Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

LFG Editora

CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS E DE SOLO E SEUS IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE GRÃOS DE TRIGO

Meteorological and soil conditions and their impacts on the productivity and quality of wheat grains

Condiciones meteorológicas y del suelo y sus impactos en el rendimiento y la calidad del grano de trigo

Diandra Ganascini
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
diandraganascini@hotmail.com

Eriveldo Mercante
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
erivelto.mercante@unioeste.br

Silvia Renata Machado Coelho
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
silvia.coelho@unioeste.br

Antonio Marcos Massao Hachisuca
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
antonio.hashisuca@unioeste.br

Eduardo Godoy de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
eduardo.souza@unioeste.br

Maicon Sérgio Nascimento dos Santos
Universidade Federal de Santa Maria
maiconsergions@gmail.com.br

Bruna de Villa
Universidade Federal de Santa Maria
bruna.devilla.58@hotmail.com

Resumo: As relações entre clima, solo, qualidade de grãos e produtividade constituem uma abordagem complexa, uma vez que as relações são cumulativas e a cada mudança, mesmo que mínima, pode resultar em uma nova resposta. Adequadamente, o propósito desse estudo foi avaliar estas relações em dois anos de cultivo de trigo. O experimento foi realizado em uma propriedade rural de Céu Azul, PR, Brasil, com a amostragem química do solo em 33 pontos aleatórios de 15 hectares, além da coleta de dados de 11 estações meteorológicas distribuídas de acordo com zonas de manejo na respectiva área. Foram avaliadas a produtividade e as características de qualidade dos grãos (teor Spearman. Apropriadamente, observou-se que na primeira safra houve a ocorrência de geadas no fim do estágio de emborrachamento, resultando na queda da qualidade e produtividade do trigo. Ainda, as condições do solo da primeira safra foram inferiores às da segunda, identificando os nutrientes do solo que influenciaram na produtividade de cada uma das safras. Por fim, concluiu-se que a variação climática de um ano para outro é capaz de influenciar na produtividade de plantas de trigo, bem afetar diretamente as condições do solo.

Palavras-chave: Interações ambientais. Qualidade fisiológica do grão. Radiação solar. Temperatura. Potencial produtivo do trigo.

Abstract: The relations between climate, soil, grain quality, and productivity constitute a complex approach since the relationships are cumulative and each change, even if minimal, can result in a new response. Accordingly, the purpose of this study was to evaluate these relations in two years of wheat cultivation. The experiment was performed on a rural property in Céu Azul, PR, Brazil, with soil chemical sampling at 33 random points on 15 hectares, in addition to collecting data from 11 meteorological stations distributed according to management zones in the respective area. Grain yield and quality characteristics (protein content and hectoliter weight) were evaluated, with the data submitted to descriptive analysis and Spearman correlation. Appropriately, it was observed that in the first harvest, there was the occurrence of frosts at the end of the booting stage, resulting in a decrease in wheat quality and productivity. Moreover, the soil conditions of the first harvest were lower than those of the second, identifying the soil nutrients that influenced the productivity of each of the harvests. Finally, it was concluded that the climatic variation from one year to another is capable of influencing the productivity of wheat plants, as well as directly affecting soil conditions.

Keywords: Environment interactions. Physiological grain quality. Solar radiation. Temperature. Wheat productive potential.

Resumen: Las relaciones entre clima, suelo, calidad de los granos y productividad constituyen un enfoque complejo, ya que las relaciones son acumulativas y cada cambio, aunque sea mínimo, puede resultar en una nueva respuesta. En consecuencia, el propósito de este estudio fue evaluar estas relaciones en dos años de cultivo de trigo. El experimento se llevó a cabo en una propiedad rural de Céu Azul, PR, Brasil, con muestreo químico del suelo en 33 puntos aleatorios en 15 hectáreas, además de recolectar datos de 11 estaciones meteorológicas distribuidas según zonas de manejo en el área respectiva. Se evaluaron las características de productividad y calidad de los granos (contenido de proteína y peso hectolítrico), sometiéndose los datos a análisis descriptivo y correlación de Spearman. De manera oportuna, se observó que en la primera cosecha se presentaron heladas al final de la etapa de arranque, lo que resultó en una disminución en la calidad y productividad del trigo. Aún así, las condiciones del suelo de la primera cosecha fueron inferiores a las de la segunda, identificándose los

nutrientes del suelo que influyeron en la productividad de cada una de las cosechas. Finalmente, se concluyó que la variación climática de un año a otro es capaz de influir en la productividad de las plantas de trigo, además de afectar directamente las condiciones del suelo.

Palabras clave: Interacciones ambientales. Calidad fisiológica del grano. Radiación solar. Temperatura. Potencial productivo del trigo.

Submetido em: 31/08/2023
Aceito para publicação em: 21/04/2024
Publicado em: 26/07/2024

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas afetam os cultivos em todo o mundo, principalmente em um cenário de crescente aumento de temperatura (XU *et al*., 2021). Este fenômeno influencia drasticamente os ciclos bioquímicos, a frequência e a intensidade das pragas e doenças das plantas e a performance da microbiota do solo (FÉRET *et al*., 2017; TIAN *et al*., 2022). Rápidas mudanças estão oportunizando surtos de doenças, ataque de insetos, infestações de plantas daninhas em plantações de trigo de todo mundo. Apropriadamente, os defensivos agrícolas tendem a ter menor eficiência por conta das condições climáticas inadequadas, tornando a eliminação desses alvos cada vez mais limitada (BAJWA *et al*., 2020). Assim, verifica-se a importância de estudos que avaliem o efeito do clima na cultura do trigo, com o propósito de tomadas de decisões previas, bem como para a construção de modelos preditivos (DALOZ *et al*., 2021). Ainda, além da temperatura, as variações pluviométricas tem gerado cada vez mais preocupações, pois é a principal causa do déficit hídrico e, geralmente, ocorre em períodos de máxima sensibilidade da cultura, levando à redução de produtividade e ocasionando em uma necessidade de irrigação (TOMAZ *et al*., 2021). Por outro lado, o excesso de chuvas também influencia diretamente a produtividade, inibindo a passagem da radiação solar às plantas, devido à presença de nuvens, o que intensifica o estiolamento das plantas (PRANDO *et al*., 2013).

As condições climáticas aliadas às condições do solo têm desafiado o desenvolvimento sustentável na agricultura, pois é o fator que mais interfere na produção e qualidade dos grãos de trigo (ZHAO *et al*., 2022; CUI *et al*., 2022). Tanto a produtividade, quanto a qualidade dos grãos com enfoque no teor de proteína e peso hectolitro dos grãos são determinadas por fatores climáticos e de condições físicas e químicas do solo. Neste sentido, a composição mineral dos grãos é o fator fundamental que define a qualidade e, por sua vez, se estabelece a partir de níveis adequados de adubação (ESPINDULA *et al*., 2010).

Ainda, temperaturas mais elevadas levam ao declínio do teor de proteína do grão (VOLLMER; MUSSHOFF, 2018). Já as altas incidências de precipitação no final do ciclo podem levar ao decréscimo do peso hectolitro. Contextualmente, em relação às condições de solo, solos mais nutritivos tendem a possibilitar maior qualidade e produtividade das culturas. Esta assertiva deve ser tratada de maneira espacializada, pois podem ser o ponto chave para o

sucesso das lavouras, levando em consideração a interação dos diversos fatores e sua localização, o que torna a tomada de decisão mais eficaz (PIAS *et al*., 2014).

