

ANÁLISE DIALÉLICA EM MILHO TROPICAL PARA RENDIMENTO DE GRÃOS E TEORES DE FERRO E ZINCO NA SEGUNDA SAFRA

PERINI, Luiz Júnior¹
ZEFFA, Douglas Mariani²
SOUZA, Nicholas Vieira de³
MARCOS, Antoni Wallace⁴
LIMA, Romário Fortunato de⁵
CANDIDO, Liliam Silvia⁶
BERTAGNA, Felipe Augusto Bengosi⁷
SCAPIM, Carlos Alberto⁸
GONÇALVES, Leandro Simões Azeredo⁹

RESUMO

Um terço da população mundial é afetada pela deficiência de micronutrientes como ferro (Fe) e zinco (Zn), principalmente em países subdesenvolvidos, onde predomina uma dieta à base de cereais. Nesse sentido, a biofortificação é considerada uma das principais estratégias para o fornecimento de micronutrientes. O presente estudo avaliou os efeitos gênicos e a capacidade de combinação de um conjunto de linhagens de milho tropical para as características rendimento de grãos (RG) e teores de Fe e Zn nos grãos. Foi avaliado um dialelo 10 x 10 de linhagens tropicais provenientes do Programa de Melhoramento de Milho da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Esses híbridos foram avaliados em dois locais na segunda safra, sendo que foram avaliados em Dourados (2018) e Londrina (2018 e 2019) para rendimento de grãos, enquanto para Fe e Zn, as avaliações foram feitas em Dourados (2018) e Londrina (2019). Com base na análise de variância, foi observado efeito significativo em todas as características para as fontes de variação genótipos (G), ambientes (A) e interação G x A, indicando uma ampla variabilidade dos genótipos e ambientes. Pelo desdobramento da análise de variância, efeitos significativos foram encontrados para capacidade geral e específica de combinação, mostrando que efeitos aditivos e não aditivos estão envolvidos no controle genético dessas características, com predomínio dos efeitos não aditivos. Objetivando a seleção simultânea das características RG, Fe e Zn, o híbrido do cruzamento das linhagens L4 e L6 se mostrou o mais promissor, mostrando valores positivos de $\hat{s}ij$ em todos os ambientes avaliados.

PALAVRAS-CHAVE: Zea mays L.. melhoramento de plantas. Micronutrientes. capacidade geral e específica de combinação. biofortificação.

DIALLEL ANALYSIS IN TROPICAL MAIZE FOR GRAIN YIELD AND IRON AND ZINC CONTENTS IN THE SECOND CROP SEASON

ABSTRACT

One third of the world's population is affected by micronutrient deficiencies such as iron (Fe) and zinc (Zn), especially in developing countries, where cereal-based diets predominate. In this context, biofortification is considered one of the main strategies for micronutrient supply. The present study evaluated gene effects and the combining ability of a set of tropical maize inbred lines for grain yield (GY) and Fe and Zn contents in the grains. A 10 × 10 diallel of tropical inbred lines from the Maize Breeding Program of the State University of Maringá (UEM) was evaluated. These hybrids were assessed at two locations during the second crop season: Dourados (2018) and Londrina (2018 and 2019) for grain yield, while Fe and Zn contents were evaluated in Dourados (2018) and Londrina (2019). Based on the analysis of variance, significant effects were observed for all traits in the sources of variation genotypes (G), environments (E), and the G × E interaction, indicating wide variability among genotypes and environments. The partitioning of the analysis of variance revealed significant effects for general and specific combining ability, demonstrating that both additive and non-additive effects are involved in the genetic control of these traits, with a predominance of non-additive effects. Aiming at the

¹ Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário FAG. E-mail: luiz.j.perini@gmail.com

² Dr. em Genética e melhoramento de plantas

³ Doutorando em Genética e melhoramento de plantas

⁴ Mestre em Agronomia

⁵ Engenheiro Agrônomo

⁶ Docente na Universidade Federal da Grande Dourados

⁷ Dr. Em Genética e melhoramento de plantas

⁸ Docente na Universidade Estadual de Maringá

⁹ Docente na Universidade Estadual de Londrina. E-mail: lsagrural1@gmail.com

simultaneous selection of GY, Fe, and Zn, the hybrid derived from the cross between inbred lines L4 and L6 proved to be the most promising, showing positive $\hat{\sigma}_{ij}$ values across all evaluated environments.

KEYWORDS: Zea mays L. Plant breeding. Micronutrients. General and specific combining ability. Biofortification.

1. INTRODUÇÃO

Globalmente, um terço da população é afetado pela deficiência de ferro (Fe) e zinco (Zn), principalmente em países subdesenvolvidos, onde predominam as dietas à base de cereais (Bailey *et al.*, 2015). Esses micronutrientes são essenciais para todos os organismos vivos, atuando como cofatores de várias enzimas que estão envolvidas em inúmeros processos metabólicos. A ingestão inadequada de Fe causa a incapacidade de manter a temperatura corporal, aumenta a mortalidade de gestantes e recém nascidos, diminui a trabalhabilidade e a aptidão física e aumenta a suscetibilidade a doenças infecciosas (Boccio: Iyengar, 2003). Por sua vez, a deficiência de Zn resulta em crescimento retardado, anorexia e hipogeusia em crianças, em problemas de gravidez e várias doenças crônicas em adultos (Brown *et al.*, 2002; Prasad, 2001).

