



DÉFICIT HÍDRICO E RECUPERAÇÃO PÓS-ESTRESSE DO METABOLISMO FISIOLÓGICO EM ARROZ - EVIDÊNCIA DO EFEITO PRIMING

WATER DEFICIT AND POST-STRESS RECOVERY OF PHYSIOLOGICAL METABOLISM IN RICE - EVIDENCE OF THE PRIMING EFFECT

Thais Stradioto Melo^{1*}; Germani Concenção²; José Maria Barbat Parfitt; Sidnei Deuner¹; Lessandro Coll Faria¹; Laryssa Barbosa Xavier da Silva¹; Alexssandra Daiane Soares de Campos¹; Camila Silveira Sinnemann¹

¹ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

*Autor correspondente: Thais Stradioto Melo. E-mail: thais.stradioto1@gmail.com.

Resumo

O objetivo do estudo foi quantificar o efeito do estresse hídrico no arroz, bem como avaliar a habilidade de recuperação dessa cultura, em termos de metabolismo fisiológico e parâmetros produtivos, após a eliminação do estresse. Alta taxa de recuperação apoiará o efeito priming no arroz. Dois experimentos foram conduzidos em ambiente controlado com a variedade de arroz BRS-Pampeira. O experimento 1 consistiu na imposição de estresse hídrico (0 - 45 kPa) no estágio reprodutivo; o experimento 2 compreendeu a imposição de estresse hídrico (0 - 40 kPa) no estágio vegetativo. As plantas de arroz não são capazes de aumentar sua atividade fisiológica além do observado em período anterior ao estresse, como forma de tentar recuperar o que foi deixado de assimilar durante este período. Uma vez o dano ocorrido, não se recupera o prejuízo em produtividade no mesmo intervalo de tempo. O presente estudo não apoia a teoria do efeito priming em arroz.

Palavras-chave: *Oryza sativa*, seca, fisiologia vegetal.

Abstract

The objective of the study was to quantify the effect of water stress on rice, as well as to assess the recovery ability of this crop, regarding the physiological metabolism and productive parameters, after the elimination of stress. A higher recovery rate would pave the way for the priming effect in rice. Two experiments were conducted under controlled environment with the rice variety BRS-Pampeira. Experiment 1 comprised the imposition of water stress (0 - 45 kPa) at the reproductive stage; experiment 2 comprised the imposition of water stress (0 - 40 kPa) at the vegetative stage. Rice plants are not able to increase their physiological metabolism beyond that observed in the period prior to stress, as a way of try and recover what was not assimilated during the stress. Once the damage has occurred, the potential loss in productivity is not recovered in the same time interval. The present study do not support the theory of the priming effect in rice.

Keywords: *Oryza sativa*, drought, plant physiology.



INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa*) é considerado alimento base da dieta para metade da população brasileira; estima-se que o consumo per capita situa-se em aproximadamente 45 kg ano⁻¹, sendo importante o incentivo à produção com a premissa de suprir os níveis de oferta e demanda do produto. De acordo com dados da Food and Agriculture Organization of the United Nations [1], o Brasil ocupa a nona posição no ranking de produção de arroz, e, estima-se que, de acordo com dados Conab [2], 80% da produção nacional do arroz está localizada na região sul do Brasil, com destaque para o estado do Rio Grande do Sul (RS).

No manejo da irrigação na cultura do arroz, é comum o estabelecimento de períodos aerados quando do uso da irrigação por inundação intermitente [3] visando economizar água, entretanto, nos períodos de aeração não há conhecimento consolidado sobre o efeito do nível do estresse hídrico ao qual a planta é submetida, sobre seu metabolismo fisiológico e produtividade de grãos.

O comportamento de diferentes genótipos de arroz em condições de déficit hídrico é distinto, pois os genótipos podem ter diferentes comprimentos de ciclo, duração de cada fase do ciclo e distinta habilidade de perfilhamento ou de tolerância a estresses, como demonstrado por [4] e [5]. Comparado, por exemplo, à cultura do milho, o arroz não possui mecanismos tão desenvolvidos a fim de minimizar a perda de água, visto que é uma planta semi-aquática e, portanto, adaptada a alta disponibilidade hídrica. Assim, essa espécie não apresenta naturalmente alta capacidade de utilizar a água de modo mais controlado ou eficiente, em parte por possuir pouca cera epicuticular na superfície foliar [6] dentre outros fatores.

Por outro lado, as preocupações com o uso eficiente da água em áreas agrícolas irrigadas aumentam de forma proporcional à escassez de água de boa qualidade, e gera discussões em relação ao seu uso neste setor. A irrigação por aspersão em arroz, pelo uso de sistemas mecanizados do tipo pivô central ou lateral móvel, quando comparada com o sistema de inundação contínua, pode gerar aproximadamente 50% de economia em água na cultura do arroz [7]

É importante que os sistemas de cultivo sejam eficientes no uso de água, contribuindo para preservação do meio ambiente; logo, é necessário compreender como a cultura do arroz é afetada pelo estresse hídrico e como essa espécie responde fisiologicamente à imposição do estresse. Há larga discussão na literatura em fisiologia vegetal sobre a habilidade de diversas espécies de plantas cultivadas compensarem, posteriormente, perdas advindas de estresses impostos em períodos anteriores [8]; [9]; [10].

Particularmente na cultura do arroz, é consenso entre produtores, mas não necessariamente entre técnicos, que lavouras que passam por período de estresse hídrico moderado na fase vegetativa, possuem plantas com sistema radicular mais robusto, estando mais aptas a enfrentar posteriores estresses hídricos. Em fisiologia vegetal, denomina-se "priming" a



esse efeito [11], que consiste em pré-condicionar uma planta para que ela possa suportar o mesmo estresse posteriormente, sofrendo menor impacto advindo do estresse de mesma natureza. Além do efeito "priming", é de conhecimento de técnicos e produtores de arroz que o estresse hídrico imposto no período vegetativo acaba por alongar o ciclo de cultivo [12].

Conhecer esses aspectos fisiológicos é essencial para o planejamento de sistemas de produção de arroz adequados, de baixo custo e eficientes, como também subsidiarão as discussões do efeito de "priming" e a habilidade de recuperação da cultura do arroz irrigado, após ter passado por períodos de estresse hídrico. Assim, o objetivo do estudo foi quantificar o efeito do estresse hídrico em níveis crescentes sobre a cultura do arroz irrigado, bem como quantificar a habilidade de recuperação desta cultura, quanto ao metabolismo fisiológico e parâmetros produtivos, após a eliminação do estresse.

MATERIAL E MÉTODOS

Instalação e condução dos experimentos

Os experimentos foram instalados em ambiente controlado na Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Terras Baixas, Capão do Leão-RS, coordenadas geográficas -31.8153; -52.4698, em delineamento experimental de blocos casualizados com seis repetições. As parcelas constaram de caixas plásticas escuras com capacidade para 36 litros, contendo 48 kg de planossolo hidromórfico previamente adubado e corrigido quanto ao pH.

