

**Desempenho Fisiológico de Plantas de Soja em
Função do Estresse Hídrico por Encharcamento**



**OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

**2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL**



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

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
358**

Desempenho Fisiológico de Plantas de Soja em
Função do Estresse Hídrico por Encharcamento

*Laryssa Barbosa Xavier da Silva
Thais Stradioto Melo
Alexssandra Dayane Soares de Campos
José Maria Barbat Parfitt
Sidnei Deuner
Germani Concenço*

**Embrapa Clima Temperado
Pelotas, RS
2022**

Embrapa Clima Temperado
BR 392 km 78 - Caixa Postal 403
CEP 96010-971, Pelotas, RS
Fone: (53) 3275-8100
www.embrapa.br/clima-temperado
www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê Local de Publicações

Presidente
Luis Antônio Suíta de Castro

Vice-Presidente
Walkyria Bueno Scivittaro

Secretária-executiva
Bárbara Chevallier Cosenza

Membros
*Ana Luiza B. Viegas, Fernando Jackson,
Marilaine Schaun Pelufê, Sonia Desimon*

Revisão de texto
Bárbara Chevallier Cosenza

Normalização bibliográfica
Marilaine Schaun Pelufê

Editoração eletrônica
Nathália Santos Fick (46.431.873/0001-50)

Foto da capa
Germani Concenço

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

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 Clima Temperado

C257 Desempenho fisiológico de plantas de soja em função do
estresse hídrico por encharcamento /
Laryssa Barbosa Xavier da Silva... [et al.]. – Pelotas:
Embrapa Clima Temperado, 2022.
16 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento /
Embrapa Clima Temperado, ISSN 1981-5980 ; 358)

1. Soja. 2. Solo hidromórfico. 3. Manejo de água.
4. Irrigação. I. Silva, Laryssa Barbosa Xavier da. II. Série.

CDD 633.34

Sumário

Introdução.....	7
Material e Métodos.....	8
Resultados e Discussão.....	10
Conclusões.....	14
Referências.....	14

Desempenho Fisiológico de Plantas de Soja em Função do Estresse Hídrico por Encharcamento

Laryssa Barbosa Xavier da Silva¹

Thais Stradioto Melo²

Alexssandra Dayane Soares de Campos³

José Maria Barbat Parfitt⁴

Sidnei Deuner⁵

Germani Concenço⁶

Resumo - A soja é uma das alternativas mais viáveis para rotação ao arroz em terras baixas, devido à rentabilidade e possibilidade de rotação de herbicidas e práticas de manejo. Em terras baixas, práticas de manejo de solo devem proporcionar redução no estresse hídrico à cultura, sendo escolhidas ainda variedades mais tolerantes ao estresse por encharcamento. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do estresse hídrico transiente sobre o metabolismo fisiológico e produtividade de cultivares de soja, oriundo de distintos programas de melhoramento genético. O experimento foi instalado em delineamento completamente casualizado em esquema fatorial 3 x 7, com 3 tratamentos de encharcamento (testemunha, 5 dias e 10 dias) e 7 genótipos de soja, com 4 repetições. Foram avaliadas as taxas de fotossíntese e de transpiração ao longo do período pré encharcamento, durante o encharcamento e pós encharcamento, bem como os índices de clorofila e de antocianinas pós estresse. Os genótipos de soja utilizados neste estudo apresentaram diferenças muito discretas. Portanto, a estratégia ecofisiológica de escape ao estresse, proporcionado por práticas de manejo fitotécnicas, constitui-se no principal mecanismo para viabilização do cultivo dos genótipos de soja, avaliados no âmbito deste trabalho, em terras baixas.

Termos para indexação: *Glycine max*; transpiração; fotossíntese; clorofila; antocianinas.

¹ Engenheira-agrônoma, mestre em Agronomia, doutoranda em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

² Engenheira-agrônoma, mestre em Agronomia, doutoranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

³ Acadêmica do curso de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

⁴ Engenheiro agrícola, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

⁵ Engenheiro-agrônomo, doutor em Fisiologia Vegetal, professor do Instituto de Botânica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

⁶ Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

Physiological Performance of Soybean Plants as a Function of Flooding Stress

Abstract - Soybean is one of the most viable alternatives for rotation to rice in lowlands, due to the profitability and possibility of herbicide rotation and diversification of cultural practices. In lowlands, the soil management should provide reduction in water stress to the crop, and the varieties which are the most tolerant to waterlogging stress should be also preferred. The objective of this work was to evaluate the effect of transient water stress on the physiological metabolism and yield of soybean cultivars with different genetic backgrounds. The experiment was installed in completely randomized design in a 3 x 7 factorial design, with 3 waterlogging treatments (control, 5 days and 10 days) and 7 soybean genotypes, with 4 replications. Photosynthesis and transpiration rates in the pre , during and post waterlogging period, as well as post stress chlorophyll and anthocyanins indices, were evaluated. There were small variations in tolerance levels among genotypes. Thus, the ecophysiological strategy of escaping from stress, enabled by cultural management practices, is still the main mechanism for making soybean cultivation viable in lowlands.

Index terms: *Glycine max*; transpiration; photosynthesis; chlorophyll; anthocianins.

Introdução

Em caráter mundial, a produção de soja em 2022 atingiu a marca de 390 milhões de toneladas, com o Brasil alcançando a liderança do ranking mundial com a produção de ~ 125 milhões de toneladas na safra 2021/2022 (Conab, 2022; USDA, 2022). A projeção é que o Brasil se mantenha como o maior produtor mundial de soja.

