

Londrina, PR / Março, 2024

Déficit de pressão de vapor (DPV) como referência de produtividade em soja - primeira aproximação

Sergio Luiz Gonçalves⁽¹⁾, José Renato Bouças Farias⁽²⁾, Luís Guilherme Teixeira Crusiol⁽³⁾, Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli⁽⁴⁾ e Norman Neumaier⁽⁵⁾

⁽¹⁾Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR; ⁽²⁾Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR; ⁽³⁾Geógrafo, doutor em Agronomia, pesquisador visitante, bolsista FAPED/Embrapa Soja, Londrina, PR; ⁽⁴⁾Matemático, especialista em Estatística, Londrina, PR; ⁽⁵⁾Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Resumo - Um dos fatores que mais influenciam o desenvolvimento das plantas são as condições climáticas, ficando cada vez mais evidentes os problemas causados por secas e veranicos. Neste cenário, uma importante variável agrometeorológica é o déficit de pressão de vapor (DPV). Ele pode ser entendido como sendo uma combinação entre a temperatura média e a umidade relativa do ar, indicando o poder que a atmosfera possui de retirar água da superfície terrestre, facilitando o entendimento da origem de secas e veranicos. Neste trabalho, foram correlacionados dados de produtividade de 75 municípios dos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul, com o DPV calculado para o período crítico entre florescimento e enchimento de grãos da cultura da soja. Foram utilizados dados de produtividade e de clima de 389 safras entre os anos de 2003 e 2022. Os resultados indicaram que, em condições próximas da normalidade, quando a distribuição hídrica e as temperaturas foram favoráveis ao bom desenvolvimento das plantas, o DPV foi baixo, ficando de 0.8 kPa ou menor. Nessas condições, a produtividade média da soja se manteve acima de 3000 kg/ha. Na ocorrência de anomalias climáticas, que produziram algum déficit hídrico regional, com queda da umidade relativa e aumento das temperaturas médias nos decêndios coincidentes com o período florescimento/enchimento de grãos da soja, o DPV elevou-se para valores superiores a 1,5 kPa, com uma tendência de a produtividade média da soja ficar em valores inferiores a 1500 kg/ha. Os dados possibilitaram construção de um modelo de regressão linear múltipla que, com os dados das coordenadas geográficas de um local e o DPV calculado, seja possível a predição da produtividade da cultura com antecipação.

Termos para indexação: *Glycine max*, temperatura, umidade relativa do ar.

Embrapa Soja
Rod. Carlos João Strass, s/n,
acesso Orlando Amaral
Caixa Postal 4006,
CEP 86085-981
Distrito de Warta
Londrina, PR
(43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
Presidente
Adeney de Freitas Bueno
Secretária-executiva
Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Membros
Claudine Dinali Santos Seixas,
Clara Beatriz Hoffmann-Campo,
Fernando Augusto Henning, Ivani
de Oliveira Negrão Lopes, Leandro
Eugênio Cardamone Diniz, Maria
Cristina Neves de Oliveira, Mônica
Juliani Zavaglia Pereira e Norman
Neumaier

Edição executiva
Vanessa Fuzinato Dall'Agnol

Revisão de texto
Regina Maria Villas Bôas de
Campos Leite

Normalização
Valéria de Fátima Cardoso
(CRB- 9/1188)

Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio

Diagramação
Marisa Yuri Horikawa
Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

Vapor pressure deficit (VPD) as a productivity reference in soybean - first approximation

Abstract - One of the factors that most influence the development of plants is climatic conditions, with problems caused by water deficiency becoming increasingly evident. On that matter, the vapor pressure deficit (VPD) is a relevant agrometeorological variable. As a combination of the average air temperature and relative humidity, VPD indicates the atmospheric power to remove water from the Earth's surface, facilitating the understanding of drought. In this work, we correlated productivity data from 75 municipalities of Rio Grande do Sul, Paraná, and Mato Grosso do Sul states with the calculated VPD for the soybean crop flowering-grain filling critical period, using productivity and climate data from 389 harvests from 2003 to 2022. The results indicated that, in conditions close to normal, when water distribution and temperatures were favorable to the best development of plants, the VPD was low, being 0.8 kPa or lower. Under these conditions, average soybean productivity remained above 3000 kg/ha. In the event of climatic anomalies, which produced some regional water deficit, with a decrease in relative humidity of the air and an increase of the average temperatures during the flowering-filling period of soybean grains, the VPD rose to values above 1.5 kPa, showing a tendency for average soybean productivity to be below 1500 kg/ha. The data allowed the construction of a multiple linear regression model with the geographic coordinates of a location and the locally calculated VPD to predict crop productivity before harvesting.

