

Desempenho do milho safrinha em Latossolo sob restrição hídrica: efeitos da adubação nitrogenada e da subsolagem

Alison de Meira Ramos¹, Silas Maciel de Oliveira², Alessandro Lucca Braccini², Laura Alievi Tirelli³, Julio Cesar Franchini⁴, Henrique Debiasi⁴, José Renato Bouças Farias⁴ e Alvadi Antonio Balbinot Junior⁵

Resumo – O milho cultivado como “safrinha” (segunda safra) é frequentemente submetido ao déficit hídrico, condição que potencializa os efeitos negativos da compactação do solo, reduz a eficiência da adubação nitrogenada e, consequentemente, limita a produtividade. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da subsolagem e da adubação nitrogenada de cobertura sobre o desempenho do milho segunda safra submetido ao déficit hídrico. O experimento foi conduzido em Londrina, PR, nas safras 2023 e 2024, em delineamento de blocos casualizados, com parcelas subdivididas. Nas parcelas foram testados dois níveis de adubação nitrogenada em cobertura: ausência de N e aplicação de 80kg ha⁻¹ de N. Nas subparcelas, avaliou-se a ausência ou a presença de subsolagem. Dois anos após a subsolagem, observou-se redução da resistência do solo à penetração, principalmente na camada de 0,15 a 0,30m, em razão da mobilização do solo. Nas duas safras, ocorreu déficit hídrico intenso durante o ciclo da cultura. Não foi verificado efeito da adubação nitrogenada de cobertura sobre a produtividade. Na safra 2023, o tratamento sem subsolagem apresentou maior produtividade do milho (6,2t ha⁻¹), em comparação ao subsolado (5,4t ha⁻¹). Na safra 2024, a subsolagem não influenciou a produtividade do cereal.

Palavras-chave: Resistência do solo à penetração; Produtividade; Componentes do rendimento.

Performance of second-crop corn in Oxisol under water deficit: effects of nitrogen fertilization and subsoiling

Abstract – Corn cultivated as a *second-season crop* (“safrinha”) is often subjected to water-deficit conditions, which exacerbate the negative effects of soil compaction, reduce nitrogen fertilization efficiency, and consequently decrease grain yield. The objective of this study was to evaluate the effects of subsoiling and topdressing nitrogen fertilization on the performance of second-season corn under water deficit. The experiment was carried out in Londrina, Paraná State, Brazil, during the 2023 and 2024 growing seasons, in a randomized complete block design with split plots. In the main plots, two levels of nitrogen topdressing were tested: absence of N and application of 80kg ha⁻¹ of N. In the subplots, the presence or absence of subsoiling was evaluated. Two years after subsoiling, a reduction in soil penetration resistance was observed, mainly in the 0.15–0.30m layer, due to soil loosening. In both growing seasons, severe water deficit occurred during the crop cycle. No effect of nitrogen topdressing on grain yield was detected. In the 2023 season, the treatment without subsoiling showed a higher corn yield (6.2t ha⁻¹) compared to subsoiled plots (5.4t ha⁻¹). In the 2024 season, subsoiling did not affect grain yield.

Keywords: Soil penetration resistance; Grain yield; Yield components.

Introdução

Na safra 2024/2025, estima-se que foram cultivados cerca de 17 milhões de hectares com milho segunda safra no Brasil, com produtividade média de 6,5t

ha⁻¹ (Conab, 2025). Nas últimas duas décadas, a taxa média de crescimento de área cultivada com milho segunda safra no país foi de 770mil ha ano⁻¹. A maioria das áreas de milho segunda safra é cultivada em modelo de sucessão com a

soja, com baixa diversificação de espécies cultivadas (Garbelini *et al.*, 2020), o que contribui para o aumento da compactação do solo, em sistema plantio direto (SPD), especialmente na camada de 0,10-0,20m (Franchini *et al.*, 2012).

Recebido em 29/08/2025. Aceito para publicação em 28/11/2025.

