

ENVELHECIMENTO ACELERADO COMO TESTE DE ESTRESSE PARA DISCRIMINAR VIGOR DE LOTES DE SEMENTES DE SORGO

Maria Iza Silva de Castro¹, Lucimara Ribeiro Venial², Paloma Rayane Pinheiro³, Ester Ramos Pancieri⁴, Alek Sandro Dutra⁵

RESUMO:

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é um cereal de grande importância para a alimentação humana e animal, devido à facilidade em se adaptar a condições adversas e ao seu alto valor nutricional. Entre os testes de vigor, o teste de envelhecimento acelerado (EA) é amplamente empregado por simular, em um curto período, a deterioração natural das sementes por meio da exposição a elevada temperatura e umidade relativa. Entretanto, a sensibilidade do teste de envelhecimento acelerado depende da combinação de tempo e temperatura. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar a capacidade discriminatória de testes de vigor convencionais e de estresse, em diferentes combinações de tempo e temperatura, na classificação do potencial fisiológico de lotes de sementes de sorgo. Foram utilizados seis lotes de sementes de sorgo, em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, sobre os quais foram realizados os testes de germinação, primeira contagem de plântulas, teste de emergência e índice de velocidade de emergência, comprimento de plântulas e massa seca, condutividade elétrica, e também o teste de envelhecimento acelerado sob diferentes tempos (24, 48, 72 e 96 horas) e temperaturas (40 °C, 42 °C e 45 °C). Foi observada uma associação positiva entre o teste de emergência e o índice de velocidade de emergência, e uma relação inversa do teste de condutividade elétrica com variáveis de desempenho. Para o EA, a resposta pós-estresse foi condicionada por tempo e temperatura, e condições intermediárias tenderam a apresentar maior concordância com teste de emergência e índice de velocidade de emergência. Os testes de vigor permitiram discriminar o potencial fisiológico dos lotes de sementes de sorgo. O EA mostrou potencial como teste de estresse para ampliar a separação entre lotes, desde que conduzido em condições intermediárias de tempo e temperatura.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*, qualidade fisiológica, qualidade de sementes.

ACCELERATED AGING AS A STRESS TEST TO DISCRIMINATE VIGOR IN SORGHUM SEED LOTS

ABSTRACT:

Sorghum (Sorghum bicolor) is a cereal of great importance for human and animal nutrition due to its adaptability to adverse conditions and high nutritional value. Among vigor tests, the accelerated aging (AA) test is widely used because it simulates natural seed deterioration over a short period through exposure to high temperature and relative humidity. However, the sensitivity of the accelerated aging test depends on the combination of time and temperature. Thus, this study aimed to evaluate and compare the discriminatory capacity of conventional and stress vigor tests—using various time and temperature combinations—in classifying the physiological potential of sorghum seed lots. Six sorghum seed lots were used in a completely randomized design with four replicates. The tests performed included germination, first seedling count, emergence and emergence speed index, seedling length and dry mass, electrical conductivity, and accelerated

¹Mestranda em Agronomia/Fitotecnia pela Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, mariaizasilvadecastro@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3825-9832>. ²Doutora em Agronomia/Fitotecnia pela Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, venialluci@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0851-9340>. ³Doutora em Agronomia/Fitotecnia pela Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, palloma.ana@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0219-1483>. ⁴Graduanda em Agronomia, Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus-ES, pancierier7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-2887-8186>. ⁵Professor Titular do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, alekdutra@ufc.br, <https://orcid.org/0000-0002-4298-383X>.

aging under different durations (24, 48, 72, and 96 hours) and temperatures (40°C, 42°C, and 45°C). A positive association was observed between the emergence test and the emergence speed index, while an inverse relationship was found between the electrical conductivity test and performance variables. Regarding AA, the post-stress response was influenced by time and temperature; intermediate conditions tended to show greater agreement with the emergence test and emergence speed index. The vigor tests successfully discriminated the physiological potential of the sorghum seed lots. The AA test demonstrated potential as a stress test to enhance the differentiation between lots, provided it was conducted under intermediate time and temperature conditions.

Key Words: *Sorghum bicolor*, physiological quality, seed quality.

INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é um cereal de grande importância para a alimentação humana e animal, principalmente em regiões que sofrem com déficit hídrico e altas temperaturas. Isso ocorre devido à facilidade em se adaptar a condições adversas e ao seu alto valor nutricional, com grãos ricos em proteínas, carboidratos, vitaminas e minerais (Tanwar et al., 2023).

Diante dessa relevância nutricional e agrônômica, torna-se igualmente importante assegurar a qualidade fisiológica das sementes empregadas no plantio, uma vez que esta interfere diretamente no estabelecimento inicial das plântulas e na produtividade da cultura, tornando indispensável a utilização de métodos confiáveis para avaliação da qualidade fisiológica (Onoabagbe et al., 2024). Além do teste de germinação, que determina o potencial máximo de produção de plântulas normais em condições ideais, os testes de vigor são utilizados para identificar diferenças fisiológicas entre lotes que não são detectadas pelo teste de germinação (Pooja et al., 2025).

Entre os testes de vigor, o teste de envelhecimento acelerado (EA) é amplamente empregado por simular, em um curto período, a deterioração natural das sementes por meio da exposição a elevada temperatura e umidade relativa. Esse teste é considerado um dos testes de vigor mais indicados, pois a exposição a altas temperaturas e umidade aceleram artificialmente as reações de deterioração que ocorrem durante o armazenamento, permitindo diferenciar lotes com diferentes níveis de vigor (Xing et al., 2023; Matera et al., 2025).

Entretanto, a sensibilidade do teste de EA depende da combinação de tempo e temperatura, pois diferentes parâmetros podem alterar profundamente a capacidade do ensaio de diferenciar lotes quanto ao potencial fisiológico (Lima et al., 2019). De acordo com Pontes et al., (2025), a associação entre o EA e demais testes fisiológicos, permite não apenas classificar lotes quanto ao vigor, mas também identificar condições de envelhecimento acelerado com maior poder de diferenciação e melhor correlação com o desempenho fisiológico das sementes.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar a capacidade discriminatória de testes de vigor convencionais e de estresse (EA), em diferentes combinações de tempo e temperatura, na

classificação do potencial fisiológico de lotes de sementes de sorgo.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Análise de Sementes do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará, utilizando-se seis lotes de sementes de sorgo forrageiro, provenientes de produtores da região do estado do Ceará, safra 2019, armazenados sob refrigeração ($\sim 8^{\circ}\text{C}$) até o início dos experimentos. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições de 50 sementes por gerbox, para cada teste empregado. Primeiramente, os seis lotes foram submetidos aos testes de grau de umidade a $103 \pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas (Brasil, 2025). Em seguida foram realizados os testes de germinação, primeira contagem de plântulas, teste de emergência e índice de velocidade de emergência, comprimento de plântulas e massa seca, condutividade elétrica e envelhecimento acelerado.

Teste de germinação e primeira contagem - quatro repetições de 50 sementes por lote, foram distribuídas sobre três folhas de papel tipo Germitest[®] umedecido com água destilada na proporção de 2,5 vezes a sua massa. Foram mantidas em germinador sob temperatura de 25°C . As avaliações foram realizadas aos quatro e dez dias (Brasil, 2025), após a semeadura. Os resultados foram expressos em porcentagem. O teste de primeira contagem foi realizado considerando o número de plântulas normais ao quarto dia do teste de germinação. Os resultados foram expressos em porcentagem.

Teste de emergência e índice de velocidade de emergência - quatro repetições de 50 sementes por lote foram distribuídas em canteiro. As avaliações foram realizadas no décimo dia e os resultados foram expressos em porcentagem. O índice de velocidade de emergência foi realizado em conjunto com o teste de emergência a partir de contagens diárias, adotando como critério o número de plântulas normais durante o período de avaliação. O índice foi calculado segundo Maguire (1962).

Comprimento de plântulas e massa seca - foram realizados em conjunto com o teste de germinação. Após 10 dias da semeadura, mediu-se o comprimento (mm) de todas as plântulas normais com auxílio de régua graduada em milímetros. O comprimento médio foi obtido somando-se as

medidas de cada repetição e dividido pelo número de plântulas normais avaliadas (Krzyzanowski et al., 2020). Posteriormente as plântulas de cada repetição foram colocadas em sacos de papel e levadas para estufa com circulação de ar forçado, a 65 °C até atingir peso constante. O material seco foi pesado em balança com precisão (0,001 g) e o resultado dividido pelo número de plântulas sendo expresso em miligramas.