Foram semeadas em cada parcela 2,0 g de sementes de arroz da cultivar BRS-Pampeira, na profundidade de 2 cm. As plântulas emergiram seis dias após a semeadura e os experimentos foram conduzidos de acordo com as recomendações oficiais para a cultura do arroz [13].

Tratamentos e momentos de avaliação

Experimento 1: todas as parcelas foram conduzidas até o início da fase reprodutiva (estádio R1), quando foram estabelecidos os tratamentos de maneira contínua: 10 kPa; 30 kPa e 45 kPa, além de uma testemunha com lâmina de água de 5 cm, ou seja, livre de estresse hídrico. Quinze dias após o estabelecimento dos níveis de estresse, no estágio R2 da cultura, considerou-se que as plantas já haviam se ambientado ao estresse e então foi realizada a avaliação do desempenho fisiológico das plantas, com as parcelas ainda sob os estresses (imposição do estresse e avaliação concomitantes).

Experimento 2: Da mesma forma das anteriores todas as parcelas foram conduzidas na capacidade de campo até o início do perfilhamento (estádio V4), quando foram estabelecidos os tratamentos de maneira contínua: 10 kPa; 20 kPa e 40 kPa, além de uma testemunha com solo continuamente com lâmina livre de estresse hídrico. Nenhuma avaliação foi realizada enquanto



os tratamentos estavam sob estresse, que foi mantido até o início do estágio reprodutivo (estádio R1), estimado pelo uso do sistema informatizado GD-Arroz [14]. Quinze dias após a remoção do estresse, no estágio R2 da cultura, considerou-se que as plantas já haviam se ambientado à disponibilidade regular de água e então foi realizada a avaliação do desempenho fisiológico das plantas, com as parcelas sob tensão de água de 10 kPa, portanto livres de estresse hídrico (imposição do estresse anterior à avaliação).

Controle do nível de estresse e manejo da água

Para monitorar a tensão de água no solo, foram instalados tensímetros mecânicos em todas as parcelas, na profundidade de 10 cm, com leituras duas vezes ao dia, sete dias por semana, através do tensômetro. Quando a tensão de água da parcela estava acima da pré-determinada para o tratamento, ela foi irrigada de forma que a tensão de água no solo retornasse para valor próximo ao preconizado para o tratamento, com base na curva de retenção de umidade do solo. Houve, portanto, pequena variação na tensão ao redor do valor estipulado, sempre corrigido duas vezes ao dia.

Avaliações dos experimentos

As avaliações dos parâmetros fisiológicos das plantas de arroz, nas condições supracitadas, foram feitas com um analisador de gases no infravermelho (IRGA), marca Walz, modelo GFS-3000, em sistema aberto, com luminosidade, temperatura, concentração de CO₂ e umidade do ar naturais. O ar de referência foi captado do lado de fora da casa de vegetação, 4 m acima do solo, estando livre de fatores visíveis de interferência quanto ao teor de CO₂. Os parâmetros estudados foram: taxa de assimilação líquida (A), condutância estomática (Gs), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência de carboxilação (Ec), taxa de transpiração (E), eficiência de uso da água (WUE), eficiência Intrínseca do uso da água (IWUE), e aquecimento foliar (ΔT) de plantas de arroz cv. BRS-Pampeira.

Em cada unidade experimental, duas aferições foram obtidas em sequência, em folhas equivalentes de diferentes plantas, totalizando 12 aferições por tratamento. As avaliações foram feitas entre 07h30 e 10h30 da manhã respeitando os blocos estatísticos, ou seja, todas as parcelas do mesmo bloco foram avaliadas em ordem aleatória, antes de proceder à avaliação do próximo bloco. Isso permite a atribuição do erro oriundo do horário de avaliação (diferenças de luminosidade e temperatura) para blocos, e não para tratamentos na análise de variância [15]; [16].

Ao final do ciclo da cultura (momentos diferentes em função do nível de estresse hídrico), foi avaliada a produtividade de grãos em função dos tratamentos, colhendo todas as plantas da unidade experimental, dividida em 4 subamostras por caixa (24 subamostras por tratamento). As



panículas foram debulhadas manualmente e os grãos secos, quando então suas massas foram aferidas e transformadas para $g\ m^{-2}$ a 13% de umidade.

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de homogeneidade de variâncias e normalidade dos erros, e após as devidas transformações e reanálises, foram submetidos à análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade para verificar o efeito dos tratamentos. Quando significativo, os dados transformados foram submetidos à análise de regressão linear de 1º grau. Para regressões significativas com os dados transformados, ajustou-se equação linear de 1º grau aos dados originais, e apresentou-se a significância da regressão ajustada aos dados transformados, junto à regressão ajustada aos dados originais (para que a regressão tivesse algum sentido).

Para equações não significativas, apresentou-se o ajuste local pelo método Loess aos dados originais, junto com a significância da regressão dos dados transformados. Cada regressão foi acompanhada de seu respectivo intervalo de confiança a 95%, conforme [17] Todas as análises foram executadas no ambiente estatístico "R", utilizando funções "ExpDes" e "ggplot2".

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho fisiológico e produtivo durante o período de estresse

A taxa de assimilação líquida, ou taxa fotossintética (Figura 1A), decresceu linearmente com o aumento na intensidade do estresse hídrico imposto às plantas. Enquanto a testemunha livre de estresse assimilou $12 - 15\ \mu\text{mol}\ \text{CO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$, somente $2 - 6\ \mu\text{mol}\ \text{CO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ foram assimilados no maior nível de estresse hídrico (Figura 1A); concomitantemente, não houve alteração na concentração de CO_2 no mesofilo (Figura 1C), o que indica que a condutância estomática (Figura 1B), mesmo menor sob maiores níveis de estresse, muito provavelmente não pode ser considerada como o limitante à fotossíntese. A eficiência de carboxilação (Figura 1D) e a taxa transpiratória (Figura 1E) também decresceram com o aumento no nível de estresse aplicado às plantas, porém, em menor intensidade comparativamente à taxa fotossintética (Figura 1A). A transpiração foi reduzida de $2,1 - 2,6\ \text{mmol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$, para $0 - 0,5\ \text{mmol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$, no maior nível de estresse (Figura 1E); similarmente, a condutância estomática foi reduzida de $0,10 - 0,16\ \text{mol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$, na testemunha para $0 - 0,06\ \text{mol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$, no maior nível de estresse (Figura 1B). A redução da condutância estomática pode ser a principal causa da redução de transpiração nas plantas [18]. O déficit hídrico afeta diversos parâmetros na fisiologia do arroz como a fotossíntese líquida [19] e condutância estomática [20]; [21], o que resulta em uma cascata de efeitos sobre outros parâmetros fisiológicos.