Adequadamente, estudos de caso que tem como propósito a associação entre as condições de clima e solo com produtividade e qualidade dos grãos de trigo ainda se faz necessário, principalmente em função da escassez científica quanto a estudos realizados em talhões para fins comerciais. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi analisar as condições climáticas e de solo em relação à produtividade e qualidade dos grãos de trigo em safras distintas.

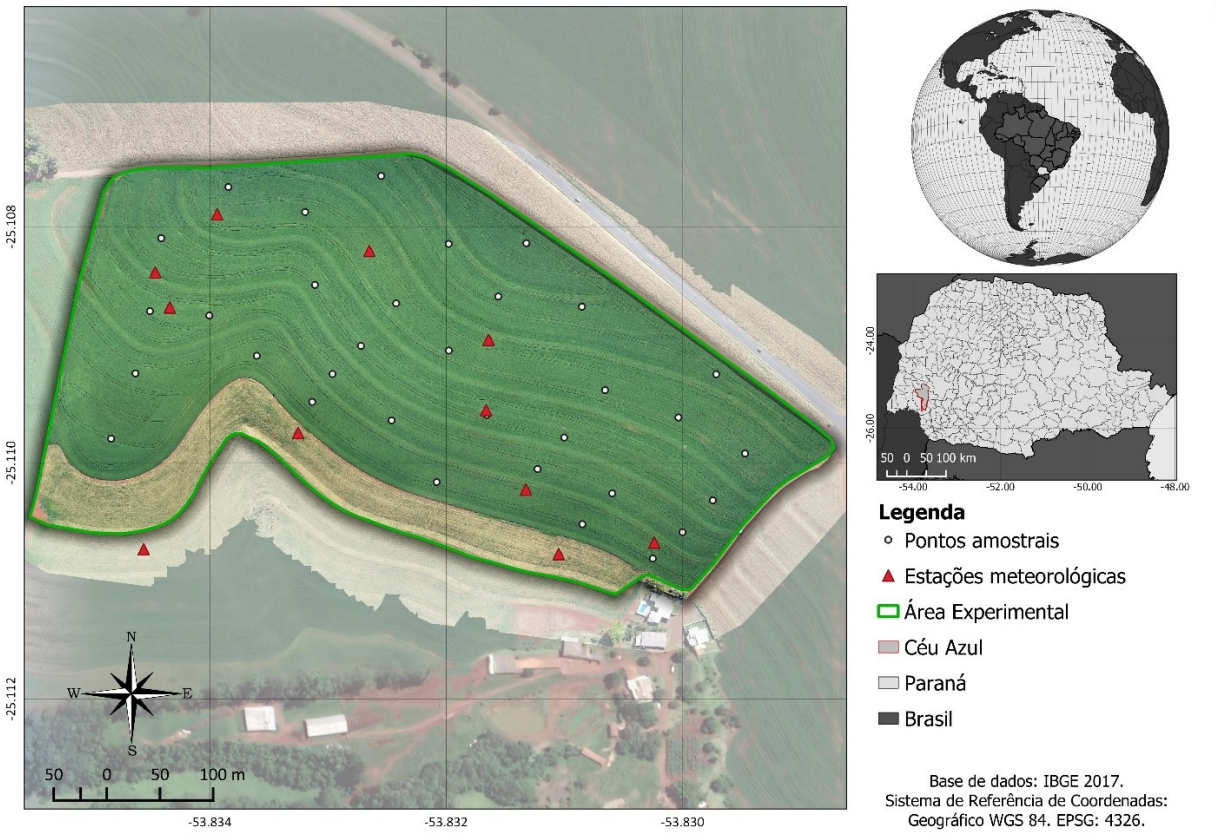
2. METODOLOGIA

2.1. Unidade experimental

O experimento foi realizado em uma propriedade rural localizada no município de Céu Azul, PR, com aproximadamente 15 ha (Figura 1). O solo da região é caracterizado como um latossolo vermelho distrófico (LVdf1) (BHERING *et al*., 2007) com clima subtropical (Cfa) segundo a classificação climática de Köppen (APARECIDO *et al*., 2016).

A composição química do solo foi caracterizada a partir de amostras coletadas em toda a área experimental, em cada um dos pontos amostrais (33 pontos), na profundidade 0 – 20 cm. As médias obtidas foram apresentadas na Tabela 1, conforme A distribuição de pontos de coleta indicados na Figura 1. O sistema de coordenadas em WGS 84 foi utilizado, uma vez que se trata de um *datum* global e internacionalmente adotado.

Figura 1- Localização da área de desenvolvimento deste estudo com a alocação de pontos amostrais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Tabela 1- Composição química do solo da área de estudo, analisada na safra 2019/2020.

Ano	MO	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	V
	g dm^{-3}	($CaCl_2$)	mg dm^{-3}	mmolc dm^{-3}					%
2019	30,3	5,59	7,3	4,6	5,81	2,83	3,33	0	72,92
2020	40,4	5,81	41,16	1,1	7,14	2,87	3,34	0	76,71

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.2. Cultivo de trigo

A primeira safra foi semeada em 03 de maio de 2019. Já a segunda ocorreu em 17 de maio de 2020. O procedimento foi realizado através de conjunto semeadora/adubadora e trator, espaçamento entre linhas de 0,175 m. A cultivar utilizada no experimento foi a TBIO Toruk, com ciclo de 145 dias, porte baixo e classificação trigo pão-melhorador.

As coletas foram realizadas nos 33 pontos estabelecidos e as datas de campanha foram determinadas de acordo com os estágios fenológicos apresentados na Tabela 2. Foram

coletadas seis plantas aleatórias por ponto, acondicionadas em saco plástico na caixa térmica e direcionadas para posterior análises de laboratório.

Tabela 2- Evolução de estágios fenológicos da primeira e segunda safra de trigo (2019/2020).

Estágio fenológico	DAS	T_b (°C)	Início (2019)	Fim (2019)	Início (2020)	Fim (2020)
Plântula (1)	15	4.76	06/05	21/05	17/05	01/06
Perfilhamento (2)	27	0,86	22/05	02/06	02/06	13/06
Alongamento (3)	42	8,44	03/06	17/06	14/06	28/06
Emborrachamento (4)	63	8,00	18/06	08/07	29/06	19/07
Florescimento (5)	70	8,00	09/07	15/07	20/07	26/07
Enchimento dos grãos (6)	89	8,00	16/07	03/08	27/07	14/08
Maturação (7)	125	8,00	04/08	08/09	15/08	19/09

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.3. Estações meteorológicas

No local de estudo, foram instaladas 11 estações meteorológicas de baixo custo, conforme zonas de manejo já delimitadas na propriedade. As estações possibilitaram a aquisição dos dados meteorológicos, tais como: temperatura máxima, mínima e média do ar (°C) (período estabelecido pelo estágio-dia da campanha), temperatura máxima e mínima do solo (°C), radiação solar, umidade do ar (%), precipitação pluvial (mm), número de dias com precipitação pluvial, temperatura do ar mínima absoluta mensal (°C) e pressão atmosférica (hPa). As estações foram desenvolvidas no âmbito do projeto SmartFarm® desenvolvido pelo LabIoT (Laboratório Internet das Coisas), pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), em parceria com o Parque Tecnológico Itaipu e faz parte do AgDataBox, desenvolvido pelo LAMAP (Laboratório de Mecanização e Agricultura de Precisão), do curso de Engenharia Agrícola – Unioeste Cascavel, em parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira.

