponibilidade hídrica: (1) IRR = irrigado durante todo ciclo; (2) NIRR = não irrigado, somente chuva; (3) DHV = déficit hídrico no período vegetativo; e (4) DHR = déficit hídrico no período reprodutivo. Os autores verificaram que a primeira (PC1) e segunda (PC2) componentes principais explicaram 93% da variabilidade espectral. A PC1 expressou comportamento espectral distinto das plantas submetidas ao déficit hídrico no período reprodutivo (DHR), enquanto a PC2 mostrou comportamento espectral oposto das plantas que receberam irrigação plena (IRR), e também das plantas submetidas ao déficit hídrico somente no período vegetativo (DHV).

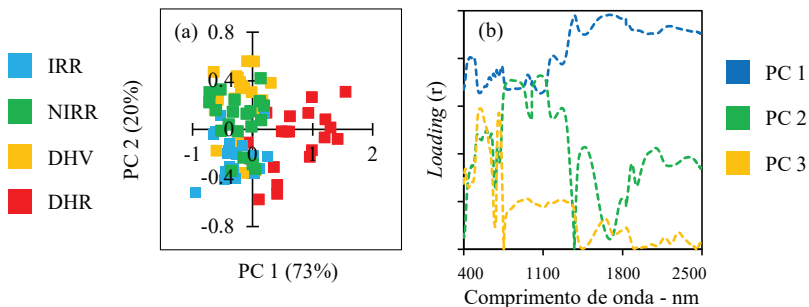


Figura 4. Análise de componentes principais de respostas espectrais de genótipos de soja aos 87 DAS sob distintas condições hídricas: IRR = irrigado durante todo ciclo; NIRR = não irrigado; DHV = déficit hídrico no período vegetativo; DHR = déficit hídrico no período reprodutivo (A); Contribuição dos comprimentos de onda avaliados para a primeira componente principal (PC1), segunda componente principal (PC2) e terceira componente principal (PC3) (B). Fonte: adaptado de Crusiol et al. (2021a).

As distintas respostas espectrais de genótipos de soja sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica demonstram elevado potencial para aferição de ganhos e perdas de produtividade em função da variação de fatores do clima (Figuras 2 a 4). Esses resultados corroboram as expectativas de uso do sensoriamento remoto em larga escala na pesquisa científica e na gestão de lavouras comerciais.

Na Figura 5A apresenta-se gráfico de dispersão entre valores observados e preditos pelo modelo PLSR, cujo coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,68. Este modelo foi desenvolvido a partir de respostas espectrais de 10 genótipos de soja submetidos a distintas condições de disponibilidade hídrica nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019. A Figura 5B mostra os coeficientes da regressão do modelo PLSR para predição de produtividade da soja (Crusiol et al., 2022).

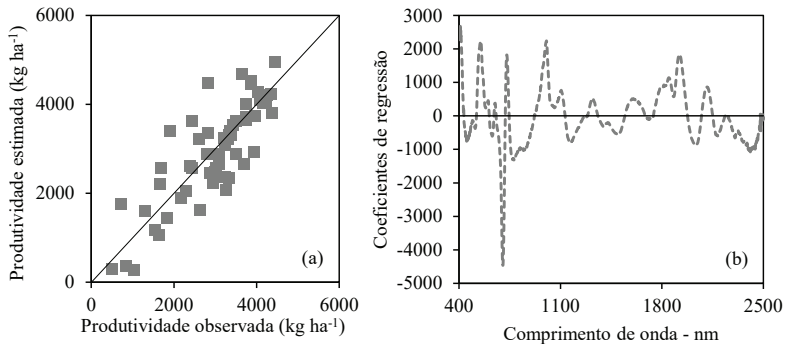


Figura 5. Correlação para produtividade da soja com dados observados e estimados (a), e coeficientes do modelo PLSR para predição de produtividade da soja (b).

Fonte: adaptado de Crusiol et al. (2022).

No trabalho de Crusiol et al. (2022) foi constatado que nos tratamentos de diferentes genótipos de soja sob déficit hídrico, os modelos de estimativa de produtividade apresentaram variações em função dos estádios fenológicos das plantas. Os autores observaram que a acurácia da predição por sensoriamento remoto aumentou à medida

em que houve avanço dos estádios fenológicos da soja, destacando-se o estágio R5 como o mais assertivo para validar a modelagem de estimativa de perda de rendimento por seca.

A Figura 6 contém mapas de produtividade de lavouras comerciais de soja que foram elaborados com base em modelos de predição constituídos por regressão de vetores de suporte (SVR = *Support vector regression*). Esses modelos foram gerados a partir da associação de mapas de colheita e bandas espectrais Vis - NIR - SWIR do satélite Sentinel-2 (Crusiol et al., 2022).

No trabalho de Crusiol et al. (2022), com base em análises de diversas áreas comerciais de produção de soja, foram identificadas importantes estratégias para o uso de bandas espectrais Vis - NIR - SWIR do satélite Sentinel-2, as quais foram elaboradas a partir de resultados gerados em diferentes datas ao longo da safra para o mapeamento da produtividade da soja, a saber: (1) Diversas imagens agregadas ao longo da safra apresentaram maior acurácia em comparação a imagens individuais; (2) O uso de 9 bandas espectrais Vis - NIR - SWIR agregadas apresentou maior acurácia em comparação aos índices de vegetação; (3) O uso de 9 bandas espectrais Vis - NIR - SWIR de imagens agregadas ao longo da safra apresentou a mais elevada acurácia verificada no trabalho; (4) A inserção de índices de vegetação aos modelos machine learning com o uso de bandas espectrais apresentou redundância, ou seja, não resultou em aumento da acurácia.

Os resultados apresentados na Figura 6 são importantes para exemplificar o uso de imagens orbitais no monitoramento de lavouras de soja. Ressalta-se, porém, que o monitoramento integrado das áreas de produção deve contemplar informações adicionais sobre variáveis do clima, solo, manejo fitossanitário, entre outras, para que seja possível efetuar a calibração e validação dos modelos para garantir a quantificação fidedigna dos valores reais de rendimento obtidos por unidade de área ao longo das safras.

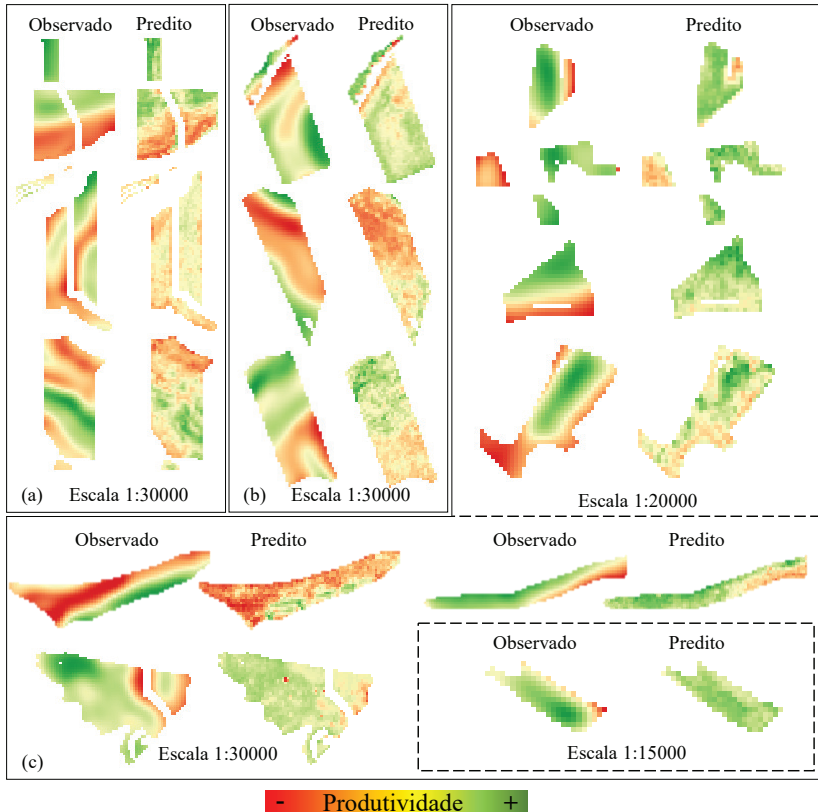


Figura 6. Mapas de produtividade de lavouras comerciais de soja gerados a partir de dados mensurados a campo e dados gerados por meio de modelo de predição machine learning - support vector regression com a utilização de bandas Vis - NIR - SWIR do satélite Sentinel-2.

Fonte: adaptado de Crusiol et al. (2022).

Destaca-se o potencial do sensoriamento remoto para gerar informações sobre as reais condições das lavouras de soja em resposta aos estresses climáticos de déficit hídrico e altas temperaturas, no sentido de amparar decisões técnico-científicas de forma cada vez mais assertiva, ágil e de custo acessível. Entretanto, ressalta-se que a consolidação do sensoriamento remoto para o enfrentamento da seca na soja necessita de vários avanços tecnológicos.

Referências

CARTER, G. A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, v. 78, n. 7, p. 916-924, 1991.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. UAV-based thermal imaging in the assessment of water status of soybean plants. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 3243-3265, 2020.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; SUN, L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Yield prediction in soybean crop grown under different levels of water availability using reflectance spectroscopy and partial least squares regression. **Remote Sensing**, v. 13, n. 5, article, 977, 2021a. 20 p.

CRUSIOL, L. G. T.; SUN, L.; CHEN, R.; SUN, Z.; ZHANG, D.; CHEN, Z.; NANNI, M. M.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Assessing the potential of using high spatial resolution daily NDVI-time-series from planet CubeSat images for crop monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 18, p. 7114-7142, 2021b.

CRUSIOL, L. G. T.; SUN, L.; SIBALDELLI, R. N. R.; JUNIOR, V. F.; FURLANETTI, W. X.; CHEN, R.; SUN, Z.; WUYUN, D.; CHEN, Z.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; CEZAR, E.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Strategies for monitoring within-field soybean yield using Sentinel-2 Vis-NIR-SWIR spectral bands and machine learning regression methods. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 3, p. 1093-1123, 2022.

EL-HENDAWY, S. E.; AL-SUHAIBANI, N. A.; ELSAYED, S.; HASSAN, W. M.; DEWIR, Y. H.; REFAY, Y.; ABDELLA, K. A. Potential of the existing and novel spectral reflectance indices for estimating the leaf water status and grain yield of spring wheat exposed to different irrigation rates. **Agricultural Water Management**, v. 217, p. 356-373, 2019.

ESTADOS UNIDOS. National Aeronautics and Space Administration. **Landsat 8 (aka LDCM) Spacecraft Animations and Still Images**. 2011. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/10812/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 284 p.

GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R.; NEUMAIER, N. **Dinâmica espectral de áreas agrícolas e impactos causados pela geada de junho de 2021, por recortes de imagens do satélite Sentinel-2, na região de Londrina, PR, Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 444).

LORENZETTI, J. A. **Princípios físicos do sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015. 292 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176 p.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: NASA, 1974. v. 1, p. 309-317.

SANO, E. E.; PONZONI, F. J.; MENESES, P. R.; BAPTISTA, G. M. de M.; TONIOL, A.; GALVÃO, L. S.; ROCHA, W. J. S. F. Reflectância da vegetação. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. (ed.). **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. p. 189-223.

Capítulo 4 - Biotecnologia aplicada ao melhoramento genético para tolerância à seca da soja

*Liliane Marcia Mertz-Henning
Alexandre Lima Nepomuceno
Larissa Alexandra Cardoso Moraes
Silvana Regina Rockenbach Marin
Carlos Lásaro Pereira de Melo
José Salvador Simonetto Foloni
José Renato Bouças Farias
Luis Guilherme Teixeira Crusiol
Norman Neumaier*

Do ponto de vista do melhoramento genético, a tolerância à seca é característica definida como complexa por ser governada por grande número de genes. Portanto, para obter cultivares de soja com maior tolerância ao déficit hídrico é necessário investir em várias frentes de trabalho, abrangendo a biotecnologia, genômica, fenotipagem e diversos outros processos de melhoramento (Mir et al., 2012).

A maneira como as plantas respondem à seca é resultado de interações multifatoriais que envolvem diferentes mecanismos morfofisiológicos, os quais variam entre espécies/cultivares, dependem da fase fenológica da cultura, da intensidade e duração do estresse.

