

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 29/11/2025

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until November 29, 2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



MÓNICA ELIANA CÓRDOBA FIGUEROA

**TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NO ESTUDO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

Botucatu

2024

MONICA ELIANA CORDOBA FIGUEROA

**TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NO ESTUDO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Agricultura).

Orientadora: Prof. Dra. Maria Márcia
Pereira Sartori.

Botucatu

2024

F475t Figueroa, Mónica Eliana Córdoba
Técnicas de avaliação no estudo da qualidade de sementes
de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) / Mónica Eliana Córdoba
Figueroa. -- Botucatu, 2024
74 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientadora: Maria Márcia Pereira Sartori

1. Longevidade. 2. Tomate. 3. Tecnologia de sementes. 4.
Funções de ligação. 5. Qualidade fisiológica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NO ESTUDO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)

AUTORA: MÔNICA ELIANA CÓRDOBA FIGUEROA

ORIENTADORA: MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Agricultura),
pela Comissão Examinadora:

Pesquisadora Dr.ª MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI (Participação Presencial)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. ANDERSON RODRIGO DA SILVA (Participação Virtual)
Agronomia / Instituto Federal Goiano

Prof.ª Dr.ª RUTE QUELVIA DE FARIA (Participação Virtual)
Engenharia Agrícola / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano

Prof. Dr. EDVALDO APARECIDO AMARAL DA SILVA (Participação Presencial)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. ANTONIO ISMAEL INÁCIO CARDOSO (Participação Presencial)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Botucatu, 29 de novembro de 2023

Do meu anjo mais amado, minha irmã Deicy Tatiana Cordoba,

dedido

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Jesús Afranio Córdoba Santacruz e Alcira del Socorro Figueroa Davila, pela criação de duas filhas responsáveis, e pelo apoio incondicional na realização do meu sonho.

A minha irmã, Deicy Tatiana Cordoba Figueroa, pelo amor, pelo orgulho e por nunca soltar minha mão. Farei minhas conquistas as suas, por toda a minha vida, até o dia de nosso reencontro.

Ao Brasil, por abrir suas portas para que eu pudesse realizar o doutorado.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas – Campus de Botucatu.

Ao professor Amaral Da Silva, meu primeiro contato na UNESP, pela coorientação pelos ensinamentos em fisiologia sementes e por me fazer gostar ainda mais dessa área.

À professora Maria Márcia Pereira Sartori, pela excelente orientação, pelos ensinamentos em estatística (outra área que sou apaixonada), pelo apoio e por sempre acreditar em minhas capacidades.

À minha melhor amiga e irmã Vanessa Lopez Peñafiel, pela amizade incondicional, que, mesmo à distância, me soube oferecer apoio no desenvolvimento do doutorado.

Aos meus tios, primas e demais amigos que sempre questionaram sobre meus estudos e estavam na torcida por mim.

Às minhas melhores amigas brasileiras Brunna e Michelane, pelo amor compartilhado, pelo carinho, pelos ensinamentos. Vocês são minha família em Botucatu.

Ao grupo de pesquisa de Modelagem e Estatística Aplicada a Ciências Agrárias (MODELSTAT), especialmente ao Pedro Moreno quem cuida do meu experimento.

À Técnica do Laboratório de Sementes, Valeria Giandoni, pelo profissionalismo, amizade e ajuda na execução das análises.

A minha faculdade colombiana: Universidade de Nariño.

Ao Centro de Estudos Interdisciplinares Básicos e Aplicados - Fundação Ceiba e Gobernación de Nariño - Colombia, pelo empréstimo de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (CAPES), Código de Financiamento 001.

“Todos os dias sabemos mais e entendemos menos”