O estado do Rio Grande do Sul, além de ser o maior produtor de arroz do Brasil, é tido como o principal estado produtor de soja da região Sul (Conab, 2022). Nos sistemas de produção da Metade Sul do Rio Grande do Sul, é comum a presença de solos de várzea e terras baixas, que são caracterizadas como áreas planas com solos de granulometria e mineralogia variada, com caráter hidromórfico com camada superficial pouco profunda, alta relação micro/macroporos, resultando em umidade excessiva devido à má drenagem, como é o caso do planossolo (Gomes; Pauleto, 2001; Timm et al., 2020). Em decorrência do relevo e do excesso de umidade, essas regiões são utilizadas principalmente para o cultivo de arroz irrigado (Marchesan, 2016).

O aumento no cultivo de soja em regiões de terras baixas, tradicionalmente cultivadas com arroz, pode ser explicado tecnicamente pela quebra no ciclo de pragas e doenças e melhoria das condições físicas, químicas e biológicas dos solos (Zanon et al., 2015), além da possibilidade da rotação de princípios ativos herbicidas para o controle das plantas daninhas do arroz resistentes a herbicidas. Além das vantagens agronômicas, a soja é uma das alternativas mais viáveis para sistemas de rotação ao arroz em terras baixas, devido à sua rentabilidade econômica, por ser uma *commodity* de fácil comercialização (Ludwig, 2010). No entanto, ao ser implantada em áreas propensas à inundação, ou com drenagem deficiente, perdas de produtividade são relatadas após chuvas pesadas (Marchesan, 2016; Concenço et al., 2020a, 2020b).

O processo de adaptação da soja ao ambiente de terras baixas está embasado em duas frentes de trabalho em pesquisa: os ajustes fitotécnicos (solo, manejo, práticas culturais) e a adaptabilidade genética dos cultivares aos estresses característicos das terras baixas (Concenço et al., 2017). O manejo fitotécnico vem sendo intensamente trabalhado pelas instituições de pesquisa, que já desenvolveram o sistema de irrigação do arroz por aspersão em terras baixas (Parfitt et al., 2017a, 2017b), que pode ser mais facilmente conjugado à produção de soja; o sistema de sistematização com declividade variada (suavização) para facilitar o escoamento do excesso hídrico no cultivo da soja em períodos de chuvas intensas (Bueno et al., 2020; Timm et al., 2020); o sistema de cultivo da soja sobre camalhões de base larga (Theisen et al., 2017) ou sulco-camalhões (Silva et al., 2006; Concenço et al., 2018), além dos primeiros testes para plantio do arroz diretamente sobre os sulco-camalhões residuais da soja, sem necessidade de preparo do solo (Concenço et al., 2020b). Os ajustes fitotécnicos foram os grandes responsáveis por aumentar a produtividade potencial de soja em terras baixas de ~ 35 para ~ 70 sacas por hectare (Verneti Júnior, 2010; Parfitt et al., 2019; Concenço et al., 2020a).

A fisiologia vegetal se constitui como uma importante ferramenta para o estudo e caracterização da influência dessas condições no metabolismo da cultura da soja, possibilitando identificar em nível metabólico os genótipos mais tolerantes às condições impostas. A avaliação das respostas da planta ao encharcamento transiente, puramente por variáveis agronômicas, tem se mostrado inconsistente na identificação de genótipos com maior tolerância ao encharcamento (Verneti Junior et al., 2012).

Dessa forma, a hipótese do presente estudo é que há diferença em adaptabilidade entre genótipos de soja indicados para cultivo nas terras baixas do Rio Grande do Sul, quanto à tolerância à duração do alagamento do solo.

Assim, visando o estudo do comportamento fisiológico de plantas de soja submetidas a períodos de hipoxia, o objetivo do presente trabalho foi avaliar, com o uso de ferramentas da fisiologia vegetal, o efeito do estresse hídrico transiente sobre o metabolismo fisiológico e produtividade de cultivares de soja, com diferentes *backgrounds* genéticos, indicadas para as terras baixas do Rio Grande do Sul.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido na safra 2019/2020 em condições de campo nas instalações da Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Terras Baixas, Capão do Leão, RS, coordenadas geográficas -31.8153; -52.4698, delineamento completamente casualizado em esquema fatorial 3 x 7, com 3 tratamentos de encharcamento e 7 genótipos de soja (Tabela 1), com 4 repetições. O solo utilizado, caracterizado como Planossolo Háplico Eutrófico Gleissólico (Embrapa, 2013), foi previamente corrigido com calcário Filler PRNT 102% e adubado com formulação NPK (00-20-20) com base nos valores obtidos através da análise de solo. A escolha dos materiais genéticos ocorreu a partir da lista de recomendação para a região edafoclimática 101 (REC 101) (Kaster; Farias, 2012), oriunda de três empresas (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos genótipos utilizados para avaliação do desempenho fisiológico de plantas de soja em função do estresse hídrico por encharcamento. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Genótipo	Marca comercial [®]	GM*	Entidade obtentora
NS 6700	NIDERA	7.1	Syngenta Seeds LTDA
SYN 1561	SYNGENTA	6.1	Syngenta Seeds LTDA
NEO 610	NEOGEN	6.1	GDM Genética do Brasil S.A.
BRS 6203	EMBRAPA	6.2	Embrapa
BMX Garra	BRASMAX	6.3	GDM Genética do Brasil S.A.
NEO 660	NEOGEN	6.6	GDM Genética do Brasil S.A.
BMX Ícone	BRASMAX	6.8	GDM Genética do Brasil S.A.