As estações meteorológicas instaladas nos 11 pontos da propriedade rural tinham como objetivo avaliar as condições de microclima do talhão. Entretanto, observou-se que não houve diferença significativa entre as estações e zonas de manejo, considerando-se, para fins de análise, a média das variáveis coletadas.

2.4. Soma térmica

Para cada estágio fenológico (considerado nas campanhas) Os graus-dia acumulados (GD) serão determinados por meio da Equação 1 (JÚNIOR *et al*., 2004):

(1) $$GD = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_b$$

Onde: GD: total de graus-dia acumulado; T_{max}: temperatura do ar máxima diária (°C); T_{min}: temperatura do ar mínima diária (°C); T_b: temperatura-base (°C); *n*: número de dias do período acumulado.

2.5. Evapotranspiração acumulada

A evapotranspiração acumulada (Equação 2) em cada estágio fenológico de coleta foi determinada a partir da evapotranspiração de referência, calculada através do método de Hargreaves (Equação 3) (HARGREAVES, 1974). O Valor de K_c utilizado nos estágios inicial, intermediário e final foram 0,7, 1,15 e 0,25, respectivamente (ALLEN *et al*., 1998).

(2) $$ET_c = ET_o \times K_c$$

(3) $$ET_o = 0{,}0075 \times Rs(1{,}8T + 32)$$

Onde: ET_c: evapotranspiração acumulada (mm dia^{-1}); K_c: coeficiente da cultura; ET_o: evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Rs: radiação solar na superfície (mm dia^{-1}); T: temperatura média diária (°C).

2.6. Avaliação da produtividade

Para a análise de produtividade, foram coletadas plantas de uma 1 m² de área em cada um dos 33 pontos amostrais (2m de raio). A debulha dos grãos procedeu-se de forma manual (mãos) in loco, e posteriormente levada para o laboratório onde ocorreu a pesagem dos grãos

de 1 m² de cada um dos 33 pontos em balança de precisão 0,01 g. Após, foi determinado o teor de água inicial, corrigindo os valores para um teor de água de 13% (VESOHOSKI *et al*., 2011). O teor de água dos grãos foi determinado pelo método padrão da estufa (BRASIL, 2009).

2.7. Conteúdo de proteína

O método utilizado para determinação do conteúdo de proteína no grão foi o semi micro Kjeldahl. Para a realização da análise, foram pesadas 0,2 g de amostra em balança de precisão 0,001 g. O fator de correção foi utilizado para transformar o teor de nitrogênio em proteína, considerando-se que as proteínas contêm, em média, 16% de nitrogênio, ou seja, 100/16 = 6,25 (valor médio ou universal) (DE SOUZA *et al*., 2016).

2.8. Peso hectolitro

O peso hectolitro (PH) dos grãos foi determinado através de uma balança modelo Dalle Molle. A pesagem foi realizada de acordo com a metodologia descrita nas Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Os resultados das análises foram expressos em kg hL^{-1}.

2.9. Análise estatística

Para a performance estatística deste estudo, foi utilizada a matriz de correlação de Spearman entre as variáveis, sendo consideradas segundo a classificação de Cohen (1998). Para as correlações que apresentaram valores significativos a 5% de significância, foram gerados os modelos lineares das variáveis correspondentes e classificados conforme coeficientes de correlação, de acordo com Cohen (1998).

3. DESENVOLVIMENTO

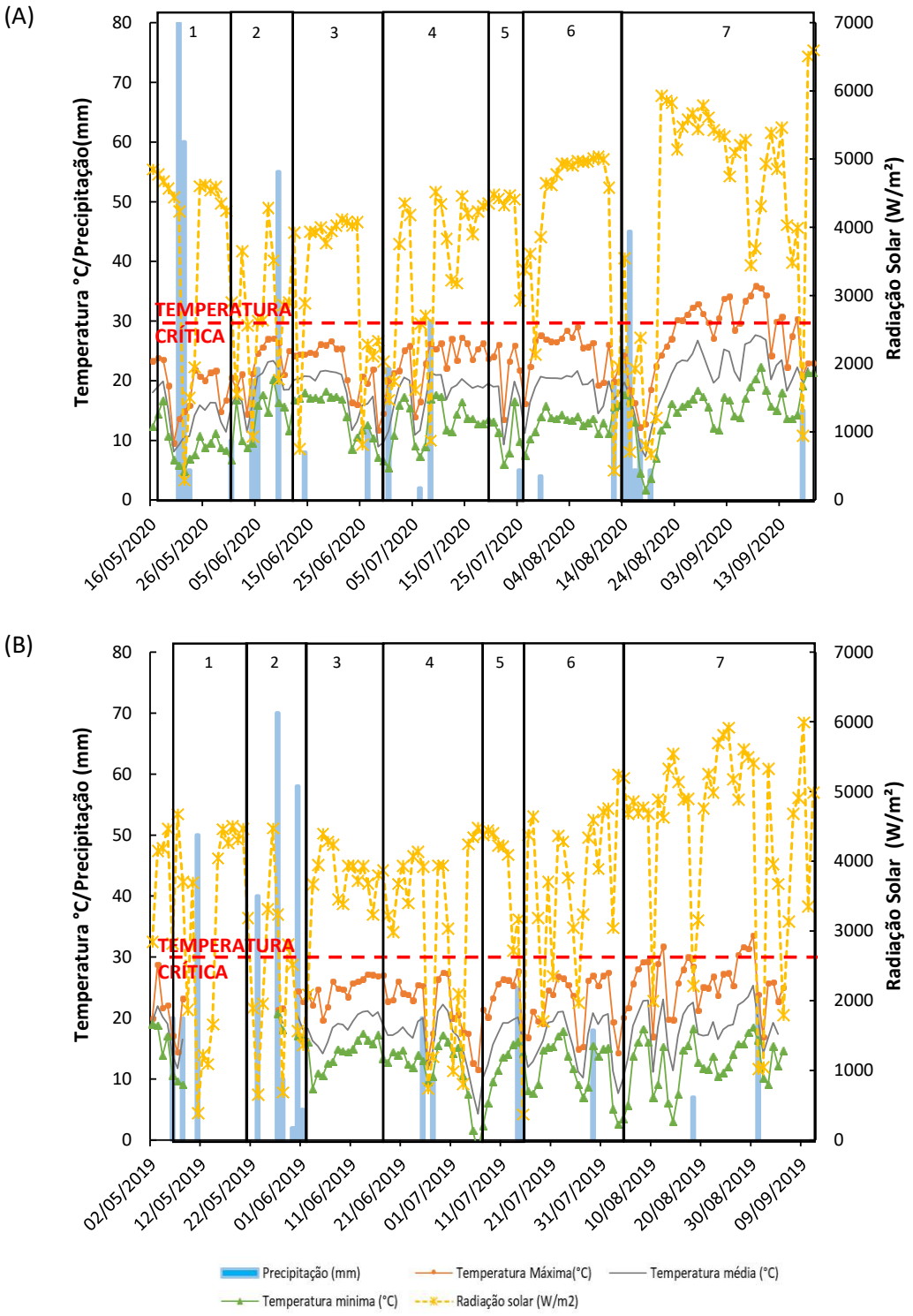
3.1. Dados climáticos

As condições climáticas podem interferir em todo processo produtivo e de qualidade do trigo, pois altas temperaturas (> 30 °C) promovem a redução da taxa fotossintética devido

à queda da taxa respiratória (NARAYANAN, 2018). Ainda, baixas temperaturas podem levar à inibição fotossintética, devido a vários fatores, como a diminuição da eficiência do aparelho fotossintético, restrição do transporte de carboidratos, condutividade estomática limitada, interrupção da cadeia transportadora de eletros e, consequentemente, de produção de energia (HUSSAIN *et al*., 2018). A temperatura máxima ao longo do ciclo nas duas safras (2020 e 2019) não ultrapassou a temperatura crítica de 30 °C (Figura 3) em nenhum dos estágios fenológicos, com exceção da maturação fisiológica. Entretanto, nesta fase, todo o processo de fotossíntese já ocorreu e a alta temperatura não traz prejuízos à cultura, pelo contrário, auxilia na redução do teor de água e acelera o processo de maturação. Considerando-se a safra de 2020, no estágio de enchimento de grãos foi possível verificar um aumento de temperatura que chega próximo aos 30 °C no período.