DOI: <https://doi.org/10.52945/rac.v38i3.2220>

Editor - Editor de seção: Luiz Augusto Martins Peruch / Epagri – Luis Cesar Cassol / UTFPR

Engenheiro-agronomo, Universidade Estadual de Maringá (UEM). Departamento de Agronomia, Av. Colombo, 5790, Jd. Universitário, Maringá, PR, CEP 87.020-900. E-mail: ramosalison1998@gmail.com

² Engenheiro-agronomo, Dr., Universidade Estadual de Maringá (UEM). Departamento de Agronomia. E-mail: msoliveira2@uem.br; albraccini@uem.br

³ Engenheira-agronoma, Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc). Centro de Ciências Agroveterinárias, Av. Luiz de Camões, 2090, Conta Dinheiro, Lages, SC, CEP 88520-000. E-mail: laura.alievi@outlook.com

⁴ Engenheiro-agronomo, Dr., Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja), Rodovia Carlos João Strass (acesso Orlando Amaral), s/n, Distrito de Warta, Londrina, PR, CEP 86001-970. E-mail: julio.franchini@embrapa.br; henrique.debiasi@embrapa.br; joserenato.farias@embrapa.br

⁵ Engenheiro-agronomo, Dr., Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Trigo), BR 285, Km 174, Bairro São Cristóvão, CEP 99050-970. E-mail: alvadi.balbinot@embrapa.br



Portanto, a compactação do solo é um dos principais problemas em culturas de grãos, especialmente em períodos de estiagem (Shah *et al.*, 2017).

Uma prática que muitos produtores têm adotado para reduzir os efeitos negativos da compactação é a subsolagem, que reduz significativamente a resistência do solo à penetração (RP) (Guamán *et al.*, 2016). Por outro lado, a subsolagem pode comprometer a estrutura do solo em SPD, reduzindo a capacidade de retenção de água, especialmente quando associada a gradagens para o nivelamento da área (Schick *et al.*, 2000). Isso ocorre devido à mudança da dinâmica da água em um solo menos estável (Kool *et al.*, 2019).

A adubação nitrogenada de cobertura é uma prática que influencia significativamente o desempenho da cultura do milho segunda safra, principalmente na formação dos grãos (Batista *et al.*, 2019). Em tese, a adubação nitrogenada pode conferir ao milho maior crescimento radicular no perfil do solo, atenuando consequentemente o impacto do déficit hídrico (Wang *et al.*, 2019). Em contrapartida, eventuais restrições hídricas, desde o começo do ciclo de desenvolvimento do milho, podem reduzir a absorção e assimilação do N pela cultura, reduzindo a resposta do milho à adubação nitrogenada. Ainda não estão elucidadas as possíveis interações entre a adubação nitrogenada e a subsolagem, nem seu potencial para atenuar os efeitos negativos do déficit hídrico no milho segunda safra.

A hipótese deste trabalho é de que a associação da adubação nitrogenada de cobertura com a subsolagem, em um Latossolo com restrições físicas ao crescimento de raízes, pode atenuar os efeitos do déficit hídrico em milho segunda safra. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da adubação nitrogenada de cobertura e da subsolagem sobre o desempenho produtivo do milho segunda safra submetido ao déficit hídrico.