*GM: Grupo de maturação

As plantas foram cultivadas em tanques de concreto sob o solo, com capacidade de 0,9 m³ (1,5 m x 2,1 m x 0,3 m). Os tanques contavam com sistema de drenagem controlado por válvula manual na parte inferior, permitindo controle preciso dos períodos de início e de fim do alagamento individualmente por repetição (Figura 1).



Figura 1. Unidades experimentais utilizadas para avaliação do desempenho fisiológico de plantas de soja em função do estresse hídrico por encharcamento. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

A semeadura ocorreu em 18 de novembro de 2019, com 20 sementes por metro linear, com profundidade média de 2 cm. Todas as sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium elkanii* SEMIA 5019 e SEMIA 587 (BRASILEC TS IN-BOX). Datou-se a emergência média em 22 de novembro e, nove dias após a emergência (DAE), realizou-se o desbaste, mantendo-se 13 plantas de porte e vigor homogêneos por linha (equivalente a ~ 300 mil plantas ha⁻¹). Cada tanque constava de 7 linhas, cada linha continha um genótipo, com distribuição de forma aleatória em cada repetição. O espaçamento entre linhas foi de 45 cm. Foi usado o mesmo espaçamento e densidade de plantas para todos os genótipos.

A indução do estresse por encharcamento ocorreu no estágio vegetativo de desenvolvimento da cultura (V4), tendo um tratamento testemunha (sem estresse hídrico, normoxia, durante todo o ciclo (Tabela 2).

Tabela 2. Tratamentos avaliados no período vegetativo do desenvolvimento da cultura da soja (V), em função do período de alagamento (5 e 10 Dias). Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Tratamento	Descrição
TEST	Parcelas conduzidas em condições de normoxia.
V5D	Parcelas alagadas por 5 dias em V4: a fim de observar o comportamento fisiológico diário das plantas em hipoxia.
V10D	Parcelas alagadas por 10 dias em V4: a fim de observar o comportamento fisiológico diário das plantas em hipoxia.

Para a determinação dos estádios fenológicos da cultura, adotou-se a escala descrita por Fehr et al. (1971), em que o estágio V4 foi determinado a partir da presença do quarto nó, apresentando três folhas trifolioladas completamente desenvolvidas.

Não houve aplicação de herbicidas, sendo o controle de plantas infestantes realizado de forma manual, conforme demanda. Não foi necessária nenhuma prática de controle de insetos-praga ou de doenças, no experimento, ao longo de todo o ciclo.

Durante o período de alagamento, o solo foi mantido com lâmina de 5 cm a 7 cm de água na superfície do solo, de forma a garantir anoxia. Fora dos períodos de tratamento, as parcelas foram irrigadas de forma a manter a tensão de água do solo entre 10kPa e 40 kPa (Parfitt et al., 2014).

Análise de trocas gasosas

As análises de trocas gasosas foram realizadas em folhas do terço superior completamente expandidas das plantas de soja. Utilizou-se o analisador de gases no infravermelho (*Infra Red Gas Analyser* – IRGA) modelo GFS-3000, marca Walz (Effeltrich, Alemanha). As medições ocorreram entre 9h e 11h da manhã, em diferentes épocas do ciclo, em condições naturais de temperatura, umidade e CO₂ (sem controle ambiental, exceto luz). A fim de homogeneizar as repetições, foi utilizada a fonte de luz 3041-L, com densidade de fluxo de fótons de 1.200 μmol m⁻² s⁻¹, acoplado à câmara de medição de 8 cm².

As aferições ocorreram diariamente (com algumas exceções) ao longo dos períodos pré-estresse (5 dias anteriores à imposição dos tratamentos), durante aplicação do estresse (ao longo dos 5 dias ou 10 dias de estresse, de acordo com o tratamento), e pós-estresse (ao longo de 10 dias após retirada da inundação). Todos os tratamentos foram avaliados em diferentes dias para diluir o efeito do ambiente sobre o comportamento dos genótipos. Todas as aferições fisiológicas foram realizadas em 14 plantas de cada parcela (duas plantas por genótipo por parcela), em cada ocasião. Devido ao tamanho do experimento, para evitar avaliações fisiológicas em horários do dia inadequados, avaliou-se uma repetição completa por dia, praticamente todos os dias ao longo do intervalo identificado, de forma a diluir tanto o efeito ambiental, como o experimental. Os parâmetros analisados foram: *A* (taxa de assimilação líquida de CO₂) e *E* (transpiração).

Índices de clorofila e antocianinas

As avaliações ocorreram no terço superior das plantas, no último dia de imposição do estresse, utilizando-se o clorofilômetro Dualex FORCE-A (Orsay, France). Foram mensurados os índices de clorofila (Chl) e de antocianinas (Anth). Cada planta, previamente avaliada com o IRGA, teve duas folhas avaliadas quanto aos teores de clorofila e antocianinas. As aferições ocorreram em folhas completamente desenvolvidas e sadias do ramo principal.

Produção de grãos

Ao final do ciclo da cultura, 137 DAE, no estágio de maturação fisiológica, foram colhidas cinco plantas de cada genótipo por repetição para avaliação do rendimento de grãos, na área útil das parcelas. A área útil foi considerada descontando-se duas plantas no início e final de cada linha. Lateralmente, a bordadura foi considerada com a linha lateral da parcela vizinha, cujo espaçamento entre linhas era o mesmo inter e entre parcelas. As vagens de cada planta foram removidas e abertas manualmente para evitar perdas; a massa de grãos por planta foi aferida em balança de precisão e seus teores de umidade aferidos com medidor de umidade de grãos portátil, compatível com amostras pequenas, sendo posteriormente corrigido para 13% de umidade.