A faixa de temperatura ótima para o trigo é de, aproximadamente, 20 °C (ALTUHAISH *et al*., 2014). As baixas temperaturas também podem ser prejudiciais ao desenvolvimento da cultura, principalmente no período vegetativo, uma vez que podem inibir o crescimento das plântulas, além de reduzir o tamanho da folha, o alongamento de pedúnculo e minimizar o número de afilhos férteis. Já no período reprodutivo, os danos são ainda maiores quanto à capacidade produtiva, pois o estresse pelo frio pode levar à infertilidade do pólen, abortamento de flores, atraso de maturação e redução do número de grãos (HASSAN *et al*., 2021). Quanto às temperaturas mínimas, somente na safra 2019 houve ocorrência de valores abaixo de 0 °C, o que caracteriza ocorrência de geada, sobretudo no fim do estágio de emborrachamento e início de florescimento, acarretando no decréscimo na produtividade e qualidade dos grãos (Figura 2).

Figura 2- Condições meteorológicas no período de cultivo de trigo safra 2020 (A) e 2019 (B) nos respectivos estágios fenológicos: plântula (1), coleta 1: perfilhamento (2), alongamento (3), coleta 2: emborrachamento (4), coleta 3: florescimento (5), coleta 4: enchimento de grãos (6) e maturação (7).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Até o estágio fenológico de alongamento, não houve ocorrência de temperaturas acima da crítica em nenhuma das safras, evidenciando a ocorrência de temperaturas

semelhantes, na maioria dos estágios fenológicos. Ainda, observou-se, no entanto, que o GD da safra de 2020 foi maior, o que provavelmente se deve à maior incidência de chuvas na fase de maturação dos grãos (Tabela 3). Esta performance levou a uma permanência maior no campo até a redução do teor de água dos grãos. Ainda, na fase final de desenvolvimento da cultura, houve a incidência de temperaturas mais elevadas, em comparação à safra 2019. Aslam *et al*. (2017) relataram que, com o aumento da temperatura, há um acúmulo mais rápido de GD e encurtamento do ciclo de vida, o que pode levar à redução de produção.

A precipitação acumulada em cada um dos estágios fenológicos foi suficiente para suprir a necessidade de água da cultura, pois apresentou valores superiores à evapotranspiração (ETc) acumulada da cultura (Tabela 3). Com exceção do estágio fenológico de maturação, os valores superaram a precipitação acumulada. No estágio de maturação, este comportamento é esperado e desejado, pois, neste estágio, a cultura necessita da perda de água para diminuir o teor de água dos grãos e possibilitar a realização da colheita com qualidade.

Tabela 3- Variáveis meteorológicas nos diferentes estágios fenológicos da cultura do trigo.

Estágio	GD acumulado	Precipitação acumulada	ETc média	ETc Acumulada
		2020		
1	149,91	155,00	2,21	35,46
2	367,72	252,00	1,91	58,41
3	513,18	272,00	2,29	92,87
4	722,49	326,00	2,42	143,73
5	777,96	331,00	5,44	181,82
6	993,98	380,00	8,75	348,08
7	1467,11	460,00	6,22	572,08
		2019		
1	148,53	130,00	1,83	31,21
2	349,35	275,00	1,49	47,68
3	515,53	275,00	2,63	87,13
4	690,88	305,00	4,08	172,94
5	768,25	348,00	6,79	220,51
6	939,91	366,00	7,27	358,73
7	1360,32	396,00	5,83	568,61

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.2. Correlação de dados químicos do solo *vs* produtividade e qualidade de grãos

Além das condições climáticas, outros fatores podem interferir na produtividade e na qualidade dos grãos, como as condições químicas e físicas do solo. Os parâmetros químicos de nutrição de solo, de modo geral, apresentaram valores mais altos para o ano de 2020 em relação à 2019 (Tabela 4), de maneira mais expressiva para matéria orgânica (MO) e fósforo (P). A menor quantidade apresentada desses nutrientes pode ter relação com a menor produtividade na safra 2019.

Tabela 4- Análise descritiva das condições químicas do solo nas safras 2020 e 2019.

	Média	Mínimo	Máximo	DPA	CV (%)
2020					
MO* (g dm^{-3})	37,38	26,80	50,93	6,43	17,19
P (mg dm^{-3})	41,16	17,40	84,92	14,28	34,70
K (cmolc dm^{-3})	1,11	0,51	1,73	0,31	28,47
Cu (mg dm^{-3})	8,38	1,20	13,80	2,20	26,27
Fe (mg dm^{-3})	36,36	26,30	55,80	6,93	19,05
Zn (mg dm^{-3})	7,62	3,20	14,90	2,62	34,44
Mn (mg dm^{-3})	228,68	171,00	267,30	26,77	11,71
pH $CaCl_2$	5,81	5,50	6,00	0,13	2,32
H+Al (cmolc dm^{-3})	3,34	2,74	4,96	0,45	13,58
Ca (cmolc dm^{-3})	7,14	5,00	9,40	0,93	13,02
Mg (cmolc dm^{-3})	2,87	1,70	4,60	0,66	22,89
SB (cmolc dm^{-3})	11,14	7,99	13,74	1,26	11,28
V (%)	76,71	63,58	82,32	4,34	5,66
Produtividade (t ha^{-1})	3,73	2,78	5,31	0,57	15,22
P_{HEC} (kg hL^{-1})	79,83	75,75	83,23	1,91	2,39
Proteína (%)	7,00	5,21	7,93	0,61	8,78
2019					
MO (g dm^{-3})	30,33	22,78	37,53	3,53	11,64
P (mg dm^{-3})	7,30	3,01	19,68	3,72	51,02
K (cmolc dm^{-3})	0,46	0,26	0,96	0,17	36,46
pH $CaCl_2$	5,59	4,80	6,10	0,27	4,91
Al (cmolc dm^{-3})	0,01	0,00	0,19	0,03	547,72
H + Al (cmolc dm^{-3})	3,33	2,54	4,96	0,52	15,47
Ca (cmolc dm^{-3})	5,81	3,90	7,60	0,78	13,49
Mg (cmolc dm^{-3})	2,83	1,70	7,50	1,05	37,03
SB (cmolc dm^{-3})	9,10	5,99	13,44	1,43	15,66
V (%)	72,92	54,70	80,19	5,36	7,35
CTC (cmolc dm^{-3})	12,44	10,86	16,86	1,29	10,37
Produtividade (t ha^{-1})	2,40	1,77	2,82	0,32	13,48
P_{HEC} (kg hL^{-1})	72,62	69,17	76,35	1,98	2,73
Proteína (%)	6,16	2,55	7,56	1,27	20,66

*Matéria orgânica (MO); Fósforo(P); Potássio (K); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Zinco (Zn); Manganês (Mn); Acidez da solução do solo (pH $CaCl_2$); H+Al (Acidez potencial); Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Soma de bases (SB); Porcentagem de saturação por base (V); Peso hectolitro (PHEC); Capacidade de troca de cátion (CTC); Desvio Padrão Amostral (DPA); coeficiente de variação (CV).