A eficiência do uso da água (Figura 1F) descreve a relação entre a quantidade de CO₂ assimilada em determinado período, e a quantidade de água perdida pela planta no mesmo intervalo de tempo; quanto maior, mais eficiente é a planta em assimilar CO₂ por volume de água perdido para a atmosfera [24]. A eficiência de uso da água (Figura 1F) aumentou de 3,8 - 6,0 μmol CO₂ mmol⁻¹ H₂O para 5,8 - 8,2 μmol CO₂ mmol⁻¹ H₂O quando o nível de estresse aumentou de zero para 45 kPa de tensão de água no solo; comportamento similar foi observado para a eficiência intrínseca do uso da água (Figura 1G).

Mesmo com a limitação hídrica imposta à planta, não houve aquecimento foliar em função do aumento no nível de estresse hídrico (Figura 1H). [23] relatam que em resposta ao estresse hídrico a transpiração é reduzida, e por consequência pode ocorrer aumento da temperatura foliar, o que também foi evidenciado por [24]. Entretanto, no presente trabalho não foi relatado aumento da temperatura foliar (Figura 1H) em função do aumento no estresse hídrico e da proporcional redução nas taxas de condutância estomática (Figura 1B) e transpiratória (Figura 1E). Logo, acredita-se que a redução na taxa de metabolismo da planta foi proporcional à redução na disponibilidade de água.

O aumento da eficiência do uso da água pode indicar um mecanismo ideal para ambientes com déficit hídrico, e tem sido considerada como uma "estratégia conservadora" envolvendo baixos índices de transpiração [25]. No entanto, não se deve considerar a eficiência de uso da água como preponderante em culturas agrícolas se ela não estiver atrelada à manutenção ou mesmo ao aumento relativo de produtividade das culturas. A estratégia descrita por [25] pode ser adequada do ponto de vista ecológico, como em ambientes áridos onde o uso mais eficiente da água relaciona-se a maior taxa de sobrevivência da espécie. Em um ambiente agrícola, no entanto, as variedades de espécies cultivadas foram melhoradas para responder ao aumento na disponibilidade dos fatores de produção; portanto, estresse hídrico não deve usualmente estar presente em lavouras comerciais, e espera-se que as variedades de espécies cultivadas respondam bem em produtividade onde a água está disponível. Por outro lado, em ambientes semiáridos, como os observados no Nordeste brasileiro, espera-se que plantas mais eficientes no uso da água aumentem suas chances de sobrevivência frente ao estresse hídrico e contribuam para a produção de alimentos – nesses ambientes o foco pode não ser a produtividade, mas a segurança alimentar [26]; [27].

[28] relatam que para manter a produtividade das culturas sob estresse hídrico e garantir a segurança alimentar, deve-se adotar uma estratégia de cultivo aprimorada. O autor recomenda estudos básicos, inclusive para a cultura do arroz, onde cronogramas de irrigação são cruzados com um cronograma de estresse hídrico, para determinar qual período no ciclo é mais tolerante às condições de estresse hídrico. Para aumentar a eficiência de uso da água, deve-se fornecer mais água nos períodos mais sensíveis ao estresse, reduzindo a irrigação em estádios onde a cultura é capaz de suportar maiores tensões de água no solo. De acordo com o autor, é possível dessa forma aumentar a eficiência no uso da água sem prejudicar a produtividade do arroz. Os



dados deste estudo estão de acordo com essa teoria.

Como não houve redução da concentração interna de CO₂ no mesofilo foliar (Figura 1C) proporcional a condutância estomática (Figura 1B), supõe-se que a eficiência do uso da água aumentou em função da maior dificuldade da planta em retirar água do solo em níveis de estresses mais altos, o que proporcionou menor velocidade de fluxo de água das raízes para as folhas, e o conseqüente menor volume de água transpirado durante período equivalente de abertura estomática. Com a diminuição da disponibilidade de água, conseqüentemente há o fechamento dos estômatos como estratégia de evitar perdas via transpiração [22].

De acordo com [29], a sensibilidade ao déficit hídrico de plantas de arroz em estágio reprodutivo inicial (período entre iniciação da panícula e floração), é maior quando comparadas as fases vegetativa e reprodutiva pós-floração (enchimento de grãos e maturação). Ainda de acordo com o autor, no período reprodutivo, em resposta ao aumento da tensão de água no solo para 40kPa, notou-se queda de 30% na produção de grãos comparado a irrigação por inundação contínua; já com tensão de 20kPa, não houve alterações na produtividade de grãos. [30] em experimento de arroz irrigado por aspersão, no estado de Mato Grosso, estabeleceram a tensão de 25kpa como marco máximo para irrigação de arroz por aspersão.

A cultivar de arroz utilizada no presente estudo, BRS-Pampeira é considerada de alta capacidade produtiva, com rendimento de grãos em campo superiores a 12 t ha⁻¹ [31]. Para que esse nível de produtividade seja alcançado no RS os resultados obtidos nesse estudo, do ponto de vista do desempenho fisiológico da planta, corroboram com os dados fitotécnicos de [30] e [31], mostrando que o arroz não pode ser sujeitado períodos de estresse hídrico no campo superiores a tensão de 15 – 20 kPa ao longo do ciclo vegetativo e reprodutivo inicial (até a floração). Esses níveis máximos de tensão de água no solo devem ser cuidadosamente observados nos ciclos de irrigação do sistema intermitente em arroz, conforme proposto por Stone [32].

A supressão da irrigação em lavouras de arroz pode contribuir para a redução na utilização de água, com menor custo com irrigação, menor dano ambiental, redução de impactos na superfície do solo durante a colheita, e possibilidade de ampliar a área cultivada, com o mesmo volume de água [33].