Análise estatística

Todas as análises estatísticas dos dados coletados, bem como os gráficos, foram executados no ambiente estatístico "R" (R CORE TEAM, 2020), a partir das funções disponibilizadas pelos pacotes *ExpDes*, *ggplot2*, *multcomp*, *base* e por programação manual, sendo os tratamentos comparados pelos respectivos intervalos de confiança a 95%.

Os dados referentes às trocas gasosas foram apresentados com base nas respectivas médias e intervalos de confiança a 95%. Optou-se pela apresentação de dados na forma de regressões lineares de primeiro grau baseadas nos valores originais; cada curva representa um genótipo, junto aos intervalos de confiança de cada dia de avaliação. Os gráficos foram gerados mediante a utilização do pacote *ggplot2* (R CORE TEAM, 2020), sendo subdivididos em função dos tratamentos utilizados: TEST, V5D e V10D. Considerou-se um genótipo como distinto dos demais, quando sua linha de regressão esteve fora do respectivo intervalo de confiança do experimento.

Para índices de clorofila e de antocianinas, dados originais foram explorados com auxílio do pacote *ggplot2*, a partir da elaboração de gráficos de barras, com o respectivo intervalo de confiança a 95%, conforme Concenço et al. (2018b). A apresentação dos respectivos gráficos se deu a partir do estudo dos tratamentos ($p < 0,05$), uma vez que não houve efeito de genótipo ou da interação entre esses fatores.

Resultados e Discussão

Trocas gasosas

Avaliações da taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), condutância estomática (*gs*) e transpiração (*E*) indicaram alterações nos parâmetros fisiológicos, influenciados pela duração do alagamento, mas com diferenças muito discretas entre os genótipos, nos raros casos em que o efeito entre genótipos esteve presente (Figura 2).

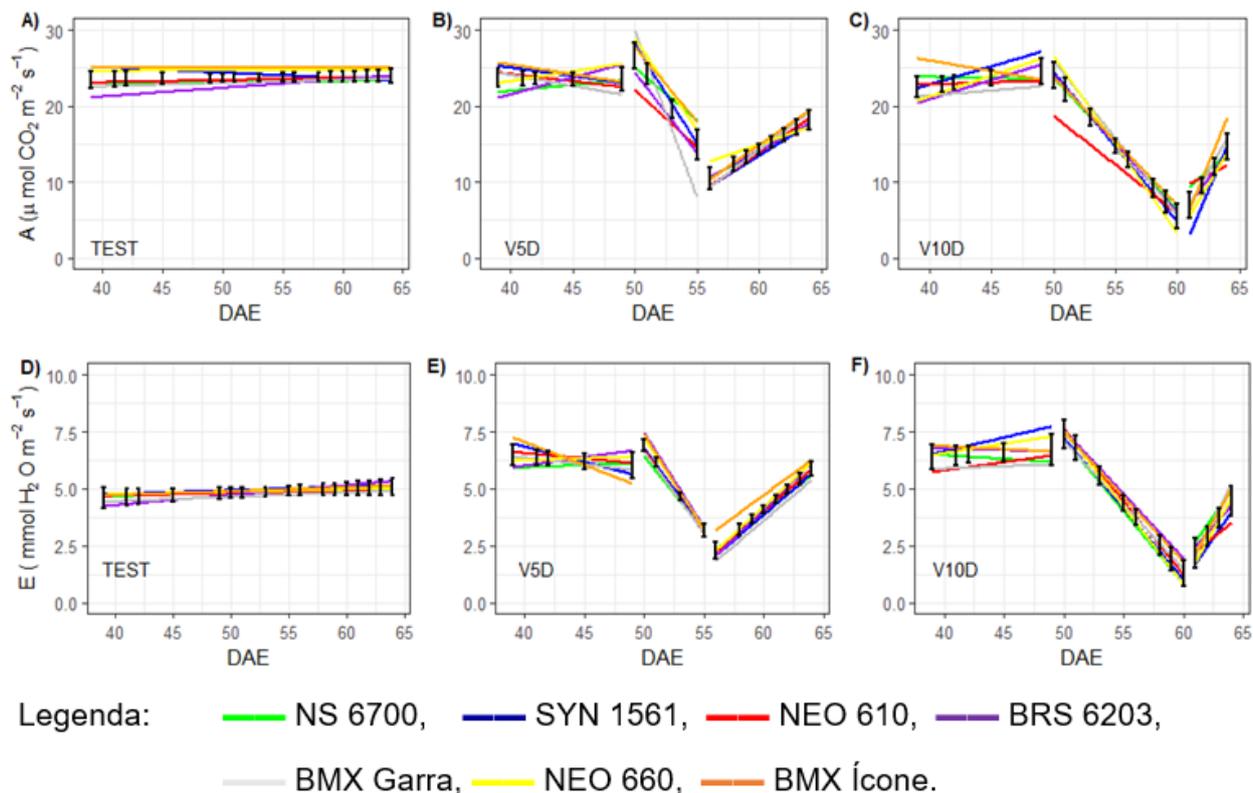


Figura 2. Taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) (A, B, C) e transpiração (E) (D, E, F) de plantas de soja submetidas a condições de normoxia (TEST) alagamento por cinco (V5D) e dez (V10D) dias em estágio vegetativo (V4). Intervalos de confiança do experimento a 95%, em cada data avaliada, são apresentados ($n = 56$). Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

A taxa de assimilação líquida (A) variou em função dos genótipos em condições normais de cultivo (TEST), com BMX Ícone apresentando a média máxima e BRS 6203 a média mínima entre os genótipos, com 25,5 e 21,0 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 50 DAE, respectivamente (Figura 2A). Nota-se que BRS 6203 apresenta menores taxas até 55 DAE; após esse período, igualou seu desempenho aos demais genótipos.

