



Stock

PRESENÇA DE MICOTOXINAS EMERGENTES NO TOMATE: DESAFIOS PARA A SEGURANÇA ALIMENTAR

O número de casos de contaminação de tomate fresco e processado por micotoxinas emergentes, produzidas por espécies do género *Alternaria*, tem vindo a aumentar. A ingestão destas micotoxinas é um risco para a saúde humana e animal. Torna-se, portanto, essencial adotar medidas eficazes de prevenção e controlo.

Daniela Simões¹ e Eugénia de Andrade^{2,3}

¹ Centro de Ecologia, Evolução e Alterações Ambientais, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



² Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária



³ GREEN-IT Bioresources for Sustainability, ITQB NOVA



Contextualização

O tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) contribui significativamente para o abastecimento alimentar mundial, representando 16% da produção total de hortícolas em 2020^[1]. Na Europa, em 2021, Portugal destacou-se com a maior produtividade (97,9 Mt/ha)^[2] e, em 2022, foi o terceiro maior produtor^[3]. No entanto, o tomate é uma cultura suscetível a mais de 200 doenças^[4], sendo que as de origem fúngica assumem particular relevância pela sua incidência e impacto nas perdas de produção^[5].

Os fungos constituem um grupo diversificado de microrganismos com capacidade de produzir substâncias e compostos químicos (metabólitos) que podem ter efeitos significativos nas plantas, nos animais e nos seres humanos^[6]. Alguns desses metabólitos podem ter efeitos benéficos – por exemplo, os alcaloides ajudam as plantas a resistir a pragas, a repelir herbívoros e a adaptar-se a alterações climáticas^[7]. Contudo, outros metabólitos, como as micotoxinas, têm efeitos tóxicos sobre outros microrganismos, plantas, animais e/ou seres humanos^[6]. Tal como os fungos podem contaminar plantas, frutos e outros alimentos com os seus esporos, também os podem contaminar com micotoxinas, colocando em causa a segurança alimentar.

A atual crise climática tem vindo a criar condições propícias tanto ao aumento da incidência de doenças fúngicas nas culturas, como à contaminação dos produtos com micotoxinas ao longo da cadeia de valor. Esta situação tem implicações para a saúde global, pois as doenças fúngicas afetam a sanidade das culturas e as micotoxinas afetam a saúde humana, quer pelo consumo de produtos contaminados, quer pela exposição ocupacional dos agricultores aos bioaerossóis presentes no ar^[6,8]. Os bioaerossóis