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os valores observados na safra 2019 apresentaram correlações significativas para todas as variáveis de interesse (Tabela 5). A produtividade obteve correlação alta com manganês (Mn) e média com cálcio (Ca). Já o PHEC obteve correlação média com potássio (K) e zinco (Zn) e alta com Mn. Finalmente, em relação ao teor de proteína, verificou-se correlação média apenas com a variável MO, uma vez que a matéria orgânica possui parte do nitrogênio (N) do solo e a proteína está diretamente relacionada ao teor de N.

Contextualmente, observou-se nos valores correlações significativas na safra 2020 (Tabela 6) apenas para a variável peso hectolitro (PHEC) com H Al (r: 0,36) classificado como correlação média. Para as demais variáveis de interesse, não houve significância nas correlações. Este cenário pode ter ocorrido devido à alta variabilidade nos teores de proteína e produtividade, principalmente em função da ocorrência de geada, comprometendo a qualidade dos grãos e a produtividade.

Tabela 5- Valores de correlação das variáveis solo com produtividade, peso hectolitro (PHEC) e proteína para safra 2019.

	Produtividade	PH	Proteína
MO (g dm^{-3})	-0,12793	-0,01087	0,129082
P (mg dm^{-3})	0,181211	0,278645	-0,00446
K (cmolc dm^{-3})	0,149014	0,159612	-0,00323
pH $CaCl_2$	-0,01795	-0,13855	-0,00191
H + Al (cmolc dm^{-3})	-0,01881	**0,366366**	0,058532
Ca (cmolc dm^{-3})	-0,25578	-0,05585	-0,13351
Mg (cmolc dm^{-3})	0,02853	0,139991	-0,15185
SB (cmolc dm^{-3})	-0,11551	0,127769	-0,21658
V (%)	0,08299	-0,04662	-0,15414
CTC	-0,11814	0,264464	-0,22475
Produtividade (t ha^{-1})	1	**0,523529**	-0,13719
P_{HEC} (kg hL^{-1})	0,523529	1	-0,11293
Proteína (%)	-0,13719	-0,11293	1

*Matéria orgânica (MO); Fósforo(P); Potássio (K); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Zinco (Zn); Manganês (Mn); Acidez da solução do solo (pH $CaCl_2$); H+Al (Acidez potencial); Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Soma de bases (SB); Porcentagem de saturação por base (V); Peso hectolitro (PHEC); Capacidade de troca de cátion (CTC).

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Tabela 6- Valores de correlação das variáveis solo com produtividade, peso hectolitro (PHEC) e proteína para safra 2020.

	Produtividade	**PHEC**	**Proteína**
MO (g dm^{-3})	-0,20189	-0,00067	**-0,34281**
P (mg dm^{-3})	-0,04148	0,083968	0,177737
K (cmolc dm^{-3})	0,040813	**0,410638**	0,069269
Cu (mg dm^{-3})	0,178016	0,129831	-0,08897
Fe (mg dm^{-3})	-0,16168	-0,17054	-0,39878
Zn (mg dm^{-3})	0,234261	**0,338266**	0,051662
Mn (mg dm^{-3})	**0,569519**	**0,533422**	0,139414
pH $CaCl_2$	-0,00892	0,281008	-0,04619
H + Al (cmolc dm^{-3})	0,003643	-0,0694	0,068372
Ca (cmolc dm^{-3})	**0,31594**	0,255299	0,0734
Mg (cmolc dm^{-3})	-0,27749	-0,12777	-0,14004
SB (cmolc dm^{-3})	0,085736	0,207738	-0,05214
V (%)	0,044452	0,130348	-0,04402
Produtividade (t ha^{-1})	1	**0,323529**	-0,0631
P_{HEC} (kg hL^{-1})	0,323529	1	0,099247
Proteína (%)	-0,0631	0,099247	1

*Matéria orgânica (MO); Fósforo(P); Potássio (K); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Zinco (Zn); Manganês (Mn); Acidez da solução do solo (pH $CaCl_2$); H+Al (Acidez potencial); Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Soma de bases (SB); Porcentagem de saturação por base (V); Peso hectolitro (PHEC); Capacidade de troca de cátion (CTC).

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Adequadamente, o manganês (Mn) faz parte de diversos processos do ciclo de vida de uma planta, como fotossíntese, síntese de clorofila, respiração, defesa de patógenos e sinalização de hormônios. A principal função do Mn no metabolismo vegetal é a quebra da molécula de água no fotossistema II (FSII), que corresponde à primeira etapa da fotossíntese e que se trata da etapa responsável pela respiração da planta, seguida da liberação do elétron para produção de energia (ATP, adenosina-trifosfato) (ALEJANDRO *et al*., 2020). Portanto, a correlação positiva entre as variáveis produtividade e PHEC com o Mn corrobora com a atuação do nutriente na planta, pois se há escassez de Mn, pode ocorrer a redução de fotoassimilados (carboidratos), prejudicando o desenvolvimento da planta, reduzindo crescimento de raiz e parte aérea e, consequentemente, a redução da produtividade da cultura.

Neste sentido, o cálcio (Ca) apresentou correlação positiva com a variável

produtividade, além de ser um nutriente importante na estabilidade da parede celular e da membrana. Além disso, se trata de um importante mensageiro de processos fisiológicos e de desenvolvimento da planta. Na função estrutural, o Ca está presente como pectatos de cálcio que constituem a lamela média, mantendo as paredes unidas, participando da síntese de pectina que proporciona a rigidez da parede celular, e proporciona a possibilidade de divisão celular para formar novas células, além de ser responsável pelo direcionamento do crescimento do tubo polínico (THOR, 2019). Logo, se verificada a deficiência de Ca, possivelmente a planta pode ter dificuldade no desenvolvimento das raízes, pois, com o sistema radicular pouco desenvolvido, há uma significativa redução de absorção de água e nutrientes, causando uma queda na produtividade e deformação do tubo polínico, dificultando a fecundação e, posteriormente, formação do grão.

Também, a correlação positiva de potássio (K) com a variável PHEC ocorre, principalmente, pois o K é responsável por uma diversidade de funções nas plantas, como controle estomático (abertura e fechamento estomático), transporte interno de substâncias e energia, mecanismos de respostas a estresse biótico e abiótico, crescimento das plantas e controle de metabolismos (SARDANS; PEÑUELAS, 2021).