Com a entrada de água nas unidades experimentais (50 DAE), variações acentuadas foram observadas; taxa de A decresceu linearmente em V5D (alagamento por 5 dias em V4) e V10D (alagamento por 10 dias em V4), com grandes perdas na taxa de acúmulo de massa dos genótipos em comparação ao TEST (Figura 2A). NEO 610 apresentou menores taxas de A dentro das 24 horas iniciais de encharcamento dos dois tratamentos impostos; V5D 22,5 comparada a 30,0 (BMX Garra), 25,1 (NS 6700, SYN 1561, NEO 660 e BMX Ícone) e 24,5 (BRS 6203) $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, representando reduções de 25%, 8,1% e 10,3% respectivamente. Entre o terceiro e décimo dia de inundação, plantas estressadas exibiram queda de A de até 44,8 %, reduzindo de ~ 20,0 para ~ 8,0 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sendo reduzida de forma gradual e consistente em função da duração da hipoxia.

Com a retirada da água e consequente reoxigenação do solo, os valores de A foram alavancados em ambos tratamentos; avaliações 24 horas pós-remoção da água em V5D: NEO 660 teve A = 13,5 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, em comparação à média de 12,9 dos demais genótipos. Esse ainda apresentou taxas de assimilação menores em comparação ao demais até 58 DAE, período em que houve a equivalência entre todos os materiais genéticos testados (Figuras 2B, 2C).

Observa-se que, tanto para V5D quanto para V10D, há tendência de recuperação na taxa fotossintética pós-alagamento; porém, dentro do período avaliado – 8 dias e 4 dias respectivamente – não houve retomada da fotossíntese a taxas comparáveis àquelas da testemunha sem inundação (Figura 2A).

A ausência de oxigênio no solo inicia uma sequência de reações de redução química e bioquímica, produzindo componentes que podem ser prejudiciais às raízes, limitando assim a absorção de água e consequentemente o processo fotossintético (Shao et al. 2013). Assim, quando se compara plantas 64 DAE de TEST e das duas condições impostas (inundação por 5 ou 10 dias), são observadas reduções de 22,3% em V5D e 35,2% em V10D na taxa de assimilação líquida.

A transpiração (E) consiste na evaporação da água nos espaços intercelulares, a partir da liberação na forma de vapor para a atmosfera (Souza et al., 2013), sendo determinante para os processos fisiológicos das plantas. Em plantas cultivadas em condições de TEST, os valores referentes à taxa transpiratória mantiveram-se entre 4,0 a 5,5 mmol H₂O m⁻² s⁻¹; em plantas estressadas, esses valores foram reduzidos de forma linear em função da duração do alagamento. Considerando-se os tratamentos, as taxas transpiratórias variaram de ~ 7,4 (1º dia) a ~ 2,8 (5º dia) em V5D; e ~ 8,0 (1º dia) a ~ 0,9 (10º dia) mmol H₂O m⁻² s⁻¹ (Figuras 2E; 2F), resultando em quedas de 62,1% e 88,7%, respectivamente, em comparação às plantas em normoxia.

Quando considerado apenas o comportamento entre genótipos 56 DAE (1º dia após a drenagem das parcelas), observa-se a formação de três grupos distintos do tratamento V5D: Grupo 1, formado pelo genótipo BMX Ícone, apresentando taxas de E 23,5% maior que os demais genótipos estudados; Grupo 2, formado pelo genótipo BMX Garra, com menor taxa de recuperação em comparação aos demais, ~ 44% menor E comparado a BMX Ícone; e Grupo 3, formado pelos cinco outros genótipos (NS 6700, SYN 1561, BRS 6203, NEO 610 e NEO 660), com média de 2,35, os quais não apresentaram diferenças entre si.

Em geral, as trocas gasosas foram reduzidas pela saturação dos poros do solo, devido à difusão de gases como O₂ e CO₂ ser muito lenta na água, devido a inúmeras barreiras (Lopes; Lima, 2015; Lapaz et al., 2020). O momento da reabertura estomática após a retirada do período de estresse foi fundamental para garantia do equilíbrio entre a captação de CO₂ para a fotossíntese e a perda de água, devido à baixa condutância hidráulica das raízes danificadas por alagamento (Yeung et al., 2019).

Os dados obtidos no presente estudo sugerem que um dos principais efeitos do alagamento nas trocas gasosas foliares de soja pode ser atribuído ao fechamento estomático que leva ao declínio da atividade fotossintética e transpiração (Lapaz et al., 2020). Resultados semelhantes foram relatados para plantas de milho (Tian et al., 2019), trigo (Shao et al., 2013) e soja (Cocco, 2017), nas quais a duração do alagamento foi determinante para a redução de A e E durante o alagamento em estágio vegetativo.

Índices de clorofila e antocianinas

Para o índice de clorofilas (Chl) e antocianinas ($Anth$), não foram observadas interações entre tratamento e genótipo nem diferenças entre genótipos (dados não apresentados).

Pigmentos fotossintéticos presentes nos fotossistemas, como clorofilas e carotenoides, são danificados por exposição a estresses, resultando em redução na eficiência na absorção de luz e, assim, em capacidade fotossintética reduzida (Ashraf; Harris, 2013). Os resultados mostram que o alagamento reduziu significativamente o balanço de clorofila em plantas de soja (Figura 3A), principalmente com o aumento na duração do estresse, que acelerou a senescência; em relação a TEST, as reduções foram de 22% em V5D e 32% em V10D, aos 51 DAE. Como esses valores se mantiveram baixos mesmo após a retirada do estresse, acredita-se que o período de estresse imposto tenha causado danos oxidativos ao aparelho fotossintético, ocasionando degradação das moléculas de clorofila ou prejudicando sua síntese e de demais componentes da maquinaria fotossintética (Lapaz et al., 2020).