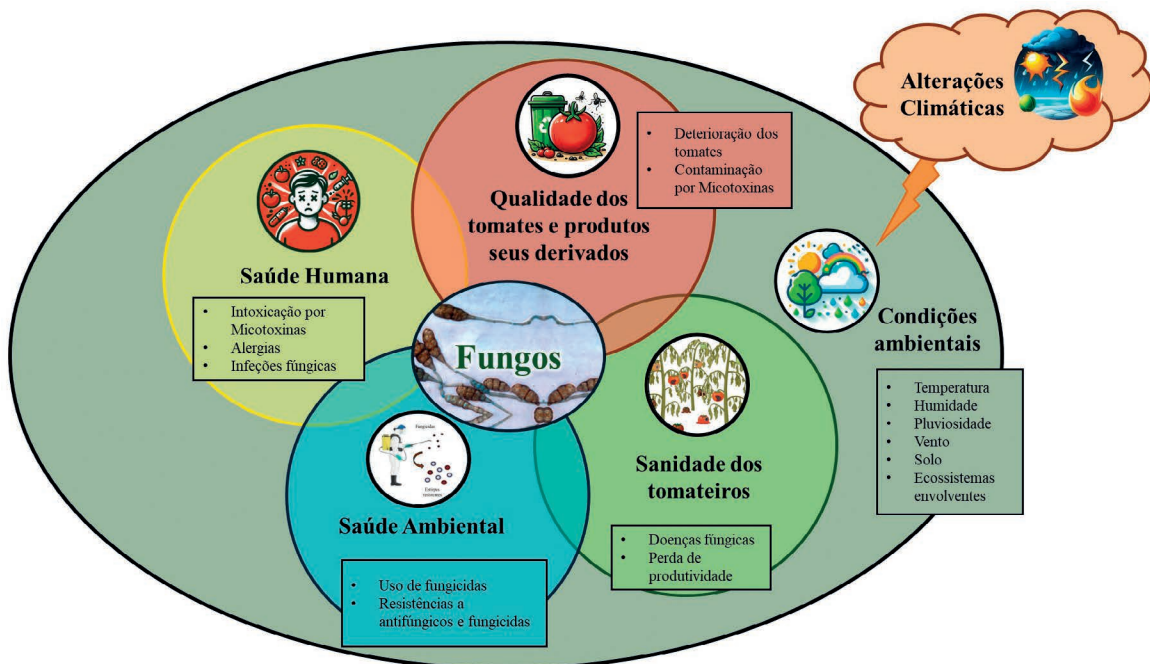


Figura 1 – Esquema simplificado de como os fungos podem afetar a saúde global.

consistem em partículas biológicas microscópicas transportadas pelo ar (0,001–100 µm), ubíquas no ambiente, compostas por pólen, ácaros, vírus, bactérias, fungos, endotoxinas e micotoxinas^[8]. Desta forma, a exposição dos agricultores a estes bioaerossóis pode provocar alergias, intoxicações por inalação ou infecções respiratórias^[8].

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento significativo de relatos sobre a detecção de micotoxinas emergentes em tomate fresco e em produtos à base de tomate processado^[9]. Entende-se por micotoxinas emergentes aquelas que foram recentemente descobertas ou identificadas na cadeia alimentar humana ou animal, ou que estão ainda pouco estudadas, para as quais não existem dados toxicológicos e de exposição suficientes que sustentem regulamentações específicas^[10]. As micotoxinas emergentes reportadas em tomate e derivados processados são, na sua maioria, produzidas por espécies pertencentes ao género *Alternaria*.

Alternaria e as suas micotoxinas emergentes

Existem mais de 250 espécies de *Alternaria* identificadas^[11], capazes de infetar mais de 4000 espécies de plantas hospedeiras, causando danos tanto na fase de pré-colheita como na de pós-colheita^[11]. Para além disto, espécies de *Alternaria* são capazes de produzir mais de 70 micotoxinas e seus derivados, com efeitos tóxicos em humanos, animais e plantas^[12]. Entre essas micotoxinas, as mais preocupantes ou frequentemente reportadas em tomate fresco e processado são o ácido tenuazónico (TeA), o ácido iso-tenuazónico, o alternariol (AOH), o alternariol éter-monometil (AME), as altertoxinas (ATX-I, ATX-II), o altenueno (ALT), as toxinas de *Alternaria alternata* f. sp. *lycopersici* (toxinas-AAL) e a tentoxina (TEN)^[9, 12].

As micotoxinas emergentes mencionadas exibem propriedades tóxicas para plantas, animais e humanos, incluindo: a) fitotoxicidade (tóxicas para as plantas, podendo comprometer o crescimento, desenvolvimento ou reprodução); b) imunotoxicidade (afetam o sistema imunitário); c) citotoxicidade (causam danos ou morte celular, podendo compro-

meter tecidos e órgãos); d) mutagenicidade (induzem mutações no material genético, podendo levar a alterações hereditárias); e) genotoxicidade (provocam danos no ADN, podendo resultar em mutações, cancro ou outras disfunções celulares); e f) teratogenicidade (causam malformações congénitas durante o desenvolvimento fetal)^[10]. Por exemplo, AOH e AME são compostos que possuem efeitos desreguladores endócrinos (afetando o equilíbrio hormonal), além de causarem efeitos imunotóxicos, citotóxicos, mutagénicos e genotóxicos que, em caso de exposição crónica, potenciam o desenvolvimento de cancro^[9, 10, 13].