Albert Einstein

RESUMO

Na avaliação da qualidade fisiológica de sementes a longevidade, vigor, e germinação são de suma importância. A longevidade refere-se à capacidade de manter a viabilidade das sementes durante o armazenamento, e o tempo em que as amostras perdem 50% de viabilidade (P_{50}) ainda tem sido determinado por uma função de ligação Probit. No entanto, é observado, em vários casos, que o uso dessa técnica induz erro na predição do P_{50} . Estudos anteriores com outras funções foram aplicadas em sementes de soja e milho que exploraram alternativas robustas na predição desse parâmetro. Nas sementes de tomate, conhecidas pela germinação lenta e irregular, o condicionamento fisiológico “priming” é utilizado para acelerar e uniformizar o processo. A avaliação do efeito do “priming” demanda tempo e pessoal, assim novas abordagens da química analítica e métodos estatísticos podem diferenciar eficientemente sementes submetidas ou não ao “priming”. Portanto, os objetivos deste trabalho foram: (i) avaliar a função de ligação que melhor se ajusta no parâmetro de P_{50} e na longevidade de sementes de tomate em diferentes condições de armazenamento, para tanto, comparou-se as funções de ligação Logit, Cauchy e Cauchy-SSF com a usual Probit pelo método de ajuste de mínimos quadrados ordinários (OLS) e Logit e Cauchy com Probit pelo modelo linear generalizado (GLM) e; (ii) investigar o desempenho da técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) combinada com análise multivariada de maneira rápida e com alta precisão na classificação de amostras de sementes primed e não primed. Os resultados demonstraram que (i) a função de ligação Cauchy-SSF, utilizando o método OLS, prediz com maior robustez a longevidade de sementes de tomate em diferentes condições de armazenamento em comparação com o Probit e, (ii) a técnica LIBS foi capaz de distinguir de forma precisa sementes primed e não primed de tomate com base na sua composição elementar, mostrando-se uma ferramenta de grande importância nessa avaliação.

Palavras-chaves: armazenamento; cauchy-ssf; composição elementar; *Solanum lycopersicum* L.; viabilidade; vigor.

ABSTRACT

In assessing the physiological quality of seeds, longevity, vigor and germination are of paramount importance. Longevity refers to the ability to maintain seed viability during storage, and the time at which samples lose 50% viability (P_{50}) has still been determined by a Probit link function. However, it has been observed in several cases that the use of this technique induces error in the prediction of P_{50} . Previous studies with other functions have been applied to soybean and corn seeds, which have explored robust alternatives for predicting this parameter. In tomato seeds, known for their slow and irregular germination, physiological priming is used to speed up and standardize the process. Evaluating the effect of priming takes time and personnel, so new approaches to analytical chemistry and statistical methods can efficiently differentiate between seeds that have been primed or not. Therefore, the objectives of this work were: (i) to evaluate the link function that best fits the P_{50} parameter and the longevity of tomato seeds under different storage conditions, to this end, the Logit, Cauchy and Cauchy-SSF link functions were compared with the usual Probit by the ordinary least squares (OLS) fitting method and Logit and Cauchy with Probit by the generalized linear model (GLM) and; (ii) to investigate the performance of the laser-induced breakdown spectrometry (LIBS) technique combined with multivariate analysis in classifying primed and non-primed seed samples quickly and with high precision. The results showed that (i) the Cauchy-SSF link function, using the OLS method, more robustly predicts the longevity of tomato seeds in different storage conditions compared to Probit and (ii) the LIBS technique was able to accurately distinguish primed and non-primed tomato seeds based on their elemental composition, proving to be a very important tool in this evaluation.

Keywords: storage; cauchy-ssf; elemental composition; *Solanum lycopersicum* L.; viability; vigor.

SÚMARIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
CAPÍTULO 1 - FUNÇÕES DE LIGAÇÃO NA PREDIÇÃO DA LONGEVIDADE DE SEMENTES DE TOMATE.....	20
1.1 INTRODUÇÃO.....	22
1.2 MATERIAL E MÉTODO.....	24
1.3 RESULTADOS	29
1.4 DISCUSSÃO	37
1.5 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	41
CHAPTER 2 - LASER INDUCED-BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS): AN ACCURATE TECHNIQUE TO SELECT PRIMED TOMATO SEEDS	43
2.1 INTRODUCTION.....	44
2.2 MATERIALS AND METHOD	45
2.3 RESULTS.....	49
2.4 DISCUSSION.....	56
REFERENCES	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICE A – Resíduos das funções Probit, Logit, Cauchy e Cauchy - SSF pelo método OLS nos tratamentos 1 e 2.	66
APÊNDICE B – Resíduos das funções Probit, Logit, Cauchy e Cauchy - SSF pelo método OLS nos tratamentos 3 e 4.	67
APÊNDICE C – Resíduos das funções Probit, Logit, Cauchy e Cauchy - SSF pelo método OLS nos tratamentos 5 e 6.	68
APÊNDICE D – Resíduos das funções Probit, Logit, Cauchy e Cauchy - SSF pelo método OLS nos tratamentos 7 e 8.	69
APÊNDICE E – Resíduos das funções Probit, Logit, Cauchy e Cauchy - SSF pelo método OLS nos tratamentos 9 e 10.	70
APÊNDICE F – Resíduos das funções Probit, Logit, Cauchy e Cauchy - SSF pelo método OLS nos tratamentos 12.	71