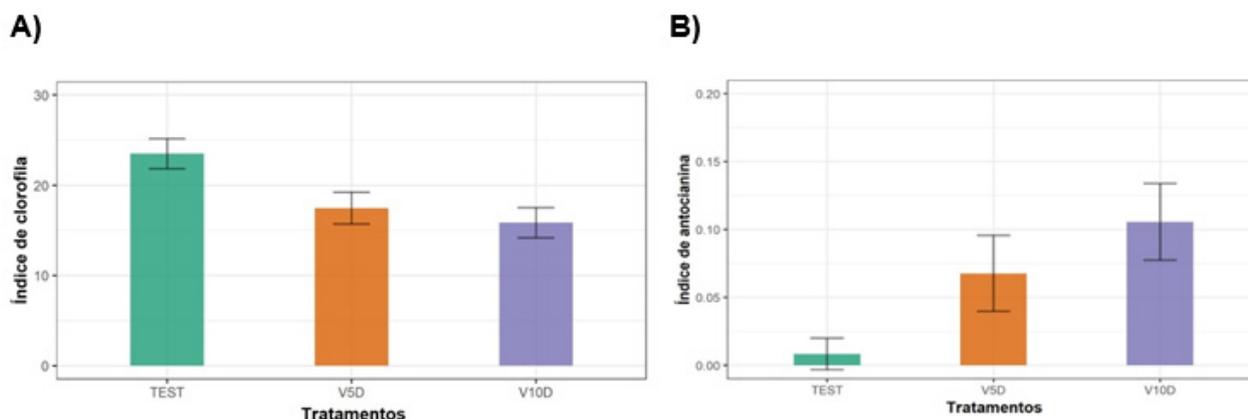


Figura 3. Índice de clorofila (*Chl*) (A) e de antocianinas (*Anth*) (B) em folhas de soja em condições de normoxia (TEST), cinco (V5D) e dez (V10D) dias de alagamento no estágio vegetativo (V4), avaliados no último dia de imposição ao estresse. Intervalos de confiança a 95% são apresentados (n = 56). Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

De fato, plantas submetidas ao alagamento apresentaram amarelecimento gradual a partir da exposição ao estresse. Tal condição pode estar relacionada à degradação de clorofilas a partir de compostos tóxicos resultantes do período de hipoxia, o que também explica a redução observada em A (Figuras 2B; 2C). Gardner et al. (1985) correlacionaram a degradação de *Chl* à deficiência de nitrogênio.

Os níveis de antocianinas (Figura 3B) foram alterados em decorrência da duração do alagamento, apresentando acréscimos de 375% (V5D) a 541% (V10D) em comparação às plantas cultivadas em condições normais (TEST), resultantes de mecanismo de defesa a níveis tóxicos de espécies reativas de oxigênio (*rs*). As antocianinas são importantes para proteção contra danos oxidativos induzidos por estresses abióticos, proporcionando vantagens osmóticas (Gutierrez-Gonzalez et al., 2010), e atuando como agente de fotoproteção (Moustaka et al., 2020).

O aumento do índice de antocianinas representa uma estratégia de sobrevivência frente ao estresse imposto; plantas com maior tolerância a condições adversas, como salinidade (Mbarki et al., 2018), toxicidade por metais (Gao et al., 2020), estresse foto-oxidativo (Moustaka et al., 2020) e estresses hídricos (Shoeva et al., 2017; Naing et al., 2018), apresentam níveis elevados de *Anth*. Dessa forma, com a redução na absorção de água promovida pelo metabolismo fermentativo, o acúmulo foliar transitório de antocianina pode atribuir respostas rápidas e pontuais às alterações do meio, em vez da promoção de alterações morfoanatômicas permanentes (Chalker-Scott, 2002).

Produção de grãos

No presente estudo, os resultados obtidos quanto à produção final de grãos por planta tiveram correlação apenas à duração do alagamento durante o estágio vegetativo, não havendo diferenças entre genótipos. Nessa situação, a produtividade foi menor com o aumento do período de alagamento. As reduções na produção de grãos foram de 47,8% em V5D e 61,7% em V10D, em comparação a TEST (Figura 4).

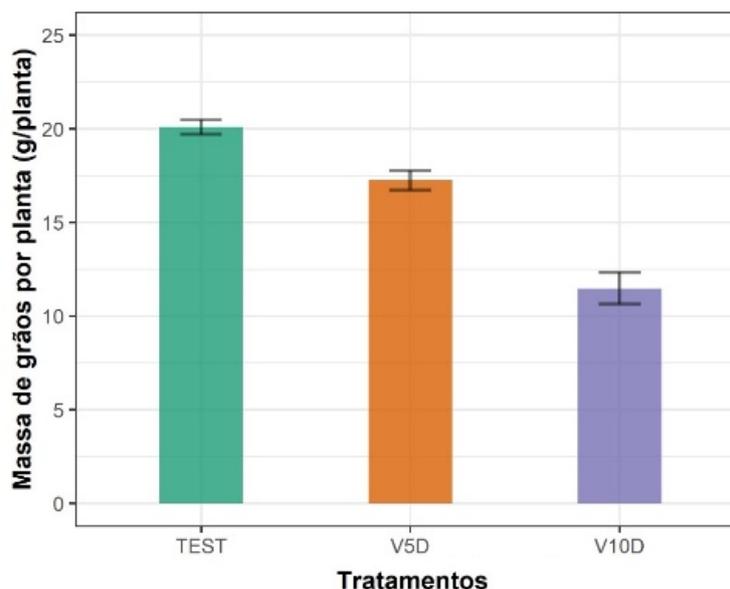


Figura 4. Massa de grãos por planta de soja submetidas a condições de normoxia (TEST), alagamento por cinco (V5D) ou por dez (V10D) dias em estágio vegetativo (V4) avaliados ao final do ciclo de cultivo (137 DAE). Intervalos de confiança das regressões a 95% são apresentados (n = 20). Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