Diversas estratégias têm sido utilizadas para enriquecer a dieta humana com micronutrientes, incluindo a suplementação (por exemplo, na forma de pílulas), fortificação industrial e a biofortificação (Delfini *et al.*, 2020). Dentre essas, a biofortificação é considerada a principal abordagem para o fornecimento de micronutrientes essenciais em populações que têm acesso limitado à diversificação da dieta (Bouis: Saltzman, 2017). A biofortificação consiste em aumentar a concentração de vitaminas e minerais em uma cultura por meio do melhoramento genético ou práticas agronômicas, sendo a biofortificação genética a mais economicamente viável em longo prazo (De Valença *et al.*, 2017).

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal mais cultivado no mundo, exercendo um papel significativo no fornecimento total de calorias em diversos países de baixa e média renda, como países da Ásia, África e América Latina e da região do Caribe (Flint-Garcia, 2017; Palacios-Rojas *et al.*, 2019). Nesse contexto, a biofortificação do milho pode melhorar a saúde e o bem-estar de muitas populações desfavorecidas em todo o mundo (Hindu *et al.*, 2018). Progressos significativos têm sido verificados no desenvolvimento, teste e distribuição de milho biofortificado, especialmente milho com alta qualidade de proteína (QPM) (Tandzi *et al.*, 2017) e milho enriquecido com pró-vitamina A (Pixley, 2013). Para os micronutrientes Fe e Zn, diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de implementar a biofortificação associada ao rendimento de grãos (Gupta *et al.*, 2015; Long *et al.*, 2004; Lung'aho *et al.*, 2011; Mallikarjuna *et al.*, 2015; Messias *et al.*, 2015; Maqbool: Beshir, 2018).

O controle genético para os teores de Fe e Zn nos grãos é complexo, sendo regulado por muitos genes envolvidos em processos de mobilização, captação, translocação e acumulação (Hindu *et al.*, 2018; Jin *et al.*, 2013; Mallikarjuna *et al.*, 2020). Em relação a ação gênica para o acúmulo desses micronutrientes, diversos estudos têm indicado que os efeitos aditivos são mais importantes que os não aditivos (Arnold: Bauman, 1976; Brkić *et al.*, 2003; Long *et al.*, 2004). A determinação desses efeitos é de suma importância para direcionar os programas de melhoramento visando o aumento dos teores de Fe e Zn nos grãos associados ao rendimento de grãos.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos gênicos e a capacidade de combinação de um conjunto de linhagens de milho tropical do Programa de Melhoramento de Milho da Universidade Estadual de Maringá (UEM) para as características rendimento de grãos e teores de Fe e Zn nos grãos.

2. METODOLOGIA

2.1 MATERIAL GENÉTICO

Dez linhagens de milho tropical do Programa de Melhoramento de Milho da Universidade Estadual de Maringá (UEM) foram cruzadas em um dialelo completo, sem recíprocos (Tabela 1).

2.2 CONDIÇÃO EXPERIMENTAL E CARACTERÍSTICAS AVALIADAS

Os 45 híbridos resultantes do dialelo foram avaliados em duas localidades e três ambientes. Ambiente 1: segunda safra de 2018 no município de Dourados – MS; Ambiente 2: segunda safra de 2018 no município de Londrina – PR; Ambiente 3: segunda safra de 2019 no município de Londrina – PR. A seguir é apresentada a descrição edafoclimática para cada localidade: i) Dourados – MS: Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) localizada na Região Centro-Oeste do Estado (coordenadas geográficas: 22°13'15" S e 54°48'21" W), com altitude média de 430 m. O solo é caracterizado como Latossolo vermelho distroférico (LVdf) (Cunhas, 2006), o clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa (clima mesotérmico úmido, verões quentes e invernos secos). ii) Londrina – PR: Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina (UEL) localizada na região Norte do Estado (coordenadas geográficas: 23°20'23"S, 51°12'32"O), com altitude média de 532 m. O solo da área experimental da UEL é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico. Segundo Köppen, o clima é classificado como subtropical úmido mesotérmico Cfa (verões quentes e ocorrência de chuva nos meses mais

secos).

Os dados de precipitação, temperatura máxima e mínima foram obtidos do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IDR-PR para Londrina, na segunda safra de 2018 e 2019 (Figura 1) e da EMBRAPA Agropecuária Oeste para Dourados. As análises químicas dos solos (0-20 cm) foram realizadas anteriormente à instalação dos experimentos, apresentando os seguintes resultados para Londrina 2018, Londrina 2019 e Dourados 2018, respectivamente: pH_{H_2O} = 5,7, 4,9 e 5,4; P = 5,48, 7,03 e 9,4 $mg\ dm^{-3}$; K^+ = 0,3, 0,86 e 2,43 $mg\ dm^{-3}$; Ca^{+2} = 7,63, 5,9 e 5,21 $cmol_c\ dm^{-3}$; Mg^{+2} = 2,5, 1,5 e 2,73 $cmol_c\ dm^{-3}$; CTC = 15,93, 8,37 e 10,38 $cmol_c\ dm^{-3}$. Com base nos resultados da análise química, foi elaborada a taxa de adubação para a semeadura. Adubação de semeadura para o ambiente de Dourados foi de 300 $kg\ ha^{-1}$ do formulado 08-28-16 (24 $kg\ ha^{-1}$ de N, 84 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 e 48 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O). Para a localidade de Londrina, para a segunda safra de 2018 e 2019, aplicou-se 300 $kg\ ha^{-1}$ no sulco de semeadura do formulado 04-30-10. Além da adubação nitrogenada de semeadura, realizou-se duas aduções de N em cobertura (nas fases V3 e V6), totalizando 240 $kg\ de\ N\ ha^{-1}$ disponibilizado para a cultura.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos completos ao acaso, com três repetições e 45 tratamentos. As parcelas foram constituídas por 1 linha de 5 m de comprimento, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e densidade de 3,2 sementes por metro linear. Os experimentos foram implantados manualmente nas duas safras, de acordo com zoneamento agroclimático do MAPA (Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento) para a cultura do milho em segunda safra. As datas de semeadura foram 15/03/2018 em Dourados e 12/03/2018 e 02/03/2019 em Londrina.