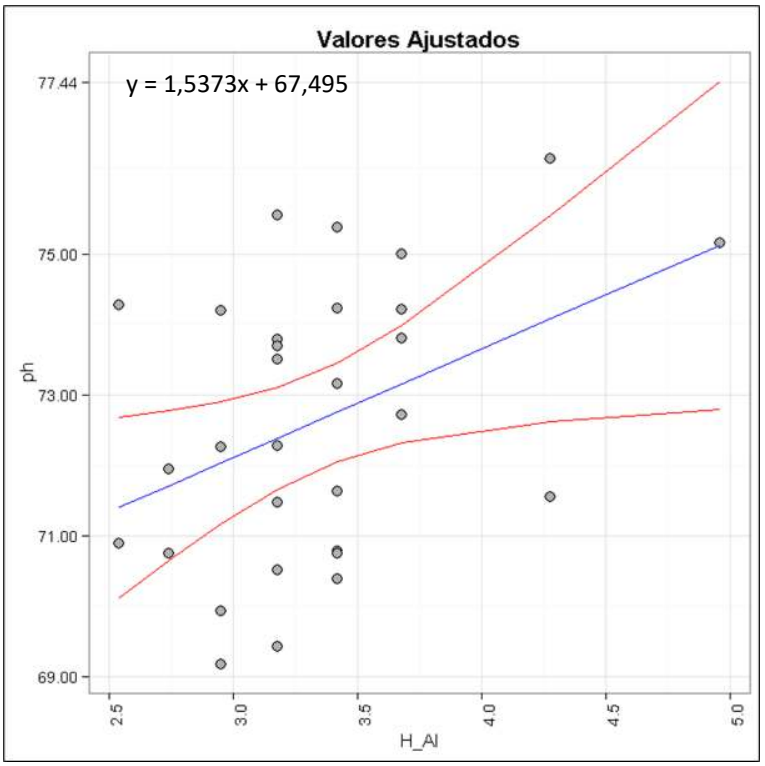
Finalmente, o zinco (Zn) apresentou correlação positiva com a variável PHEC, em função do grande espectro de funções que ele exerce nas plantas. O Zn possui um papel fundamental na regulação do crescimento, ativação enzimática, regulação genética, atividade de fitohormônios e, principalmente, na síntese de proteína, fotossíntese, metabolismo de carboidratos e na formação do grão (SADEGHZADEH, 2013).

Ainda, os sistemas agrícolas de plantio direto têm, por premissa, a palhada na superfície do solo, dando aporte de matéria orgânica. Tais compostos auxiliam na disponibilidade de N no solo (FARZADFAR *et al*., 2021). Também, a MO presente no solo está intimamente relacionada às transformações de N, pois os nutrientes C e N compõem a MO e estão sujeitos à transformação por meio da ação dos microrganismos (KALLENBACH *et al*., 2016). Razões de C:N menores ou iguais a 25:1 possibilitam a mineralização do N no solo, enquanto que, se a concentração de C aumentar muito no solo, os teores de N da MO podem ser imobilizados e, consequentemente, indisponibilizado para o processo de absorção (FARZADFAR *et al*., 2021). Com o aumento do teor de MO em solos sob plantio direto, o uso de N pelas plantas pode ocasionar em graves problemas quanto à resposta da cultura à

fertilização com N (KAPP JUNIOR *et al*., 2016). Assim, a correlação de MO e proteína pode ter ocorrido em função da imobilização do N pelos microrganismos do solo. De acordo com a Tabela 6, este cenário ocorreu, possivelmente, em razão de uma alta concentração de C presente no solo, induzindo a desnitrificação de N e indisponibilizando-o para a absorção das plantas.

O modelo linear de peso hectolitro com H+Al no solo apresentou p-valor de 0,02 mostrando que o H+Al tem influência sobre o PHEC, no entanto o R^2 Ajustado de 0,13, apresentando uma baixa capacidade de estimativa (Figura 3).

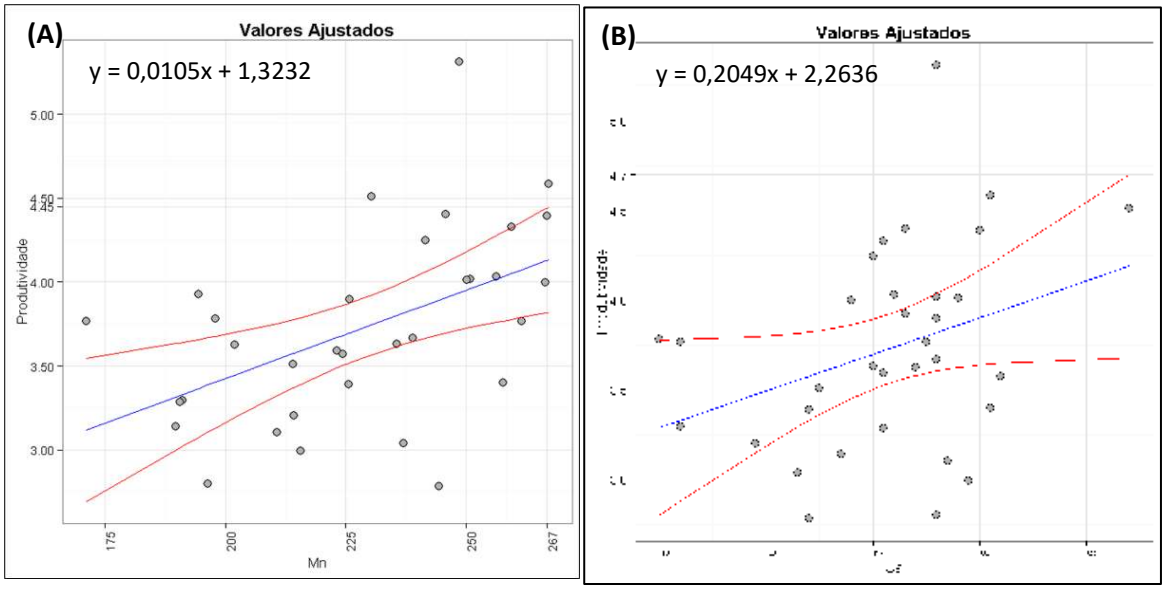
Figura 3- Modelos lineares de peso hectolitro (PHEC) basead o nas características do solo para safra 2019.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Analisando o modelo linear de produtividade (Figura 4 (A)) baseado em manganês (Mn) (p-valor: 0,003), observou-se que o teor de Mn do solo possui influência sobre a variável produtividade para safra 2020. O modelo apresentou R^2 ajustado de 0,22. Já para o modelo linear baseado em cálcio (Ca) (p-valor: 0,05), o valor de R^2 ajustado foi de 0,08 (Figura 4 (B)).