De acordo com Souza et al. (2014), durante os estádios de formação de vagens (R4 - R5), plantas de soja exigem maior quantidade de fotoassimilados para o desenvolvimento de estruturas reprodutivas. Dessa forma, a redução das trocas gasosas e do índice de clorofila acarreta competição por assimilados dentro da planta (competição intra-planta), podendo diminuir o potencial de rendimento, gerando vagens com apenas uma ou duas sementes, devido à não fecundação de demais óvulos (Souza et al., 2014).

De acordo com Ahmed et al. (2013), dois dias de inundação podem causar 18% de perda de rendimento no estágio vegetativo tardio, possivelmente devido à redução no nível de oxigênio no solo.

Conclusões

Os genótipos de soja utilizados neste estudo apresentam diferenças discretas quanto à reação ao estresse por encharcamento.

A estratégia ecofisiológica de escape ao estresse, proporcionado por práticas de manejo fitotécnicas, constitui o principal mecanismo para viabilização do cultivo dos genótipos de soja avaliados neste trabalho em terras baixas.

Referências

AHMED, F.; RAFII, M. Y.; ISMAIL, M. R.; JURAIMI, A. S.; RAHIM, H. A.; ASFALIZA, R.; LATIF, M. A. Waterlogging tolerance of crops: breeding, mechanism of tolerance, molecular approaches, and future prospects. **BioMed Research International**, v. 2013, 2012.

ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: an overview. **Photosynthetica**, v. 51, n. 2, p. 163-190, 2013.

BUENO, M.; CAMPOS, A. D. S.; SILVA, J. T.; MASSEY, J.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; ROEL, A.; PARFITT, J. M. B. Improving the Drainage and Irrigation Efficiency of Lowland Soils: Land-Forming Options for Southern Brazil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, p. 04020019, 2020.

CHALKER-SCOTT, L. Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? **Advances in Botanical Research**, v. 37, p. 103-127, 2002.

COCCO, K. L. T. **Genótipos de soja sob condições de hipóxia**: desempenho germinativo e alterações fisiológicas e bioquímicas. 2017. 126 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, Departamento de Botânica, Instituto de Biologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