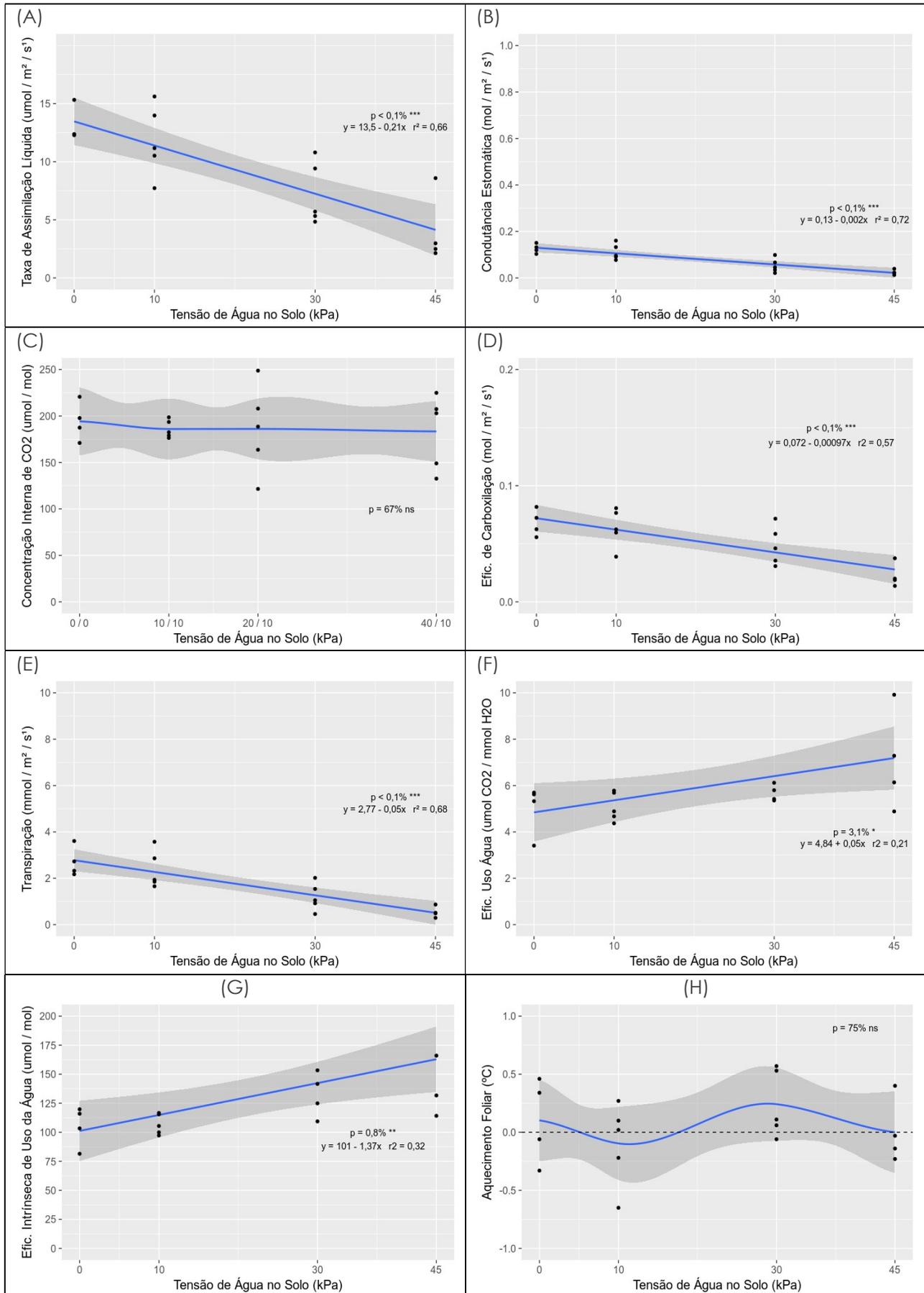


Figura 1. (A) taxa fotosintética (A); (B) condutância estomática (Gs); (C) CO_2 interno (Ci); (D) eficiência de carboxilação (Ec); (E) taxa transpiratória (E); (F) eficiência de uso da água (WUE); (G) eficiência intrínseca de uso da água (IWUE); (H) aquecimento foliar (ΔT), de plantas de arroz cv. BRS-Pampeira sob estresse hídrico. Estresse imposto, e seu efeito avaliado, no estádio reprodutivo do arroz.

Em relação a produtividade de grãos, nas tensões de 30 e 45 kPa a produtividade da cultura do arroz apresentou redução entre 37 - 63% e entre 55 - 81%, respectivamente, em comparação a testemunha (Figura 2), de acordo com o intervalo de confiança da regressão. Como relatado por [34] a fase reprodutiva é o período em que a cultura do arroz é mais sensível ao estresse hídrico. Ainda, [35] relatam que a seca ou o estresse hídrico no estágio reprodutivo inicial afetam significativamente o rendimento de grãos do arroz.

De acordo com o modelo proposto por [36], a produtividade é diretamente relacionada com as condições hídricas das plantas nos seus diferentes estágios fenológicos, no qual, a produtividade relativa se dá pelo produto dos valores da transpiração em cada fase fenológica. Acredita-se que a resposta da cultura à deficiência hídrica pode ser explicada pela interferência dos processos fisiológicos, tais como transporte de carboidratos, níveis de fotossíntese, redução de índice de área foliar (IAF), dentre outros sintomas [34].

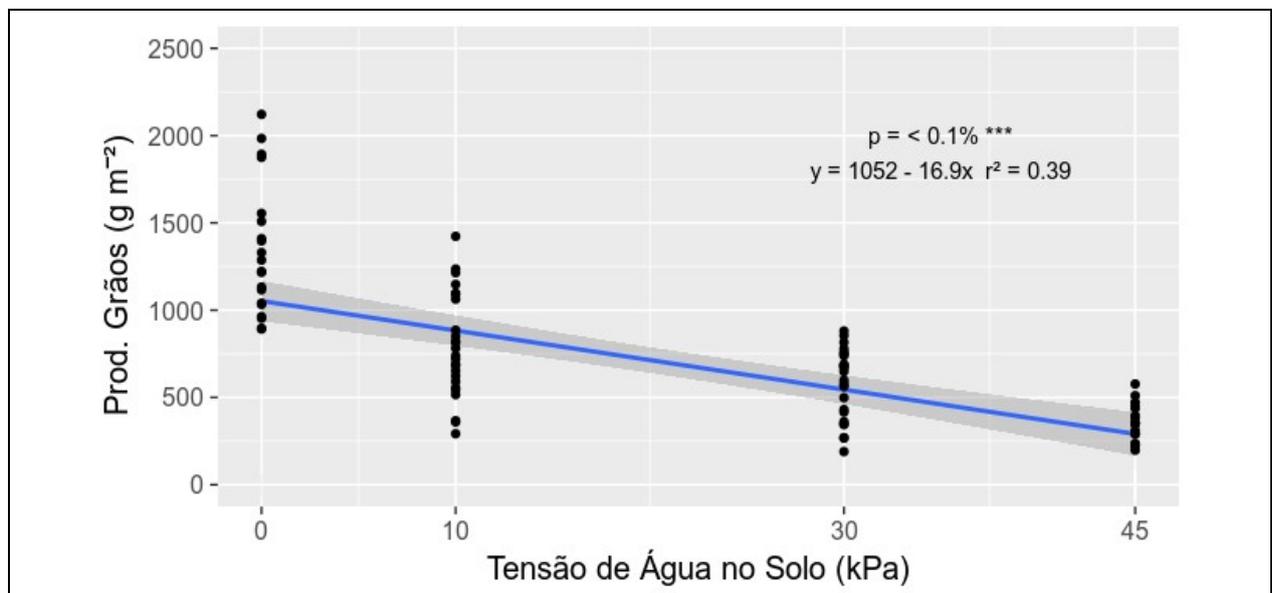


Figura 2. Produtividade de grãos de arroz cv. BRS-Pampeira sob tensões de água no solo imposto no estágio reprodutivo 1 (entre iniciação da panícula e antese). Estresse imposto, e seus efeitos avaliados, no estágio reprodutivo do arroz.