Foram semeadas duas sementes por cova com desbaste após a emergência, garantindo uma população final de 71.111 $pl\ ha^{-1}$. A área útil das parcelas foi definida como 4 m centrais das linhas, retirando 0,5 m de cada extremidade. Durante o ciclo da cultura, as plantas foram irrigadas e adubação e práticas de manejo foram realizadas de acordo com as recomendações para a cultura. O manejo de plantas daninhas, pragas e doenças foi feito com base nas recomendações técnicas para o milho.

Para determinação da produtividade de grãos, as espigas localizadas nos 4 m centrais da parcela foram colhidas. A produtividade de grãos foi expressa em $kg\ ha^{-1}$, após correção do teor de umidade para 13%. Para determinação do teor de ferro e zinco nos grãos de milho cultivados em Dourados (2018) e Londrina (2019), duas espigas foram coletadas de cada parcela e acondicionadas em sacos de papel. Estes foram levados para estufa com ventilação forçada a 65 °C até peso constante. Em seguida, as amostras foram moídas e homogeneizadas. A quantificação do teor de Fe e Zn foi baseada em da Silva (2009), por meio de fotometria de chama e espectrofotometria de absorção atômica. O teor de Fe e Zn foram expressos em $mg\ kg^{-1}$ de MS (matéria seca).

2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram submetidos à análise de variância conjunta ($p < 0,05$), conforme o modelo a seguir:

$Y_{ijk} = \mu + G_i + B/A_{jk} + A_j + GA_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, em que: Y_{ijk} : representa o i -ésimo genótipo no j -ésimo ambiente no k -ésimo bloco; μ : é a média geral; G_i : é o efeito do i -ésimo genótipo; B/A_{jk} : corresponde ao efeito de bloco dentro de ambiente, j -ésimo no k -ésimo bloco; A_j : é o efeito do j -ésimo ambiente; GA_{ij} : é o efeito da interação do i -ésimo genótipo com o j -ésimo ambiente; ε_{ijk} : é o efeito do erro experimental.

A homogeneidade das variâncias foi verificada por meio da razão entre o maior e o menor quadrado médio de resíduo (QMR), considerando como sete o valor limite para a validação da análise, conforme descrito em Cruz *et al.* (2006).

Em seguida, procedeu-se as estimativas da capacidade geral (CGC) (Tabela 2) e específica de combinação (CEC) por meio do método IV de análise dialélica proposto por Griffing (1956). A seguir é apresentado o modelo matemático empregado na análise dialélica:

$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + a_k + s_{ij} + (ag)_{ik} + (ag)_{jk} + (as)_{ijk} + \bar{E}_{ijk}$, em que: Y_{ijk} : é média geral observada entre a combinação híbrida da i -ésima e a j -ésima linhagem dentro do k -ésimo ambiente; μ : é a média geral; a : é o efeito do ambiente; g_i : é o efeito da capacidade geral de combinação associada a i -ésima linhagem; g_j : é o efeito da capacidade geral de combinação associada a j -ésima linhagem; s_{ij} : é o efeito da capacidade específica de combinação entre a linhagem i e j ; $(ag)_{ik}$ e $(ag)_{jk}$ é efeito da capacidade geral de combinação das linhagens com o ambiente; $(as)_{ijk}$ é o efeito da capacidade específica de combinação entre as linhagens i e j com o ambiente; e \bar{E}_{ijk} : é o erro experimental médio. As análises estatísticas foram realizadas por meio do programa Genes (Cruz, 2016).

3. ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pela análise de variância, foi observado efeito significativo em todas as características para as fontes de variação genótipos, ambientes e interação genótipos x ambientes, indicando uma ampla variabilidade dos genótipos e dos ambientes avaliados (Tabela 2). O coeficiente de variação foi de 12,85%, 14,78% e 18,61% para rendimento de grãos, teores de Fe e Zn, respectivamente, indicando uma boa qualidade experimental.

Os maiores valores de rendimento de grãos foram verificados para o ambiente Londrina 2019 com a média de 5228,42 kg ha⁻¹, seguido pelos ambientes Londrina 2018 e Dourados 2018 com 4448,49 e 4386,67 kg ha⁻¹, respectivamente. A testemunha comercial (Pionner 30F53 VYH) obteve

as seguintes produtividades 4552,54, 4390,93 e 8113,10 kg ha⁻¹ para os ambientes de Londrina – 2018, Londrina – 2019 e Dourados – 2018, respectivamente. Segundo os dados da CONAB (2020), a produtividade média nos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul para segunda safra foram de 3685 e 4270 kg ha⁻¹ para 2018, respectivamente, e 5040 e 6040 kg ha⁻¹ para 2019, respectivamente. Aguiar *et al.* (2004), avaliando diferentes híbridos experimentais na segunda safra em diferentes estados brasileiros (MT, MS, MG e PR), verificaram valores de produtividade variando de 3675 a 6742 kg ha⁻¹.