- CONAB. Acompanhamento safra brasileira de grãos, Brasília, v. 9 - Safra 2021/22, n. 9 - Nono levantamento, p. 1-98, jun. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 08 jun. 2022.
- CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M.; SINNEMANN, C. S.; CAMPOS, A. D.; VEIGA, A. B.; BERGMANN, H. M.; SILVA, L. B. Semeadura direta de arroz em resteva de soja cultivada no sistema sulco-camalhão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 13221-13231, 2020b.
- CONCENÇO, G.; AGUILA, L. S. H.; PARFITT, J. M. B.; SCIVITTARO, W. B. **Manejo da soja em terras baixas para alta produtividade**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020a. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 207).
- CONCENÇO, G.; AGUILA, L. S. H. D.; VERNETTI JUNIOR, F. de J. Produtividade da soja no Rio Grande do Sul: genética ou manejo? **Revista Cultivar Grandes Culturas**, n. 221, out. 2017. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1077687>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- CONCENÇO, G.; ANDRES, A.; SCHREIBER, F.; SCHERNER, A.; BEHENCK, J. P. Statistical approaches in weed research: choosing wisely. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 17, n. 1, p. 45-58, 2018b.
- CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M. B.; THIEL, C. H.; DEUNER, S.; TIMM, P. A.; CAMPOS, A. D. S.; AIRES, T. A.; SILVA, J. T. **Estabelecimento da cultura da soja em terras baixas em função do manejo e umidade do solo**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2018. 27 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 290).
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E.; BURMOOD, D. T.; PENNINGTON, J. S. Stage of development descriptions for soybeans, Glycine Max (L.) Merrill 1. **Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 929-931, Nov./Dec. 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- GARDNER, P. F.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. Physiology of crop plants. Iowa: Iowa State University Press, 1985. 337 p.
- GOMES, A. da S.; PAULETTO, E. A. **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2001.
- GUTIERREZ-GONZALEZ, J. J.; GUTTIKONDA, S. K.; TRAN, L. S.; ALDRICH, D. L.; ZHONG, R.; YU, O.; NGUYEN, H. T.; SLEPER, D. A. Differential expression of isoflavone biosynthetic genes in soybean during water deficits. **Plant and Cell Physiology**, v. 51, n. 6, p. 936-948, 2010.
- 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. (Embrapa Soja. Documentos, 330).
- LAPAZ, A. M.; DE CAMARGOS, L. S.; YOSHIDA, C. H. P.; FIRMINO, A. C.; DE FIGUEIREDO, P. A. M.; AGUILAR, J. V.; NICOLAI, A. B.; SILVA DE PAIVA, W. da; CRUZ, V. H.; TOMAZ, R. S. Response of soybean to soil waterlogging associated with iron excess in the reproductive stage. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 26, n. 8, p. 1635-1648, 2020.
- LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. **Fisiologia da produção**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. 482 p.
- LUDWIG, M. P. **Desempenho agrônomo e qualidade de sementes de soja produzida em solo de várzea alagada**. 2010. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.
- MARCHESAN, E. Desenvolvimento de tecnologias para cultivo de soja em terras baixas. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 4-19, jan./jun. 2016.
- MBARKI, S.; SYTAR, O.; ZIVCAK, M.; ABDELLY, C.; CERDA, A.; BRESTIC, M. Anthocyanins of Coloured wheat genotypes in specific response to SalStress. **Molecules**, v. 23, n. 7, p. 1518, 2018.
- MOUSTAKA, J.; TANOU, G.; GIANNAKOULA, A.; ADAMAKIS, I. D. S.; PANTERIS, E.; ELEFThERIOU, E. P.; MOUSTAKAS, M. Anthocyanin accumulation in poinsettia leaves and its functional role in photo-oxidative stress. **Environmental and Experimental Botany**, p. 104065, 2020.
- NAING, A. H.; AI, T. N.; LIM, K. B.; LEE, I. J.; KIM, C. K. Overexpression of Rosea1 from snapdragon enhances anthocyanin accumulation and abiotic stress tolerance in transgenic tobacco. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 1070, 2018.
- PARFITT, J. M. B.; CONCENÇO, G.; SCIVITTARO, W. B.; ANDRES, A. **Práticas de manejo de solo em cultivos de sequeiro em terras baixas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2019. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 202).
- PARFITT, J. M. B.; CONCENÇO, G.; DOWNING, K.; LARUE, J.; SILVA J. T. da. Rice growth under water stress levels imposed at distinct development. **Revista de Ciências Agrárias** (Lisboa), v. 40, p. 587-596, 2017a.
- PARFITT, J. M. B.; CONCENÇO, G.; SCIVITTARO, W. B.; ANDRES, A.; DA SILVA, J. T.; PINTO, M. A. B. Soil and Water Management for Sprinkler Irrigated Rice in Southern Brazil. In: LI, J. (ed.). **Advances in International Rice Research**. Rijeka: InTech, 2017b. p. 3-18.
- PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C. **Efeito da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos de um solo de várzea no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. (Embrapa Clima Temperado-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 189). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/998984>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- R Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- SHAO, G. C.; LAN, J. J.; YU, S. E.; LIU, N.; GUO, R. Q.; SHE, D. L. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages. **Photosynthetica**, v. 51, n. 3, p. 429-437, 2013.
- SHOEVA, O. Y. U.; GORDEEVA, E. I.; ARBUZOVA, V. S.; KHELESTKINA, E. K. Anthocyanins participate in protection of wheat seedlings from osmotic stress. **Cereal Research Communications**, v. 45, n. 1, p. 47-56, 2017.
- SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B.; THEISEN, G.; PEREIRA, M. R. **Sistema Sulco/Camalhão para Culturas em Rotação ao Arroz em Áreas de Várzea do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 14 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 54).

- SOUZA, G. M.; CATUCHI, T. A.; BERTOLLI, S. C.; SORATTO, R. P. Soybean under water deficit: physiological and yield responses. **A comprehensive survey of international soybean research: genetics, physiology agronomy and nitrogen relationships**. Rijeka: InTech, p. 273-298, 2013.
- SOUZA, V. Q.; NARDINO, M.; FOLLMANN, D. N.; BAHRY, C. A.; CARON, B. O.; ZIMMER, P. D. Caracteres morfofisiológicos e produtividade da soja em razão da desfolha no estágio vegetativo. **Cientifica**, v. 42, n. 3, p. 216-223, 2014.
- THEISEN, G.; SILVA, J. J. C.; SILVA, J. S.; ANDRES, A.; ANTEN, N. P. R.; BASTIAANS, L. The birth of a new cropping system: towards sustainability in the sub-tropical lowland agriculture. **Field Crops Research**, v. 212, p. 82-94, 2017.
- TIAN, L.; LI, J.; BI, W.; ZUO, S.; LI, L.; LI, W.; SUN, L. Effects of waterlogging stress at different growth stages on the photosynthetic characteristics and grain yield of spring maize (*Zea mays* L.) Under field conditions. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 250-258, 2019.
- TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; CENTENO, L. N.; BITENCOURT, D. G. B.; PARFITT, J.M. B.; CAMPOS, A. D. S. Assessment of land levelling effects on lowland soil quality indicators and water retention evaluated by multivariate and geostatistical analyses. **Land Degradation & Development**, v. 31, p. 959-974, 2020.
- USDA (United States Department of Agriculture). **Data and Statistics 2022**. Disponível em: <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- VERNETTI JÚNIOR, F. J. **Resultados de Pesquisa da Soja na Embrapa Clima Temperado – 2010**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 89 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 322).
- VERNETTI JUNIOR, F. de J.; SCHUCH, L. O. B.; LUDWIG, M. P. **Tolerância ao encharcamento em genótipos de soja**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 172). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/965308> Acesso em: 23 ago. 2022.
- YEUNG, E.; BAILEY-SERRES, J.; SASIDHARAN, R. After the deluge: plant revival post-flooding. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 5, p. 443-454, 2019.
- ZANON, A. J.; WINCK, J. E. M.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M. D.; CERA, J. C.; RICHTER, G. L.; LAGO, I.; SANTOS, P. M. dos; MACIEL, L. da R.; GUEDES, J. V. C.; MARCHESAN, E. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras e terras baixas. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p. 400-411, 2015.

Embrapa

Clima Temperado



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