Condutividade elétrica - foi realizado com quatro repetições de 25 sementes por lote e colocadas para embeber em 75 mL de água destilada em copos de plásticos (200 mL), sendo mantidas em câmara de germinação, tipo BOD, a 25°C, durante 24 h. Após este período, foi realizada a leitura da condutividade elétrica da solução e os resultados expressos em $\mu\text{S cm}^{-1}\text{g}^{-1}$.

Envelhecimento acelerado - foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes por lote. As sementes foram dispostas em camada única sobre tela de alumínio no interior de caixas plásticas do tipo Gerbox®, contendo 40 mL de solução no fundo. Foi adotado esquema fatorial completo 3×4 , sendo as três temperaturas (40 °C, 42 °C e 45 °C) combinadas com os quatro tempos de exposição (24, 48, 72 e 96 horas), totalizando doze condições de envelhecimento acelerado, cada uma com quatro repetições. Posteriormente foram instalados os testes de grau de umidade e de germinação, considerando apenas a primeira contagem, realizada no quarto dia após a instalação do teste (Brasil, 2025). Os resultados foram expressos em porcentagem.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com F a 5% e comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para integrar e explorar padrões entre variáveis de vigor, aplicou-se análise de componentes principais (PCA) a partir de matriz padronizada (z-score), via decomposição em valores singulares (SVD), utilizando MATLAB® versão R2023b (MathWorks, 2023).

A correlação de Pearson foi estimada entre as variáveis de vigor e condições de envelhecimento acelerado, com visualização por mapa de calor (heatmap). As análises de variância (ANOVA), o teste de comparação de médias com correção de Bonferroni para comparações múltiplas, a PCA via SVD e as rotinas de geração de figuras foram implementados em MATLAB® versão R2023b (MathWorks, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os lotes apresentaram diferenças significativas para os testes de vigor primeira contagem (PC), emergência (E) e índice de velocidade de emergência (IVE) e condutividade elétrica (CE) (Tabela 1), evidenciando a heterogeneidade do potencial fisiológico. De modo geral, essas variáveis foram eficientes para identificar lotes com desempenho superior.

O baixo coeficiente de variação reforça a robustez de CE, sugerindo alta precisão e boa capacidade de distinguir diferenças sutis entre lotes. Em contrapartida, IVE e massa seca (MS) exibem maior variabilidade experimental, o que pode reduzir a sensibilidade para separar lotes próximos e exige interpretação integrada com outros testes.

Observa-se um padrão consistente de classificação, onde lotes com maiores médias de E e IVE tendem a apresentar menor condutividade elétrica (CE). Valores baixos de CE refletem em uma menor lixiviação de solutos durante a embebição, característica de sementes mais vigorosas e com maior capacidade de estabelecimento em campo (Reed et al., 2022). Em sorgo, estudos relatam correlação negativa entre CE e testes de vigor, reforçando o potencial desse teste para diferenciar lotes com maior risco de baixa emergência sob condições subótimas (Fatonah et al., 2017).

Tabela 1. Médias (com agrupamento de letras) e coeficiente de variação (CV%) para variáveis de vigor em seis lotes de sementes de sorgo. PC: primeira contagem (%); E: emergência (%); IVE: índice de velocidade de emergência; CE: condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}\text{g}^{-1}$); CP: comprimento de plântulas (mm); MS: massa seca de plântulas (mg).

Lotes	PC	E	IVE	CE	CP	MS
	---%---	---%---		$\mu\text{S cm}^{-1}\text{g}^{-1}$	---mm---	---mg---
1	48,75 b	46,25 a	33,05 a	265,48 a	12,00 a	0,78 a
2	48,25 b	43,50 a	28,82 b	271,12 a	12,86 a	1,09 a
3	56,50 a	42,50 a	31,08 a	265,40 a	15,88 a	1,16 a
4	48,75 b	48,00 a	41,00 a	258,65 b	14,56 a	1,13 a
5	47,00 b	33,75 b	20,40 b	266,40 a	15,94 a	0,80 a
6	48,74 b	41,25 a	30,18 a	266,15 a	17,30 a	1,08 a
CV (%)	7,29	13,69	24,90	1,81	19,19	24,51

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Análise de variância revelou efeito significativo de lote para PC ($F = 12,35^*$), E ($F = 6,21^*$), IVE ($F = 6,91^*$) e CE ($F = 5,42^*$), enquanto CP ($F = 2,84\text{ns}$) e MS ($F = 2,56\text{ns}$) não apresentaram diferenças significativas entre lotes. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo (gl tratamento = 5; gl resíduo = 18).