Para os teores de Fe e Zn, foram observados valores médios de 25,82 e 31,22 mg kg⁻¹ MS, respectivamente, para o ambiente de Dourados 2018, enquanto para o ambiente de Londrina 2019 foram de 71,00 e 33,08 mg kg⁻¹ MS, respectivamente. Queiroz *et al.* (2011) investigaram 22 linhagens de milho no Brasil e verificaram valores entre 12,2 e 36,6 mg kg⁻¹ para Fe e 17,5 e 42,00 mg kg⁻¹ para Zn. Por sua vez, Maziya-Dixon *et al.* (2000) mediram os teores de Fe e Zn em 120 linhagens na Nigéria e encontraram números variando entre 13,6 e 159 mg kg⁻¹ para ferro e entre 11,6 e 95,6 mg kg⁻¹ para zinco.

Os teores de Fe e Zn apresentaram uma correlação de 0,39 ($p < 0,01$). Diversos pesquisadores têm reportado uma correlação significativa ($r = 0,37$ a $0,52$) entre Fe e Zn em grãos de milho em diferentes ambientes (Baxter *et al.*, 2014; Lung'aho *et al.*, 2011; Mallikarjuna *et al.*, 2015; Qin *et al.*, 2012; Thakur *et al.*, 2015). Essas correlações podem ser influenciadas por diversos fatores ambientais e genéticos e podem ser atribuídas à ligação ou efeitos pleiotrópicos dos genes. Os fatores genéticos incluem vários genes que codificam proteínas transportadoras de metal no milho ou a presença de transportadores comuns para alguns minerais (Aktar *et al.*, 2018; Hindu *et al.*, 2018; Qin *et al.*, 2012). No presente estudo, não foi observada correlação do rendimento de grãos com Fe e Zn. Bänziger e Long (2000) observaram uma ampla variação do coeficiente de correlação entre rendimento de grãos com Fe ($r = -0,60$ a $0,16$) e Zn ($r = -0,44$ a $-0,03$) em 12 ambientes e concluíram que esta relação é amplamente afetada pelas condições ambientais.

Pelo desdobramento da soma de quadrado de genótipos para capacidade geral e específica de combinação, bem como as interações com os ambientes, foram observados efeitos significativos para todas as características, indicando que os efeitos aditivos e não aditivos estão envolvidos no controle genético das características RG, e Fe e Zn nos grãos. No entanto, pela relação da CGC (ϕ_g)/CEC (ϕ_s), foram observados valores inferiores a 1, indicando a predominância dos efeitos não aditivos em relação aos efeitos aditivos. Para teores de Fe e Zn nos grãos a ocorrência de ambos os efeitos (aditivos e não aditivos) têm sido observada em diferentes trabalhos, no entanto, com predomínio dos efeitos aditivos (Arnold: Bauman, 1976; Brkić *et al.*, 2003; Long *et al.*, 2004). No presente trabalho,

o predomínio dos efeitos não aditivos indica a possibilidade da exploração da heterose para essas características.

Pela estimativa de \hat{g}_i (CGC) para RG, as linhagens L6 e L7 apresentaram os maiores valores positivos para o ambiente Londrina - 2018 (948,7 e 978,9 kg ha⁻¹, respectivamente) e Londrina – 2019 (608,5 e 505,8 kg ha⁻¹, respectivamente), enquanto para o ambiente Dourados – 2018, o maior valor foi observado para linhagem L4 (1253,9 kg ha⁻¹), indicando que essas linhagens possuem uma maior frequência de alelos favoráveis para RG (Figura 2). Para os teores de Fe e Zn, os maiores valores positivos de \hat{g}_i foram observados para as linhagens L2 (6,4 e 2,1 mg kg⁻¹, respectivamente) e L9 (8,3 e 2,2 mg kg⁻¹, respectivamente) em Londrina – 2019, enquanto para Dourados foi a linhagem L7 (5,6 e 3,1 mg kg⁻¹, respectivamente).