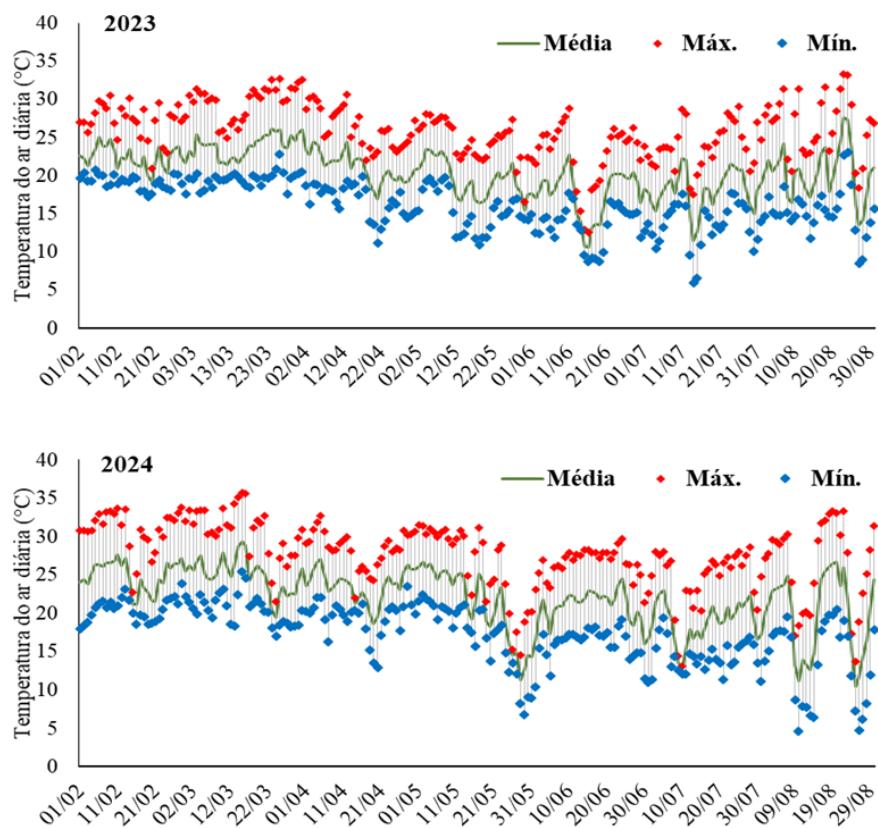


Figura 1. Temperaturas diárias máximas, mínimas e médias do ar durante o período de cultivo do milho segunda safra, em duas safras - Londrina, PR

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figure 1. Daily maximum, minimum, and mean air temperatures during the second-season maize cultivation period in two growing seasons - Londrina, PR

Source: Prepared by the authors (2025)

Material e métodos

O experimento foi conduzido de março de 2023 a março de 2025, em Londrina, Paraná, Brasil ($23^{\circ}11'37"S$, $51^{\circ}11'03"O$ e altitude de 630m). O clima é classificado como Cfa, de acordo com a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013). Os dados de temperatura do ar foram obtidos na estação meteorológica da Embrapa Soja, distante cerca de 800m do experimento e apresentados na Figura 1. O balanço hídrico sequencial durante o período experimental foi estimado por meio de dados meteorológicos e assumindo profundidade efetiva do sistema radicular de 0,5m e capacidade de água disponível de 75mm (Farias *et al.*, 2001), de acordo com o método descrito por Thornthwaite e Mather (1955) (Figura 2).

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos *et al.*, 2018), com textura muito argilosa (710 de argila, 82 de silte e 208g kg⁻¹ de areia). As propriedades químicas do solo na camada de 0,00–0,20m, no início do experimento, eram as seguintes: C (Walkley Black) 17,8g dm⁻³, pH CaCl₂ 5,1, H⁺ + Al³⁺ (SMP) 5,2cmol_c dm⁻³, K (Mehlich-1) 0,85cmol_c dm⁻³, P (Mehlich-1) 36,9mg dm⁻³, Ca²⁺ (KCl) 4,41cmol_c dm⁻³ e Mg²⁺ (KCl) 1,52cmol_c dm⁻³. No momento da implantação do experimento, a densidade média do solo na camada de 0,10–0,20m atingiu 1,33Mg m⁻³, enquanto nas camadas de 0–0,10m e de 0,20–0,30m atingiu 1,28Mg m⁻³. Na camada de 0,10–0,20m a resistência à penetração (RP), com umidade em capacidade de campo, era de 3,5MPa. Estes dados indicam restrições físicas