Para além dos efeitos toxicológicos característicos de cada uma destas micotoxinas isoladamente, quando combinadas, os seus efeitos tendem a ser intensificados, mesmo em concentrações baixas, como acontece quando, por exemplo, se combina AOH com AME^[9, 14]. Estas combinações podem também ter efeitos sinérgicos, ou seja, efeitos maiores do que a soma dos efeitos individuais, como já foi observado na interação entre AOH e ATX-II^[9]. Para além disso, também já foram reportados casos de coexistência de micotoxinas de *Alternaria* com micotoxinas de outras espécies fúngicas, como as produzidas por *Fusarium* spp. (e.g., AOH com deoxinivalenol (DON) ou zearalenona (ZEN)) levando a efeitos citotóxicos e genotóxicos aumentados^[9, 15, 16]. Embora o conhecimento acerca destas micotoxinas emergentes seja, ainda, insuficiente para regular e estabelecer limites máximos específicos para cada tipo de produto alimentar, é já conhecido que a ingestão de alimentos contaminados com estas substâncias é prejudicial para a saúde humana. Neste sentido, a Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) estabeleceu o limiar de preocupação toxicológica (*Threshold of Toxicological Concern* – TTC) para o consumo de alimentos contaminados com algumas destas micotoxinas. Para as micotoxinas com potencial genotóxico, como AOH e AME, o TTC foi definido em 2,5 ng por quilograma de peso corporal por dia, enquanto para as micotoxinas consideradas não genotóxicas, como TeA e TEN, o TTC estabelecido foi de 1500 ng por quilograma de peso corporal por dia^[12, 13]. Para-

lamente, a EFSA estimou a exposição alimentar crónica da população europeia, concluindo que esta excede o TTC para as micotoxinas AOH, AME e TeA^[12, 13].

Micotoxinas emergentes em tomate

No que se refere à contaminação de alimentos com estas micotoxinas emergentes de *Alternaria*, o tomate fresco e processado destacam-se como os mais contaminados com AOH, AME, TeA e TEN, sendo TeA a micotoxina mais reportada e encontrada em maiores concentrações^[9, 12, 13]. Aproximadamente 70% dos estudos de avaliação da exposição a micotoxinas por ingestão concluíram que uma ou mais micotoxinas de *Alternaria* constituem um risco de segurança alimentar, sendo os cereais e produtos à base de tomate as principais fontes de exposição^[9, 12, 13]. De facto, a EFSA concluiu que o tomate fresco e processado são os alimentos que mais contribuem para a ingestão de TeA, sendo os concentrados de tomate os principais responsáveis pela exposição a TEN por via da dieta^[12, 13]. As concentrações destas micotoxinas são, geralmente, inferiores em tomate fresco, quando comparadas com os produtos processados, indicando que as suas concentrações podem aumentar sob condições favoráveis ao desenvolvimento fúngico e permanecer estáveis durante o processamento^[9, 12, 13].

Medidas de prevenção e controlo

A prevenção e o controlo da contaminação por micotoxinas emergentes são feitos essencialmente de forma indireta, por ação sobre os fungos seus sintetizadores. Os métodos convencionais recorrem ao uso de fungicidas para combater os fungos fitopatogénicos durante o ciclo da cultura^[6, 9]. Porém, o uso extensivo de fungicidas na agricultura, para além dos efeitos tóxicos dos seus resíduos no solo, água e ecossistemas envolventes, elimina também os fungos endófitos benéficos para a cultura. Além disso, esta prática tem sido associada à emergência de estirpes fúngicas resistentes, tanto a esses fungicidas agrícolas como a antifúngicos utilizados em medicina humana, para tratamento de infeções fúngicas^[6, 17]. O grupo dos azóis é o caso mais preo-

cupante devido à semelhança estrutural e funcional entre os antifúngicos médicos e os fungicidas agrícolas, favorecendo elevados níveis de resistência cruzada^[6, 17].

Desta forma, é crucial investigar e desenvolver alternativas mais sustentáveis para controlar os fungos e micotoxinas nas culturas e nos seus produtos, minimizando os impactos negativos nas saúdes humana, ambiental e dos ecossistemas envolventes^[6, 9]. Algumas estratégias podem incluir: 1) a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e adequadas à cultura em questão; 2) o controlo biológico, nomeadamente utilizando produtos à base de determinadas espécies de bactérias e de outros fungos que competem com *Alternaria* e limitam a sua proliferação, ou extratos e óleos de plantas que inibem o crescimento de *Alternaria*; 3) a utilização de variedades de tomate resistentes a *Alternaria*; 4) a implementação de boas práticas de processamento e armazenamento de tomate fresco e processado; e 5) a monitorização sistemática da presença de *Alternaria* e das suas micotoxinas nos tomateiros, no tomate e nos produtos seus derivados^[6, 9].