Há três principais mecanismos morfofisiológicos das plantas descritos na literatura que conferem maior capacidade para reduzir prejuízos decorrentes do déficit hídrico (Yue et al., 2006; Fang; Xiong, 2015), a saber:

(1) Escape: é o encurtamento do ciclo da cultura quando ocorre déficit hídrico. A planta acelera o seu ciclo para atingir a maturação plena das sementes antes que ocorra total esgotamento da disponibilidade hídrica do solo. O escape é bastante pronunciado na cultura da soja, principalmente quando acontece déficit hídrico nas fases de

formação das vagens (Estádios: R3 a R4) e/ou enchimento dos grãos (Estádios: R5 a R6).

(2) Evitamento: acontece a partir de modificações morfofisiológicas das plantas para que haja aumento da absorção e/ou redução da perda de água. São exemplos de evitamento: a deposição de cera nas folhas, o aumento de raízes no perfil do solo, o enrolamento das folhas, o fechamento dos estômatos para reduzir a transpiração, entre outros.

(3) Tolerância: é a capacidade da planta de manter seus processos fisiológicos mesmo em condições severas de estresse, dentro de certos limites. Esse mecanismo é governado por grande número de genes que ativam várias vias metabólicas para reduzir ou reparar danos ocasionados pelo estresse. São exemplos de tolerância à seca, a regulação osmótica e a ativação da defesa antioxidante das células.

Nas últimas décadas, tem havido avanços significativos nos procedimentos de seleção genômica ampla (GWS = Genome-Wide Selection), constituindo ferramentas de alta performance para obtenção de genótipos de soja com características agronômicas importantes.

A GWS consiste em fazer a predição dos efeitos genéticos de grande número de marcadores dispersos em todo o genoma de um determinado organismo. Assim, é possível capturar os efeitos de todos os loci (pequenos e grandes efeitos), permitindo que se elucide grande parte da variação genética de uma determinada característica quantitativa como, por exemplo, a tolerância à seca que é controlada por vários QTLs (Quantitative Trait Loci = Loci de Características Quantitativas) (Meuwissen et al., 2001). Contudo, para que a GWS tenha sucesso é preciso que esteja atrelada a processos de fenotipagem de elevada eficiência e acurácia, ou seja, é imprescindível que essas áreas da ciência evoluam concomitantemente.

A fenotipagem para uso em larga escala ainda é um grande desafio e constitui um dos principais entraves aos programas de melhoramento de soja para tolerância à seca. Atualmente, os protocolos e equipamentos disponíveis são demasiadamente lentos e onerosos para mensurar variáveis morfofisiológicas das plantas responsivas ao déficit hídrico, por isso são usados somente em estudos conceituais.

Contudo, nos últimos anos têm sido aprimoradas tecnologias de fenotipagem de linhagens de soja baseadas em sensores multiespectrais e termais para viabilizar o uso em programas de melhoramento genético para tolerância à seca, buscando constituir processos mais céleres e eficientes de seleção (Crusiol et al., 2021).

Para experimentos em ambientes controlados, há no mercado plataformas de fenotipagem instaladas em casas de vegetação totalmente climatizadas, as quais permitem não apenas o controle das condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar, irrigação, fotoperíodo, entre outras), como também a automatização integral da coleta de dados de maneira rápida e não destrutiva (pesagem de biomassa), assim como, o uso de diferentes sensores hiperespectrais e termais. Essas estruturas viabilizam a execução de protocolos de fenotipagem com alta eficiência operacional (Honsdorf et al., 2014).

Nas avaliações de campo, nos últimos anos vêm sendo desenvolvidas plataformas e metodologias de fenotipagem de larga escala denominadas HTP (High-Throughput Phenotyping), operacionalizadas por meio de sensoriamento remoto terrestre (rovers) e/ou aéreo (drones, satélites). O HTP gera dados por meio de sensores multiespectrais e termais que abrangem comprimentos de onda na faixa do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR: Near Infrared) e/ou do infravermelho termal (TIR: Thermal Infrared) (Ghanem et al., 2015).

Para simular o estresse por seca em condição de campo, uma estratégia é usar coberturas móveis denominadas “rain out shelters” (abrigos contra chuva). São telhados instalados sobre parcelas experimentais, comandados por sensores e que se movimentam automaticamente em trilhos. Quando inicia a chuva eles imediatamente cobrem as parcelas, e após o término da chuva, imediatamente retornam à posição de céu aberto (Figura 1). Dessa forma, é possível simular déficits hídricos severos (ausência de chuva) em diferentes fases fenológicas da cultura.

Foto: Arquivo Embrapa Soja.



Figura 1. Cobertura móvel modelo “rain out shelter” para simular, em condição de campo, déficits hídricos severos (ausência de chuva) em diferentes fases fenológicas da soja.

A biologia molecular nas últimas décadas tem elucidado o funcionamento de vários genes envolvidos em diferentes mecanismos morfofisiológicos da soja para tolerância à seca. Concomitantemente, a engenharia genética tem possibilitado o desenvolvimento de génotipos de soja contendo genes de tolerância à seca. Entre as ferramentas da biotecnologia, a criação de linhagens geneticamente modificadas (GMs) é uma alternativa que tem sido explorada.

As plantas sob estresse por seca ativam um grande número de genes que são classificados em dois grupos (Hasegawa et al., 2000; Shinozaki; Yamaguchi-Shinozaki, 2007):

O primeiro grupo inclui genes que codificam proteínas que estão diretamente associadas à tolerância de estresses abióticos, como as chaperonas (proteínas LEA: abundantes em embriogênese tardia), osmotinas (proteínas anticongelantes), proteínas de ligação a mRNA, enzimas-chave para a biossíntese de osmólitos, proteínas de canal de água (aquaporinas), proteínas transportadoras de açúcares e de prolina, enzimas de detoxificação e várias proteases.

O segundo grupo é composto por proteínas reguladoras, ou seja, que estão envolvidas na regulação subsequente à transdução de sinais e também na expressão gênica responsiva aos estresses. As proteínas reguladoras são constituintes de vários fatores de transcrição: proteínas quinases, proteínas fosfatases, enzimas envolvidas no metabolismo de fosfolípidios e outras moléculas sinalizadoras.

Há complexos mecanismos regulatórios de genes conectados à percepção de sinais decorrentes de estresses abióticos ou ambientais (Shinozaki; Yamaguchi-Shinozaki, 2000; Zhu, 2001). No caso da seca, vários genes são induzidos pelo estresse ambiental (déficit hídrico) e também são regulados pelo hormônio ácido abscísico (ABA) (Urano et al., 2017). Porém, existem genes que não são ativados pelo ABA, mas são induzidos pela seca. Assim, as respostas moleculares das plantas ao estresse por seca são divididas em rotas dependentes e independentes do ABA (Shinozaki; Yamaguchi-Shinozaki, 2000; Yamaguchi-Shinozaki; Shinozaki, 2005).

As primeiras estratégias de transgenia para tolerância à seca baseavam-se na introdução e superexpressão de genes que codificam para a síntese de proteínas funcionais, tais como, as proteínas envolvidas na biossíntese de prolina (Kishor et al., 1995), proteínas LEA (Xu et al., 1996) e outras proteínas que atuam diretamente no metabolismo celular como as aquaporinas, desidrinas e enzimas de detoxificação.

Posteriormente, a estratégia passou a ser focada em genes que codificam para fatores de transcrição (FTs). Os FTs controlam a expressão de um grande número de genes e, dessa forma, é possível obter genótipos mais promissores com características complexas de tolerância a estresses abióticos. Os FTs apresentam grande potencial para o melhoramento genético porque são capazes de reconhecer e se ligar a sequências específicas do DNA nas regiões reguladoras de genes alvo, ativando processos de proteção celular em condições de estresse (Shinozaki; Yamaguchi-Shinozaki, 2007).

A Embrapa Soja, há vários anos, vem conduzindo diversos trabalhos visando a obtenção de linhagens de soja transgênicas tolerantes à seca por meio da superexpressão dos genes AtDREB1A, GmDREB2A, AtAREB1, AtGolS2 e AtNCED3 (Barbosa et al., 2013; Leite et al., 2014; Fuganti-Pagliarini et al., 2017; Marinho et al., 2016, 2022; Caranhato, 2018).

A proteína DREB, que faz ligação a um elemento responsivo à desidratação, é um FT que constitui via de resposta à seca independente do ABA. Os DREB/CBFs interagem com o elemento cis de resposta à desidratação [(DRE) (TACCGACAT)/ motivo de repetição

C (CRT) (A/GCCGAC)] que está presente na região promotora dos genes alvo e controlam a expressão de múltiplos genes estresse induzidos (Sakuma et al., 2006a).

A inserção do FT AtDREB1A melhorou as respostas de tolerância à seca em *Arabidopsis thaliana* (Gilmour et al., 1998; Jaglo-Ottosen et al., 1998; Liu et al., 1998), tabaco (Kasuga et al., 2004), arroz (Dubouzet et al., 2003; Oh et al., 2005; Ito et al., 2006), milho (Qin et al., 2004, 2007), trigo (Pellegrineschi et al., 2004; Gao et al., 2009) e amendoim (Bhatnagar-Mathur et al., 2004, 2007; Devi et al., 2011; Vadez et al., 2013).

Em projetos conduzidos na Embrapa Soja nas últimas décadas, em colaboração com o instituto de pesquisa científica JIRCAS (Japan International Research Center for Agricultural Sciences), foram geradas linhagens GM de soja contendo o FT AtDREB1A. Essas linhagens foram caracterizadas em casa de vegetação e em campo e apresentaram incrementos significativos de desempenho fisiológico e agrônômico sob déficit hídrico.

Num dos primeiros trabalhos de transgenia feitos na Embrapa Soja foi gerada a linhagem P58, cuja expressão do gene AtDREB1A em condição de seca foi maior nas plantas GMs, demonstrando estabilidade do transgene nas gerações T2 (Polizel et al., 2011; Rolla et al., 2014).

Em outro estudo realizado na Embrapa Soja, genes responsivos à seca (GmPI-PLC, GmSTP, GmGRP e GmLEA14) foram altamente expressos em plantas GMs que foram submetidas ao déficit hídrico severo. Essas plantas transformadas, quando submetidas ao estresse por seca, apresentaram incrementos significativos nas taxas fotossintéticas e maiores teores de clorofila nas folhas (Polizel et al., 2011).

Outro FT que também pertence à família DREB é a proteína DREB2A, a qual tem sido utilizada para desenvolver plantas GMs tolerantes à seca em diversas espécies. Em *Arabidopsis*, a superexpressão de uma forma constitutivamente ativa de DREB2A resultou em maiores níveis de tolerância ao déficit hídrico e a altas temperaturas (Sakuma et al. 2006a, 2006b). Os genes homólogos de AtDREB2A foram estudados em milho (Qin et al., 2007), arroz (Dubouzet et al.,

2003), girassol (Almoguera et al., 2009), trigo (Terashima; Takumi, 2009) e crisântemo (Liu et al., 2008).

Em projeto conduzido por Mizoi et al. (2013) foi identificado um gene DREB2 da soja denominado GmDREB2A;2. Os autores comprovaram em *Arabidopsis* que a expressão heteróloga do FT GmDREB2A;2 induziu genes de resposta ao déficit hídrico (RD29A, RD29B, HsfA3 e HSP70), elevando o nível de tolerância ao estresse.

Em outra pesquisa realizada por Rolla et al. (2014), com as linhagens de soja P58 e P1142 contendo o gene AtDREB1A nas gerações T8 e T5, respectivamente, foram constatados maiores índices de sobrevivência das plantas GMs em relação à sua progenitora cultivar BR 16 (não GM). Os níveis de sobrevivência após déficit hídrico foram de 70% e 60% para as linhagens P58 e P1142, respectivamente, e de apenas 40% para a BR 16.

No trabalho de Marinho et al. (2022), foi introduzido o FT GmDREB2A;2 em plantas de soja que foram caracterizadas para respostas moleculares, fisiológicas e agrônômicas. Os dados moleculares mostraram que as linhagens GMs tiveram expressões do FT relativamente maiores em comparação à cultivar comercial BRS 283 (não GM), independentemente de ter havido ou não estresse (testadas nas condições de plena irrigação e déficit hídrico severo).