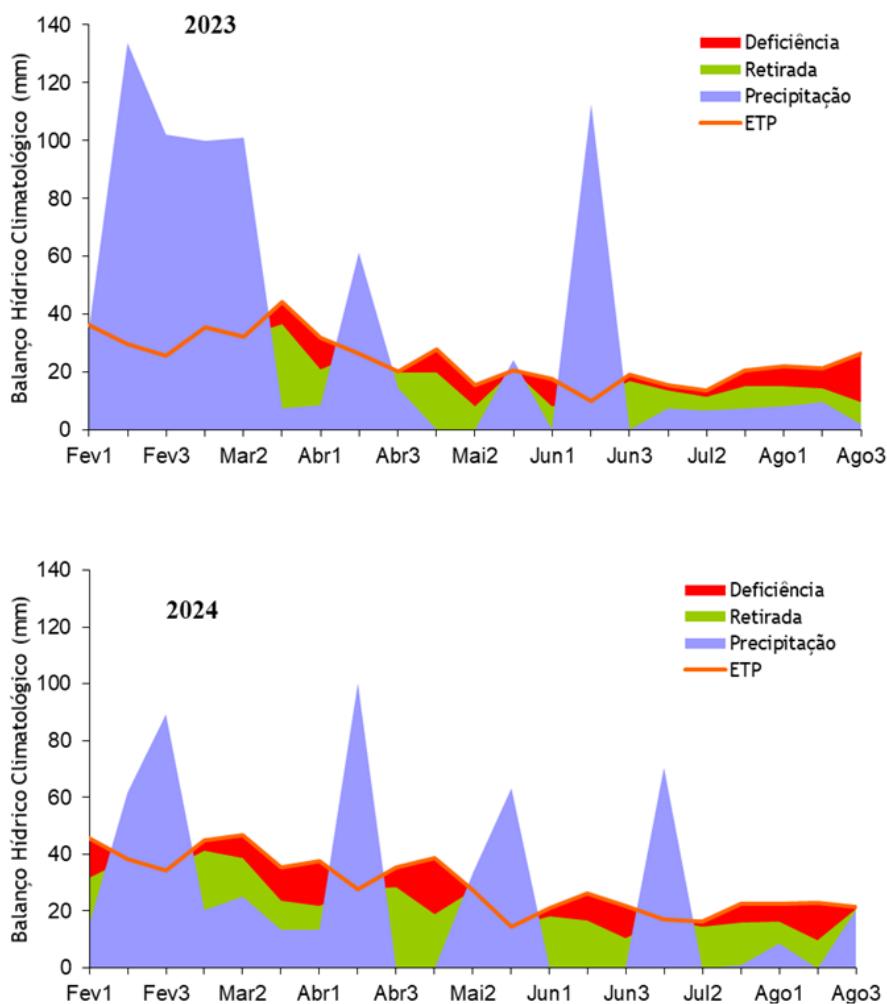


Figura 2. Balanço hídrico climatológico decendial, considerando a capacidade de água disponível de 75mm, durante o período de cultivo do milho segunda safra, em duas safras - Londrina, PR

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figure 2. Ten-day climatological water balance, considering an available water capacity of 75mm, during the second-season maize cultivation period in two growing seasons - Londrina, PR

Source: Prepared by the authors (2025)

relevantes na camada de 0,10-0,20m no momento da subsolagem (Moraes et al., 2014).

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos completos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas. Nas parcelas (5 x 10m) foram testados dois níveis de adubação nitrogenada de cobertura: ausência de N e aplicação de 80kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, aplicada a lanço, quando o milho apresentava cinco folhas expandidas. Nas subparcelas (2,5 x 10m), avaliou-se a ausência e a presença da subsolagem.

Cada subparcela apresentou área útil de 12m² (1,5 x 8m). A subsolagem foi realizada em março de 2023, com solo friável, utilizando-se um subsolador com cinco hastes espaçadas em 0,50m e com profundidade de ação de 0,32m. Após a subsolagem, foram realizadas duas gradagens, a 0,10m de profundidade, para nivelar a área e viabilizar a semeadura do milho.

A semeadura do milho híbrido B2401PWU ocorreu em meados de março, em fileiras espaçadas de 0,45m, com 55.000 plantas ha⁻¹. A fertilização

na semeadura foi de 24kg ha⁻¹ de N, 84kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 48kg ha⁻¹ de K₂O, buscando atingir a produtividade de 8t ha⁻¹, (Pauletti; Motta, 2019). Nas duas safras, o milho foi colhido em agosto. Após 2 anos da subsolagem, foi realizada a avaliação de RP, com umidade gravimétrica média do solo de 31,2%, utilizando o penetrômetro Falker Solostar, equipado com cone de 12,5mm de diâmetro e 25mm de comprimento, em cinco pontos por transecta nas entrelinhas da cultura. Para isso, foram realizadas 10 amostragens por parcela, a fim de reduzir o erro amostral da avaliação.

