

METABÓLITOS SECUNDÁRIOS BIOATIVOS DE PLANTAS MEDICINAIS E AROMÁTICAS SOB ESTRESSE: ELICITAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE INGREDIENTES COSMÉTICOS E TERAPÊUTICOS

BIOACTIVE SECONDARY METABOLITES FROM MEDICINAL AND AROMATIC PLANTS UNDER STRESS: ELICITATION AND DEVELOPMENT OF COSMETIC AND THERAPEUTIC INGREDIENTS

METABOLITOS SECUNDARIOS BIOACTIVOS DE PLANTAS MEDICINALES Y AROMÁTICAS BAJO ESTRÉS: ELICITACIÓN Y DESARROLLO DE INGREDIENTES COSMÉTICOS Y TERAPÉUTICOS

Laryssa Andrade da Luz Santos¹
Stephanie Santana Saint Clair Cerqueira²
Sílvia Naiane Figueiredo Cristovam³
René Saint Clair Pimentel de Cerqueira Filho⁴
Suallen Amaral Rocha Machado⁵
Ana Raquel Mendes Batista⁶
Tâmara Maria Souza Santos⁷

RESUMO: Plantas medicinais e aromáticas respondem a condições de estresse, como déficit hídrico, salinidade, radiação ultravioleta, temperaturas extremas, metais e agentes bióticos, reprogramando seu metabolismo especializado e acumulando metabólitos secundários bioativos, como compostos fenólicos, flavonoides, terpenoides e alcaloides. Essa resposta adaptativa, conhecida como elicitação, representa estratégia promissora para a produção de ingredientes naturais com aplicação nas indústrias cosmética e farmacêutica. Esta revisão narrativa sistematiza 52 artigos originais publicados entre 2020 e 2026, selecionados exclusivamente entre estudos experimentais, abordando: (i) as bases metabólicas e moleculares da resposta vegetal ao estresse; (ii) o efeito de diferentes estresses abióticos na acumulação de metabólitos; (iii) a elicitação por fitormônios, polissacarídeos e agentes bióticos, inclusive em culturas *in vitro* e raízes transformadas; (iv) a aplicação de metabolômica, transcriptômica e modelagem preditiva na caracterização desses compostos; e (v) as evidências de segurança e eficácia de extratos e óleos essenciais de plantas estressadas em fotoproteção, atividade antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória, cicatrização de feridas e clareamento cutâneo. O estresse moderado e controlado eleva substancialmente o teor de fenólicos e flavonoides e modifica favoravelmente a composição de óleos essenciais, aumentando a bioatividade dos extratos; contudo, a intensidade e a duração do estresse são fatores críticos, pois estresse severo reduz a biomassa e pode comprometer o rendimento global. Lacunas metodológicas, ausência de padronização de protocolos, necessidade de validação em escala de campo e escassez de ensaios clínicos de fase avançada ainda limitam a translação desses achados para produtos comerciais.

Palavras-chave: Elicitação. Estresse abiótico. Estresse biótico. Compostos fenólicos. Flavonoides. Terpenoides. Alcaloides. Óleos essenciais. Cosméticos. Saúde humana.

¹Engenheira Agrônoma (UFRB), Licenciada em Biologia (UNIFAHE), Graduanda em Farmácia (UNIRB) e Doutora em Fitotecnia pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB).

²Graduanda em Medicina pelo Centro Universitário de Excelência (UNEX) — Feira de Santana.

³Graduanda em Medicina pelo Centro Universitário de Excelência (UNEX) — Feira de Santana.

⁴Graduando em Medicina pelo Centro Universitário de Excelência (UNEX) — Feira de Santana.

⁵Graduanda em Medicina pelo Centro Universitário de Excelência (UNEX) — Feira de Santana.

⁶Graduanda em Medicina pelo Centro Universitário de Excelência (UNEX) — Feira de Santana.

⁷Licenciada em Biologia pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e Especialista em Docência do Ensino Superior pelo Centro Universitário Maria Milza (UNIMAM).

ABSTRACT: Medicinal and aromatic plants respond to stress conditions, including water deficit, salinity, ultraviolet radiation, extreme temperatures, metals, and biotic agents, by reprogramming their specialized metabolism and accumulating bioactive secondary metabolites, such as phenolic compounds, flavonoids, terpenoids, and alkaloids. This adaptive response, known as elicitation, represents a promising strategy for the production of natural ingredients with applications in the cosmetic and pharmaceutical industries. This narrative review systematizes 52 original articles published between 2020 and 2026, selected exclusively from experimental studies with their own methodology, addressing: (i) the metabolic and molecular bases of plant responses to stress; (ii) the effect of different abiotic stresses on metabolite accumulation; (iii) elicitation by phytohormones, polysaccharides, and biotic agents, including *in vitro* cultures and transformed roots; (iv) the application of metabolomics, transcriptomics, and predictive modeling in the characterization of these compounds; and (v) evidence of the safety and efficacy of extracts and essential oils obtained from stressed plants in photoprotection, antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory activities, wound healing, and skin lightening. Moderate and controlled stress can substantially increase the content of phenolics and flavonoids and favorably modify the composition of essential oils, increasing the bioactivity of extracts; however, stress intensity and duration are critical factors, as severe stress reduces biomass and may compromise overall yield. Methodological gaps, protocol standardization, field-scale validation, and advanced-phase clinical trials still limit the translation of these findings into commercial products.