Genes responsivos à seca foram induzidos nas linhagens GMs com superexpressão dos genes GmDREB2A;2 CA e GmDREB2A;-2FL, em trabalho realizado por Marinho et al. (2022). Todas as plantas de soja (GMs e não GMs) foram submetidas ao déficit hídrico nas fases vegetativa e reprodutiva, e os autores constataram que os níveis de expressão dos genes LEA6, LEA2 e HSP70 foram maiores nas linhagens GMs em comparação à cultivar não GM BRS 283.

Os transcritos dos genes LEA2 e LEA6 são deidrinas que normalmente se acumulam nas plantas na fase de maturação das sementes em resposta ao déficit hídrico, alta salinidade e baixas temperaturas, assim como, em resposta à aplicação de ABA (Battaglia et al., 2008). A contribuição das deidrinas para elevar a tolerância das plantas a estresses abióticos ocorre principalmente devido à proteção de membranas lipídicas (Bao et al., 2017).

No estudo de Koag et al. (2009) foi identificado que a interação das desidrinas com lipídios na membrana e com proteínas parcialmente desnaturadas ajuda a proteger as células contra danos do déficit hídrico. Segundo Hand et al. (2011), as desidrinas desempenham funções chave na tolerância à desidratação, capturando água e protegendo a estrutura de proteínas e membranas, além disso, atuam como chaperonas moleculares (proteínas de choque térmico) e solutos hidrofílicos para proteger as células em condição de estresse.

Ao considerar os FTs dependentes do ABA, há resultados positivos do AREB que contempla um grupo de proteínas de ligação que proporcionam às plantas elevada capacidade de tolerância à seca. Em *Arabidopsis*, o AREB demonstrou ser o principal FT sob condições de estresses abióticos (Yamaguchi-Shinozaki; Shinozaki, 2005; Kobayashi et al., 2008; Lee et al., 2010; Yoshida et al., 2015).

O AREB ativa mecanismos de resposta da soja a estresses abióticos e efetua a sinalização via ABA durante a fase vegetativa (Jakoby et al., 2002; Fujita et al., 2005; Yoshida et al., 2010). No estudo de Barbosa et al. (2013), descreve-se que o FT AREB tem como alvo a expressão de genes responsivos ao déficit hídrico através da ligação a elementos cis conservados, denominados de elementos responsivos ao ABA (ABRE; PyACGTGG/TC) presentes nas regiões promotoras de genes alvo.

Em experimento com *Arabidopsis*, Fujita et al. (2005) constataram que a superexpressão do gene AREB1 resultou em hipersensibilidade ao ABA e induziu genes como o RD29B responsivos ao estresse, promovendo aumento da tolerância ao déficit hídrico.

Trabalhos desenvolvidos pela Embrapa Soja com plantas GM de soja com superexpressão do FT AtAREB1, mostraram incrementos significativos de performance fisiológica e agrônômica para tolerância à seca (Barbosa et al., 2013; Leite et al., 2014; Marinho et al., 2016; Fuganti-Pagliarini et al., 2017).

Em estudo conduzido por Marinho et al. (2016), foram avaliadas três linhagens de soja GMs (1Eb2889, 1Ea15 e 1Ea2939) contendo o gene AtAREB1, em comparação à sua progenitora cultivar BR 16 (não GM). Os autores verificaram que, embora o gene tenha sido introduzido com sucesso em todas as plantas GMs, a expressão

do AtAREB1 foi menor na linhagem 1Ea15 em relação às outras 1Eb2889 e 1Ea2939, o que causou diferenças de desempenho sob déficit hídrico.

Na Figura 2 são apresentadas imagens de plantas GMs de soja contendo o gene AtAREB1 (linhagens: 1Eb2889, 1Ea15 e 1Ea2939) e da cultivar BR 16 (não GM), após déficit hídrico severo em experimento executado por Marinho et al. (2016). Neste trabalho de casa de vegetação, após 17 dias de suspensão total da irrigação, seguidos de 7 dias de reidratação, constatou-se que a cultivar BR 16 e a linhagem 1Ea15 tiveram 100% de plantas mortas, enquanto as linhagens GMs 1Ea2939 e 1Eb2889 tiveram índices de sobrevivência de 60% e 40%, respectivamente.

Avaliações realizadas por Marinho et al. (2016) mostraram que a transgenia com o gene AtAREB1 sob o controle do promotor constitutivo 35S não prejudicou o desempenho das plantas transformadas. A linhagem GM 1Ea2939 (gene AtAREB1) apresentou maior número total de vagens, maior massa de matéria seca de vagens, maior número de sementes viáveis, maior massa de matéria seca de sementes viáveis, maior massa de matéria seca de sementes e maior número total de sementes por planta. A linhagem 1Ea2939 teve menores taxas de transpiração sob déficit hídrico, evidenciando o efeito do gene AtAREB1 sobre um dos mecanismos de evitamento à seca que é a regulação da abertura de estômatos.

No trabalho de Caranhato (2018), foi realizada a introgressão do gene AtAREB1 por meio de cruzamentos da linhagem GM 1Ea2939 com diferentes genótipos de soja (linhagem LS 93-0375 e cultivares BR 16 e BMX Desafio RR). Os resultados mostraram que o mecanismo fisiológico de evitamento da seca (regulação da abertura de estômatos) foi preservado para todos os cruzamentos efetuados, quando as plantas foram submetidas ao déficit hídrico (Figura 3).

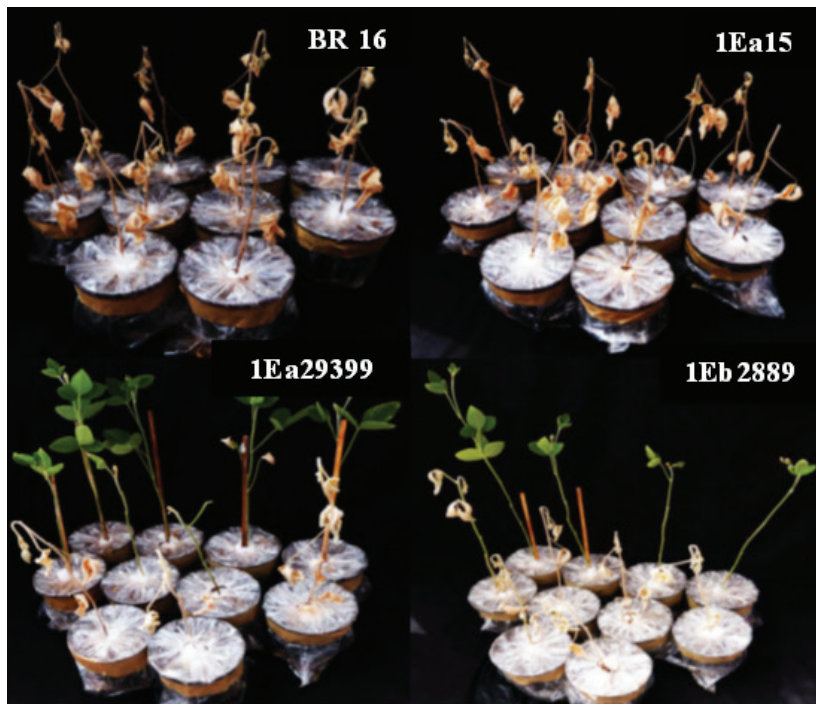


Figura 2. Plantas de soja das linhagens GMs 1Ea29399, 1Eb2889 e 1Ea15 (gene *AtAREB1*) em comparação à sua progenitora cultivar BR 16 (não GM), após período prolongado sob déficit hídrico severo em condição de casa de vegetação. As linhagens GMs 1Ea29399 e 1Eb2889 tiveram índices de sobrevivência de 60% e 40%, respectivamente, e a linhagem GM 1Ea15 e a cultivar BR 16 tiveram 100% de plantas mortas.

Fonte: adaptado de Caranhato (2018).



Figura 3. Plantas de soja de linhagens GMs contendo o gene *AtAREB1*, comparadas aos seus respectivos progenitores (sem o gene *AtAREB1*), após período prolongado sob déficit hídrico em condição de casa de vegetação. (A) Linhagem GM 1Ea2939 e cultivar BR 16; (B) Linhagem GM (1Ea2939 x LS 93-0375) e linhagem LS93-0375; (C) Linhagem GM (1Ea2939 x BMX Desafio RR) e cultivar BMX Desafio RR.

Fonte: adaptado de Caranhato (2018).

Em outro estudo realizado na Embrapa Soja por Honna et al. (2016), foram geradas linhagens GMs de soja com o gene AtGolS2 que codifica para a enzima galactinol sintase, a qual atua na biossíntese de oligossarídeos pertencentes a família da rafinose (RFOs). Foram obtidas duas linhagens GMs (21a1 e 21a4) com superexpressão do gene AtGolS2 por meio de transformação mediada por *Agrobacterium tumefaciens*, as quais foram avaliadas para atributos moleculares, fisiológicos e agronômicos em condição de déficit hídrico. Os resultados mostraram que a superexpressão do gene AtGolS2 nas linhagens GMs de soja incrementou as quantidades de transcritos da biossíntese de galactinol e dos genes dos RFOs (rafinose 1 e rafinose 3).

O acúmulo de carboidratos em plantas de soja sob déficit hídrico é um mecanismo adaptativo à essa condição estressante, uma vez que pode elevar o potencial osmótico nos tecidos vegetais e, por consequência, intensificar a entrada de água nas células, retardando o processo de desidratação e senescência (Quick et al., 1989; Turner et al., 2001). Assim, o acúmulo de transcritos de galactinol e rafinose observado na linhagem GM 21a4 gerada por Honna et al. (2016), pode constituir importante ativo para o melhoramento genético da soja para tolerância à seca.

Outro gene estudado pela equipe da Embrapa Soja foi o AtNCED3, que codifica para a enzima 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase (NCED) que é chave na biossíntese do ABA. O ABA tem função importante na resposta das plantas à seca, com destaque para a regulação da abertura dos estômatos. Sob condição de déficit hídrico, observou-se que as trocas gasosas diminuíram na linhagem GM de soja 2Ha11 com superexpressão do gene AtNCED3 (Molinari et al., 2020).

No trabalho de Molinari et al. (2020), foi estudada a eficiência intrínseca de uso da água (EIUA), calculada a partir da divisão da taxa fotossintética líquida pelos valores de condutância estomática. Neste experimento, após período prolongado sob déficit hídrico, as plantas GMs de soja com o gene AtNCED3 apresentaram valores de EIUA em torno de 80% maiores em comparação às plantas não transformadas.

Alguns trabalhos disponíveis na literatura corroboram os resultados obtidos por Molinari et al. (2020). No experimento de Luchi et al. (2001) foi constatada redução significativa da taxa de trocas gasosas em plantas de *Arabidopsis* com superexpressão do gene AtNCED3. Em outro trabalho de Hwang et al. (2010), houve expressiva redução da taxa de transpiração de plantas de *Arabidopsis* com superexpressão do gene OsNCED3 proveniente do arroz. Em estudo de Zhang et al. (2008) com linhagens GMs de tabaco com superexpressão do gene SgNCED1, foram verificadas menores taxas de transpiração em condição de déficit hídrico.

Segundo Molinari et al. (2020), nas avaliações da linhagem GM de soja 2Ha11, com superexpressão do gene AtNCED3, foram observados valores reduzidos de trocas gasosas em condição de déficit hídrico. Os autores argumentam que este efeito fisiológico aconteceu por causa do fechamento estomático desencadeado por aumento dos níveis de ABA.

Todos os resultados supracitados evidenciam o elevado potencial da biotecnologia para obtenção de cultivares GMs de soja com maior tolerância à seca. Dentre os genes estudados pela equipe da Embrapa Soja, destacam-se o AtAREB1, AtGolS2 e AtNCED3 como os mais promissores a serem usados em programas de melhoramento de soja no Brasil.

Porém, atualmente há processos burocráticos demasiadamente demorados e onerosos, nacionais e internacionais, para liberação comercial de cultivares transgênicas, os quais constituem um dos principais entraves ao melhoramento genético para tolerância à seca na sojicultura brasileira. No Brasil, a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio) do Governo Federal avalia a biossegurança de todos os organismos geneticamente modificados (OGMs) a serem estudados e/ou comercializados no País.