Os dados de variáveis do milho de cada safra foram analisados separadamente. Inicialmente utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resíduos e o teste de Bartlett para avaliar a homogeneidade das variâncias. Ambos indicaram que não havia necessidade de transformação dos dados, uma vez que as premissas da análise de variância (ANOVA) foram atendidas. Em seguida, os dados foram submetidos ao teste F ($p \leq 0,05$) e, quando detectada diferença significativa, as médias foram comparadas. As análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2023).

Resultados e discussão

Nas duas safras de milho, houve déficit hídrico expressivo (Figura 2). Na safra 2024 ocorreu déficit mais intenso no início do ciclo e na fase de enchimento de grãos, comparativamente à safra 2023. Apesar de o cereal ser cultivado no outono/inverno, em vários dias as temperaturas máximas ultrapassaram 30°C (Figura 1), o que acentuou os efeitos negativos da estiagem sobre o crescimento e a produtividade do milho.

Após dois anos da subsolagem, observou-se menor RP no tratamento subsolado, em relação ao não subsolado, principalmente na camada de 0,10-0,30m (Figura 3). No solo não subsolado, a RP chegou a 3,4MPa, enquanto no subsolado a RP máxima foi de 3,1MPa. Por outro lado, na camada de 0,00-

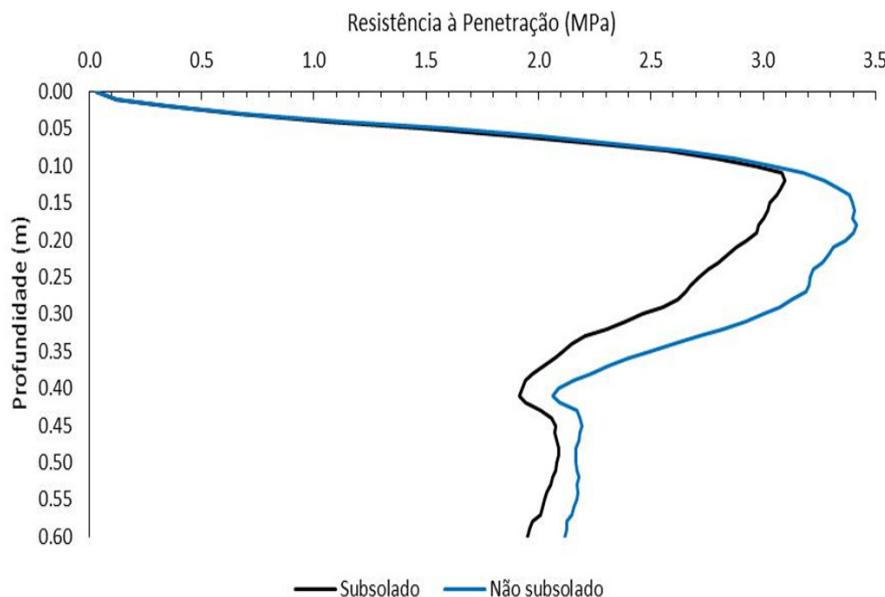


Figura 3. Resistência do solo à penetração avaliada em março de 2025, em solo não subsolado e subsolado em março de 2023 - Londrina, PR

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figure 3. Soil penetration resistance evaluated in March 2025 in non-subsoiled soil and in soil subsoiled in March 2023 - Londrina, PR

Source: Prepared by the authors (2025)



Figura 4. Sintoma de deficiência de fósforo nas folhas do milho segunda safra no tratamento subsolado. Safra 2023 - Londrina, PR

Foto: Alvadi Antonio Balbinot Junior

Figure 4. Phosphorus deficiency symptoms in second-season maize leaves in the subsoiled treatment. 2023 growing season - Londrina, PR

Photo: Alvadi Antonio Balbinot Junior

0,10m não foram observados efeitos da subsolagem na RP, demonstrando que ocorreu processo de reagregação do solo, retornando ao estado anterior à subsolagem. Na camada superficial, a RP máxima foi próxima de 3,0MPa.