Index terms: *Glycine max*, temperature, air relative humidity.

Introdução

Uma seca pode ser caracterizada como uma estiagem prolongada, com séria diminuição de chuvas durante grande parte da estação chuvosa, podendo causar não só prejuízos à vegetação, como também desequilíbrios hidrológicos regionais e ter consequências sociais negativas. Veranicos por sua vez, são períodos de déficit hídrico mais curtos, que geralmente duram alguns dias, mas também podem se estender por várias semanas (Pertussatti, 2013). Normalmente causam prejuízos agrônômicos às culturas, atingindo principalmente aquelas de sequeiro. As extensões dos prejuízos dependem muito da época de semeadura e das características das plantas, como, por exemplo,

a própria tolerância da espécie agrícola e os estádios mais críticos à deficiência hídrica, como o período compreendido entre o florescimento e o desenvolvimento de grãos.

É comum o veranico ocorrer no período primavera-verão, sendo acompanhado de forte calor e insolação, com baixa umidade relativa do ar e associado a massas de ar quentes e secas. No entanto, pode ser considerado mais brando que as secas. Além da espécie agrícola, os prejuízos causados por irregularidades na distribuição hídrica são muito variáveis em função das condições ambientais locais. Essas podem atenuar ou agravar as condições desfavoráveis. Um ambiente com altas temperaturas do ar e o ar com baixa umidade relativa tendem a retirar grande parte da umidade da superfície terrestre. Tais condições são ainda mais adversas em solos descobertos, solos rasos e com textura média a arenosa, principalmente em regiões de baixa altitude. Nessa situação a perda de água do sistema pode levar as plantas a entrarem em condições de deficiência hídrica e como consequência ocorrer grandes quedas de produtividade das lavouras.

Em decorrência do grande potencial de reduzir a produtividade das plantas de modo geral, as condições climáticas vigentes sobre áreas agrícolas ou mesmo em toda uma região têm sido motivo cada vez mais frequentes para discussões de especialistas, uma vez que a deficiência hídrica têm sido considerada o principal fator de prejuízos. Dentro deste cenário, uma variável agrometeorológica bastante importante para a compreensão destes eventos climáticos é o déficit de pressão de vapor (DPV). Ele pode ser entendido como sendo uma espécie de combinação entre a temperatura média e a umidade relativa do ar, que indica o poder que a atmosfera possui de retirar água da superfície terrestre, uma vez que, quando ele é alto, significa que a atmosfera está apresentando uma capacidade de conter mais vapor d'água. Tal combinação entre a temperatura e a umidade relativa do ar obviamente possui uma influência direta no desenvolvimento das plantas.

É preciso lembrar que, no ar, a quantidade de água existente está na forma de gás (ou vapor d'água) e isso é variável em função da temperatura. Aqui entra um conceito importante que é o da umidade relativa, que mostra valores mais elevados em baixas temperaturas e mais baixos quando ocorrem altas temperaturas. Ela nos dá a porcentagem de vapor d'água presente no ar a uma dada temperatura em comparação com a quantidade potencial ou total que esse ar poderia

conter na mesma temperatura. O vapor d'água exerce uma pressão sobre as plantas, sendo que, quando a umidade relativa é alta a pressão é maior e o DPV é baixo e, nessas condições as plantas transpiram menos (Oliveira, 2016). Cabe salientar que a planta precisa transpirar para poder crescer e se desenvolver, dependendo disso a captura de gás carbônico da atmosfera e a realização de fotossíntese.

Por outro lado, quando a umidade relativa é baixa e a pressão é menor, o DPV é alto, sendo que as plantas tendem a transpirar mais. Se o DPV se elevar demais, os estômatos das folhas tendem a se fechar, numa tentativa de limitar a transpiração e a consequente murcha da planta (Tatagiba et al., 2007; Lima et al., 2016). Há uma correlação direta entre alto DPV e baixa disponibilidade hídrica no solo (Paiva et al., 2005). Na prática, o déficit de pressão de vapor é a diferença entre a pressão exercida pelo vapor d'água quando o ar está saturado (100% de umidade relativa numa determinada temperatura) e a real pressão que está ocorrendo nessa temperatura. Em consequência disso, como já foi enfatizado, o DPV dá um indicativo da umidade que a atmosfera retira das plantas.