A PC discriminou o lote 3 como superior, enquanto os demais lotes permaneceram no grupo de menor valor. Esse resultado indica maior precocidade de germinação no lote 3, característica associada a maior vigor e potencial de estabelecimento mais rápido e uniforme de plântulas, uma vez que a PC é reconhecida como indicadora da velocidade inicial do processo germinativo (Krzyzanowski et al., 2020).

Na emergência, o lote 4 apresentou o maior desempenho enquanto o lote 5 apresentou o menor valor. O IVE reforçou a mesma tendência, com destaque, novamente, para o lote 4 e redução acentuada no lote 5. Assim, o IVE mostrou-se particularmente informativo para separar lotes com diferenças de estabelecimento por incorporar o componente temporal do processo e refletir, simultaneamente, velocidade e uniformidade de emergência (Maguire, 1962).

Para a CE, o lote 4 apresentou o menor valor, diferenciando-se dos demais lotes. O menor valor de CE no lote 4 sugere melhor integridade de membranas e menor deterioração, corroborando sua classificação como mais vigoroso. Estudos recentes mostram que o teste de CE é capaz de diferenciar

lotes de sementes quanto ao vigor fisiológico, uma vez que maiores valores de lixiviação de solutos estão associados a lotes de menor vigor e desempenho reduzido em parâmetros relacionados ao estabelecimento inicial de plântulas (Pontes et al., 2025).

Em atendimento ao objetivo central deste estudo, as respostas dos lotes ao teste de envelhecimento acelerado (EA) variaram conforme a combinação de tempo e temperatura (Figura 1). O aumento da temperatura e/ou do período de exposição reduziu a PC após o EA e, em determinadas condições, ampliou a separação entre lotes, favorecendo a discriminação do vigor. Entretanto, sob condições excessivamente severas, ocorreu redução generalizada da PC, diminuindo o poder discriminatório do ensaio. Em contrapartida, combinações intermediárias de tempo e temperatura tendem a evidenciar diferenças mais consistentes entre lotes superiores e inferiores e apresentar maior associação com as variáveis de vigor, como demonstrado por Silva et al. (2022) em testes de EA que identificaram que tempos moderados foram os mais eficientes para discriminar vigor entre lotes de sementes.