Ferramentas de edição gênica vêm revolucionando a biotecnologia nos últimos anos em todo o mundo, tal como o sistema Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat (CRISPR). A edição gênica tem criado novas possibilidades para além da transgenia,

possibilitando a geração de cultivares com características agrônômicas impactantes, como é o caso da tolerância à seca.

No que se refere à edição gênica no melhoramento da soja, dependendo das alterações realizadas por meio do CRISPR, se não houver introdução de genes exógenos, as linhagens geradas podem ser consideradas como não GMs, reduzindo expressivamente o custo e o tempo para disponibilizar sementes aos agricultores para ampliar a capacidade de tolerância à seca de suas lavouras.

Referências

ALMOGUERA, C.; PRIETO-DAPENA, P.; DÍAZ-MARTÍN, J.; ESPINOSA, J. M.; CARRANCO, R.; JORDANO, J. The HaDREB2 transcription factor enhances basal thermotolerance and longevity of seeds through functional interaction with HaHSFA9. **BMC Plant Biology**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2009. DOI: 10.1186/1471-2229-9-75.

BAO, F.; DU, D.; AN, Y.; YANG, W.; WANG, J.; CHENG, T.; ZHANG, Q. Overexpression of *Prunus mume* dehydrin genes in tobacco enhances tolerance to cold and drought. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 151, 2017. 12 p. DOI: 10.3389/fpls.2017.00151.

BARBOSA, E. G. G.; LEITE, J. P.; MARIN, S. R. R.; MARINHO, J. P.; CARVALHO, J. D. F. C.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; OLIVEIRA, M. C. N.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; NAKASHIMA, K.; MARUYAMA, K.; KANAMORI, N.; FUJITA, Y.; YOSHIDA, T.; Nepomuceno, A. L. Overexpression of the ABA-dependent AREB1 transcription factor from *Arabidopsis thaliana* improves soybean tolerance to water deficit. **Plant Molecular Biology Reporter**, v. 31, n. 3, p. 719-730, 2013. DOI: 10.1007/s11105-012-0541-4.

BATTAGLIA, M.; OLVERA-CARRILLO, Y.; GARCIARRUBIO, A.; CAMPOS, F.; COVARRUBIAS, A. A. The enigmatic LEA proteins and other hydrophilins. **Plant Physiology**, v. 148, n. 1, p. 6-24, 2008. DOI: 10.1104/pp.108.120725.

BHATNAGAR-MATHUR, P.; DEVI, M. J.; REDDY, D. S.; LAVANYA, M.; VADEZ, V.; SERRAJ, R.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHARMA, K. K. Stress-inducible expression of At DREB1A in transgenic peanut (*Arachis hypogaea* L.) increases transpiration efficiency under water-limiting conditions. **Plant Cell Reports**, v. 26, n. 12, p. 2071-2082, 2007. DOI: 10.1007/s00299-007-0406-8.

BHATNAGAR-MATHUR, P.; SHARMA, K. K.; DEVI, M. J.; SERRAJ, R.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; VADEZ, V. Evaluation of transgenic groundnut lines under water limited conditions. **International Arachis Newsletter**, v. 24, p. 33-35, 2004.

CARANHATO, A. L. H. **Caracterização de respostas moleculares e fisiológicas da introgressão da construção 35S-AtAREB1 em genótipos de soja**. 2018. 65 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Biologia Molecular) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

CRUSIOL, G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; SUN, L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Classification of soybean genotypes assessed under different water availability and at different phenological stages using leaf-based hyperspectral reflectance. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, article 172, 2021. 24 p. DOI: 10.3390/rs13020172.

DEVI, M. J.; BHATNAGAR-MATHUR, P.; SHARMA, K. K.; SERRAJ, R.; ANWAR, S. Y.; VADEZ, V. Relationships between transpiration efficiency and its surrogate traits in the rd29A: DREB1A transgenic lines of groundnut. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 4, p. 272-283, 2011. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2011.00464.x.

DUBOUZET, J. G.; SAKUMA, Y.; ITO, Y.; KASUGA, M.; DUBOUZET, E. G.; MIURA, S.; SEKI, M.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. OsDREB genes in rice, *Oryza sativa* L., encode transcription activators that function in drought-, high-salt-and cold-responsive gene expression. **The Plant Journal**, v. 33, n. 4, p. 751-763, 2003. DOI: 10.1046/j.1365-313x.2003.01661.x.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 72, n. 4, p. 673-689, 2015. DOI: 10.1007/s00018-014-1767-0.

FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FERREIRA, L. C.; RODRIGUES, F. A.; MOLINARI, H. B.; MARIN, S. R.; MOLINARI, M. D. C.; MARCOLINO-GOMES, J.; MERTZ-HENNING, L. M.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; NEUMAIER, N.; KANAMORI, N.; FUJITA, Y.; MIZOI, J.; NAKASHIMA, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAMI, k.; Nepomuceno, A. L. Characterization of soybean genetically modified for drought tolerance in field conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 448, 2017. 15 p. DOI: 10.3389/fpls.2017.00448.

FUJITA, Y.; FUJITA, M.; SATOH, R.; MARUYAMA, K.; PARVEZ, M. M.; SEKI, M.; HIRATSU, K.; OLHME-TAKAGI, M.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. AREB1 is a transcription activator of novel ABRE-dependent ABA signaling that enhances drought stress tolerance in *Arabidopsis*. **The Plant Cell**, v. 17, n. 12, p. 3470-3488, 2005. DOI: 10.1105/tpc.105.035659.

GAO, S. Q.; CHEN, M.; XIA, L. Q.; XIU, H. J.; XU, Z. S.; LI, L. C.; ZHAO, C. P.; CHENG, X. G.; MA, Y. Z. A cotton (*Gossypium hirsutum*) DRE-binding transcription factor gene, GhDREB, confers enhanced tolerance to drought, high salt, and freezing stresses in transgenic wheat. **Plant Cell Reports**, v. 28, n. 2, p. 301-311, 2009. DOI: 10.1007/s00299-008-0623-9.

GHANEM, M. E.; MARROU, H.; SINCLAIR, T. R. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 3, p. 139-144, 2015. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.

GILMOUR, S. J.; ZARKA, D. G.; STOCKINGER, E. J.; SALAZAR, M. P.; HOUGHTON, J. M.; THOMASHOW, M. F. Low temperature regulation of the *Arabidopsis* CBF family of AP2 transcriptional activators as an early step in cold-induced COR gene expression. **The Plant Journal**, v. 16, n. 4, p. 433-442, 1998. DOI: 10.1046/j.1365-313x.1998.00310.x.

HAND, S. C.; MENZE, M. A.; TONER, M.; BOSWELL, L.; MOORE, D. LEA proteins during water stress: not just for plants anymore. **Annual Review of Physiology**, v. 73, p. 115-134, 2011. DOI: 10.1146/annurev-physiol-012110-142203.

HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; ZHU, J. K.; BOHNERT, H. J. Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review of Plant Biology**, v. 51, n. 1, p. 463-499, 2000. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.463.

HONNA, P. T.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FERREIRA, L. C.; MOLINARI, M. D. C.; MARIN, S. R.; DE OLIVEIRA, M. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; MERTZ-HENNING, L. M.; KANAMORI, N.; NAKASHIMA, K.; TAKASAKI, H.; URANO, K.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOSAKI, K.; DESIDÉRIO, J.; Nepomuceno, A. L. Molecular, physiological, and agronomical characterization, in greenhouse and in field conditions, of soybean plants genetically modified with AtGolS2 gene for drought tolerance. **Molecular Breeding**, v. 36, n. 11, p. 1-17, 2016. DOI: 10.1007/s11032-016-0570-z.

HONSDORF, N.; MARCH, T. J.; BERGER, B.; TESTER, M.; PILLEN, K. High-throughput phenotyping to detect drought tolerance QTL in wild barley introgression lines. **PLoS One**, v. 9, n. 5, e97047, 2014. 13 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0097047.

HWANG, S. G.; CHEN, H. C.; HUANG, W. Y.; CHU, Y. C.; SHII, C. T.; CHENG, W. H. Ectopic expression of rice OsNCED3 in *Arabidopsis* increases ABA level and alters leaf morphology. **Plant Science**, v. 178, n. 1, p. 12-22, 2010. DOI: 10.1016/j.plantsci.2009.09.014.

ITO, Y.; KATSURA, K.; MARUYAMA, K.; TAJI, T.; KOBAYASHI, M.; SEKI, M.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Functional analysis of rice DREB1/CBF-type transcription factors involved in cold-responsive gene expression in transgenic rice. **Plant and Cell Physiology**, v. 47, n. 1, p. 141-153, 2006. DOI: 10.1093/pcp/pci230.

IUCHI, S.; KOBAYASHI, M.; TAJI, T.; NARAMOTO, M.; SEKI, M.; KATO, T.; TABATA, S.; KAKUBARI, Y.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Regulation of drought tolerance by gene manipulation of 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, a key enzyme in abscisic acid biosynthesis in *Arabidopsis*. **The Plant Journal**, v. 27, n. 4, p. 325-333, 2001. DOI: 10.1046/j.1365-313x.2001.01096.x.

JAGLO-OTTOSEN, K. R.; GILMOUR, S. J.; ZARKA, D. G.; SCHABENBERGER, O.; THOMASHOW, M. F. *Arabidopsis* CBF1 overexpression induces COR genes and enhances freezing tolerance. **Science**, v. 280, n. 5360, p. 104-106, 1998. DOI: 10.1126/science.280.5360.104.

JAKOBY, M.; WEISSHAAR, B.; DRÖGE-LASER, W.; VICENTE-CARBAJOSA, J.; TIEDEMANN, J.; KROJ, T.; PARCY, F. bZIP transcription factors in *Arabidopsis*. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 3, p. 106-111, 2002. DOI: 10.1016/s1360-1385(01)02223-3.

KASUGA, M.; MIURA, S.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. A combination of the *Arabidopsis* DREB1A gene and stress-inducible rd29A promoter improved drought-and low-temperature stress tolerance in tobacco by gene transfer. **Plant and Cell Physiology**, v. 45, n. 3, p. 346-350, 2004. DOI: 10.1093/pcp/pch037.

KISHOR, P. K.; HONG, Z.; MIAO, G. H.; HU, C. A. A.; VERMA, D. P. S. Overexpression of [δ]-pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. **Plant Physiology**, v. 108, n. 4, p. 1387-1394, 1995. DOI: 10.1104/pp.108.4.1387.

KOAG, M. C.; WILKENS, S.; FENTON, R. D.; RESNIK, J.; VO, E.; CLOSE, T. J. The K-segment of maize DHN1 mediates binding to anionic phospholipid vesicles and concomitant structural changes. **Plant Physiology**, v. 150, n. 3, p. 1503-1514, 2009. DOI: 10.1104/pp.109.136697.

KOBAYASHI, F.; MAETA, E.; TERASHIMA, A.; TAKUMI, S. Positive role of a wheat HvABI5 ortholog in abiotic stress response of seedlings. **Physiologia Plantarum**, v. 134, n. 1, p. 74-86, 2008. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2008.01107.x.

LEE, S. J.; KANG, J. Y.; PARK, H. J.; KIM, M. D.; BAE, M. S.; CHOI, H. I.; KIM, S. Y. DREB2C interacts with ABF2, a bZIP protein regulating abscisic acid-responsive gene expression, and its overexpression affects abscisic acid sensitivity. **Plant Physiology**, v. 153, n. 2, p. 716-727, 2010. DOI: 10.1104/pp.110.154617.

LEITE, J. P.; BARBOSA, E. G. G.; MARIN, S. R. R.; MARINHO, J. P.; CARVALHO, J. F. C.; PAGLIARINI, R. F.; CRUZ, A. S.; OLIVEIRA, M. C. N.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; YOSHIDA, T.; KANAMORI, N.; FUJITA, Y.; NAKASHIMA, K., YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; DESIDÉRIO, J.; NEPOMUCENO, A. L. Overexpression of the activated form of the AtAREB1 gene (AtAREB1ΔQT) improves soybean responses to water deficit. **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 3, p. 6272-6286, 2014. DOI: 10.4238/2014.August.15.10.