O DPV é obtido num valor único, podendo ser calculado pela equação de Tetens (1930), conforme demonstrado por Sibaldelli et al. (2022). As principais variáveis do DPV, temperatura e umidade relativa do ar, podem variar em função do ambiente, seja ele um ambiente protegido ou externo, ou ainda apresentar variações em função de altitude e latitude, dias chuvosos ou dias ensolarados ou em meio a um veranico ou a uma seca, horas mais quentes do dia, horários noturnos, entre outras situações. As plantas, por sua vez, respondem diferentemente com relação a essas alternâncias ambientais. Heckler (2009), estudando a cultura da uva coberta por plástico, observou que nesse ambiente a temperatura da folha da videira foi menor que no ambiente externo. Em consequência, o déficit de pressão de vapor também foi menor. Schwider et al. (2013), estudando a cultura do eucalipto, verificaram que plântulas apresentaram melhor desenvolvimento em ambiente mais quente (temperatura de 32 °C) e seco (umidade relativa de 40%), com o DPV variando de 0,86 a 1,64 kPa. Santos (2013), estudando a cultura da cana-de-açúcar, verificou que antes de estresses hídricos a cultura mostrou baixo DPV, entre 1,0 e 1,6 kPa, tendo um aumento significativo para a faixa de 2,5 a 3,6 kPa em cultivares submetidas a períodos de deficiência hídrica. Esses diferentes trabalhos citados dão uma noção de que as plantas respondem de maneiras

diferentes a diferentes níveis de DPV, sendo que o ideal para uma cultura pode não o ideal para outra. Em síntese, de modo geral, podemos dizer que quando o DPV é alto, com baixa umidade relativa, as plantas podem sofrer perdas por deficiência hídrica. Por outro lado, quando ocorre o inverso, com o DPV muito baixo, em condições de alta umidade relativa, o excesso de umidade pode favorecer o surgimento de doenças, principalmente as fúngicas.

O objetivo deste trabalho foi correlacionar, numa primeira aproximação, produtividades de soja, em nível municipal e regional, obtidas em 389 safras, com o respectivo DPV calculado para as mesmas safras, no período de florescimento/formação de grãos da soja, entre os anos de 2003 e 2022, nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul.

Material e Métodos

Foram reunidos dados de produtividade média municipal de soja de 389 safras, dos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul, publicados nos respectivos boletins de acompanhamento de safras dos órgãos estaduais de economia agrícola e extensão rural de cada estado. Para o número total de safras estudado foram obtidos dados de produtividade e dados de temperatura e umidade relativa do ar disponíveis para cada safra, nas estações do INMET existentes nos municípios ou regiões estudadas. Os dados de produtividade para as respectivas safras foram aqueles já publicados pelos órgãos estaduais do setor: Emater/RS, Seab-Deral/PR e sistema Famasul/Aprosoja/MS (Famasul, 2019, 2022; Emater-RS, 2021a, 2021b, 2022; Paraná, 2022, 2023). Foram utilizadas as informações das séries de dados temperatura média e umidade relativa de estações meteorológicas do INMET (INMET, 2023), distribuídas nos três estados estudados (Anexo 1).

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado pela equação de Tetens (1930), para o período com maior probabilidade de ocorrência dos estádios da soja compreendidos entre o início do florescimento e o enchimento de grãos. Para isso foram consideradas as épocas de semeadura usuais para municípios e regiões e o ciclo médio das cultivares predominantes. Em função da disponibilidade dos dados climáticos e de produtividade disponíveis, foi possível calcular o DPV para um número mínimo de 3 safras para alguns municípios até um máximo de 15 safras para outros. Devido aos avanços tecnológicos e melhorias genéticas ocorridas na cultura da soja nas últimas décadas, este

trabalho buscou estudar principalmente o período compreendido entre as últimas 6 safras, apesar de a data mais antiga do experimento tenha sido o ano de 2003.

Os dados de clima foram obtidos para o período compreendido entre o florescimento e a formação de grãos da soja para as regiões em estudo. De modo geral, em função das diferentes regiões, variações de altitude e de épocas de semeadura regionais, os períodos críticos considerados foram de janeiro até o início de março para o Rio Grande do Sul. No Paraná, do início de dezembro indo até janeiro nas regiões mais baixas e de janeiro até o final de fevereiro e início de março nas mais altas. Para o Mato Grosso do Sul o período crítico ficou em janeiro e fevereiro. O cálculo do DPV foi realizado diariamente, sendo que, em função da disponibilidade de dados, na equação de regressão foram utilizadas médias de 3 a 4 decêndios coincidentes com o florescimento e formação de grãos da soja.