De facto, optar por variedades de tomate resistentes ou mais tolerantes às doenças causadas por fungos de solo tem-se mostrado uma prática bastante eficaz na prevenção e controlo de doenças fúngicas. No entanto, estas variedades são o resultado de métodos de melhoramento convencional, por cruzamento seletivo ou hibridação, métodos esses que são demorados, pois a seleção e estabilização das características desejáveis podem levar várias gerações, e estão limitados pela variabilidade genética disponível^[18]. Neste contexto, a engenharia genética surge como uma alternativa mais eficiente e mais precisa para introduzir características desejáveis nas plantas.

As Novas Técnicas Genómicas (NGT), como a edição de genoma por CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*), permitem a modificação de genes específicos sem introduzir ADN externo, o que se traduz numa maior precisão e menor ocorrência de efeitos indesejados. Esta abordagem distingue-se dos tradicionais OGM (organismos geneticamente modificados), mais co-

nhecidos como transgênicos. Dada a importância, a técnica CRISPR foi distinguida com o Prêmio Nobel de Química em 2020, atribuído a Emmanuelle Charpentier e Jennifer Doudna, suas criadoras. Utilizando a técnica CRISPR, será possível, em pouco tempo, criar variedades de tomate efetivamente resistentes a *Alternaria* e à contaminação dos frutos com micotoxinas, mantendo as características de sabor, textura, cor e brix (teor de açúcar) valorizadas pelos consumidores. Além disso, para tornar a resistência mais duradoura, é também possível editar o genoma de uma estirpe de *Alternaria* tornando-a menos patogênica e menos micotoxigêni-

ca. Esta nova estirpe “bio-criada” deverá ter o comportamento de um endófito antagonista do crescimento das estirpes patogênicas e assim atuar como um agente de controle biológico^[19, 20]. Desta forma, altera-se todo o patossistema de forma favorável.

Conclusão

A presença de micotoxinas emergentes produzidas por espécies do gênero *Alternaria*, constitui um problema crescente de segurança alimentar, com implicações na saúde humana, animal e ambiental. A toxicidade destas substâncias obriga a maior vigilância ao longo da cadeia de produção alimentar e