Nota-se que o desempenho dos parâmetros fisiológicos (Figura 1) está diretamente relacionado com a produtividade de grãos da cultura do arroz (Tabela 1). A baixa taxa de assimilação líquida e trocas gasosas contribuem para o mau desempenho dos demais parâmetros relacionados. A relação entre desempenho fotossintético e produtividade é bem estabelecida [37] nesse sentido, melhorar parâmetros fotossintéticos levaria ao aumento do rendimento da cultura [38].



Tabela 1. Correlação linear entre os parâmetros fisiológicos e a produtividade de grãos do arroz cv. BRS-Pampeira, em função do aumento do estresse hídrico.

Variável	Correlação	Probabilidade
A x produtividade	0,71	0,09%
Gs x produtividade	0,77	0,02%
Ci x produtividade	0,55	1,70%
E x produtividade	0,76	0,02%
EC x produtividade	-0,17	50,80%
WUE x produtividade	-0,47	4,70%
IWUE x produtividade	-0,54	1,90%
DELTA T x produtividade	-0,14	56,30%

Correlações com probabilidades superiores a 5% são consideradas não significativas.

Sumarizando, níveis de estresse hídrico superiores a 15 – 20 kPa, aplicados às plantas de arroz irrigado no início do período reprodutivo, trazem prejuízos ao desempenho fisiológico das plantas dessa cultura enquanto o estresse é vigente, e resultam em perdas de produtividade de grãos.

Desempenho fisiológico e produtivo após a remoção do estresse

No presente estudo não foram relatados efeitos nos parâmetros fisiológicos avaliados no início da fase reprodutiva, em função do estresse imposto na fase vegetativa (Figura 3). A taxa de assimilação líquida de CO₂ (Figura 3A), condutância estomática (Figura 3B), concentração de CO₂ no mesofilo (Figura 3C), eficiência de carboxilação (Figura 3D), transpiração (Figura 3E), eficiência absoluta (Figura 3F) e intrínseca (Figura 3G) do uso da água e aquecimento foliar (Figura 3H), não foram alterados em função do nível de estresse anteriormente imposto, quinze dias após sua remoção, nem tampouco foram relatados sinais de que as plantas de arroz estivessem incrementando suas taxas metabólicas além das esperadas como forma de recuperar o que deixou de ser assimilado e incorporado à planta durante o período de estresse, o que evidenciaria a efetividade de um possível efeito de “priming”.

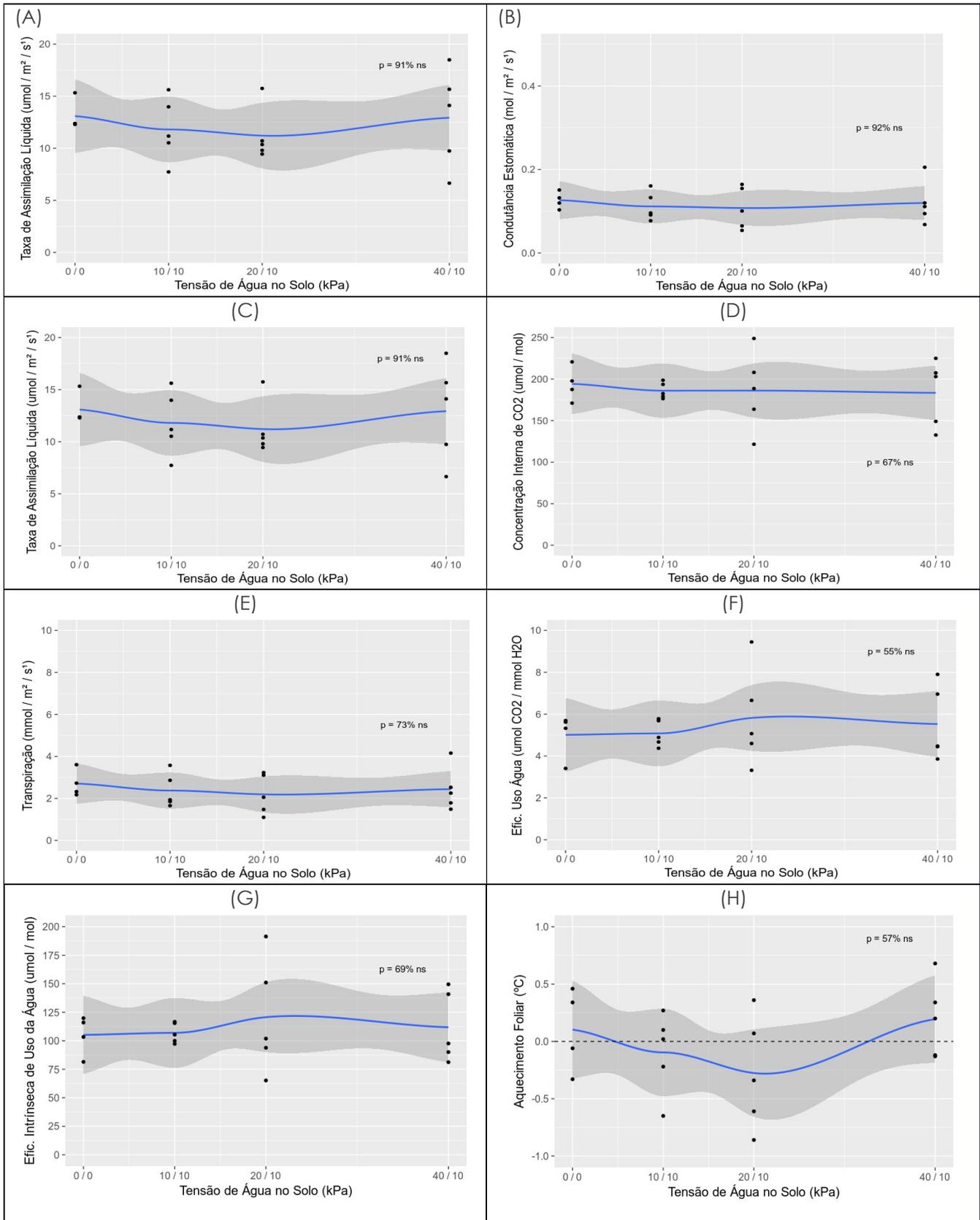


Figura 3. [A] taxa fotossintética (A); [B] condutância estomática (Gs); [C] CO_2 interno (Ci); [D] eficiência de carboxilação (Ec); [E] taxa transpiratória (E); [F] eficiência de uso da água (WUE); [G] eficiência intrínseca de uso da água (IWUE); [H] aquecimento foliar (ΔT), de plantas de arroz cv. BRS-Pampeira sob estresse hídrico. O estresse foi imposto no estágio vegetativo (0 - 40 kPa), e seus efeitos foram avaliados no estágio reprodutivo do arroz (quando todos os tratamentos estavam sob 10 kPa). Eixo X: tensão de água no estágio vegetativo / tensão de água nas outras fases do desenvolvimento.