Para estimativa de \hat{s}_{ij} (CEC) (Tabela 3), as combinações híbridas L4 x L6 e L4 x L7 apresentaram valores positivos para RG para todos os ambientes, indicando híbridos promissores. Esses híbridos obtiveram uma produtividade de 5403 e 5200 kg ha⁻¹, respectivamente, no ambiente Dourados – 2018, 5586,07 e 6651,18 kg ha⁻¹, respectivamente, no ambiente Londrina – 2018 e 6174,54 e 6257,23 kg ha⁻¹, respectivamente, no ambiente Londrina – 2019. Para os teores de Fe e Zn, as combinações que se destacaram foram L2 x L9, L4 x L6 e L6 x L7 para ambiente de Londrina – 2019, enquanto para o ambiente de Dourados – 2018, foi L4 x L6. Esses híbridos obtiveram valores de Fe de 19,81, 30,55 e 35,13 mg kg⁻¹, respectivamente, para o ambiente de Dourados – 2018 e 75,5, 74,08 e 68,31 mg kg⁻¹, respectivamente, para o ambiente de Londrina – 2019. Para o teor de Zn, os valores foram de 28,11, 29,30 e 31,23 mg kg⁻¹, respectivamente, em Dourados – 2018 e 33,03, 30,98 e 24,1 mg kg⁻¹, respectivamente, em Londrina – 2019. Objetivando a seleção simultânea das características RG, e Fe e Zn no grão, o híbrido L4 x L6 se mostrou o mais promissor, mostrando valores positivos de \hat{s}_{ij} em todos os ambientes avaliados. De acordo com Zeffa *et al.* (2024) a introgressão de alelos favoráveis pode ser utilizada para o desenvolvimento de novas cultivares de milho com maior conteúdo nutricional.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma ampla variabilidade foi observada entre os híbridos avaliados para rendimento de grãos e teores de Fe e Zn no grão. Efeitos aditivos e não aditivos estão envolvidos no controle genético dessas características, com predomínio dos efeitos não aditivos. Objetivando a seleção simultânea das características RG e altos teores de Fe e Zn no grão, o híbrido L4 x L6 se mostrou o mais promissor, mostrando valores positivos de \hat{s}_{ij} em todos os ambientes avaliados.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. G. D.; SCAPIM, C. A.; PINTO, R. J. B.; AMARAL JÚNIOR, A. T. D.; SILVÉRIO, L.: ANDRADE, C. A. D. B. Análise dialética de linhagens de milho na safrinha. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1731-1737, 2004

AKHTAR, S.; OSTHOFF, G.; MASHINGAIDZE, K.: LABUSCHAGNE, M. Iron and zinc in maize in the developing world: deficiency, availability, and breeding. **Crop Science**, v. 58, n. 6, 2200-2213, 2018.

ARNOLD, J. M.; BAUMAN, L. F. Inheritance of and interrelationships among maize kernel traits and elemental contents 1. **Crop Science**, v. 16, n. 3, p. 439-440, 1976.

BAILEY, R. L.; WEST JR., K. P.; BLACK, R. E. The epidemiology of global micronutrient deficiencies. **Annals of Nutrition and Metabolism**, v. 66, supl. 2, p. 22–33, 2015.

BÄNZIGER, M.; LONG, J. The potential for increasing the iron and zinc density of maize through plant breeding. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 21, n. 4, p. 397–400, 2000.

BAXTER, I. R. et al. Single-kernel ionomic profiles are highly heritable indicators of genetic and environmental influences on elemental accumulation in maize grain (*Zea mays*). **PLOS One**, v. 9, n. 1, e87628, 2014.

BOCCIO, J. R.; IYENGAR, V. Iron deficiency: causes, consequences, and strategies to overcome this nutritional problem. **Biological Trace Element Research**, v. 94, p. 1–31, 2003.

BOUIS, H. E.; SALTZMAN, A. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global Food Security**, v. 12, p. 49–58, 2017.

BRKIĆ, I. et al. **Combining abilities of corn-belt inbred lines of maize for mineral content in grain**. 2003.

BROWN, K. H. et al. Effect of supplemental zinc on the growth and serum zinc concentrations of prepubertal children: a meta-analysis of randomized controlled trials. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 75, n. 6, p. 1062–1071, 2002.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos 2020**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 11 fev. 2021.

CRUZ, C. D. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2006.

CRUZ, C. D. Programa Genes: ampliado e integrado aos aplicativos R, Matlab e Selegen. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 38, p. 547–552, 2016.

DA SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

DE VALENÇA, A. W. et al. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. **Global Food Security**, v. 12, p. 8–14, 2017.

DELFINI, J. et al. Diversity of nutritional content in seeds of Brazilian common bean germplasm. **PLOS One**, v. 15, n. 9, e0239263, 2020.

FLINT-GARCIA, S. A. Kernel evolution: from teosinte to maize. *In: Maize kernel development*. p. 1–15, 2017.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 9, n. 4, p. 463–493, 1956.

GUPTA, D. S. et al. Rice, wheat and maize biofortification. *In: Sustainable Agriculture Reviews: Cereals*. p. 123–140, 2015.

HINDU, V. et al. Identification and validation of genomic regions influencing kernel zinc and iron in maize. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 131, p. 1443–1457, 2018.

JIN, T. et al. The genetic architecture of zinc and iron content in maize grains as revealed by QTL mapping and meta-analysis. **Breeding Science**, v. 63, n. 3, p. 317–324, 2013.

LONG, J. K.; BÄNZIGER, M.; SMITH, M. E. Diallel analysis of grain iron and zinc density in southern African-adapted maize inbreds. **Crop Science**, v. 44, n. 6, p. 2019–2026, 2004.

LUNG'AHU, M. G. et al. Genetic and physiological analysis of iron biofortification in maize kernels. **PLOS One**, v. 6, n. 6, e20429, 2011.

MALLIKARJUNA, M. G. et al. Stability performance of kernel mineral concentration and grain yield in maize in different agro-climatic zones. **PLOS One**, v. 10, n. 9, e0139067, 2015.

MALLIKARJUNA, M. G. et al. Comparative transcriptome analysis of iron and zinc deficiency in maize (*Zea mays* L.). **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1812, 2020.