Após os cálculos do DPV foram organizados os dados para a realização dos procedimentos estatísticos, considerando que análises de regressão são úteis em estudos de clima e mapeamentos de informações (Draper; Smith, 1998). Para esse procedimento, utilizou-se o software Statistica (Statsoft, 2007). Aos dados climatológicos foram aplicados um modelo de regressão linear múltipla entre as variáveis produtividade municipal das safras estudadas (kg/ha), latitude e longitude (graus), altitude (m) e DPV médio calculado para os períodos críticos da soja, para todas as safras estudadas (kPa), conforme Gonçalves et al. (2020).

Resultados e Discussão

Foram geradas equações de regressão pelo método de regressão linear múltipla, fazendo-se diferentes combinações com as variáveis estudadas e fixando-se a produtividade como variável dependente. O resumo da equação linear múltipla encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo da equação linear múltipla tendo a produtividade como variável dependente ($r = 0,7675$; $R^2 = 0,5891$)

Variáveis	B	Significância
Intercepto	3959,16	0,000521
Latitude (lat)	-76,16	0,000000
Altitude (alt)	-0,23	0,073136
Longitude (long)	45,57	0,024524
DPV	-1836,08	0,000000

Com os dados da Tabela 1 foi possível organizar Equação 1, que possibilita a estimativa da produtividade:

$$\hat{Y} = 3959,16 + (-76,16 * lat) + (-0,23 * alt) + (45,57 * long) + (-1836,08 * DPV)$$

A regressão múltipla com as variáveis independentes, tendo a produtividade como variável dependente, mostrou alta significância para a latitude e DPV, que foram mais importantes que a altitude e a longitude. O DPV teve um peso significativo uma vez que integra dois fatores fundamentais para a produtividade que são a temperatura e a umidade e que variam no tempo e no espaço. A latitude foi altamente significativa, expressando as produtividades de um conjunto de dados específico, resultado que poderia ser diferente para um conjunto de dados diferente.

Em seguida, a regressão linear múltipla foi avaliada quanto à capacidade de estimar a produtividade para cada local, comparando-se com os dados da produtividade verdadeiramente obtidos. Isto foi feito da seguinte maneira: partindo-se dos dados de produtividade existentes para cada município ou região e para cada safra foram obtidas médias das produtividades para cada local. Essa produtividade média municipal passou a ser uma referência do potencial produtivo do município. Utilizando-se os DPVs calculados para as mesmas safras, utilizou-se a Equação 1 para fazer a estimativa de produtividade dessas safras. Calculou-se então as médias das estimativas. Com isso foi possível comparar a média de produtividade municipal com a média das estimativas geradas pelo modelo. A eficiência do modelo foi feita pela porcentagem de acerto, para mais ou para menos, entre as produtividades obtidas na realidade e aquelas estimadas pelo modelo. Ao final, as eficiências foram divididas em faixas. No Rio Grande do Sul, de 32 locais, 7 deles ficaram numa faixa de acerto entre 80 e 90%, enquanto que os 25 restantes ficaram entre 90 e 100% de acerto. No Paraná, de 28 locais, 9 ficaram na faixa de 80 a 90% enquanto que os outros 18 locais ficaram numa faixa de 90 a 100% de acerto. O Mato Grosso do Sul, por sua vez, teve 15 locais, sendo que 3 deles ficaram na faixa de acerto de 80 a 90% e os demais, entre 90 e 100%. A Figura 1 mostra a importância do DPV, pela tendência de associação entre boas produtividades e baixo DPV.