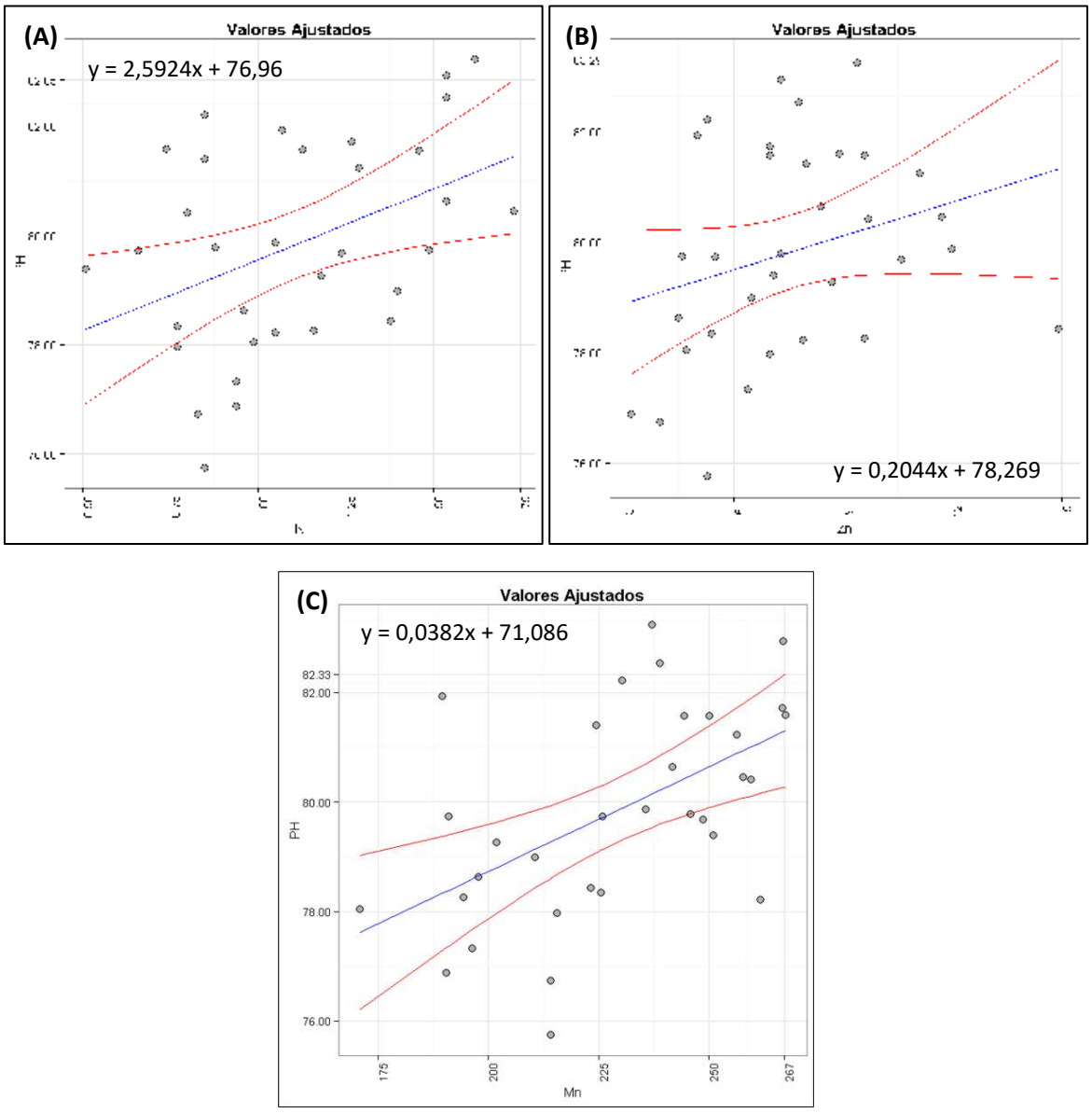
Figura 4- Modelos lineares de peso hectolitro (PHEC) baseado nas características do solo para safra 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Já o modelo de produtividade com potássio (K), apresentou p-valor de 0,01, indicando forte influência do teor de potássio no valor de PH do grão. Entretanto, o valor de R^2 ajustado foi de 0,15 (Figura 5 (A)). Quando o modelo tomou como parâmetro base o nutriente zinco (Zn) (Figura 5 (B)), obteve-se o valor de R^2 ajustado de 0,04, com p-valor de 0,11, indicando que o teor de zinco não possui influência significativa a 5% no parâmetro de produtividade do trigo. Avaliando o modelo linear de produtividade com manganês (Mn), o p-valor obtido é de 0,001 e o R^2 ajustado é de 0,26, reportando que os teores de Mn no solo podem influenciar na produtividade dos grãos.

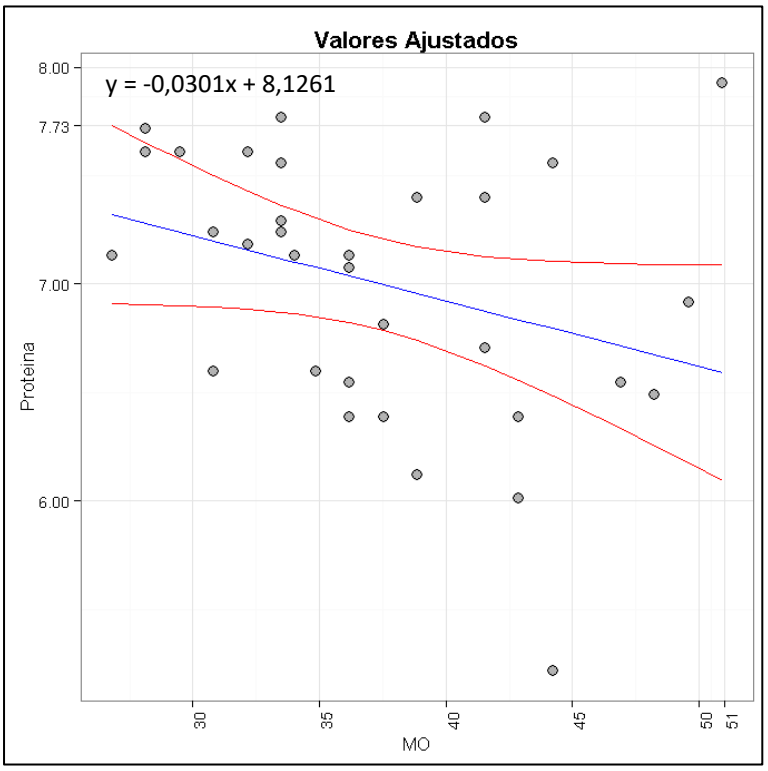
Figura 5- Modelo linear de produtividade com base nas características do solo, potássio (K), zinco (Zn) e manganês (Mn).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

O modelo linear de teor de proteína com a MO (p-valor: 0,07) indicou que a MO não exerceu influência no teor de proteína do grão. O R^2 ajustado deste modelo foi de 0,07 (Figura 6).

Figura 6- Modelo linear de teor de proteína com base nas características do solo e a matéria orgânica (MO).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produtividade e a qualidade do grão de trigo sofrem impactos diretos em função do clima e das características do solo. Entretanto, são fatores cumulativos e que, em situações de lavouras comerciais, tendem a ser mais complexas, se comparadas a ambientes experimentais com condições controladas. Assim, este cenário indica a necessidade de mais estudos científicos em lavouras comerciais, sobretudo com o propósito de investigar essas interações.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Fundação Parque Tecnológico da Itaipu-PTI/ ITAIPU-BR. À Unioeste pelo apoio, estrutura e oportunidade de pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALEJANDRO, Santiago; HÖLLER, Stefanie; MEIER, Bastian; PEITER, Edgar. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in Plant Science**, p. 300, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300. Acesso em: 02 fev. 2024.

ALLEN, Richard; PEREIRA, Luis; RAES, Dirk; SMITH, Martin. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. **FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, 1998. Disponível em: http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm. Acesso em: 18 set. 2023.

ALTUHAISH, Adeel Abdul Karim; MIFTAHUDIN; TRIKOESOEMANINGTYAS; YAHYA, Sudirman. Field adaptation of some introduced wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in two altitudes of tropical agro-ecosystem environment of Indonesia. **HAYATI Journal of Biosciences**, v. 21, n. 1, p. 31–38, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.4308/hjb.21.1.31. Acesso em: 29 mar. 2024.

ASLAM, Muhammad; AHMED, Mukhtar; STÖCKLE, Claudio; HIGGINS, Stewart; HASSAN, Fayyaz Ul; HAYAT, Rifat. Can growing degree days and photoperiod predict spring wheat phenology? **Frontiers in Environmental Science**, p. 57, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00057. Acesso em: 09 mar. 2024.