Observou-se que o mecanismo utilizado pela cultura do arroz para recuperar perdas oriundas de períodos de estresse hídrico, é o alongamento de seu ciclo fenológico, e não o aumento de seu metabolismo fisiológico após a remoção do estresse. [39] relatam que as diferenças de comprimento de ciclo entre cultivares de arroz precoces, de ciclo médio ou tardio está principalmente no número de dias do ciclo vegetativo (emergência à iniciação da panícula), sendo o comprimento da fase reprodutiva 1 (iniciação da panícula a antese) e 2 (antese a maturação) relativamente estáveis entre variedades. [40] relatam que o estresse hídrico durante o estágio vegetativo do arroz, alongou o período vegetativo e atrasou proporcionalmente a maturidade fisiológica.

Dados similares foram relatados por [41], trabalhando com cultivo de arroz irrigado por sistema mecanizado tipo lateral móvel, que afirmam que na situação, de menor disponibilidade hídrica, em comparação com o sistema de irrigação por inundação contínua, o ciclo total do arroz irrigado pode ser até 15 dias mais longo, em função do alongamento do período vegetativo do ciclo fenológico. No entanto, [3] afirmam que este comportamento não afeta a qualidade dos grãos de arroz, e que níveis moderados de estresse hídrico podem ser mantidos em lavouras de arroz sob sistemas de irrigação intermitente ou sistemas mecanizados de irrigação por aspersão.

Assim, as afirmações de [42] e de [3], de que o arroz é mais sensível ao estresse hídrico na fase fenológica reprodutiva comparativamente à fase vegetativa, pode necessitar de algumas ressalvas quando relacionadas ao desempenho dos parâmetros fisiológicos.

As perdas de produtividade do arroz são maiores quando o estresse ocorre no período reprodutivo, conforme afirmado por [42] e [3] mas a menor perda de produtividade da cultura quando o estresse ocorre na fase vegetativa do ciclo pode ser atribuída ao aumento do número de dias do ciclo vegetativo, que permite recuperação da planta ao longo do tempo como se ela anulasse parcialmente a existência dos dias em que esteve sob estresse, fotossintetizando por dias adicionais. Assim, pode não haver efetiva diferença de sensibilidade ao estresse hídrico em arroz em função da fase do ciclo em que o estresse ocorre, mas sim uma inabilidade da planta de se recuperar do estresse quando ele ocorre na fase reprodutiva do ciclo fenológico. Este fato deve ser investigado em estudos futuros.

A produtividade de grãos do arroz não foi afetada quando os níveis de estresse foram aplicados na fase vegetativa (Figura 4); como também não houve aumento nas taxas metabólicas pós-estresse (Figura 3), propõe-se que a recuperação dos níveis de produtividade se deu pelo alongamento da fase vegetativa do ciclo do arroz. Plantas de arroz pode ter o crescimento atrofiado ou retardado devido deficit hídrico durante o estágio vegetativo, porém pode não acarretar efeitos negativos no rendimento se as plantas de arroz forem irrigadas e recuperadas antes da colheita especialmente no início da floração [40].

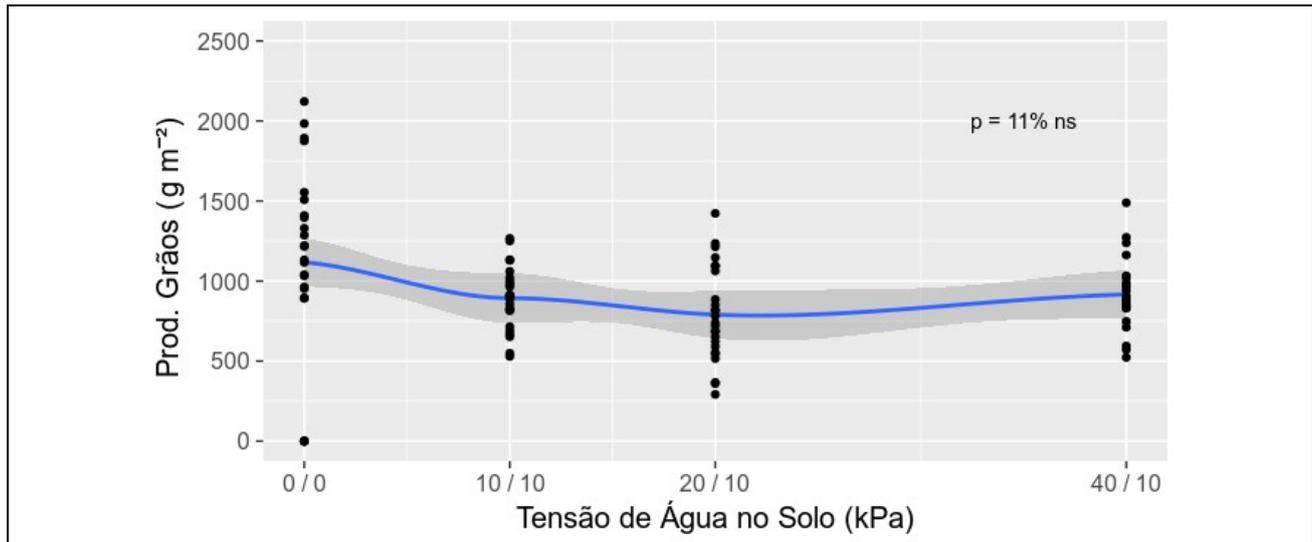


Figura 4. Produtividade de grãos de arroz cv. BRS-Pampeira sob níveis crescentes de estresse hídrico imposto no estágio vegetativo (início do perfilhamento à iniciação da panícula). Estresse imposto no estágio vegetativo (0 - 40 kPa), e seus efeitos avaliados no estágio reprodutivo do arroz (quando todos os tratamentos estavam sob 10 kPa). Eixo X: tensão de água no estágio vegetativo / tensão de água nas outras fases do desenvolvimento.

Em condições de campo, [44] e [29] compararam sistema de irrigação intermitente (entrada da água realizada em V4 seguida por ciclos de irrigação e drenagem natural) com a inundação contínua, e não observaram redução no rendimento de grãos de arroz; detectaram, no entanto, alongamento do ciclo fenológico da cultura, o que reforça a necessidade de estudos sobre a hipótese levantada.