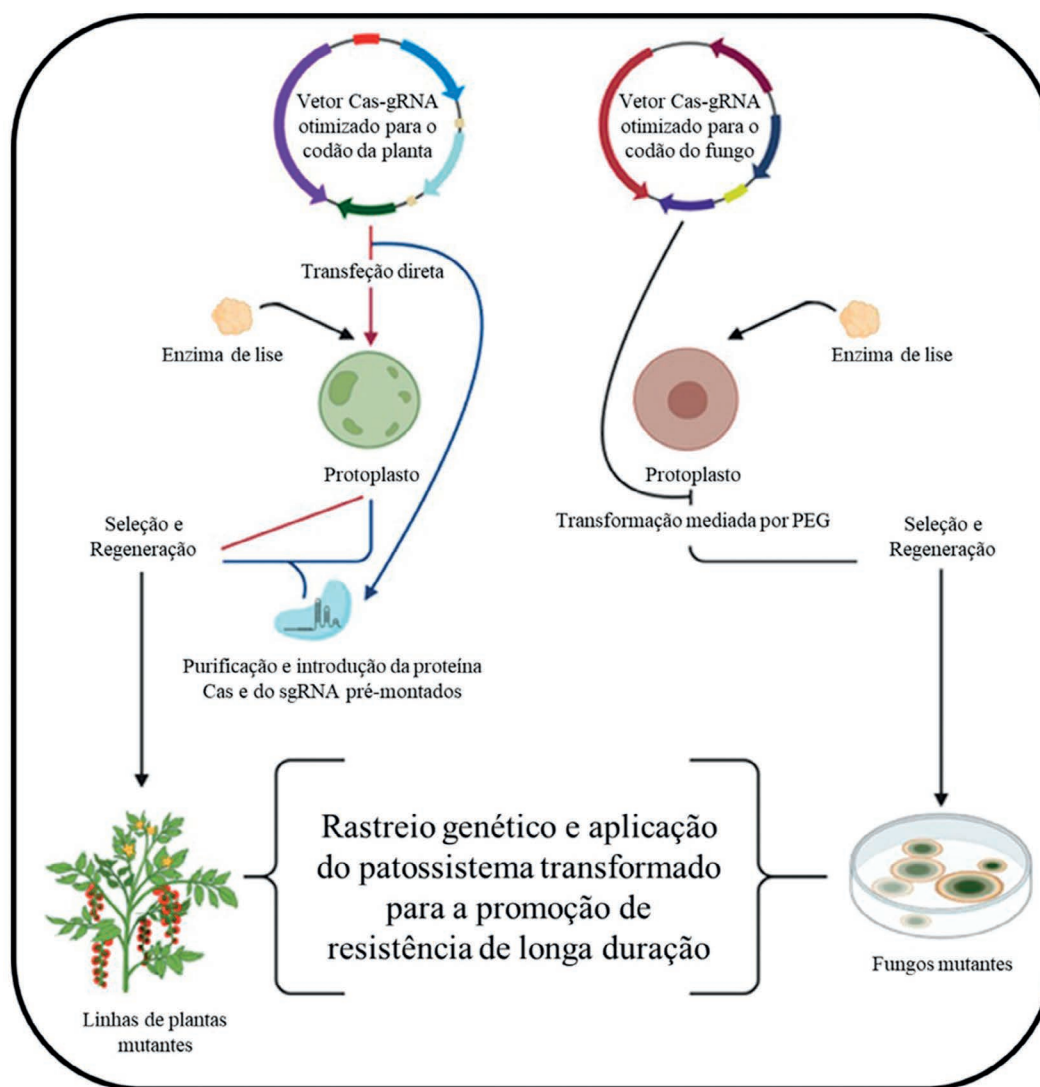


Figura 2 – Esquema explicativo da transformação do patossistema Tomate-*Alternaria* utilizando a técnica CRISPR (adaptado de: Paul et al. (2021). *Front. Plant Sci.*, 12).

justifica uma ação preventiva mais rigorosa. Os métodos de controlo atualmente utilizados, como os fungicidas, apresentam muitas limitações, pelo que é essencial apostar em estratégias mais sustentáveis e eficazes como o controlo biológico e o desenvolvimento de variedades realmente resistentes. As NGT, nomeadamente a edição de genoma por CRISPR, apresentam-se como uma ferramenta promissora para criar novas variedades de tomate, resistentes a *Alternaria* spp. e menos suscetíveis a contaminação por micotoxinas, e novas estirpes de *Alternaria* com comportamento de endófito, ambas para utilização em biocontrolo. Desta forma conseguir-se-á promover a segurança alimentar, a saúde pública e a resiliência dos sistemas agroalimentares. 🍅

Agradecimentos

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto com o identificador DOI <https://doi.org/10.54499/UI/BD/154444/2022>.

Bibliografia

- [1] FAO (2022). *Agricultural Production Statistics 2000–2020*.
- [2] FAOSTAT. Tomatoes.
- [3] Eurostat. *Agricultural Production – Crops*.
- [4] Ma et al. (2023). *Microorganisms*, **11**.
- [5] Peng et al. (2021). *Front. Microbiol.*, **12**.
- [6] Simões et al. (2023). *Encyclopedia*, **3**.
- [7] Daley et al. (2017). *Pharmacognosy: Fundamentals, Applications and Strategy*.
- [8] Simões et al. (2021). *Int. J. Environ. Health Res.*, **31**.
- [9] Zhang et al. (2025). *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **24**.
- [10] Nagda et al. (2024). *Food Control.*, **158**.
- [11] Pinto et al. (2017). *Methods Mol. Biol.*, **1542**.
- [12] EFSA J. (2011). **9**.
- [13] EFSA J. (2016). **14**.
- [14] Bensassi et al. (2015). *Toxicol. Mech. Methods*, **25**.
- [15] Juan-García et al. (2016). *Toxicol. Vitri.*, **34**.
- [16] Balázs et al. (2021). *Int. J. Mol. Sci.*
- [17] Berger et al. (2017). *Front. Microbiol.*, **8**.
- [18] Wolfenbarger et al. (2000). *Science*, **290**.
- [19] Ajilogba et al. (2013). *Stud. Ethno-Medicine*, **7**.
- [20] Carrascal-Hernández et al. (2022). *Agric.*, **12**.



A PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO DOS PROFISSIONAIS DE AGRONEGÓCIOS

ASSINE A VIDA RURAL

Conteúdos exclusivos

Edição impressa e digital

App disponível em IOS ou Android

Leitura online e offline

Acesso a números antigos na App

Acesso a conteúdos premium

Organização de conteúdos por área de interesse

www.vidarural.pt