LIU, L.; ZHU, K.; YANG, Y.; WU, J.; CHEN, F.; YU, D. Molecular cloning, expression profiling and trans-activation property studies of a DREB2-like gene from chrysanthemum (*Dendranthema vestitum*). **Journal of Plant Research**, v. 121, n. 2, p. 215-226, 2008. DOI: 110.1007/s10265-007-0140-x.

LIU, Q.; KASUGA, M.; SAKUMA, Y.; ABE, H.; MIURA, S.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Two transcription factors, DREB1 and DREB2, with an EREBP/AP2 DNA binding domain separate two cellular signal transduction pathways in drought-and low-temperature-responsive gene expression, respectively, in *Arabidopsis*. **The Plant Cell**, v. 10, n. 8, p. 1391-1406, 1998. DOI: 10.1105/tpc.10.8.1391.

MARINHO, J. P.; KANAMORI, N.; FERREIRA, L. C.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; CARVALHO, J. D. F. C.; FREITAS, R. A.; MARIN, S. R. R.; RODRIGUES, F. A.; MERTZ-HENNING, L. M.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; OLIVEIRA, M. C. N.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; YOSHIDA, T.; FUJITA, Y.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; NAKASHIMA, K.; NEPOMUCENO, A. L. Characterization of molecular and physiological responses under water deficit of genetically modified soybean plants overexpressing the AtAREB1 transcription factor. **Plant Molecular Biology Reporter**, v. 34, n. 2, p. 410-426, 2016. DOI: 10.1007/s11105-015-0928-0.

MARINHO, J. P.; PAGLIARINI, R. F.; MOLINARI, M. D. C.; MARCOLINO-GOMES, J.; CARANHOTO, A. L. H.; MARIN, S. R. R.; OLIVEIRA, M. C. N.; FOLONI, J. S. S.; MELO, C. L. P.; KIDOKORO, S.; MIZOI, J.; KANAMORI, N.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; NAKASHIMA, K.; NEPOMUCENO, A. L.; MERTZ-HENNING, L. M. Overexpression of full-length and partial DREB2A enhances soybean drought tolerance. **Agronomy Science and Biotechnology**, v. 8, p. 1-21, 2022. DOI: 10.33158/ASB.r141.v8.2022.

MEUWISSEN, T. H.; HAYES, B. J.; GODDARD, M. E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. **Genetics**, v. 157, n. 4, p. 1819-1829, 2001. DOI: 10.1093/genetics/157.4.1819.

MIR, R. R.; ZAMAN-ALLAH, M.; SREENIVASULU, N.; TRETOWAN, R.; VARSHNEY, R. K. Integrated genomics, physiology and breeding approaches for improving drought tolerance in crops. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 125, n. 4, p. 625-645, 2012. DOI: 10.1007/s00122-012-1904-9.

MIZOI, J.; OHORI, T.; MORIWAKI, T.; KIDOKORO, S.; TODAKA, D.; MARUYAMA, K.; KUSAKABE, K.; OSAKABE, Y.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. GmDREB2A; 2, a canonical Dehydration-responsive element-binding protein 2-type transcription factor in soybean, is posttranslationally regulated and mediates dehydration-responsive element-dependent gene expression. **Plant Physiology**, v. 161, n. 1, p. 346-361, 2013. DOI: 10.1104/pp.112.204875.

MOLINARI, M. D. C.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; MARIN, S. R. R.; FERREIRA, L. C.; BARBOSA, D. A.; MARCOLINO-GOMES, J.; OLIVEIRA, M. C. N.; MERTZ-HENNING, L. M.; KANAMORI, N.; TAKASAKI, H.; URANO, K.; SHINOZAKI, K.; NAKASHIMA, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; NEPOMUCENO, A. L. Overexpression of AtNCED3 gene improved drought tolerance in soybean in greenhouse and field conditions. **Genetics and Molecular Biology**, v. 43, n. 3, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1590/1678-4685-GMB-2019-0292.

OH, S. J.; SONG, S. I.; KIM, Y. S.; JANG, H. J.; KIM, S. Y.; KIM, M.; KIM, Y. K.; NAHM, B. H.; KIM, J. K. *Arabidopsis* CBF3/DREB1A and ABF3 in transgenic rice increased tolerance to abiotic stress without stunting growth. **Plant Physiology**, v. 138, n. 1, p. 341-351, 2005. DOI: 10.1104/pp.104.059147.

PELLEGRINESCHI, A.; REYNOLDS, M.; PACHECO, M.; BRITO, R. M.; ALMERAYA, R.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; HOISINGTON, D. Stress-induced expression in wheat of the *Arabidopsis thaliana* DREB1A gene delays water stress symptoms under greenhouse conditions. **Genome**, v. 47, n. 3, p. 493-500, 2004. DOI: 10.1139/g03-140.

POLIZEL, A. M.; MEDRI, M. E.; NAKASHIMA, K.; YAMANAKA, N.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. DE; MARIN, S. R. R.; ABDELNOOR, R. V.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; FUGANTI, R.; RODRIGUES, F.; STOLF-MOREIRA, R.; BENEVENTI, M. A.; ROLLA, A. A. P.; NEUMAIER, N.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, Y.; CARVALHO, J. F. C.; NEPOMUCENO, A. L. Molecular, anatomical and physiological properties of a genetically modified soybean line transformed with rd29A:AtDREB1A for the improvement of drought tolerance. **Genetics and Molecular Research**, v. 10, n. 4, p. 3641-3656, 2011. DOI: 10.4238/2011.October.21.4.

QIN, F.; KAKIMOTO, M.; SAKUMA, Y.; MARUYAMA, K.; OSAKABE, Y.; TRAN, L. S. P.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Regulation and functional analysis of ZmDREB2A in response to drought and heat stresses in *Zea mays* L. **The Plant Journal**, v. 50, n. 1, p. 54-69, 2007. DOI: 10.1111/J.1365-313X.2007.03034.X.

QIN, F.; SAKUMA, Y.; LI, J.; LIU, Q.; LI, Y. Q.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Cloning and functional analysis of a novel DREB1/CBF transcription factor involved in cold-responsive gene expression in *Zea mays* L. **Plant and Cell Physiology**, v. 45, n. 8, p. 1042-1052, 2004. DOI: 10.1093/pcp/pch118.

QUICK, P.; SIEGL, G.; NEUHAUS, E.; FEIL, R.; STITT, M. Short-term water stress leads to a stimulation of sucrose synthesis by activating sucrose-phosphate synthase. **Planta**, v. 177, n. 4, p. 535-546, 1989. DOI: 10.1007/BF00392622.

ROLLA, A. A.; CARVALHO, J. D. F. C.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; ENGELS, C.; DO RIO, A.; MARIN, S. R. R.; OLIVEIRA, M. C. N. DE; BENEVENTI, M. A.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NAKASHIMA, K.; YAMAGUCHI-SHINOSAKI, K.; NEPOMUCENO, A. L. Phenotyping soybean plants transformed with rd29A: AtDREB1A for drought tolerance in the greenhouse and field. **Transgenic Research**, v. 23, n. 1, p. 75-87, 2014. DOI: 10.1007/s11248-013-9723-6.

SAKUMA, Y.; MARUYAMA, K.; OSAKABE, Y.; QIN, F.; SEKI, M.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Functional analysis of an *Arabidopsis* transcription factor, DREB2A, involved in drought-responsive gene expression. **The Plant Cell**, v. 18, n. 5, p. 1292-1309, 2006a. DOI: 10.1105/tpc.105.035881.

SAKUMA, Y.; MARUYAMA, K.; QIN, F.; OSAKABE, Y.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Dual function of an *Arabidopsis* transcription factor DREB2A in water-stress-responsive and heat-stress-responsive gene expression. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 49, p. 18822-18827, 2006b. DOI: 10.1073/pnas.0605639103.

SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Gene networks involved in drought stress response and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 221-227, 2007. DOI: 10.1093/jxb/erl164.

SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Molecular responses to dehydration and low temperature: differences and cross-talk between two stress signaling pathways. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 3, n. 3, p. 217-223, 2000. DOI: 10.1016/s1369-5266(00)80068-0.

TERASHIMA, A.; TAKUMI, S. Allopolyploidization reduces alternative splicing efficiency for transcripts of the wheat DREB2 homolog, WDREB2. **Genome**, v. 52, n. 1, p. 100-105, 2009. DOI: 10.1139/G08-101.

TURNER, N.; WRIGHT, G.; SIDDIQUE, K. Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. **Advances in Agronomy**, v. 17, n. 10, p. 123-231, 2001. DOI: 10.1016/s0065-2113(01)71015-2.

URANO, K.; MARUYAMA, K.; JIKUMARU, Y.; KAMIYA, Y.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Analysis of plant hormone profiles in response to moderate dehydration stress. **The Plant Journal**, v. 90, n. 1, p. 17-36, 2017. DOI: 10.1111/tpj.13460.

VADEZ, V.; RAO, J. S.; BHATNAGAR-MATHUR, P.; SHARMA, K. K. DREB1A promotes root development in deep soil layers and increases water extraction under water stress in groundnut. **Plant Biology**, v. 15, n. 1, p. 45-52, 2013. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2012.00588.x.

XU, D.; DUAN, X.; WANG, B.; HONG, B.; HO, T. H. D.; WU, R. Expression of a late embryogenesis abundant protein gene, HVA1, from barley confers tolerance to water deficit and salt stress in transgenic rice. **Plant Physiology**, v. 110, n. 1, p. 249-257, 1996. DOI: 10.1104/pp.110.1.249.

YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Organization of cis-acting regulatory elements in osmotic- and cold-stress-responsive promoters. **Trends in Plant Science**, v. 10, n. 2, p. 88-94, 2005. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.12.012.

YOSHIDA, T.; FUJITA, Y.; SAYAMA, H.; KIDOKORO, S.; MARUYAMA, K.; MIZOI, J.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. AREB1, AREB2, and ABF3 are master transcription factors that cooperatively regulate ABRE-dependent ABA signaling involved in drought stress tolerance and require ABA for full activation. **The Plant Journal**, v. 61, n. 4, p. 672-685, 2010. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2009.04092.x.

YOSHIDA, T.; MOGAMI, J.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Omics approaches toward defining the comprehensive abscisic acid signaling network in plants. **Plant and Cell Physiology**, v. 56, n. 6, p. 1043-1052, 2015. DOI: 10.1093/pcp/pcv060.

YUE, B.; XUE, W.; XIONG, L.; YU, X.; LUO, L.; CUI, K.; JIN, D.; XING, Y.; ZHANG, Q. Genetic basis of drought resistance at reproductive stage in rice: separation of drought tolerance from drought avoidance. **Genetics**, v. 172, n. 2, p. 1213-1228, 2006. DOI: 10.1534/genetics.105.045062.

ZHANG, Y.; YANG, J.; LU, S.; CAI, J.; GUO, Z. Overexpressing SgNCED1 in tobacco increases ABA level, antioxidant enzyme activities, and stress tolerance. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 27, n. 2, p. 151-158, 2008. DOI: 10.1007/s00344-008-9041-z.

ZHU, J. K. Cell signaling under salt, water and cold stresses. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 4, n. 5, p. 401-406, 2001. DOI: 10.1016/s1369-5266(00)00192-8.

Capítulo 5 - Manejo do solo para reduzir perdas por seca na soja

Henrique Debiasi

Julio Cezar Franchini

Alvadi Antonio Balbinot Junior

O manejo conservacionista do solo e da água em sistemas de produção que envolvem a cultura da soja é amplamente reconhecido como uma das principais estratégias para a mitigação de perdas de produtividade por seca. Nesse contexto, o incremento da disponibilidade hídrica para as lavouras está associado aos seguintes benefícios: (1) aumento do volume de água armazenada no perfil do solo; (2) redução de perdas de água por evaporação, escoamento superficial (erosão) e drenagem profunda; e (3) melhoria das condições físicas, químicas, biológicas e fitossanitárias no perfil do solo para aumentar o crescimento radicular.

O sistema plantio direto (SPD) é capaz de gerar todos os benefícios supracitados, desde que seja mantido conforme as seguintes premissas: (1) evitar ao máximo a mobilização do solo para não prejudicar a formação de agregados e o acúmulo de matéria orgânica; (2) efetuar a permanente cobertura do solo com palhada (restos culturais) e lavouras (comerciais e/ou de cobertura); e (3) incrementar a diversificação de culturas. Além disso, o SPD precisa ser conduzido em conformidade com outros processos agrônômicos, como a construção de terraços para conter a erosão, controle da compactação do solo, correção da acidez, fertilização com macro e micronutrientes e manejo fitossanitário integrado (pragas, doenças e plantas daninhas).