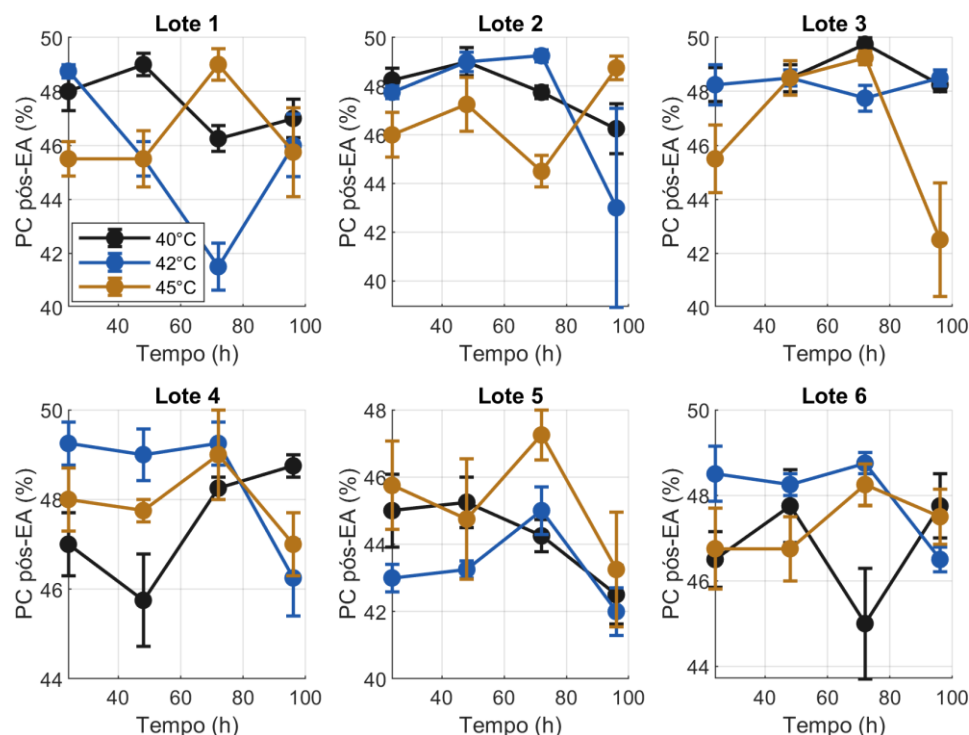


Figura 1. Curvas de primeira contagem (PC) pós-envelhecimento acelerado em função do tempo (24–96 h) e temperatura (40, 42 e 45 °C), por lote, com médias $\pm$ erro-padrão.

As curvas por lote mostram que o aumento do tempo e/ou da temperatura intensifica o estresse e reduz a performance pós - EA, porém com magnitudes distintas entre lotes. Em testes de vigor, aplicações de estresse térmico e temporal tendem a causar alterações fisiológicas que reduzem o potencial de lotes com menor vigor rapidamente do que nos lotes superiores, resultando em respostas mais estáveis para lotes mais vigorosos ao longo dos gradientes de temperatura/tempo e queda mais acentuada nos lotes inferiores (Xing et al., 2023; Assunção et al., 2025).

A correlação entre variáveis de vigor e condições de EA (Figura 2) indica que, neste conjunto de dados, combinações intermediárias de tempo e temperatura apresentou maior concordância com E e IVE, ao passo que exposições mais severas tenderam a enfraquecer essa concordância. Assim, o EA mostrou potencial como teste complementar, desde que a condição de estresse seja selecionada de modo a maximizar discriminação sem perder a capacidade preditiva em relação aos testes convencionais.