APÊNDICE G – Resíduos das funções Probit, Logit e Cauchy pelo modelo GLM nos tratamentos 1, 2, 3 e 4.	72
APÊNDICE H – Resíduos das funções Probit, Logit e Cauchy pelo modelo GLM nos tratamentos 5, 6, 7 e 8.	73
APÊNDICE I – Resíduos das funções Probit, Logit e Cauchy pelo modelo GLM nos tratamentos 9, 10, 12.	74

INTRODUÇÃO GERAL

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pertence à família das Solanáceas e é um vegetal considerado essencial em todo o mundo (Thwe *et al.*, 2020; Habibi *et al.*, 2023). Prevê-se que a produção e o consumo dessa cultura continuarão aumentando. Em países como o Brasil, sua produtividade média é de 65,14 t ha⁻¹, enquanto, na Colômbia é de 27,20 t ha⁻¹(Conab, 2019; Minagricultura, 2018).

As cultivares de tomate são destinadas a produção de frutos, com o objetivo de atender à demanda do mercado para comercialização “in natura” e/ou para a produção de molho e subprodutos na indústria. O custo da produção de sementes, usado na propagação do tomate, pode atingir valores elevados, devido ao nível tecnológico investido. Também pela redução da longevidade das sementes, o que se torna um grande problema no armazenamento (Batista, 2018; De Souza *et al.*, 2016).

A longevidade das sementes representa o período em que as sementes mantêm sua viabilidade e vigor após a maturidade fisiológica e é uma característica importante no âmbito ecológico, agrônômico e econômico (Hay *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019). Durante o armazenamento a seco, as sementes perdem qualidade devido aos processos de deterioração, que são inevitáveis e irreversíveis (De Souza *et al.*, 2016). O primeiro indicador de deterioração é a queda do vigor, tornando-se mais sensível ao estresse durante a germinação, o que reduz a capacidade de germinar, e conseqüentemente, resulta na perda da germinabilidade em um período posterior de armazenamento (Bernal-Lugo e Carl Leopold, 1992; Bewley *et al.*, 2013; Rajjou; Debeaujon, 2008).

As propriedades das sementes, como composição lipídica, viabilidade inicial, estágio de maturação, massa de sementes, teor de óleo e composição de carboidratos afetam a longevidade das sementes e são fortemente influenciados pelas condições de umidade relativa e temperatura do ar durante o armazenamento. Sementes de diferentes espécies variam seu potencial de armazenamento; por exemplo, sementes de cebola e de soja possuem uma vida útil curta, enquanto sementes de cereais ou tomate podem ser armazenadas por mais tempo em condições adequadas.

A longevidade das sementes no armazenamento é uma característica quantitativa binária específica para cada espécie. Sua predição requer modelos matemáticos que expliquem o comportamento, bem como os fatores que podem influenciar a germinação ao longo do tempo de armazenamento. A função de ligação Probit determina o período em que 50% das sementes perderam viabilidade (P_{50}). Os dados além de binários nem sempre são normalmente distribuídos, e nesse caso não é possível utilizar a função Probit e, portanto, é necessário aplicar outras funções de ligação para prever a longevidade.

As funções de ligação Logit, utilizando o modelo linear generalizado, e Cauchy-SSF com mínimos quadrados ordinários, quando comparados com o usual Probit, fornecem resultados superiores na predição da longevidade de sementes de soja. Isso sugere a utilização dessas funções de ligação em outras espécies (Santos *et al.*, 2019) e representa uma inovação na utilização dessa metodologia para sementes de tomate.

Por outro lado, as sementes de tomate apresentam germinação lenta e irregular, resultando em problemas de propagação (Batista *et al.*, 2020). Para mitigar esse problema, empresas e pesquisadores usam técnicas de condicionamento fisiológico conhecido como priming. Esse tratamento é empregado em sementes de hortaliças e outras espécies que possuem sementes de tamanho pequeno, favorecendo a velocidade de germinação e emergência, resultando na uniformidade de germinação do lote e na formação de plântulas mais vigorosas.