Diversos trabalhos científicos têm comprovado a efetividade do SPD para mitigação de perdas de produtividade da soja por seca. Um desses trabalhos foi realizado por Franchini et al. (2012), por meio de experimento de longa duração conduzido em Londrina, PR, no qual foi calculado o índice de satisfação da necessidade de água (ISNA) na fase reprodutiva da soja (estádios: R1 a R6) em 17 safras

(1994/1995 a 2010/2011). Os autores fizeram correlações entre os valores de ISNA e as produtividades da soja obtidas nas condições de SPD e de preparo convencional do solo com aração e gradagem (PC) (Figura 1).

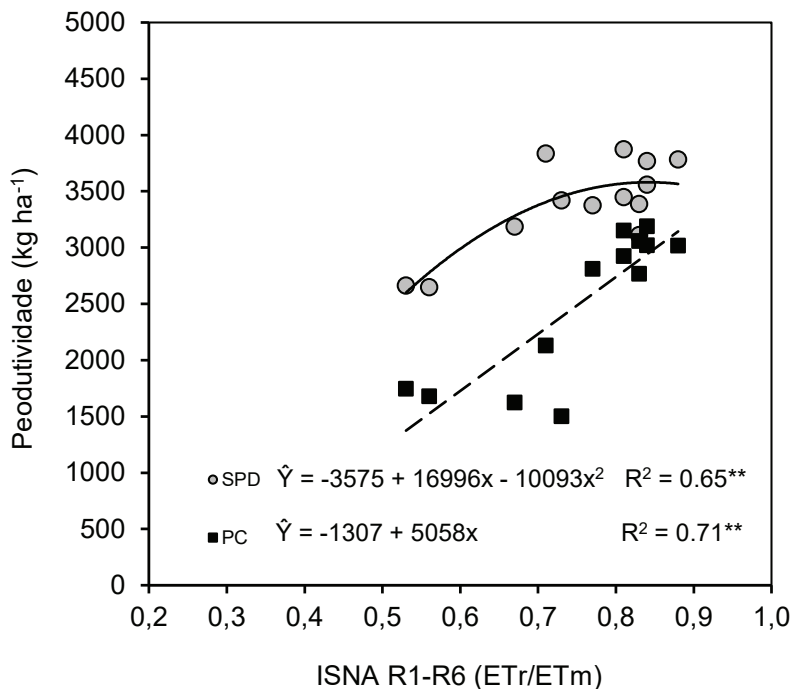


Figura 1. Correlação entre a produtividade e o índice de satisfação da necessidade de água (ISNA) na fase reprodutiva (estádios: R1 a R6) da soja conduzida no sistema plantio direto (SPD) e no preparo convencional de solo (PC), a partir de dados de 17 safras de experimento de longa duração (período: 1994/1995 a 2010/2011) instalado em Londrina, PR.

Fonte: adaptado de Franchini et al. (2012).

O ISNA é um indicador da capacidade de oferta de água para suprir a demanda evapotranspiratória da cultura, ou seja, quando o ISNA é igual a 1 significa que a lavoura tem sua necessidade de água totalmente atendida. Os resultados apresentados na Figura 1 mostram que as diferenças de produtividade entre o SPD e PC aumentaram à medida em que os valores de ISNA foram reduzidos, ou seja, houve menor disponibilidade de água para a soja no PC do que no SPD, considerando um banco de dados de 17 safras.

As perdas de produtividade da soja quando o ISNA foi reduzido de 0,8 para 0,6 foram de, aproximadamente, 15% no SPD, ao passo que no PC foram da ordem de 40% (Figura 1). No PC a produtividade da soja foi reduzida a partir de valores de ISNA menores que 0,8, e no SPD isso ocorreu somente quando o ISNA foi menor que 0,7, evidenciando a maior resiliência da soja no SPD perante o déficit hídrico.

Na Figura 2, apresenta-se imagem aérea de parcelas de soja após seca severa na safra 2008/2009 em experimento de longa duração conduzido em Londrina, PR por Debiasi et al. (2015), no qual foram comparados quatro procedimentos de manejo do solo: (1) sistema plantio direto (SPD); (2) escarificação anual (ESC); (3) gradagem pesada anual (GRP); e (4) preparo convencional anual com aração e gradagem (PC). Verifica-se na Figura 2 que as plantas de soja tinham melhor aspecto visual (“mais verdes”) no SPD em comparação aos demais tipos de manejo do solo. Na condição de déficit hídrico da safra 2008/2009, a soja no SPD teve produtividade de 3240 kg ha⁻¹, e a média da soja conduzida nos demais procedimentos de manejo do solo (ESC, GRP e PC) foi de 1437 kg ha⁻¹, resultando em perda da ordem de 1800 kg ha⁻¹ (-56%). Além disso, a produtividade média da soja no município de Londrina, na mesma safra, foi de 2.520 kg ha⁻¹ (IBGE, 2022), reforçando a elevada capacidade de mitigação da seca do SPD (Figura 2).

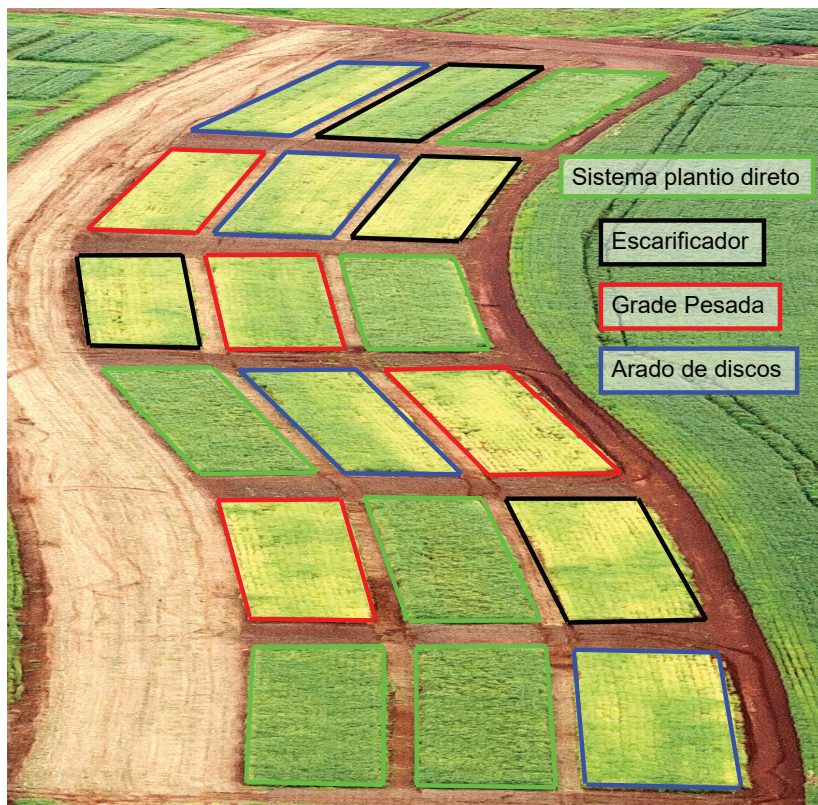


Figura 2. Imagem aérea de parcelas de soja após seca severa na safra 2008/2009 em experimento de longa duração com quatro procedimentos de manejo do solo: sistema plantio direto, escarificação anual, gradagem pesada anual e preparo convencional anual com aração e gradagem. Local: Fazenda da Embrapa Soja em Londrina, PR.

Fonte: adaptado de Debiasi et al. (2015).

Quanto aos benefícios gerados pela palhada no SPD, destacam-se a redução da erosão, o aumento da reserva hídrica no perfil do solo e a diminuição da temperatura na zona de crescimento radicular das culturas. Para exemplificar a importância da cobertura do solo no controle da erosão, no trabalho de Derpsch et al. (1986) foi realizada

simulação de chuva de 60 mm por uma hora sobre parcelas experimentais com e sem palhada instaladas em um Latossolo Vermelho muito argiloso, sendo constatado que no solo descoberto houve escoamento superficial de cerca de 70% da chuva (42 mm), e nas parcelas com palhada não foi registrado escoamento superficial de água. Portanto, em termos práticos, os 42 mm de chuva perdidos por erosão poderiam atender a demanda hídrica da soja por cerca de 8 dias na fase reprodutiva da cultura.

A palhada no SPD também reduz as perdas de água por evaporação no solo, da seguinte forma: (1) Constitui barreira física que dificulta o processo de difusão do vapor de água; e (2) Concomitantemente, diminui a energia da radiação solar incidente sobre a superfície do solo. Além de minimizar as perdas de água, a palhada reduz a temperatura do solo, favorecendo a fisiologia das plantas e a atividade de microrganismos (Dalmago, 2004; Freitas et al., 2006; Andrade, 2008; Mariano et al., 2016; Vieira, 2017).

No trabalho de Pushkala e Yagarajarao (1988), verificou-se que o máximo comprimento de raízes da soja ocorreu em temperaturas do solo próximas a 28 °C. Porém, a partir de 30 °C, para cada incremento de 1 °C no solo houve decréscimo de aproximadamente 8% do crescimento radicular. Assim, sob temperatura do solo de 37,5 °C, o crescimento radicular da soja foi reduzido em cerca de 60%, em comparação à temperatura de 28 °C.

A construção do perfil do solo com elevada qualidade química, física, biológica e fitossanitária é estratégia imprescindível para que os benefícios do SPD possam aumentar a eficiência de uso de água nas lavouras. Em primeiro lugar, as práticas de manejo devem minimizar os estresses bióticos e abióticos que limitam o crescimento das raízes, assim, aumenta-se a capacidade de exploração da água e nutrientes em camadas mais profundas do perfil.

No estudo de Battisti e Sentelhas (2017) foram feitas simulações com diferentes profundidades do sistema radicular da soja, variando de 0,6 a 2,0 m, considerando dados climáticos de 24 locais de diferentes regiões sojícolas do Brasil. Os resultados mostraram que o aumento da profundidade máxima das raízes em relação ao valor-base

de 0,6 m proporcionou ganhos de produtividade significativos, sobretudo em regiões com maior risco de déficit hídrico, como foi no caso de Cruz Alta/RS (Figura 3). Nesta localidade do RS, as simulações apontaram que o aumento da profundidade radicular máxima para 2,0 m resultou em ganho de 1260 kg ha⁻¹ na produtividade da soja. Por outro lado, em Tapurah/MT onde o risco de déficit hídrico é relativamente menor, o ganho foi de 210 kg ha⁻¹ para a simulação com 2,0 m de máxima profundidade de raízes (Figura 3). Evidencia-se, portanto, que a presença de raízes em camadas mais profundas do perfil do solo é fundamental para mitigar perdas por seca na soja.

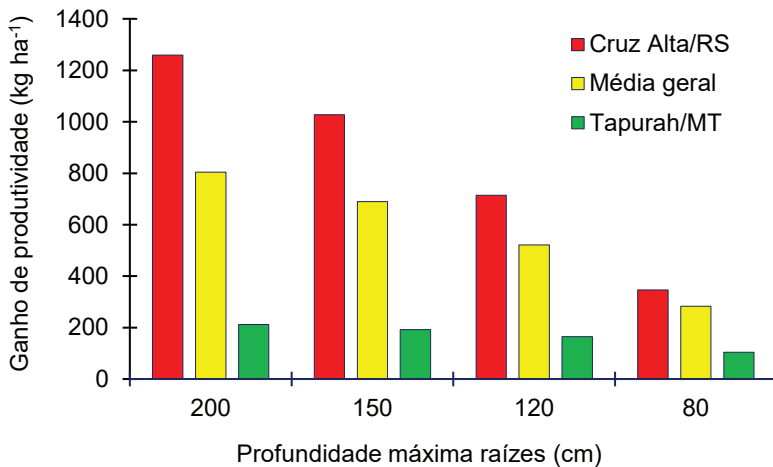


Figura 3. Ganho de produtividade da soja para diferentes simulações de profundidade máxima de crescimento radicular, sendo para Cruz Alta/RS em uma condição de risco de déficit hídrico moderado, em Tapurah/MT para uma condição de risco de déficit hídrico baixo, e para a média geral de 24 localidades com diferentes níveis de risco por déficit hídrico em várias regiões sojícolas do Brasil. Foram utilizados dados climáticos dos anos de 1965 a 2016. Os incrementos de produtividade da soja foram calculados em comparação à produtividade modelada para 60 cm de profundidade máxima radicular.