A subsolagem apresenta efeito temporário, pois o solo tende a recuperar o estado de compactação anterior à intervenção mecânica quando submetido a manejos inadequados. Assim, seus benefícios são de curta duração, uma vez que a operação apenas reduz momentaneamente a compactação, sem corrigir as causas que levam à sua reincidência. De acordo com Drescher et al. (2016), a persistência da descompactação promovida pela subsolagem pode variar de uma safra até, aproximadamente, 24 meses, dependendo das condições edafoclimáticas e do manejo adotado. Esse efeito de curta duração é causado principalmente pelo tráfego de máquinas agrícolas e pela carência de raízes e palhada para manter a elevada porosidade do solo (Correa et al., 2019). Portanto, o solo pode recuperar parcialmente suas características estruturais e funcionais após uma perturbação externa, por meio de processos naturais, como os ciclos de umedecimento e seccagem, desde que o manejo adotado favoreça a estabilidade estrutural (Gubiani et al., 2015) e promova a atividade biológica das plantas e da fauna do solo.

A subsolagem é uma prática adequada para a recuperação de solos compactados, no entanto, solos de textura argilosa apresentam uma rápida reconsolidação, pela qual a densidade aumenta e a macroporosidade diminui em um período inferior a dois anos (Nunes et al., 2014). Apesar da reconsolidação após a subsolagem, em cultivos sob SPD com rotação de culturas a compactação não atinge níveis prejudiciais ao crescimento radicular (Sales et al., 2016). Bareta Junior et al. (2022) observaram que a RP de 3,4MPa, em geral, não prejudicou o desempenho do milho em SPD.

Para todas as variáveis avaliadas na cultura do milho, não houve nas duas safras interação entre a subsolagem e a

Tabela 1. Efeito da subsolagem, em março de 2023, sobre variáveis do milho segunda safra, em duas safras. Médias com e sem adubação nitrogenada de cobertura - Londrina, PR
 Table 1. Effect of subsoiling in March 2023 on second-season maize variables in two growing seasons. Means with and without nitrogen topdressing fertilization - Londrina, PR

Variáveis	Subsolagem		C.V. (%)
	sem	com	
Safra 2023			
Altura de plantas (cm)	236 a ¹	231 a	7,4
Altura de inserção da espiga principal (cm)	135 a	131 a	9,9
Número de espigas por planta	1,08 a	1,12 a	5,4
Número de grãos por espiga	399 a	382 a	14,8
Massa de mil grãos (g)	262 a	258 a	5,8
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	6254 a	5426 b	13,3
Safra 2024			
Altura de plantas (cm)	193 a	203 a	8,9
Altura de inserção da espiga principal (cm)	97 a	101 a	10,7
Número de espigas por planta	0,87 a	0,86 a	17,3
Massa de mil grãos (g)	304 a	297 a	4,8
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	4293 a	4153 a	20,2

¹ Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$).

¹ Means followed by the same letters do not differ from each other by the F-test ($p \leq 0,05$).

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

adubação nitrogenada de cobertura. Na safra 2023, na qual o milho foi semeado logo após a subsolagem, a mobilização do solo não influenciou a altura de plantas e de inserção da espiga principal, bem como os componentes de rendimento (Tabela 1). Contudo, observou-se menor produtividade de grãos no tratamento subsolado, em relação ao não subsolado.

Na safra 2023, foram observados sintomas de deficiência de P nas plantas de milho cultivadas nas parcelas subsoladas (Figura 4), mesmo o solo apresentando teor de P enquadrado como muito alto ($36,9 \text{ mg dm}^{-3}$) (Pauletti; Motta, 2019). Por outro lado, nas parcelas não

subsoladas esse sintoma não foi observado. Uma possível explicação para esse fato é que a subsolagem realizada em março de 2023 provocou perda de água presente na camada superficial do solo via evaporação, em função da mobilização do solo e redução da cobertura do solo por palha, acentuando os efeitos do déficit hídrico dos meses de abril e maio (Figura 2). Outro efeito pode ser a menor retenção de água em solos mobilizados, pois o preparo tende a aumentar a macroporosidade e diminuir a microporosidade (Mazurana et al., 2011). No caso do P, por se tratar de um íon fortemente adsorvido ao solo, e tendo a difusão como o seu principal mecanis-

mo de absorção pelas plantas, o déficit hídrico provoca ineficiência na absorção desse íon, ocasionando sintomas de deficiência (Gurgel et al., 2020). Assim, a redução do teor de água no solo pode refletir em uma baixa disponibilidade de P às plantas (Silva, 2021). Portanto, os resultados obtidos na presente pesquisa indicam que o cultivo de milho segunda safra logo após a subsolagem deve ser evitado.