Normalmente, o efeito de “priming” é determinado pela uniformidade da germinação e teste de vigor (t_{50}) das sementes, que demandam preparo de materiais, equipamentos, pessoal, tempo e minuciosos cuidados. No entanto, novas abordagens como a química analítica aliada a novas ferramentas de avaliação de dados como os métodos multivariados, podem permitir uma avaliação rápida e eficiente do efeito de “priming” pretendido, questão que ainda não foi estudada. Essa abordagem aqui foi investigada com a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS), capaz de realizar a análise química direta de amostras sólidas e determinar simultaneamente vários elementos químicos em pouco tempo e com alta frequência analítica (Gamela *et al.*, 2019; Gamela *et al.*, 2020).

Frente ao exposto, os objetivos do trabalho foram: (i) avaliar e comparar as funções de ligação Logit, Cauchy e Cauchy-SSF com a usual Probit pelo método de mínimos quadrados – OLS e Logit e Cauchy com Probit pelo modelo linear generalizado – GLM na predição da longevidade de sementes de tomate em diferentes condições de armazenamento e; (ii) investigar o desempenho da LIBS combinada com análise multivariada de maneira rápida e com alta precisão na classificação de amostras de sementes com condicionamento fisiológico e não condicionadas em comparação aos métodos padrões. Além disso, identificar a composição elementar quando são submetidas ao “priming” e determinar conjuntamente com as variáveis fisiológicas sua relação nos dois grupos de amostras (com e sem “priming”).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, a agricultura e o setor sementeiro enfrentam grandes desafios na produção e conservação das espécies, especialmente de produtos que contêm fontes de vitaminas essenciais para a segurança alimentar, como o tomate. Aqui, foi apresentada uma maneira robusta para prever a longevidade de sementes de tomate utilizando a função de ligação Cauchy-SSF com o método de mínimos quadrados ordinários (OLS), que superou o Probit. Esse conhecimento pode ser de grande utilidade para os bancos de germoplasma, auxiliando na renovação de materiais e na tomada de decisões assertivas frente à conservação da espécie.

Foi igualmente relevante descobrir que a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), combinada com a estatística multivariada e modelos de classificação, seleciona de maneira precisa sementes de tomate primed e não primed, contribuindo para o avanço da ciência e da tecnologia de sementes na indústria brasileira. Indiretamente, esses benefícios se estendem à Colômbia, resultando em uma melhoria na qualidade das sementes de tomate. É sabido que o Brasil é o terceiro maior fornecedor de sementes de tomate para a Colômbia, logo após os Estados Unidos e China.

REFERÊNCIAS

BATISTA, T.B. **Longevidade de sementes condicionadas de tomate: estudos fisiológicos e moleculares**. Dissertação (Mestre em Agronomia - Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

BERNAL-LUGO, I and; CARL LEOPOLD, A. Changes in soluble carbohydrates during seed storage. **Plant Physiology**, v. 98, n. 3, p. 1207–1210, 1992.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Tomate: Análise dos indicadores da produção e comercialização no mercado mundial, Brasileiro e Catarinense, v. 21, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-da-conab/item/12529-compendio-de-estudos-da-conab-v-21-tomate-analise-dos-indicadores-da-producao-e-comercializacao-no-mercado-mundial-brasileiro-e-catarinense>

DE SOUZA, D. et al. Galactinol as marker for seed longevity. **Plant Science**, Ireland, v. 246, p. 112–118, 2016.

HABIBI, N., ARYAN, S., AMIN, M. W., SANADA, A., TERADA, N., & KOSHIO, K. Potential Benefits of Seed Priming under Salt Stress Conditions on Physiological, and Biochemical Attributes of Micro-Tom Tomato Plants. **Plants**, v. 12, n. 11, p. 2187, 2023.

HAY, F. R. et al. Seed longevity phenotyping: recommendations on research methodology. **Journal of experimental botany**. v. 70, n. 2, p. 425–434, 2019.

MINAGRICULTURA. **Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia**. Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo en Colombia, 2018. Disponível em: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>.

RAJJOU, L.; DEBEAUJON, I. Seed longevity: Survival and maintenance of high germination ability of dry seeds. **Comptes Rendus - Biologies**, v. 331, n. 10, p. 796–805, 2008.

THWE, A. A. et al. Impact of red and blue nets on physiological and morphological traits, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.). **Scientia Horticulturae**, Netherlands, v. 264, p. 109185, 2020.