Fonte: adaptado de Battisti e Sentelhas (2017).

No que se refere à fertilidade química do solo, as limitações ao crescimento radicular estão associadas à elevada acidez que é caracterizada por altos teores de alumínio tóxico (Al) e baixos teores de cálcio (Ca), principalmente em camadas mais profundas do perfil. Os danos do Al às raízes ocorrem por inibição da divisão celular, distúrbios fisiológicos nos meristemas e necrose de tecidos, cujos sintomas mais comuns são redução drástica da massa e comprimento, engrossamento generalizado e lesões escurecidas nos pontos de crescimento radiculares (Silva et al., 2005).

Somado aos efeitos do Al, o desenvolvimento das raízes é condicionado à presença de Ca no solo próximo aos meristemas (pontos de crescimento), tendo em vista que esse nutriente é constituinte da estrutura de organelas das células (parede celular e membranas) e também porque não há translocação de Ca via floema de outras partes da planta para as raízes em formação. No caso do magnésio (Mg), mesmo sendo um nutriente móvel na planta, a sua presença junto aos pontos de crescimento radiculares tem sido associada a maior potencial de alongamento dos tecidos, principalmente em solos com altos teores de Al tóxico (Silva et al., 2005).

Baixos teores de fósforo (P) no perfil do solo também causam limitações ao crescimento radicular de várias culturas (Salisbury; Ross, 1992). É comum no SPD ter estratificação acentuada de teores de P ao longo do perfil do solo, com elevados níveis do nutriente nas camadas mais superficiais de 0-10 cm e 10-20 cm, e baixos níveis nas camadas mais profundas de 20-40 e 40-60 cm (Tiecher et al., 2017; Nunes et al., 2019). Solos com baixos teores de P em camadas abaixo de 10 cm de profundidade podem limitar o potencial produtivo da soja em condição de déficit hídrico (Hansel et al., 2017).

Quanto às ações para incrementar a qualidade química do solo, visando construir uma zona favorável para o crescimento radicular ao longo do perfil do solo, assim como, para que haja nutrição mineral de alta performance, é fundamental efetuar amostragens periódicas, formar bancos de dados de análises laboratoriais, elaborar mapas de campo e fazer gestão de todos os atributos do solo que podem limitar o potencial produtivo das culturas (acidez, MO, P, K, B, Zn, entre outros).

Conjuntamente ao monitoramento do solo, também são importantes os procedimentos de diagnóstico do estado nutricional da soja a partir de amostragens periódicas de folhas e constituição de bancos de dados laboratoriais. Dessa forma, é possível estabelecer programas permanentes de manejo que contemplem critérios e estratégias para uso de calcário, gesso e fertilizantes. Indicações técnicas para o correto manejo da fertilidade química do solo e adubação para a cultura da soja, compreendendo procedimentos de amostragem de solo e de tecido vegetal e interpretação de análises laboratoriais, podem ser acessadas em Oliveira Junior et al. (2020).

Além da química do solo, é fundamental estabelecer procedimentos de boas práticas de uso de bioinsumos na cultura da soja como, por exemplo, a inoculação de semente com bactérias fixadoras de nitrogênio (N) do gênero *Bradyrhizobium*, conforme descrito em Hungria e Nogueira (2020).

A diversificação de culturas eleva a capacidade do solo de mitigar danos da seca na soja, da seguinte forma: (1) Aumenta o aporte de palhada e formação de bioporos de raízes, ampliando a reserva de água no perfil; (2) Intensifica a reciclagem de nutrientes; (3) Eleva o acúmulo de matéria orgânica e ácidos orgânicos (CTC, complexação de Al, etc.); e (4) Amplia a eficiência do controle cultural de pragas e doenças (nematoides, podridão de fitóftora, entre outras) que atacam raízes.

No que se refere à reciclagem de nutrientes, determinadas espécies vegetais têm maior capacidade de extração de nutrientes no solo do que outras, assim, o incremento da diversificação de culturas aumenta o potencial de reciclagem e, conseqüentemente, eleva os níveis de nutrientes disponíveis para culturas/cultivares mais exigentes (Tiecher et al., 2017).

Há espécies vegetais utilizadas em programas de rotação que produzem expressivas quantidades de compostos orgânicos hidrossolúveis como, por exemplo, ácidos orgânicos de baixa massa molecular (cítrico, oxálico, málico, etc.) e/ou de alta massa molecular (ácido fúlvico), os quais têm interações físico-químicas no solo e podem promover benefícios como o aumento da disponibilização de

nutrientes e a redução da atividade de elementos químicos tóxicos (Hue et al., 1986; Franchini et al., 2001; Alleoni et al., 2010; Salton et al., 2011; Bayer et al., 2016).

Ácidos orgânicos podem complexar cátions básicos (Ca, Mg e K) e intensificar a translocação desses nutrientes para camadas abaixo de 40 cm no solo, contribuindo para o enraizamento profundo das culturas para que haja maior acesso à água e nutrientes no perfil (Rheinheimer et al., 2018). Além dos cátions básicos, ácidos orgânicos complexam o Al diminuindo a sua atividade no solo e, conseqüentemente, minimizam ou neutralizam o seu efeito tóxico para as culturas/cultivares sensíveis (Franchini et al., 2001; Nolla; Anghinoni, 2006; Alleoni et al., 2010).

Algumas espécies vegetais usadas em programas de rotação, sobretudo aquelas destinadas à cobertura do solo, exercem função de redistribuição de P em diferentes camadas no perfil do solo. O P tem elevada mobilidade via floema na planta. Assim, o P-adubo absorvido nos primeiros centímetros do solo é translocado para outras partes do sistema radicular em camadas mais profundas (20-40 cm, 40-60 cm), em seguida, quando essas raízes são decompostas, há redistribuição de P para além da camada superficial onde foi depositado o adubo fosfatado (Bayon et al., 2006; Kunze et al., 2011; Chavarría et al., 2016).

Diversos trabalhos têm mostrado maior eficiência de uso de adubos fosfatados quando são aplicados conjuntamente à instalação de culturas de cobertura, especialmente quando são gramíneas, com destaque para as braquiárias (Calegari et al., 2013; Tiecher et al., 2017; Soltangheisi et al., 2018; Rodrigues et al., 2021).

No que se refere à qualidade física do solo, destacam-se quatro atributos diretamente relacionados ao crescimento radicular: (1) resistência mecânica à penetração; (2) temperatura; (3) disponibilidade hídrica; e (4) oxigênio. Contudo, o nível de agregação do solo, que tem relação direta com os atributos supracitados, é um dos principais componentes da física do solo que deve ser monitorado periodicamente porque é passível de alterações mediante práticas de manejo (Letey, 1985; Moraes; Gusmão, 2021).

Os agregados do solo são unidades estruturais que têm padrão de arranjo de partículas minerais (argila, silte e areia) e orgânicas, e há superfícies de fraqueza entre essas unidades estruturais que as separam. Nos agregados, as partículas sólidas estão ligadas por substâncias orgânicas e/ou minerais, como carbonatos, óxidos de ferro (Fe) e Al, entre outras (Santos et al., 2005).

Um solo com agregação adequada é aquele formado por estrutura estável que tem as seguintes características: (1) alta resiliência às forças externas (pressão por tráfego de máquinas), contudo, sem impedir o crescimento das raízes; (2) elevada taxa de infiltração e alta capacidade de armazenamento de água; e (3) elevado suprimento de oxigênio para raízes e biota do solo (Ralisch et al., 2017).

É essencial que os agregados resultem em poros estáveis, contínuos e interconectados ao longo do perfil do solo. Nesse sentido, os bioporos formados por raízes das culturas favorecem grandemente a condutividade hidráulica no solo, bem como constituem caminhos preferenciais para o crescimento das raízes de culturas subsequentes em programas de rotação (Zhang et al., 2018; Bertollo et al., 2021; Moraes; Gusmão, 2021).

Solos excessivamente desagregados, resultantes de operações de preparo convencional (gradagem), apresentam altas quantidades de macroporos e descontinuidade acentuada do complexo poroso como um todo (macro e microporos). Essa condição desfavorece a condutividade hidráulica ao longo do perfil do solo e o contato solo-raiz para absorção de nutrientes, especialmente em texturas mais arenosas. Além disso, quando os solos estão desagregados, notadamente os mais argilosos, há elevada suscetibilidade à compactação e à erosão (Ortigara, 2017; Moraes et al., 2018, 2020; Bertollo et al., 2021).

A compactação do solo prejudica a disponibilidade hídrica para as plantas em função da redução da taxa de infiltração e por causa do menor volume de espaço poroso para armazenar água. Adicionalmente, a compactação causa impedimento mecânico ao crescimento radicular e, no caso de períodos excessivamente chuvosos, há limitação de oxigênio para as raízes (Soriani, 2020).

Na Figura 4 estão apresentadas imagens de amostras de solo coletadas conforme a metodologia do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), desenvolvida por Ralisch et al. (2017). O DRES estabelece uma escala denominada de Índice de Qualidade da Estrutura do Solo (IQES) para distinguir níveis de qualidade física do solo, em que valores de IQES próximos de 1 são para solos intensamente degradados, e valores de IQES próximos de 5 são para solos com elevada qualidade física (alto grau de agregação).

As amostras apresentadas na Figura 4 foram obtidas em áreas agrícolas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná, em solos derivados da formação arenito (textura < 30% de argila) e formação basalto (textura > 60% de argila), os quais foram submetidos a diferentes modelos de diversificação de culturas no SPD, conduzidos por quatro anos consecutivos da seguinte forma: (1) Sucessão tradicional: Soja / Milho-2a-safra; (2) Sucessão tradicional: Soja / Trigo; (3) Sucessão com cultura de cobertura: Soja / Braquiária; (4) Sucessão com cultura de cobertura: Soja / Milho-2a-safra + Braquiária; e (5) Diversificação de culturas: Soja / Milho-2a-safra (1o ano), Soja / Milheto (2o ano), Soja / Trigo (3o ano), e Soja / Braquiária + Nabo-forageiro (4o ano).

Nas sucessões tradicionais de Soja / Milho-2a-safra e Soja / Trigo, houve elevada degradação da estrutura do solo expressa por baixos valores de IQES de 2 e 3, respectivamente. Por outro lado, o aumento do aporte de biomassa nos modelos com culturas de cobertura (braquiária, por exemplo), resultou em valores de IQES superiores a 4, indicando alta qualidade física do solo e maior potencial para mitigar danos da seca na soja (Figura 4).



Diversificado: milho 2ª safra – milheto/soja (17/18) – trigo/soja (18/19) – ruziziensis + nabo /soja (19/20)

Figura 4. Imagens de amostras de solo coletadas na camada de 0-25 cm em áreas agrícolas do Norte e Noroeste do Paraná, manejadas sob modelos contrastantes de rotação de culturas, em solos derivados das formações arenito (textura < 30% de argila) e basalto (textura > 60% de argila). Os valores numéricos fixados nas imagens são os Índices de Qualidade da Estrutura do Solo (IQES) determinados pelo método do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES).

Fonte: adaptado de Ralisch et al. (2017).

Hastes escarificadoras acopladas às semeadoras-adubadoras para descompactar o solo nos sulcos de semeadura, constituem estratégia importante para favorecer o enraizamento profundo da soja, ampliando o potencial de resiliência da lavoura perante a seca (Nunes et al., 2019). Na Figura 5 são apresentadas imagens de plantas de soja coletadas em lavouras que foram instaladas no SPD com semeadoras-adubadoras munidas de hastes escarificadas posicionadas a 15 cm e 7 cm de profundidade nos sulcos de semeadura, em um solo argiloso com alto grau de compactação (Debiasi et al., 2015). Nota-se que houve melhor desenvolvimento radicular da soja instalada com haste escarificadora posicionada a 15 cm de profundidade.

Portanto, no caso da soja, o manejo mecânico da compactação do solo por meio de hastes escarificadoras acopladas às semeadoras tem por objetivo favorecer o enraizamento profundo das plantas, principalmente para mitigar danos do déficit hídrico.