Na safra 2024, não foram observados efeitos da subsolagem sobre a altura de plantas e de inserção da espiga principal, componentes de rendimento e produtividade de grãos (Tabela 1). Neste sentido, a subsolagem não apresentou efeitos favoráveis ao milho nas duas safras avaliadas.

Em ambas as safras, a adubação nitrogenada de cobertura não influenciou a altura de plantas e de inserção de espigas. Houve diferença no número de espigas por planta; contudo, essa variação não resultou em diferenças significativas na produtividade do milho (Tabela 2). Possivelmente, a restrição hídrica comprometeu a absorção do N pelas plantas de milho durante o ciclo de desenvolvimento. Plett et al. (2020) destacam que a deficiência hídrica diminui a atividade da enzima nitrato redutase (NR), ocasionando acúmulo de nitrato nas folhas, reduzindo consequentemente o fluxo deste íon do solo às folhas. Adicionalmente, Glosner et al. (2020) observaram que a disponibilidade de N nas folhas é limitada pelo fechamento estomático em períodos de déficit hídrico.

Conclusões

A adubação nitrogenada de cobertura não influenciou a produtividade e as variáveis de crescimento (altura de plantas e altura de inserção da espiga), embora tenham aumentado o número de espigas por planta na safra de 2023, não refletiram em aumento de produtividade. De modo geral, a adubação nitrogenada de cobertura não alterou o desempenho do milho segunda safra submetido ao déficit hídrico.

Tabela 2. Efeito da adubação nitrogenada de cobertura no milho segunda safra, 80kg ha⁻¹ de N, sobre variáveis do cereal em duas safras. Médias com e sem subsolagem - Londrina, PR

Table 2. Effect of nitrogen topdressing fertilization (80 kg ha⁻¹ N) on second-season maize variables in two growing seasons. Means with and without subsoiling - Londrina, PR

Variáveis	Adubação nitrogenada de cobertura		C.V. (%)
	sem	com	
Safra 2023			
Altura de plantas (cm)	233 a ¹	234 a	4,4
Altura de inserção da espiga principal (cm)	133 a	133 a	7,6
Número de espigas por planta	1,05 b	1,14 a	2,2
Número de grãos por espiga	391 a	389 a	13,0
Massa de mil grãos (g)	254 a	266 a	5,6
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	5688 a	5992 a	16,7
Safra 2024			
Altura de plantas (cm)	200 a	198 a	5,5
Altura de inserção da espiga principal (cm)	98 a	100 a	2,9
Número de espigas por planta	0,85 a	0,88 a	8,4
Massa de mil grãos (g)	299 a	303 a	6,2
Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)	4287 a	4159 a	18,4

¹ Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$).

¹ Means followed by the same letters do not differ from each other according to the F-test ($p \leq 0,05$).

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

A subsolagem associada às gradagens reduziu a produtividade do milho implantado imediatamente após a mobilização do solo e, no segundo ano, não apresentou efeito sobre o desempenho do cereal sob déficit hídrico.

Contribuição dos autores

Alison de Meira Ramos: Conceituação, Investigação, Metodologia, Escrita – primeira redação, Escrita – Revisão, edição e análise formal; **Alvadi Antonio**

Balbinot Junior: Conceituação, Investigação, Metodologia, Escrita – primeira redação, Escrita – Revisão, edição e análise formal; **Alessandro Lucca Braccini:** Conceituação e investigação; **José Renato Farias:** Conceituação e investigação; **Julio Cesar Franchini:** Conceituação; Investigação; **Henrique Debiasi:** Conceituação e investigação. **Laura Alievi Tirelli:** Investigação; **Silas Maciel de Oliveira:** Conceituação e investigação.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses neste trabalho.

Dados de pesquisa

Os dados serão disponibilizados pelos autores por solicitação.

Financiamento

Este trabalho não recebeu financiamento externo para sua realização.

Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BATISTA, K.; GIACOMINI, A. A.; GERDES, L.; MATTOS, W. T de; OTSUK, I. P. A fertilização com nitrogênio melhora a eficiência da produção de grãos e a sustentabilidade do cultivo consorciado de milho fora de época e capim-congo. *Soil Research*, v. 57, n. 4, p. 397-407, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1071/SR19002>.