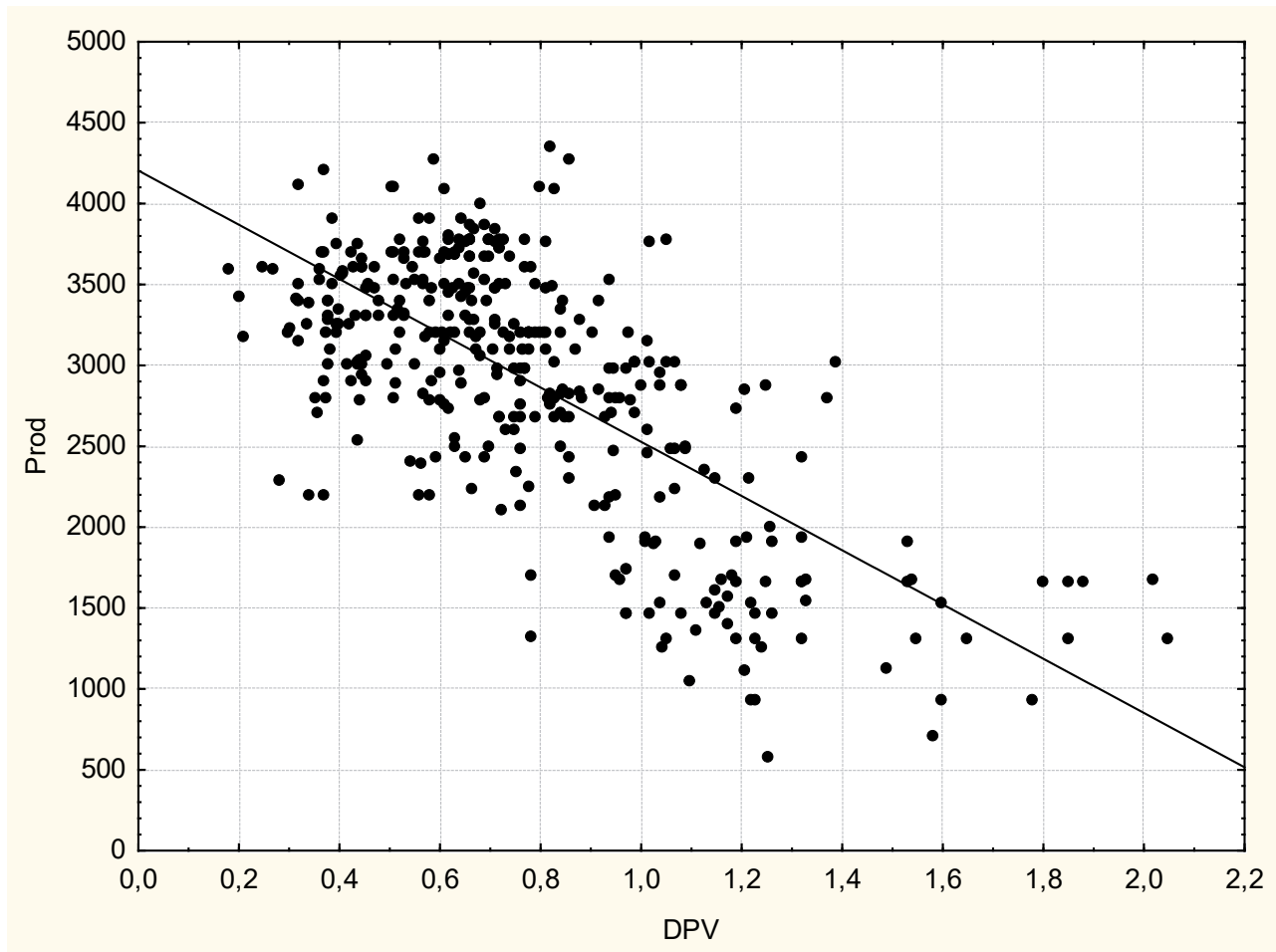


Figura 1. Correlação entre produtividade e DPV nos períodos críticos da soja, obtido com dados de produtividade média municipal, temperatura média e umidade relativa do ar, em 389 safras ocorridas entre 2003 e 2022, nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul.

Sobre a variável latitude, também altamente significativa na equação da Tabela 1, foi possível notar que a maior concentração de altas produtividades médias ocorreram entre as latitudes de 18 e 26 graus, havendo uma concentração menor entre 26 e 32 graus. Porém, isto aconteceu em função especificamente deste conjunto de dados, que apresentou características como menos locais com safras de altas produtividades no norte do Mato Grosso do Sul e, por outro lado, algumas safras com baixas produtividades no sul do Rio Grande do Sul. A significância do DPV, no entanto, foi mais consistente uma vez que foi possível associar baixos DPVs com altas produtividades e vice-versa em todo o conjunto de dados. Tais vieses podem ser considerados normais, uma vez que existe

uma significativa limitação de dados disponíveis simultaneamente de produtividade e de clima, principalmente umidade relativa do ar. A limitação de dados de clima, dados de safras e de locais com informações tanto de clima como de safras, permitiu a criação de uma equação que é uma primeira aproximação. A melhoria deste trabalho poderá vir com a incorporação de novos dados de produtividade, novos dados de clima e de outras safras e locais. A Tabela 2 mostra a produtividade média obtida nas colheitas, a faixa de DPV calculado para elas e produtividade estimada pelo Equação 1, com o uso dos mesmos DPVs obtidos em cada safra. É possível ver as associações de colheitas e de estimativas com o DPV na Tabela 2.