Haste posicionada a 15 cm

Haste posicionada a 7 cm



Figura 5. Imagem de plantas de soja coletadas em lavouras instaladas com semeadoras-adubadoras munidas de hastes escarificadoras posicionadas a 15 cm e 7 cm de profundidade nos sulcos de semeadura, em solo com alto grau de compactação. Nota-se melhor desenvolvimento radicular da soja instalada com haste posicionada a 15 cm.

Fonte: adaptado de Debiasi et al. (2015).

Pragas e doenças que atacam as raízes prejudicam expressivamente as culturas, e quando esses ataques ocorrem simultaneamente ao déficit hídrico, as perdas de produtividade são fortemente intensificadas, principalmente em culturas anuais de sequeiro, como é o caso de grande parte das lavouras de soja no Brasil (Raaijmakers et al., 2009; Roggia et al., 2020; Seixas et al., 2020).

O manejo integrado de doenças (MID) na soja engloba táticas de controle cultural, genético, biológico e químico. O MID segue premissas técnico-científicas para que haja viabilidade econômica, sem

causar problemas ambientais e de segurança de alimentos (Seixas et al., 2020).

As principais doenças radiculares da soja no Brasil, conforme classificação de Seixas et al. (2020), são as seguintes: (1) Fungos: *Fusarium* spp., *Macrophomina phaseolina*, *Phytophthora sojae* e *Corynespora cassiicola*; e (2) Parasitas: nematoide de cisto (*Heterodera glycines*), nematoides de galhas (*Meloidogyne javanica* e *Meloidogyne incognita*), nematoide reniforme (*Rotylenchulus reniformis*) e nematoide das lesões radiculares (*Pratylenchus* spp.).

Quanto ao controle das doenças radiculares da soja, Seixas et al. (2020) destacam os seguintes procedimentos: (1) evitar a introdução de patógenos na área; (2) usar cultivares resistentes ou com maior tolerância; (3) ampliar o uso de práticas culturais como a rotação de culturas; (4) realizar a semeadura em época que proporcione escape da cultura em relação ao período mais favorável à proliferação das doenças; (5) adotar procedimentos de manejo do solo que resultem em ambiente radicular desfavorável aos patógenos (calagem, descompactação, aporte de biomassa); e (6) realizar controle biológico e/ou químico por meio de monitoramento periódico e definição de nível de dano econômico.

Insetos-praga também prejudicam as raízes da soja, e as perdas de produtividade são agravadas quando os ataques acontecem concomitantemente ao déficit hídrico. Citam-se exemplos: percevejo castanho (*Scaptocoris* spp.), larvas de coleópteros conhecidos como “corós” (*Phyllophaga* spp, *Diloboderus abderus* e *Liogenys fuscus*), entre outros (Roggia et al., 2020).

O manejo integrado de pragas (MIP) na soja, da mesma forma que o MID, engloba táticas de controle cultural, genético, biológico e químico. O MIP também segue premissas técnico-científicas para que haja viabilidade econômica, sem causar problemas ambientais e de segurança de alimentos (Roggia et al., 2020).

As estratégias para controle de insetos que atacam raízes da soja, de acordo com Roggia et al. (2020), são as seguintes: (1) semeadura da cultura em época que não coincida com maior densidade populacional e/ou fase de maior atividade dos insetos; (2) usar cultivares

resistentes ou com maior tolerância; (3) ampliar o uso de práticas culturais como a rotação de culturas; (4) adotar procedimentos de manejo do solo que resultem em ambiente radicular desfavorável às pragas (aporte de biomassa); e (5) realizar controle biológico e/ou químico por meio de monitoramento periódico e definição de nível de dano econômico.

No que diz respeito à conservação do solo e da água no SPD, há metodologia exequível em lavouras comerciais e que tem elevada eficiência para mensurar efeitos de boas práticas agronômicas, denominada de Taxa de Infiltração Estável de Água no Solo (TIE). Na Figura 6 estão apresentados dados de TIE obtidos em 17 áreas de lavouras comerciais manejadas com distintos modelos de produção, localizadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná. Os menores valores de TIE, ao redor de 20 mm h^{-1} , foram obtidos onde teve sucessão de Soja / Milho-2a-safra por vários anos consecutivos no mesmo local. Por outro lado, nas lavouras de Soja / Milho-2a-safra + Braquiária ruziziensis, devido à adoção da gramínea de cobertura, houve incrementos significativos nos valores de TIE.

Neste estudo foram avaliadas seis lavouras conduzidas com Soja / Milho-2a-safra + Braquiária ruziziensis, dos quais em cinco houve TIE acima de 100 mm h^{-1} por causa do consórcio com a braquiária (Figura 6). Em geral, quanto maior for o valor de TIE, menor é o escoamento superficial de água que provoca erosão do solo. Portanto, práticas de manejo que geram incrementos da TIE proporcionam alta performance de conservação do solo e da água no SPD e, por consequência, maior armazenamento de água no perfil do solo para mitigação da seca em sistemas de produção.

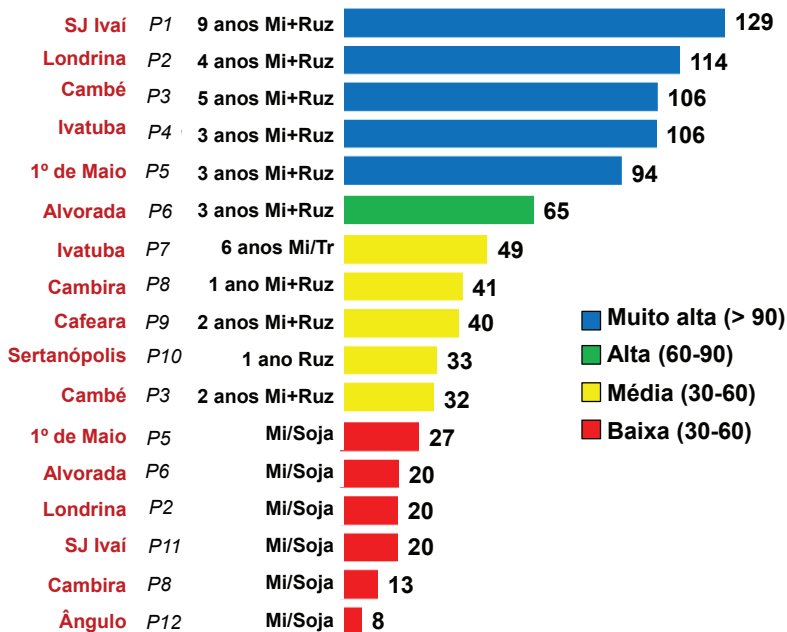


Figura 6. Taxa de infiltração estável de água no solo (TIE), em mm h⁻¹, mensurada em 17 lavouras comerciais manejadas com diferentes sistemas de produção de culturas de grãos e cobertura, nas regiões norte e noroeste do Paraná. Mi+Ruz = Milho-2a-safra + Braquiária ruziziensis; Mi/Soja = Milho-2a-safra / Soja.

Fonte: adaptado de Debiasi et al. (2020).

A ocorrência de chuva com intensidade superior à capacidade de infiltração de água no solo pode resultar em intensa erosão, mesmo em áreas manejadas no SPD. Assim, é imprescindível construir terraços para conter a enxurrada e evitar a degradação do solo, bem como para aumentar o armazenamento de água para mitigação da seca nos sistemas de produção que envolvem a cultura da soja.

Referências

- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3, 1010-1017, 2010.
- ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1612-1622, 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.
- BAYON, R. C. L.; WEISSKOPF, L.; MARTINOIA, E.; JANSÁ, J.; FROSSARD, E.; KELLER, F.; FÖLLMI, K. B.; GOBAT, J. M. Soil phosphorus uptake by continuously cropped *Lupinus albus*: a new microcosm design. **Plant and Soil**, v. 283, p. 309-321, 2006.
- 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. 11 p.
- CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S. D.; GUIMARÃES, M. D. F.; RHEINHEIMER, D. S. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v.133, p. 32-39, 2013.
- CHAVARRÍA, D. N.; VERDENELLI, R. A.; SERRI, D. L.; RESTOVICH, S. B.; ANDRIULO, A. E.; MERILES, J. M.; VARGAS-GIL, S. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Soil Biology**, v. 76, p. 74-82, 2016.

DALMAGO, G. A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 245 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O. Diversificação de espécies vegetais em sistemas de produção. 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. p. 93-118. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 8, p. 253-263, 1986.

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.; VILA, F. G.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid soil. **Plant and Soil**, v. 231, p. 55-63, 2001.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 104-111, 2006.

HANSEL, F. D.; AMADO, T. J. C.; DIAZ, D. A. R.; ROSSO, L. H. M.; NICOLOSO, F. T.; SHORR, M. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 2936-2944, 2017.

HUE, N. V.; CRADDOCK, G. R.; ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 28-34, 1986.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica de nitrogênio. 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. p. 185-195. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

IBGE. Sistema IBGE de recuperação rápida - SIDRA. **Produção Agrícola Municipal**: Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 15 fev. 2022.

KUNZE, A.; COSTA, M. D.; EPPING, J.; LOFFAGUEN, J. C.; SCHUH, R.; LOVATO, P. E. Phosphatase activity in sandy soil influenced by mycorrhizal and non-mycorrhizal cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 705-711, 2011.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

MARIANO, D. C.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T.; REZENDE, R.; DALLACORT, R.; SILVA, A. L. B. R. D. Evaporation of soil water based on the quantity and uniformity of crop waste distribution in soil superficies. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 4726-4734, 2016.

MORAES, M. T. D.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 200, 104611, 2020. 14 p.

MORAES, M. T. D.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; BONETTI, J. A.; DEBIASI, H. Corn performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 464-477, 2018.

MORAES, M. T. de; GUSMÃO, A. G. How do water, compaction and heat stresses affect soybean root elongation? A review. **Rizosphere**, v. 19, 100493, 2021. 10 p.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 955-963, 2006.

NUNES, M. R.; KARLEN, D. L.; DENARDIN, J. E.; CAMBARDELLA, C. A. Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 285, 106607, 2019. 12 p.

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. p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

ORTIGARA, C. **Propriedades físicas e hídricas de um Latossolo em diferentes sistemas de cultivo de longa duração**. 2017. 75 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen.

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.

RAAIJMAKERS, J. M.; PAULITZ, T. C.; STEINBERG, C.; ALABOUVETTE, C.; MÖENNE-LOCCOZ, Y. The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. **Plant and Soil**, v. 321, p. 341-361, 2009.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo** - DRES. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).

RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a longterm experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7-16, 2018.

RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil & Tillage Research**, v. 205, 104770, 2021. 10 p.

ROGGIA, S.; BUENO, A. de F.; CÔRREA-FERREIRA, B. S.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; HIROSE, E.; GAZZONI, D. L.; PITTA, R. M.; PEREIRA, P. R. V. da S.; OLIVEIRA, C. M. de; OLIVEIRA, F. T. de. Manejo integrado de pragas. 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. p. 197-226. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology**. 4th ed. Belmont: Wadsworth, 1992. 682 p.

SALTON, J. C.; MIELNICUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavourapeçuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1349-1356, 2011.

SANTOS, R. D. D.; LEMOS, R. C. D.; SANTOS, H. G. D.; KER, J. C.; ABJOS, L. H. C. D. **Manual de descrição e coleta de amostras de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 100 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.; KRZYZANOWSKI, 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).

SILVA, I. R.; FERRUFINO, A.; SANZONOWICZ, C.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W.; CARTER JÚNIOR, T. E. Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 747-754, 2005.

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINIM, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018.

SORIANI, R. **Índice de qualidade estrutural do solo e sua relação com atributos físicos de um Latossolo Vermelho**. 2020. 71 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

TIECHER, T.; CALEGARI, A.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D. D. S. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78-85, 2017.

VIEIRA, F. F. **Efeito da cobertura do solo no Kc dual e na produtividade do milho safrinha na região sudeste de Mato Grosso**. 2017. 70 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra.

ZHANG, Z.; LIU, K.; ZHOU, H.; LIN, H.; LI, D.; PENG, X. Three dimensional characteristics of biopores and non-biopores in the subsoil respond differently to land use and fertilization. **Plant and Soil**, v. 428, p. 453-467, 2018.