Plantas submetidas ao estresse hídrico promovem modificações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas para conviver com o estresse, ou mesmo para contorná-lo parcialmente [45]. O estresse por seca afeta as taxas fotossintéticas, devido principalmente ao fechamento estomático que limita a condutância de gases e vapores de água o que, conseqüentemente, reduz a taxa de fotossíntese [46]. Devido a isto, espera-se que, removido o estresse, a taxa fotossintética e demais parâmetros fisiológicos associados tendam a voltar aos patamares anteriores à imposição do estresse após um período de ambientação, desde que as plantas não tenham sofrido severas restrições de desenvolvimento morfoanatômico como consequência do estresse [47].

Alguns tipos de estresse, como exemplo, a competição com plantas daninhas, estimulam aumento nas taxas metabólicas da planta mais competitiva como forma de evitar o estresse imposto. Isso foi relatado, por exemplo, para plantas de mandioca (*Manihot esculenta*), que aumentaram suas taxas de metabolismo dos processos fisiológicos, inclusive com maior ganho de massa de parte aérea (mas não da parte econômica), como forma de sobrepassar pequenos níveis de competição com determinadas plantas daninhas [48] comparativamente à testemunha livre de invasoras. Outras particularidades sobre esse comportamento são discutidas por [49].

Os efeitos do estresse hídrico sobre plantas de arroz parecem, portanto, estar mais relacionados a aspectos morfológicos da cultura do que fisiológicos, pois não houve aumento da taxa fotossintética, bem como de nenhum outro parâmetro fisiológico acima do observado pré-estresse, como forma de tentar compensar as perdas ocasionadas pela sua imposição.



Resultados que corroboram os observados nesse estudo foram relatados para feijão caupi (*Vigna unguiculata*) por [50], em que a suspensão da irrigação diminuiu o desempenho dos parâmetros fisiológicos da planta em comparação com o controle, mas quando retomada a irrigação, as taxas fotossintéticas e trocas gasosas retornaram aos patamares do tratamento controle, sem evidências de aceleração do metabolismo como forma de recuperar o que foi perdido durante o período de estresse.

Existem ainda relatos de espécies que, quando submetidas ao estresse hídrico, não conseguem nem mesmo retornar às taxas metabólicas médias observadas para a testemunha livre de estresse, após a remoção do estresse hídrico. [51] relatam que a taxa transpiratória aumentou nas plantas de gergelim (*Sesamum indicum*) após 48 horas da reposição de irrigação. Entretanto, a espécie não foi capaz de retornar a patamares semelhantes às do tratamento controle. O mesmo autor relata que sob irrigação diária, maiores valores de condutância estomática são observados comparativamente a plantas que foram previamente submetidas a suspensão da irrigação, mas não estavam mais em estresse hídrico no momento da avaliação.

Os dados deste estudo podem ser um indicativo bastante inicial de que o efeito “priming”, estudado por vários autores, mesmo que efetivo acabe trazendo certo nível de prejuízo ao metabolismo da planta previamente submetida a estresses, e que a recuperação do potencial de produtividade seja atribuída primordialmente ao aumento do ciclo vegetativo do arroz, como forma de compensar os dias de metabolismo fisiológico perdidos.

Assim, de modo geral, o estudo demonstra que as plantas de arroz não foram capazes de aumentar sua atividade fisiológica além do observado em período anterior ao estresse, como forma de tentar recuperar o que foi deixado de assimilar durante este período. Em outras palavras, uma vez o dano ocorrido, não se recupera o prejuízo no mesmo intervalo de tempo, mas provavelmente pelo alongamento do ciclo vegetativo da cultura.

CONCLUSÃO

Níveis de estresse hídrico superiores a 15 – 20 kPa, aplicados às plantas de arroz irrigado, trazem prejuízos ao desempenho fisiológico das plantas enquanto o estresse é vigente.

As plantas de arroz não são capazes de aumentar sua atividade fisiológica além do observado em período anterior ao estresse, como forma de tentar recuperar o que foi deixado de assimilar durante este período. Uma vez o dano ocorrido, não se recupera o prejuízo em produtividade no mesmo intervalo de tempo.

O presente estudo não apoia a teoria do efeito priming em arroz.



Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 424223/2016-3.

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo compartilhamento do local para teste de campo no Campo Experimental de Terras Baixas (ETB), Pelotas-RS.

REFERÊNCIAS

- [1] FAO – **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em 05 mai. 2019.
- [2] CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira. - Safra 2019/20** - Quarto levantamento, Brasília v.7, p.1-25, 2020.
- [3] SILVA, J. T. da et al . Soil water tension and rice grain quality. Revista de Ciências **Agrárias**, v.41, n. 2, p. 231-240, 2018.
- [4] BOSCO, L.C; GRIMM, E.L; STRECK, N.A. Crescimento e desenvolvimento de genótipos de arroz cultivados em solo alagado e não-alagado. **Revista Ceres**, v.56, p.96-804, 2009.
- [5] TERRA, T. G. R. et al. Características de tolerância à seca em genótipos de uma coleção nuclear de arroz de terras altas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 50, n. 9, p.788-796, 2015.
- [6] FUKAI S.; COOPER, M. Development of drought resistant cultivars using physio-morphological traits in rice. Field **Crops Research**, v. 40, n. 1, p. 67- 86, 1995.
- [7] PARFITT, J.M.B.; et al - Manejo da irrigação por aspersão e desempenho da cultura do arroz. In: Congresso brasileiro de arroz irrigado. Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí: EPAGRI; SOSBAI.v.7. p. 461-464, 2011.
- [8] MAITI R., KUMARI A. **Necessidade Social de uma Gestão Eficiente e Conservação do Bio-recurso e Gestão do Stress**. In: Maiti R., A. Kumari, Thakur A., Sarkar N. (eds) Bioresource e Stress Management. Springer, Cingapura. 2016.
- [9] TANOU, L, FOTOPOULOS, V , MOLASSIOTIS U. **Plant acclimation to environmental stress using priming agents**. In: Tuteja NGill SS, eds. Plant acclimation to environmental stress , NY: Springer,p 1–28, 2012.
- [10] WANG, X. et al. Improved tolerance to drought stress after anthesis due to priming before anthesis in wheat (*Triticum aestivum* L.) var. Vinjett, **Journal of Experimental Botany**, v.65, p.6441–6456, 2014.
- [11] BORGES, M., et al. Metodologias para o estudo da defesa de memória (Priming) em plantas frente a estresse biótico.**Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia-Circular Técnica** (INFOTECA-E) 2017.
- [12] TERRA, T. G. R. et al. Tolerância de linhagens de arroz de terras altas à seca. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 201-208, 2013.
- [13] SOBAl - **SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO**. Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. 2018.
- [14] STEINMETZ, S. et al. Fundamentos do programa GD Arroz, versões Web e Aplicativo, e seu uso no manejo do arroz irrigado. **Agrometeoros** , v. 26, p. 1-10, 2018.
- [15] Padovani, C.R.. **Delineamento de experimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2014.