Tabela 2. Produtividades médias municipais obtidas e estimadas em função da faixa de DPV, para 389 safras colhidas no Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul, entre 2003 e 2022.

DPV	Produtividade média observada (kg/ha)	Produtividade média estimada (kg/ha)	Safras (n°)
0,0 a 0,20	3505	3566	2
0,21 a 0,40	3282	3428	39
0,41 a 0,60	3292	3265	78
0,61 a 0,80	3262	3151	120
0,81 a 1,00	2863	2770	64
1,01 a 1,30	1992	2262	61
1,31 a 1,50	1873	1849	10
1,51 a 1,80	1339	1329	10
1,81 a 2,10	1502	778	5

Os resultados da Tabela 2 mostram dados de produtividades médias regionais obtidas nos municípios em cada safra estudada e a produtividade estimada pela Equação 1, para as mesmas safras. Os resultados indicam que, em condições próximas da normalidade, quando a distribuição hídrica e as temperaturas foram favoráveis ao bom desenvolvimento das plantas, o DPV foi baixo, ficando em muitas vezes de 0.8 kPa para baixo. Nessas condições, a produtividade média da soja se manteve acima de 3000 kg/ha. Na ocorrência de anomalias climáticas, que produziram algum déficit hídrico regional, com queda da umidade relativa e aumentos das temperaturas médias em decêndios coincidentes com o período florescimento/enchimento de grãos, o DPV se elevou, definindo uma condição para que fosse formada a faixa de 0,81 até 1,50 kPa, com reflexos na produtividade, que ficou entre 1800 a 2800 kg/ha. Em condições mais extremas ainda, o DPV subiu para patamares superiores a 1,50 kPa, com a produtividade caindo para valores inferiores a 1500 kg/ha. É importante lembrar que o modelo está baseado num grande número de observações expressando condições gerais e médias. Provavelmente por isso, ele mostrou uma eficiência ligeiramente menor em estimar as situações mais extremas. O modelo estima que, em condições muito extremas, deve ocorrer grandes prejuízos, porém a exatidão da estimativa poderá ser mediana. Foi o caso da faixa de DPV entre 1,81 a 2,1 kPa, quando resultou numa queda significativa de produtividade, porém a estimativa foi muito inferior às colheitas obtidas no campo. Isso ocorreu em apenas 5 casos, porém, é importante lembrar que tal deficiência ocorreu em alguns poucos municípios localizados em regiões

de solos mais fracos e com menor fertilidade natural, notadamente arenitos e em regiões de muito baixa altitude. A faixa de DPV entre 1,81 e 2,1 como um todo contemplou safras de anos de secas e portanto, com um número menor de ocorrências que os anos normais. Nessas situações extremas e de alto DPV, provavelmente também ocorram interações de vários fatores ambientais como fertilidade do solo, diferentes tecnologias, diferentes altitudes, que variam de local para local, dificultando a eficiência de um modelo geral. Isso mostra a necessidade de novas aproximações em nível estadual e regional, o que pode ser reforçado pelo fato de que o banco de dados, em função da localização geográfica do estado, do relevo de cada estado e das áreas cultivadas, mostrou que o DPV é importante em todas as regiões. Porém, as variáveis geográficas como latitude, longitude e altitude podem ser mais importantes para um estado do que para outro, o que sugere que equações estaduais podem refletir melhor as condições específicas de diferentes regiões.

Conclusão

O modelo apresentado aqui poderá ser útil no monitoramento, acompanhamento e previsões de safras, pelo seu poder de antecipar perdas e estimar áreas e regiões onde estiver acontecendo problemas de deficiência hídrica em tempo quase que real. Isso auxilia com antecedência a estimativa das perdas e ajuda a enfatizar a importância das boas práticas agrícolas, orientando sobre as melhores estratégias de convivência com as secas e com os veranicos.