BARETA JUNIOR, E.; GENÚ, A. M.; RAMPIM, L.; UMBURANAS, R. C.; POTT, C. A. Critical limits of soil physical attributes for corn and black oat in a Xanthic Hapludox. *Revista Ciência Agronômica*, v. 53, 2022. DOI: <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20220003>.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: safra 2024/25, v. 12, n. 1 – janeiro 2025. Brasília, DF: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 27 ago. 2025.

CORREA, J.; POSTMA, J.; WATT, M.; WOJCIECHOWSKI, T. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany*, v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1093/jxb/erz383>.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.;

- DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>.
- FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R. de; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. *Field Crops Research*, v. 137, p. 178-185, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.003>.
- GARBELINI, L. G.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; TELLES, T. S. Profitability of soybean production models with diversified crops in the autumn-winter. *Agronomy Journal*, v. 112, n. 5, p. 4092-4103, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1002/agj2.20308>.
- GUAMÁN, V.; BÅTH, B.; HAGMAN, J.; GUNNARSSON, A.; PERSSON, P. Short time effects of biological and inter-row subsoiling on yield of potatoes grown on a loamy sand, and on soil penetration resistance, root growth and nitrogen uptake. *European Journal of Agronomy*, v. 80, p. 55-65, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.014>.
- GUBIANI, P. I.; VAN LIER, Q. de J.; DRESCHER, M. S.; MEZZOMO, H. C.; VEIGA, C. M. C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 1, p. 100-108, 2015.
- GURGEL, A. L. C.; SANTANA, J. C. S.; THEODORO, G. F.; DIFANTE, G. S.; ALMEIDA, E. M.; ARCANJO, A. H. M.; COSTA, C. M.; COSTA, A. B. G.; FERNANDES, P. B. Compactação do Solo: Efeitos na Nutrição Mineral e Produtividade de Plantas Forrageiras. *Revista Científica Rural*, v. 22, n. 1, p. 13-29, 10 jun. 2020. DOI: <http://doi.org/10.30945/racr22i1.3154>.
- GLOSER, V.; DVORACKOVA, M.; MOTA, D. H.; PETROVIC, B.; GONZALEZ, P.; GEILFUS, C. M. Early Changes in Nitrate Uptake and Assimilation Under Drought in Relation to Transpiration. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 602065, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.602065>.
- KOOL, D.; TONG, B.; TIAN, Z.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; HORTON, R. Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil & Tillage Research*, v. 193, p. 95-100, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.020>.
- MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. *Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1197-1206, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7LQwHbxq6kNHCWBtBt9ZMNJ/>. Acesso em: 01 dez. 2025.
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrustox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014.
- NUNES, M. N.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 7, p. 531-539, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000700005>.
- PLETT, D. C.; RANATHUNGE, K.; MELINO, V. J.; KUYA, N.; UGA, Y.; KRONZUCKER, H. J. The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *Journal of Experimental Botany*, v. 71, n. 15, p. 4452-4468, 25 jul. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1093/jxb/eraa049>.
- R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023.
- SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. *Revista Ciência Agronômica*, v. 47, n. 3, 2016. DOI: <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20160052>.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353 p.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p. 427-436, 2000. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-06832000000200020>.
- SHAH, A. N.; TANVEER, M.; SHAHZAD, B.; YANG, G.; FAHAD, X.; ALI, S.; BUKHARI, M.A.; TUNG, S.A.; HAFEEZ, A.; SOULIYANONH, B. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 11, p. 10056-10067, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>.
- SILVA, P. L. F. da. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: uma revisão bibliográfica. *Meio Ambiente (Brasil)*, v. 3, n. 2, p. 24-33, 2021. DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.5118286>.
- PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. *Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná*. 2. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2019. 289 p.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The water balance*. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).
- WANG, Y.; ZHANG, X.; CHEN, J.; CHEN, A.; WANG, L.; GUO, X.; NIU, Y.; LIU, S.; MI, G.; GAO, Q. Reducing basal nitrogen rate to improve maize seedling growth, water and nitrogen use efficiencies under drought stress by optimizing root morphology and distribution. *Agricultural Water Management*, v. 212, p. 328-337, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.010>