MAQBOOL, M. A. et al. Breeding for provitamin A biofortification of maize (*Zea mays* L.). **Plant Breeding**, v. 137, n. 4, p. 451–469, 2018.

MAZIYA-DIXON, B. et al. Genetic variation in total carotene, iron, and zinc contents of maize and cassava genotypes. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 21, n. 4, p. 419–422, 2000.

MESSIAS, R. D. S. et al. Micronutrient and functional compounds biofortification of maize grains. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 1, p. 123–139, 2015.

PALACIOS-ROJAS, N. et al. Mining maize diversity and improving its nutritional aspects within agro-food systems. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 4, p. 1809–1834, 2020.

PIXLEY, K. et al. Biofortification of maize with provitamin A carotenoids. *In: Carotenoids and human health*. p. 271–292, 2013.

PRASAD, A. S. Discovery of human zinc deficiency: impact on human health. **Nutrition**, v. 17, n. 7, p. 685–687, 2001.

QIN, H. et al. Identification of QTL for zinc and iron concentration in maize kernel and cob. **Euphytica**, v. 187, p. 345–358, 2012.

QUEIROZ, V. A. V. et al. Disponibilidade de ferro e zinco em linhagens de milho. **Food Science and Technology**, v. 31, p. 577–583, 2011.

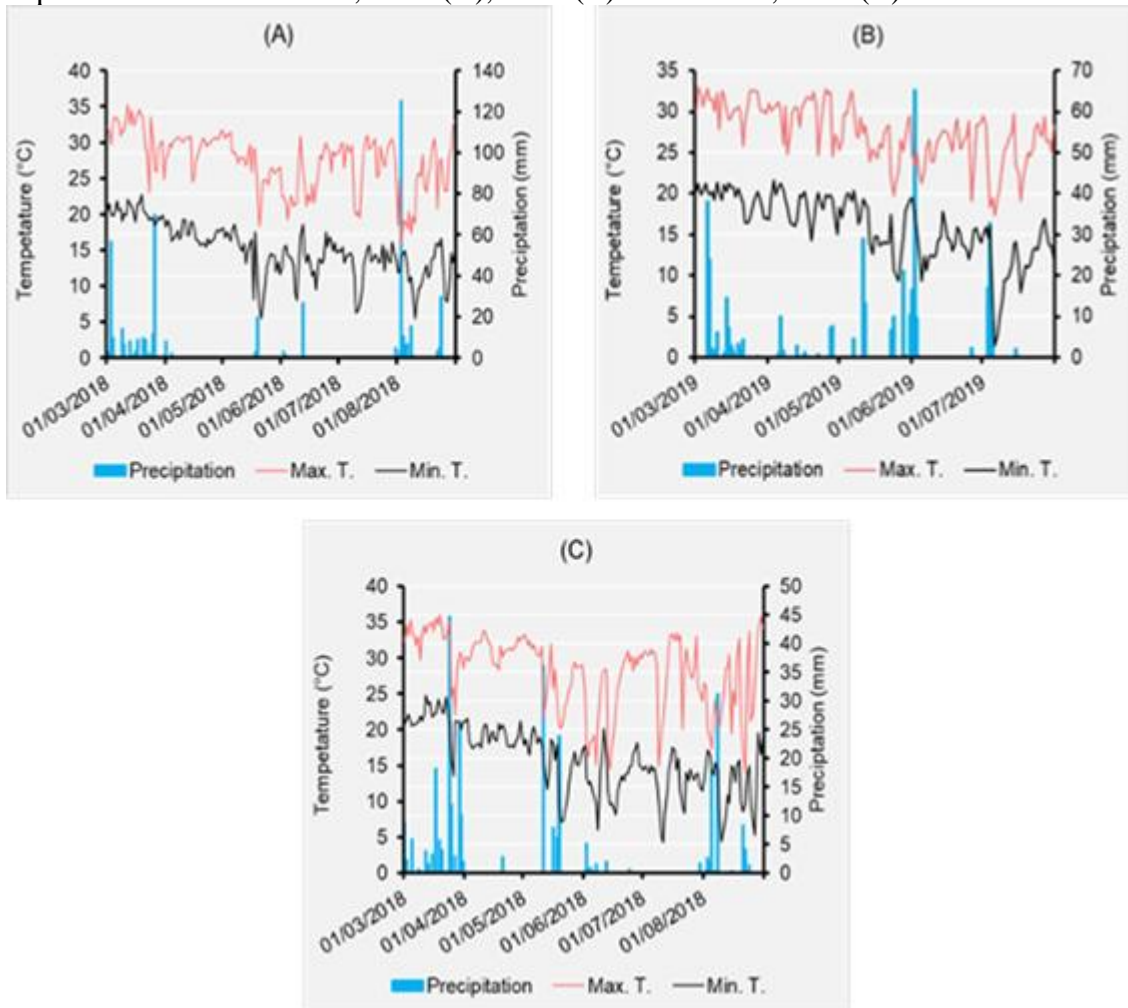
SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

TANDZI, L. N. S. et al. Breeding for quality protein maize (QPM) varieties: a review. **Agronomy**, v. 7, n. 4, p. 80, 2017.

THAKUR, N. et al. Evaluation of elite maize genotypes (*Zea mays* L.) for nutritional traits. **Electronic Journal of Plant Breeding**, v. 6, n. 1, p. 350–354, 2015.