- [16] Ferreira, P. V. **Estatística Experimental Aplicada às Ciências Agrárias**. VIÇOSA. Editora: Editora UFV, 2018.
- [17] CLEVELAND, W.S.; DEVLIN, S.J. An approach to regression analysis by local fitting. **Journal of the American Statistical Association**, v. 83, n. 403, p. 596-610. 1988.
- [18] YAN W M, ZHONG Y Q, SHANGGUAN Z P. A meta-analysis of leaf gas exchange and water status responses to drought. **Scientific Reports**, v6: n.20917. 2016.
- [19] YANG P. M, et al.. Different drought-stress responses in photosynthesis and reactive oxygen metabolism between autotetraploid and diploid rice. **Photosynthetica**, v.52, p193-202. 2014.
- [20] JI K X. et al. Drought-responsive mechanisms in rice genotypes with contrasting drought tolerance during reproductive stage. **Journal of plant physiology**, v. 169 p.336-344, 2012.
- [21] CONCENÇO, G. **Caracterização de biótipos de capim arroz (*Echinochloa crusgalli*) resistentes e suscetíveis ao quinclorac e desenvolvimento de método para detecção rápida da resistência**. Tese. Doutorado no Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 78p. 2008.
- [22] SINGH A, SENGAR K, SENGAR R S. Gene regulation and biotechnology of drought tolerance in rice. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research**. v.4 p.547-552, 2013.
- [23] ENDRES, L.; et al. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.11- 16, 2010.
- [24] OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D. Condut,ncia estomática como indicador de estresse hídrico em feijoeiro. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 25, n. 1, p. 86-95, 2005.
- [25] TARDIEU, F. Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. **Frontiers in Physiology**, v. 4, p. 1-11, 2013.
- [26] BATISTA, M. S. **Espécies vegetais nativas da flora do Brasil utilizadas na alimentação da região Nordeste: diversificando a dieta e a produção agrícola**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Agronomia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- [27] SCHEMBERGUE, A. et al. Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de economia e sociologia rural**,v.5, n.1. 2017.
- [28] ZAIN, N. A. M., et al., Impacto do estresse hídrico cíclico no crescimento, respostas fisiológicas e produtividade de arroz (*Oryza sativa L.*) cultivado em ambiente tropical. **Ciência Rural** , v.44, n.12), p.2136-2141, 2014.
- [29] SILVA J.T. et al. Resposta do arroz irrigado ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas. In: Proceedings of the 9th Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado. **Anais...** Porto Alegre. CD-ROM. 2015.
- [30] STONE, L.F. et al. Cultivo do arroz de terras altas no Estado do Mato Grosso. Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. Embrapa Arroz e Feijão. **Sistemas de produção**, 7, 2006.
- [31] GUIMARAES, C. M. et al. Tolerance of upland rice genotypes to water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, p. 805-810. 2013.
- [31] MAGALHAES JUNIOR, A. M.de et al. BRS Pampeira: new irrigated rice cultivar with high yield potential. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 17, n. 1, p. 78-83, de 2017.
- [32] STONE, L.F. Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado. Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, (Documentos, 176) p.48, 2005.
- [33] GOMES, A. S. et al. A água: distribuição, regulamentação e uso na agricultura, com ênfase ao arroz irrigado. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, n. 250, p.44, 2008.
- [34] PINTO, M.A.B. **Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 68 f. 2015.



- [35] SARAGIH A.A. et al. Pollen quality traits of cultivated (*Oryza sativa* L. ssp. *indica*) and weedy (*Oryza sativa* var. *nivara*) rice to water stress at reproductive stage. **Australian Journal of Crop Science**, v.7, n.8, p. 1106 – 1112, 2013.
- [36] JENSEN, M.E. **Water consumption by agricultural plants**. In: KOZLOWSKY, T.T. (Ed.). Water deficits and plants growth. New York: Academic Press, p. 1-22. 1968.
- [37] LONG S. P, ZHU, X. G, NAIDU, S. L, ORT, D. R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? **Plant Cell Environ**, v29, n3, p.315–330, 2006.
- [38] ZAMAN, N.K., et al. Growth and Physiological Performance of Aerobic and Lowland Rice as Affected by Water Stress at Selected Growth Stages. **Rice Science**, v. 25, p.82-93, 2018.
- [39] COLOMBARI FILHO, J. M.; RANGEL, P. H. N. **Cultivares**. In: BORÉM, A.; RANGEL, P. H. N. (Ed.) Arroz: do plantio à colheita. Viçosa: Ed. UFVcap. 5, p. 84-121, 2015.
- [40] BOONJUNG, H.; FUKAI, S. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions: 2. Phenology, biomass production and yield. **Field Crops Research**, v. 48, n.1, p. 47-55, 1996.
- [41] PARFITT, J. M. B. et al. Rice growth under water stress levels imposed at distinct developmental stages. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, p. 587-596, 2017.
- [42] PARFITT, J.M.B.; et al. **Soil and water management for sprinkler irrigated rice in Southern Brazil**. In: Li, J.Q. (Ed). Advances in International Rice Research. Rijeka: Intech. p. 3-18. 201.
- [43] YOSHIDA, S. **Growth and Development of the Rice Plant: Fundamentals of Rice Crop Science**. International Rice Research Institute, Los Baños, the Phillipines. 1981.
- [44] PETRINI, J. A. et al. Estratégias de irrigação para redução do uso da água em arroz irrigado. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 8, 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, SOSBAI, v.2 p 1180-1183, 2013.
- [45] FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.
- [46] SILVA, C. D. S.; SANTOS, P. A. A.; LIRA, J. M. S.; SANTANA, M. C.; SILVA JUNIOR, C. D. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica. **Revista Caatinga**, v.23, p.7-13, 2010.
- [46] SILVA, J. T. et al.. **Resposta do arroz irrigado ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas**. Ciência e tecnologia para otimização da orizicultura: anais. Brasília, DF: Embrapa; Pelotas: Sosbai, 2015.
- [47] LEVITT, J. **Response of plants to environmental stress. II: Water radiation, salt and other stress**. New York: Academic Press, p 606,. 1980.
- [48] ASPIAZÚ, I. et al. Water use efficiency of cassava plants under competition conditions. **Planta Daninha**, v. 28, p. 699-703, 2010.
- [49] ASPIAZÚ, I. et al. Photosynthetic activity of cassava plants under weed competition. **Planta Daninha**, v. 28, p. 963-968, 2010.
- [50] NUNES, A. DA S. **Termometria por infravermelho como indicador de estresse hídrico em plantas de feijão-caupi**. Tese. Doutorado Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), Universidade Federal da Grande Dourados. 2012.
- [51] FEITOSA, S. dos S. et al. Fisiologia do *sesamum indicum* l. Sob estresse hídrico e aplicação de ácido salicílico. **Irriga (UNESP Botucatu)**, v. 4, p.711-723, 2016.