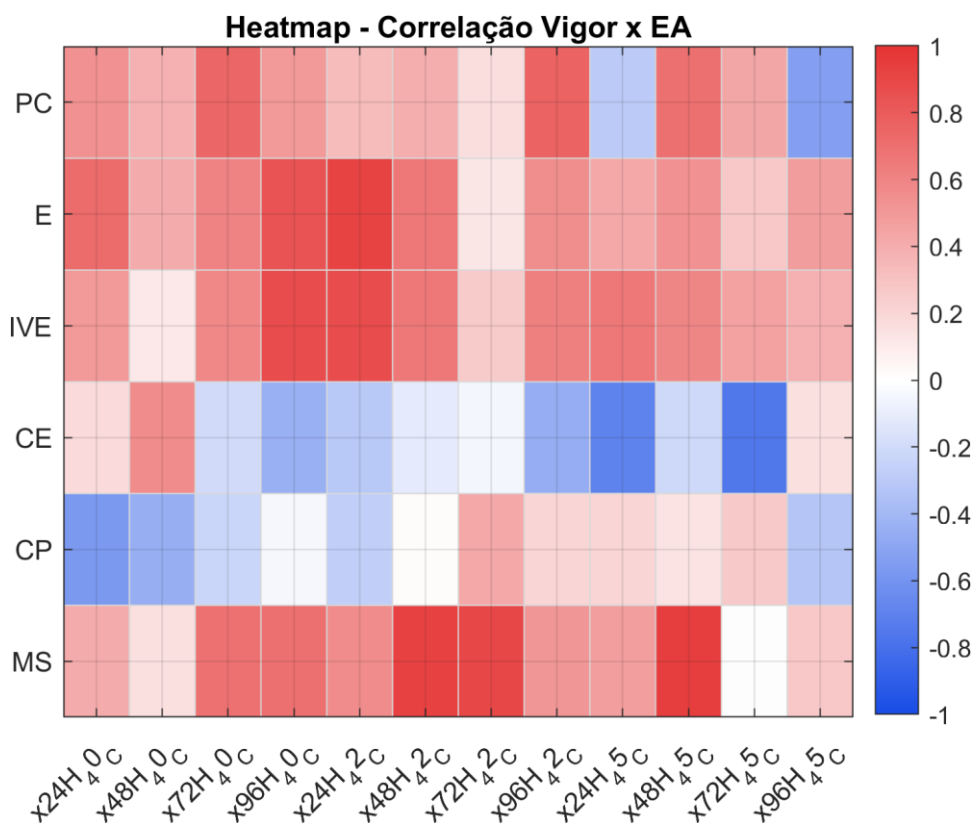


Figura 2. Matriz de correlação (Pearson) entre variáveis de vigor e condições de envelhecimento acelerado (tempo $\times$ temperatura), conforme esquema fatorial completo descrito em Material e Métodos, destacando combinações com maior aderência às variáveis E e IVE.

A PCA (Figura 3) sintetiza a relação entre as variáveis de vigor, permitindo visualizar a separação dos lotes em função dos gradientes de desempenho fisiológico. Vetores longos e alinhados indicam variáveis com maior contribuição e correlação positiva na formação dos componentes principais. O primeiro componente principal (PC1) explicou a maior parcela da variância e separou, de forma consistente, lotes associados a maiores valores de desempenho (E/IVE) daqueles associados a maiores valores de CE. A proximidade angular entre E e IVE sugere que ambas capturam um componente fisiológico semelhante (rapidez e sucesso de emergência), enquanto o vetor de CE aponta em

direção oposta, evidenciando antagonismo entre lixiviação eletrolítica e vigor.

O segundo componente principal (PC2) evidenciou contrastes associados às variáveis de crescimento (CP e MS) e parte dos indicadores de desempenho, indicando que os lotes podem combinar de forma distinta rapidez de emergência, integridade de membranas e crescimento inicial. Embora CP e MS descrevam a capacidade de formação de plântulas, estes apresentaram menor peso discriminatório em comparação com E, IVE e CE. De modo geral, a análise de componentes principais reforça que a avaliação integrada de múltiplos testes torna a interpretação do vigor mais consistente e confiável (Silva et al., 2019).

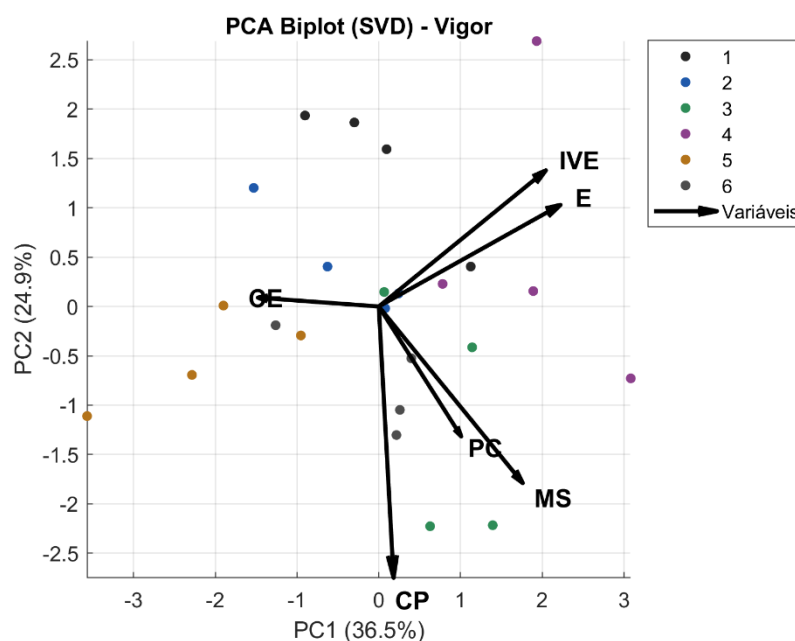


Figura 3. Biplot da PCA (PC1 × PC2) para variáveis de vigor (PC, E, IVE, CE, CP e MS), com dados padronizados. Pontos representam repetições por lote e vetores indicam a contribuição/direção das variáveis.