BAJWA, Ali; FAROOQ, Muhammad; AL-SADI, Abdullah; NAWAZ, Ahmad; JABRAN, Khawar; SIDDIQUE, Kadambot. Impact of climate change on biology and management of wheat pests. **Crop Protection**, v. 137, n. 105304, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105304. Acesso em: 11 mar. 2024.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. 2009. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

CUI, Haixing; LUO, Yongli; CHEN, Jin; JIN, Min; LI, Yong; WANG, Zhenlin. Straw return strategies to improve soil properties and crop productivity in a winter wheat-summer maize cropping system. **European Journal of Agronomy**, v. 133, p. 126436, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126436. Acesso em: 11 fev. 2024.

DALOZ, Anne Sophie; RYDSAA, Johanne; HODNEBROG Øivind; SILLMANN, Jana; VAN OORT, Bob; MOHR, Christian Wilhelm; AGRAWAL, Madhoolika; EMBERSON, Lisa; STORDAL, Frode; ZHANG, Tianyi. Direct and indirect impacts of climate change on wheat yield in the Indo-Gangetic plain in India. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 4, p. 100132, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100132. Acesso em: 21 fev. 2024.

DE SOUZA, Marjorrie Augusto; DETMANN, Edenio; DE FRANCO, Marcia de Oliveira; BATISTA, Erick Darlisson; ROCHA, Gabriel Cipriano; VALADARES FILHO, Sebastião de Campos; SALIBA, Eloísa de Oliveira Simões. Estudo colaborativo para avaliação dos teores de proteína bruta em alimentos utilizando o método de Kjeldhal. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, n. 4, p. 696–709, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1519-99402016000400013. Acesso em: 07 mar. 2024.

ESPINDULA, Marcelo Curitiba; CAMPANHARO, Marcela; ROCHA, Valterely Soares; MONNERAT, Pedro Henrique; FAVARATO, Luiz Fernando. Mineral composition of wheat grains subjected to ammonium sulfate and trinexapac-ethyl rates. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 4, p. 513–520, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1983-40632010000400014. Acesso em: 14 jan. 2024.

FARZADFAR, Soudeh; KNIGHT, Diane; CONGREVES, Kate. Soil organic nitrogen: an overlooked but potentially significant contribution to crop nutrition. **Plant and Soil**, v. 462, n. 1, p. 7–23, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11104-021-04860-w. Acesso em: 11 fev. 2024.

FÉRET, Jean Baptiste; GITELSON, Anatoly; NOBLE, Scott; JACQUEMOUD, Stéphane. PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. **Remote Sensing of Environment**, v. 193, p. 204–215, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.004. Acesso em: 18 fev. 2024.

HARGREAVES, John Harry. Potential evapotranspiration and irrigation requirements for Northeast Brazil. Logan: Utah State University, p. 123, 1974.

HASSAN, Muhammad; XIANG, Chen; FAROOQ, Muhammad; MUHAMMAD, Noor; YAN, Zhang; HUI, Xu; YUANYUAN, Ke; BRUNO, Attiogbe; LELE, Zhang; JINCAI, Li. Cold stress in wheat: plant acclimation responses and management strategies. **Frontiers in Plant Science**, p. 1234, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.676884. Acesso em: 19 fev. 2024.

HUSSAIN, Hafiz; HUSSAIN, Saddam; KHALIQ, Abdul; ASHRAF, Umair; ANJUM, Shakeel; MEN, Shengnan; WANG, Longchang. Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. **Frontiers in Plant Science**, p. 393, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393. Acesso em: 10 mar. 2024.

JÚNIOR, Mario José Pedro; CAMARGO, Marcelo Bento Paes de; MORAES, Adriana Vieira de Camargo; FELÍCIO, João Carlos; CASTRO, Jairo Lopes de. Base-temperature, growing degree-days and crop growth cycle duration of triticale cultivars. **Bragantia**, v. 63, n. 3, p. 447–453, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000300015. Acesso em: 11 abr. 2024.

KALLENBACH, Cynthia; FREY, Serita; GRANDY, Stuart. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. **Nature Communications**, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1038/ncomms13630. Acesso em: 15 fev. 2024.

KAPP JUNIOR, Claudio; GUIMARÃES, Alaine; CAIRES, Eduardo. Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 886–894, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p886-894/2016. Acesso em: 13 jan. 2024.

NARAYANAN, Sruthi. Effects of high temperature stress and traits associated with tolerance in wheat. **Open Access Journal of Science**, v. 2, n. 3, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.15406/oajs.2018.02.00067. Acesso em: 21 fev. 2024.

PIAS, Osmar Henrique de Castro; SANTI, Antônio Luis; CHERUBIN, Maurício Roberto; BERGHETTI, Juliano; OLIVEIRA, Thiago Campos de. Characterization of spatial variability of the relative chlorophyll index in wheat crop. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 4, p. 451–

459, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000400013. Acesso em: 09 mar. 2024.

PRANDO, André Mateus; ZUCARELI, Claudemir; FRONZA, Vanoli; OLIVEIRA, Fábio Álvares de; OLIVEIRA JÚNIOR, Adilson. Productive characteristics of wheat according to nitrogen sources and levels. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 34–41, 2013. Disponível em: https://doi.org/ https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000100009. Acesso em: 04 mar. 2024.

SADEGHZADEH, Behzad. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, n. 4, p. 905–927, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072. Acesso em: 23 fev. 2024.

SARDANS, Jordi; PEÑUELAS, Josep. Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 419, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/plants10020419. Acesso em: 15 mar. 2024.

THOR, Kathrin. Calcium—nutrient and messenger. **Frontiers in Plant Science**, p. 440, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440. Acesso em: 07 abr. 2024.

TIAN, Baoliang; ZHU, Mengke; PEI, Yingchun; RAN, Geyao; SHI, Yu; DING, Jianqing. Climate warming alters the soil microbial association network and role of keystone taxa in determining wheat quality in the field. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 326, p. 107817, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107817. Acesso em: 29 jan. 2024.

TOMAZ, Alexandra; PALMA, José Ferro; RAMOS, Tiago; COSTA, Maria Natividade; ROSA, Elizabete; SANTOS, Marta; BOTETA, Luís; DÔRES, José; PATANITA, Manuel. Yield, technological quality and water footprints of wheat under Mediterranean climate conditions: a field experiment to evaluate the effects of irrigation and nitrogen fertilization strategies. **Agricultural Water Management**, v. 258, p. 107214, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107214. Acesso em: 05 abr. 2024.

VESOHOSKI, Fernando; MARCHIORO, Volmir Sergio; FRANCO, Francisco de Assis; CANTELLE, Alexandro. Components of grain yield in wheat and its direct and indirect effects on productivity. **Revista Ceres**, v. 58, n. 3, p. 337–341, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000300014. Acesso em: 07 abr. 2024.

VOLLMER, Elisabeth; MUßHOFF, Oliver. Average protein content and its variability in winter wheat: a forecast model based on weather parameters. **Earth Interactions**, v. 22, n. 19, p. 1–24, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1175/EI-D-18-0011.1. Acesso em: 07 abr. 2024.

XU, Chengcheng; LU, Chuiyu; SUN, Qingyan. Impact of climate change on irrigation water requirement of wheat growth – a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region in China. **Urban Climate**, v. 39, p. 100971, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100971. Acesso em: 07 abr. 2024.

ZHAO, Jihao; LIU, Zhaoxin; LAI, Huajiang; YANG, Dongqing; LI, Xiangdong. Optimizing residue and tillage management practices to improve soil carbon sequestration in a wheat–peanut rotation system. **Journal of Environmental Management**, v. 306, p. 114468, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114468. Acesso em: 07 abr. 2024.