Referências

- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 716 p.
- EMATER-RS. **Estimativa da safra de verão 2021-2022**. março, 2022. Disponível em: https://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/safra/safraTabela_08032022.pdf. Acesso em: 2 set. 2022.
- EMATER-RS. **Informativo Conjuntural**, n. 1691, 30 dez. 2021a. Disponível em: https://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/conjuntural/conj_30122021.pdf. Acesso em 2 fev. 2022.
- EMATER-RS. **Safra de verão 2020-2021**: estimativas atuais de produtividade, área e produção. março, 2021b. Disponível em: https://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/safra/safraTabela_25032021.pdf. Acesso em: 15 fev. 2023.
- FAMASUL. **Acompanhamento de Safra - Circular 302/2019**: soja-2018/2019. Boletim Rural, Casa Rural Agricultura, 2019. 27 p. Disponível em: https://portal.sistemafamasul.com.br/sites/default/files/boletimcasapdf/302%20-%20BOLETIM%20SEMANAL%20CASA%20RURAL%20-%20AGRICULTURA%20-%20CIRCULAR%20302_Produtividade%20da%20Soja%20docx.pdf. Acesso em: 2 maio 2023.
- FAMASUL. **Resultados da safra - Circular 454/2022**: safra soja-2021/2022. Boletim Rural, Casa Rural Agricultura, 2022. 41 p. Disponível em: <https://portal.sistemafamasul.com.br/sites/default/files/boletimcasapdf/454%20-%20BOLETIM%20SEMANAL%20CASA%20RURAL%20-%20AGRICULTURA%20-%20CIRCULAR%20454%2026.04.2022.pdf>. Acesso em 2 jun. 2023.
- GONÇALVES, S. L.; OLIVEIRA, M. C. N. de; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R. Mathematical equations representing the impacts of climatic factors on soybean productivity in the 2018/2019 crop season in the Parana State, Brazil. **Agrometeoros**, v. 28, e026748, 2020.
- HECKLER, B. M. M. **Parâmetros ecofisiológicos em vinhedo de “Niágara Rosada” sob cobertura plástica**. 2009. 68 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações meteorológicas**. 2023. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 2 mar. 2023.
- LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P.; SAMPAIO, L. S.; SOUZA, P. Efeito combinado das variáveis meteorológicas sobre a condutância estomática do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 547-553, 2016. DOI: 10.1590/S0102-053620160414.
- OLIVEIRA, G. B. de. **Análise da regionalização do déficit de pressão de vapor em condições semiáridas**. 2016. 38 f. Monografia (Curso de Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Agrícola, Fortaleza.
- PAIVA, A.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 161-169, 2005.
- PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Departamento de Economia Rural (DERAL). **Estimativas de safra**. 2022. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/safras>. Acesso em: 22 mar. 2022.
- PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Departamento de Economia Rural (DERAL). **Estimativas de safra**. 2023. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/safras>. Acesso em 14 fev. 2023
- PERTUSSATTI, C. A. **Veranicos no estado do Mato Grosso**: análise da variabilidade espaço-temporal e modelagem estatística. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF.
- SANTOS, C. M. dos. **Mecanismos fisiológicos e bioquímicos da cana-de-açúcar sob estresses induzidos por deficiência hídrica e paraquat**. 2013. 93 f. Tese (Doutorado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu.
- SCHWIDER, Y. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CORRÊA, V. B.; TOLEDO, J. V.; XAVIER, T. M. T. Efeito do déficit hídrico sobre o crescimento de eucalipto em diferentes condições microclimáticas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 888, 2013.
- SIBALDELLI, R. N. R.; GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B. **Boletim agrometeorológico da Embrapa Soja Londrina, PR - 2021**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 29 p. (Embrapa Soja. Documentos, 445).
- STATSOFT. **Statistica for Windows**: computer program manual. version 7. Tulsa, 2007.
- TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Efeito do déficit de pressão de vapor do ar na modulação da condutância estomática e suas implicações na assimilação fotossintética do carbono em plantas de eucalipto mantidas irrigadas e sob déficit hídrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Efeito das mudanças climáticas na agricultura**: anais. Aracaju: SBA: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. 1 CD-ROM.
- TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift für Geophysik**, v. 6, n. 1, p. 297-309, 1930.

Anexo 1. Coordenadas geográficas e altitude média dos municípios com estação meteorológica do INMET, nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul, cujos dados foram utilizados para cálculos de déficit de pressão de vapor (DPV).