CONCLUSÃO

Os testes de vigor permitiram discriminar o potencial fisiológico dos lotes de sementes de sorgo, com destaque para primeira contagem, emergência e índice de velocidade de emergência na identificação de lotes superiores. Como principal resultado deste estudo, o teste de envelhecimento acelerado mostrou potencial para ampliar a separação entre lotes, desde que conduzido em condições intermediárias de tempo e temperatura. A análise multivariada (PCA) e a correlação confirmaram a coerência fisiológica do conjunto de variáveis. Em conjunto, os resultados sustentam o uso integrado de E, IVG e CE para classificação de lotes e a adoção do EA como ferramenta complementar para identificar diferenças de vigor com maior robustez.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assunção, C. T.; Silva, M. F.; Leal, J. H. S. (2025). Accelerated aging associated with computerized analysis (Vigor-S) to evaluate the vigor of soybean seeds. *Revista de Ciências Agroveterinárias* 24(1): 167–178.
<https://doi.org/10.5965/223811712412025167>

Brasil. (2025). **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 398 p.

Fatonah, K.; Suliansyah, I.; Rozen, N. (2017). Electrical conductivity for seed vigor test in sorghum (*Sorghum bicolor*). *Cell Biology & Development* 1(1): 6–12.
<https://doi.org/10.13057/cellbioldev/v010102>.

Krzyzanowski, F.C.; Vieira, R.D.; França Neto, J.B.; Marcos Filho, J. (2020). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES. 601p.

Lima, F. B.; Passos, A. M. A.; Silva, J. B.; Alves, C. Z.; Netto, D. A. M.; Cotrim, M. F. (2019). Accelerated aging in sorghum genotypes. *Bioscience Journal* 35(2): 450–458.
<https://doi.org/10.14393/BJ-v35n2a20198-41774>.

Maguire, J. D. (1962). Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(2): 176-177.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033X>.

Matera, T. C.; Krzyzanowski, F. C.; Braccini, A. L.; Scapim, C. A. (2025). Classification of vigor levels

- for soybean seeds using the accelerated aging test. **Journal of Seed Science** 47: 7098. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v47287098>.
- MathWorks. (2023). **MATLAB R2023b**. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts. <https://www.mathworks.com>.
- Onoabagbe, O.; Ogwu, M.C.; Ikhajiagbe, B. (2024). Germination characteristics of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. under different pH regimes after chemo-priming. **Vegetos** 37, 1876–1886. <https://doi.org/10.1007/s42535-024-00909-0>.
- Pontes, B. S.; Catão, H. C. R. M.; Oliveira Filho, M. A. de; Santos, A. L. C.; Zanetti, R. B. (2025). Improving accelerated aging and electrical conductivity tests to assess popcorn seed vigor. **Bioscience Journal** 41: e41009. <https://doi.org/10.14393/BJ-v41n0a2025-69965>.
- Pooja, D.; Sripathy, K. V.; Siddaraju, R.; Bhojrajnaik, K. Parashivamurthy. (2025). Determination of Mean Germination Time as an Index of Seed Vigour in Sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Journal of Advances in Biology & Biotechnology** 28(10): 1538-1547. <https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i103168>.
- Reed, R. C.; Bradford, K. J.; Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. **Heredity** 128: 450–459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>.
- Silva, G. Z.; Martins, C. C.; Alcântara Bruno, R. de L.; Pereira, F. E. C. B. & Jeromini, T. S. (2019). Multivariate analysis and vigor tests to determine the quality of *Brachiaria decumbens* seeds. **Revista Ciência Agronômica** 50(2): 291–299. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190034>.
- Silva, M.V.; Paz, R.B.O.; Rocha, D.I.; Machado, C.G.; Silva, G.Z. (2022). Accelerated aging test in the determination of safflower seeds vigor. **Bioscience Journal** 38: e38003. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-54228>.
- Tanwar, R.; Panghal, A.; Chaudhary, G.; Kumari, A.; Chhikara, N. (2023). Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: a review. **Food Chemistry Advances** 3: 100501. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100501>.
- Xing, M.; Long, Y.; Wang, Q.; Tian, X.; Fan, S.; Zhang, C. & Huang, W. (2023). Physiological Alterations and Nondestructive Test Methods of Crop Seed Vigor: A Comprehensive Review. **Agriculture** 13(3): 527. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030527>.