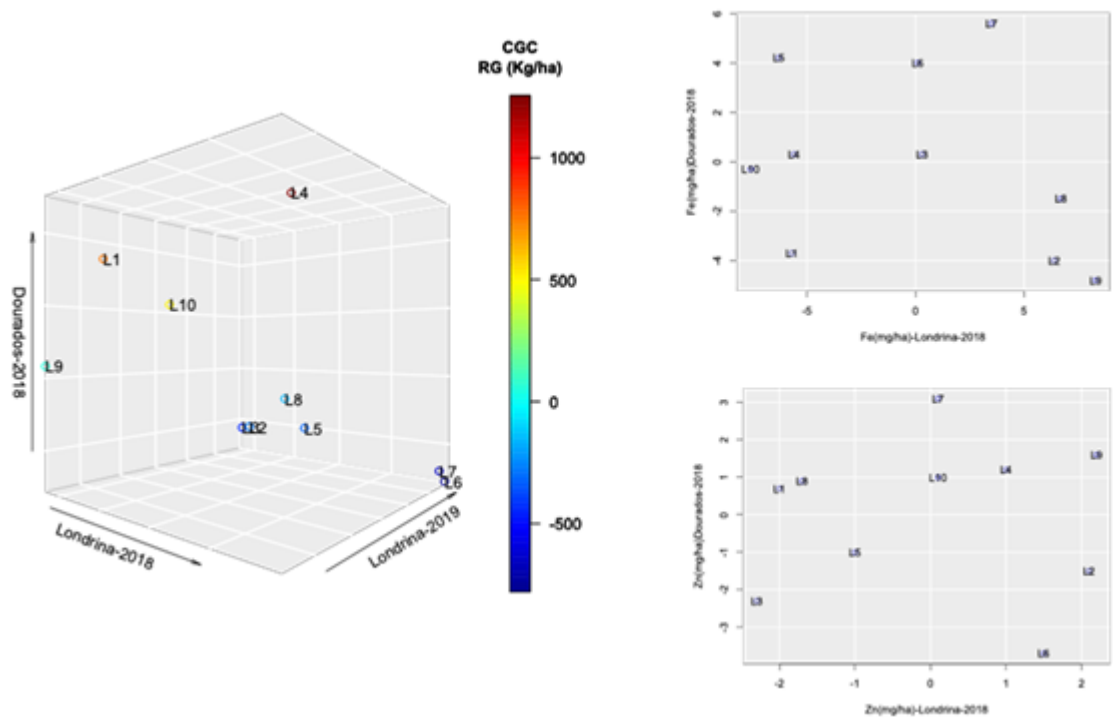
ZEFFA, D. M. et al. Multi-locus genome-wide association study for phosphorus use efficiency in a tropical maize germplasm. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1366173, 2024.

Figura 1 – Dados diários da precipitação e temperatura máxima e mínima durante o período experimental em Londrina, 2018 (A), 2019 (B) e Dourados, 2018 (C).



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 2 – Estimativas da capacidade geral de combinação para rendimento de grãos (RG), e teor de ferro (Fe) e zinco (Zn) no grão em dez linhagens de milho tropical destinadas à produção de grãos em três ambientes.



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 1 – Origem e características dos genitores de milho tropical para produção de grãos utilizados nos cruzamentos dialélicos

Linhagens	Origem	Número	Empresa	GM	Tipo
131-CD303-90H4.3	CD303	1	COODETEC	Não GM	Milho grão
4-AG8080-7H3.1	AG8080	2	Monsanto	Não GM	Milho grão
5-T5-AVANT-14H5.5	Avant	3	Syngenta	Não GM	Milho grão
FORT 84.86.1-239	Fort	4	Syngenta	Não GM	Milho grão
140-POP101-195.2	POP101	5	-	Não GM	Milho grão
146-A2560-63H23.2	A2560	6	Bayer	Não GM	Milho grão
188-DKB350-77-H30.1	DKB350	7	Monsanto	Não GM	Milho grão
122-30F33-70H23.1	P30F33	8	Pioneer	Não GM	Milho grão
AG 9090 58.H21.2-158	AG9090	9	Monsanto	Não GM	Milho grão
30-DKB747-43H17.4	DKB 747	10	Monsanto	Não GM	Milho grão

COODETEC: Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola; GM: Geneticamente modificado.

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 2 – Estimativas do quadrado médio de genótipos, capacidade geral de combinação (CGC), capacidade específica de combinação (CEC) e componentes quadráticos da CGC e CEC para rendimento de grãos (GY), teor de ferro (Fe) e teor de zinco (Zn) avaliados em milho de origem tropical destinado a produção de grãos, no ambiente de safrinha em Londrina e Dourados

Fonte de variação	GL	QM ^{1/}	GL	QM	
		GY kg ha ⁻¹		Fe	Zn
Bloco/Ambiente	6	4970612,73	4	16,96	28,61
Genótipos	(44)	4397894,93**	44	359,27**	102,15**
CGC	9	6371640,77**	9	437,41**	85,36**
CEC	35	3890360,28**	35	339,17**	106,47**
Ambientes	2	24342441,35**	1	137746,59**	234,53**
Genótipos × Ambientes	88	5022047,28**	44	404,73**	61,02**
CGC × Ambientes	18	9710210,89**	9	759,59**	84,63**
CEC × Ambientes	70	3816519,50**	35	313,48**	54,95*
Resíduo	264	376690,56	176	51,25	35,81
Média		4774,85		48,41	32,15
CV (%)		12,85		14,78	18,61
Componentes quadráticos					
$\hat{\Phi}_{ge}$		72799,58		6,97	0,28
$\hat{\Phi}_{se}$		306698,80		39,44	5,80
$\hat{\Phi}_{ge} / \hat{\Phi}_{se}$		0,23		0,17	0,048

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: ^{1/} * e ^{ns} = significativo e não significativo ao nível de 5% de probabilidade de acordo com o teste F; GL= graus de liberdade; CV (%) = média do coeficiente de variação ambiental. ^{2/} GY= kg ha⁻¹; Fe e Zn= mg kg⁻¹.