Local	Latitude	Longitude	Altitude municipal (m)	Estado
Alegrete	-29,7	-55,52	120	RS
Bagé	-31,34	-54,01	226	RS
Cambará do Sul	-29,04	-50,14	1017	RS
Canguçu	-31,4	-52,7	447	RS
Capão do Leão	-31,8	-52,4	13	RS
Cruz Alta	-28,6	-53,67	424	RS
Dom Pedrito	-31,0	-54,61	150	RS
Encruzilhada do Sul	-30,54	-52,52	428	RS
Erechim	-27,65	-52,3	777	RS
Frederico Westphalen	-27,39	-53,42	489	RS
Ibirubá	-28,65	-53,11	455	RS
Passo Fundo	-28,22	-52,4	680	RS
Palmeira das Missões	-27,92	-53,31	614	RS
Porto Alegre	-30,05	-51,17	41	RS
Quaraí	-30,36	-56,43	113	RS
Rio Grande	-32,07	-52,16	5	RS
Rio Pardo	-29,87	-52,18	107	RS
São Borja	-28,65	-56,01	81	RS
São Gabriel	-30,34	-54,31	115	RS
São José dos Ausentes	-28,74	-50,05	1228	RS
São Luiz Gonzaga	-28,41	-54,96	245	RS
Santana do Livramento	-30,75	-55,04	196	RS
Santiago	-29,19	-54,88	390	RS
Serafina Correa	-28,7	-51,87	545	RS
Soledade	-28,85	-52,54	660	RS
Santa Maria	-29,72	-53,72	103	RS
Santo Augusto	-27,85	-53,79	489	RS
Teutônia	-29,44	-51,82	81	RS
Torres	-29,35	-49,73	8	RS
Tupanciretã	-29,08	-53,82	462	RS
Uruguaiana	-29,83	-57,08	74	RS
Vacaria	-28,51	-50,88	967	RS
Campina da Lagoa	-24,47	-52,8	598	PR
Campo Mourão	-24,08	-52,38	602	PR
Castro	-24,78	-49,99	994	PR
Cidade Gaúcha	-23,35	-52,93	366	PR
Clevelândia	-26,41	-52,34	966	PR
Colombo	-25,32	-49,15	950	PR
Diamante do Norte	-22,63	-52,89	368	PR
Dois Vizinhos	-25,69	-53,09	549	PR
Foz do Iguaçu	-25,60	-54,48	235	PR
Francisco Beltrão	-26,04	-53,03	571	PR

Anexo 1 - Continuação

General Carneiro	-26,39	-51,35	1009	PR
Goioerê	-24,18	-53,03	481	PR
Icaraíma	-23,39	-53,63	381	PR
Inácio Martins	-25,56	-51,07	1208	PR
Irati	-25,50	-50,63	882	PR
Ivaí	-25,01	-50,85	803	PR
Japira	-23,77	-50,18	693	PR
Joaquim Távora	-23,5	-49,94	513	PR
Laranjeiras do Sul	-25,36	-52,39	835	PR
Londrina	-23,32	-51,14	566	PR
Marechal Cândido Rondon	-24,53	-54,01	392	PR
Maringá	-23,4	-51,93	542	PR
Nova Fátima	-23,41	-50,57	664	PR
Nova Tebas	-24,43	-51,96	656	PR
Paranapoema	-22,65	-52,13	309	PR
Planalto	-25,72	-53,74	399	PR
São Mateus do Sul	-25,83	-50,36	780	PR
Ventania	-24,28	-50,21	1093	PR
Água Clara	-20,44	-52,87	324	MS
Campo Grande	-20,44	-54,72	528	MS
Costa Rica	-18,49	-53,17	727	MS
Coxim	-18,51	-54,73	251	MS
Iguatemi	-23,64	-54,57	319	MS
Itaquiraí	-23,44	-54,18	337	MS
Jardim	-21,47	-56,13	252	MS
Laguna Carapã	-22,57	-55,16	499	MS
Nova Alvorada do Sul	-21,45	-54,34	5	MS
Ponta Porã	-22,55	-55,71	668	MS
Ribas do Rio Pardo	-20,46	-53,76	442	MS
Rio Brillhante	-21,77	-54,52	324	MS
Sidrolândia	-20,98	-54,97	471	MS
Santa Rita do Rio Pardo	-21,3	-52,82	383	MS
Três Lagoas	-20,78	-51,71	328	MS