Tabela 3 – Estimativas da capacidade específica de combinação para rendimento de grãos (RG) e teor de ferro (Fe) e zinco (Zn) em 45 híbridos de milho tropical destinadas à produção de grãos, avaliadas na segunda safra em 3 ambientes (A1: Londrina, 2018; A2: Londrina, 2019; A:3 Dourados, 2018)

Híbridos	Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)			Fe (mg kg ⁻¹)		Zn (mg kg ⁻¹)	
	A1	A2	A3	A1	A3	A1	A3
1x2	-1419,5	-645,4	-923,6	6,8	5,8	-2,1	8,5
1x3	-124,4	-61,2	-262,0	7,3	-5,4	-0,5	1,1
1x4	-323,5	43,3	824,3	4,6	-0,8	-0,3	-1,1
1x5	1860,1	486,7	-807,5	-7,2	7,2	4,4	3,2
1x6	-1028,8	-149,1	1076,7	-1,9	-10,4	-4,5	-2,4
1x7	-848,0	167,7	-9,3	12,3	20,9	4,1	-4,0
1x8	639,8	-40,8	4104,8	-6,4	-17,4	3,6	-5,5
1x9	701,6	-317,1	-127,7	0,4	-1,3	1,3	4,0
1x10	542,6	515,8	-3875,6	-15,9	1,5	-6,1	-3,7
2x3	1212,9	-658,3	611,7	2,5	10,0	-1,3	6,6
2x4	-439,3	-599,8	-874,1	-21,1	-6,2	-0,2	0,5
2x5	-472,6	914,6	4172,2	-2,1	-10,8	4,2	-2,7
2x6	16,5	133,8	-754,7	-11,2	28,8	2,4	0,8
2x7	612,3	-8,4	-515,7	-6,8	-11,4	-3,3	-6,0
2x8	10,0	83,1	-656,6	-8,6	-0,5	-0,5	-2,5
2x9	754,9	36,8	587,9	30,5	-9,1	5,2	-8,1
2x10	-275,1	743,7	-1647,0	10,0	-6,7	-4,4	2,9
3x4	833,9	55,4	-1770,5	-7,7	-5,8	-5,8	-4,0
3x5	693,5	377,8	179,8	-0,9	-3,6	1,7	-1,1
3x6	-149,4	130,1	2806,9	-3,4	-8,0	-1,7	-3,1
3x7	-1292,6	506,8	724,9	3,5	-5,9	-3,5	-3,8
3x8	-147,9	-142,7	217,0	5,3	13,9	-1,1	-3,8
3x9	-784,0	-88,9	-434,5	-8,9	0,4	3,0	0,1
3x10	-242,0	-119,1	-2073,3	2,2	4,4	9,4	8,1
4x5	-430,6	-319,7	-1104,0	15,1	0,2	-2,2	-2,2
4x6	1133,5	377,6	473,2	11,9	10,2	0,7	2,8
4x7	544,3	276,3	440,2	-1,5	-11,3	5,7	6,5
4x8	-410,0	-311,2	-634,7	-6,8	6,9	2,7	-2,4
4x9	-17,1	-286,4	90,8	3,8	1,3	4,1	6,7
4x10	-891,1	764,4	2554,9	1,7	5,6	-4,7	-6,9
5x6	879,1	-115,1	-1356,6	-5,7	-8,1	-2,5	5,5
5x7	-432,1	-818,3	-1002,6	-5,2	6,9	2,3	-1,1
5x8	-920,4	341,2	-1358,5	0,5	-0,2	1,9	1,0
5x9	-329,5	486,9	14,0	-5,6	3,0	-1,7	-2,6
5x10	-847,5	-1354,2	1263,2	11,2	5,5	-8,1	0,0
6x7	-258,0	-334,1	-119,5	19,2	-2,6	10,4	8,0
6x8	137,8	78,4	-595,3	-0,6	2,9	-1,5	4,6
6x9	-313,4	-175,8	-746,8	-8,4	-3,2	-1,9	-5,7
6x10	-417,4	54,1	-783,7	0,2	-9,5	-1,4	-10,4
7x8	535,5	451,2	-1625,3	7,9	0,3	-5,2	-1,6
7x9	263,4	564,9	-368,8	-19,5	0,8	-12,6	-1,5
7x10	875,4	-806,2	2476,3	-10,0	2,3	2,2	3,4
8x9	-687,9	-440,6	-275,7	7,9	2,7	-5,2	5,5

8x10	843,1	-18,7	824,4	0,8	-8,6	5,2	4,9
9x10	412,0	220,1	1260,9	-0,3	5,5	7,9	1,6

Fonte: Dados da pesquisa.