Keywords: Elicitation. Abiotic stress. Biotic stress. Phenolic compounds. Flavonoids. Terpenoids. Alkaloids. Essential oils. Cosmetics. Human health.

2

RESUMEN: Las plantas medicinales y aromáticas responden a condiciones de estrés, como déficit hídrico, salinidad, radiación ultravioleta, temperaturas extremas, metales y agentes bióticos, mediante la reprogramación de su metabolismo especializado y la acumulación de metabolitos secundarios bioactivos, como compuestos fenólicos, flavonoides, terpenoides y alcaloides. Esta respuesta adaptativa, conocida como elicitación, representa una estrategia prometedora para la producción de ingredientes naturales con aplicaciones en las industrias cosmética y farmacéutica. Esta revisión narrativa sistematiza 52 artículos originales publicados entre 2020 y 2026, seleccionados exclusivamente entre estudios experimentales con metodología propia, abordando: (i) las bases metabólicas y moleculares de la respuesta vegetal al estrés; (ii) el efecto de diferentes estreses abióticos sobre la acumulación de metabolitos; (iii) la elicitación mediante fitohormonas, polisacáridos y agentes bióticos, incluidas las culturas *in vitro* y las raíces transformadas; (iv) la aplicación de metabolómica, transcriptómica y modelización predictiva en la caracterización de estos compuestos; y (v) las evidencias de seguridad y eficacia de extractos y aceites esenciales obtenidos de plantas sometidas a estrés en fotoprotección, actividad antioxidante, antimicrobiana y antiinflamatoria, cicatrización de heridas y aclaramiento cutáneo. El estrés moderado y controlado puede aumentar sustancialmente el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides y modificar favorablemente la composición de los aceites esenciales, aumentando la bioactividad de los extractos; sin embargo, la intensidad

y la duración del estrés son factores críticos, ya que el estrés severo reduce la biomasa y puede comprometer el rendimiento global. Las lagunas metodológicas, la estandarización de protocolos, la validación a escala de campo y los ensayos clínicos de fase avanzada todavía limitan la transferencia de estos hallazgos hacia productos comerciales.

Palabras clave: Elicitación. Estrés abiótico. Estrés biótico. Compuestos fenólicos. Flavonoides. Terpenoides. Alcaloides. Aceites esenciales. Cosméticos. Salud humana.

INTRODUÇÃO

As plantas medicinais e aromáticas constituem fonte histórica e insubstituível de substâncias bioativas para as indústrias farmacêutica e dermocosmética. Quando submetidas a condições ambientais adversas, essas espécies ativam redes de sinalização e defesa que culminam no acúmulo de metabólitos secundários, como compostos fenólicos, flavonoides, terpenoides e alcaloides (Chen *et al.*, 2024; Mohagheghian *et al.*, 2025). Tais moléculas desempenham papéis cruciais na sobrevivência da planta e exibem propriedades antioxidantes, antimicrobianas, anti-inflamatórias e fotoprotetoras (Chen *et al.*, 2024; Mohagheghian *et al.*, 2025). O processo biológico pelo qual um estímulo externo, biótico ou abiótico, dispara a biossíntese desses compostos é denominado elicitación, e os agentes indutores envolvidos são chamados elicitores (Khaldari *et al.*, 2025; Kahromi e Khara, 2021).

3

O conhecimento sobre esses metabólitos derivava tradicionalmente da exploração de espécimes silvestres ou de cultivos convencionais. Hoje, sabe-se que o perfil fitoquímico responde intensamente ao ambiente: déficit hídrico, salinidade, radiação UV e oscilações térmicas fundamentam o conceito de elicitación em campo, na qual o estresse é administrado deliberadamente como ferramenta agrônômica para otimizar a matéria-prima (Hosseini e Heidari, 2025; Taheri-Garavand *et al.*, 2024). Em paralelo, o avanço das estratégias *in vitro*, incluindo culturas de células em suspensão, calos e raízes transformadas (hairy roots), permite elicitar o metabolismo sob condições altamente padronizadas, assegurando reprodutibilidade e independência de oscilações sazonais (Rastegarnejad *et al.*, 2024; Rezazadehfar *et al.*, 2024; Dorrazehi *et al.*, 2024).

Essa capacidade de modulação conecta a fisiologia da planta às demandas de mercado: extratos obtidos de matrizes estressadas apresentam concentração de polifenóis e capacidade de varredura de radicais livres muito superiores às de plantas mantidas em cultivo ideal (Farahani *et al.*, 2025; Kamyab *et al.*, 2024; Ye *et al.*, 2025). O estresse funciona como gatilho metabólico de baixo custo que força o vegetal a produzir ativos em níveis inacessíveis ao cultivo normal,

reduzindo a biomassa necessária para extrair concentrações elevadas e agregando valor comercial aos extratos (Ikeda *et al.*, 2025; Muzykiewicz-Szymańska *et al.*, 2024; Mohammed *et al.*, 2022). Neste contexto, este trabalho analisa a elicitación e a produção de metabólitos secundários de plantas medicinais e aromáticas sob estresse, mapeando os mecanismos biossintéticos e moleculares de indução, bem como as evidências de bioatividade em produtos cosméticos e na saúde humana.

MÉTODOS

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de caráter exploratório e descritivo, desenvolvida para analisar a relação entre estresse vegetal, elicitación e produção de metabólitos secundários bioativos em plantas medicinais e aromáticas, considerando o potencial de utilização desses compostos no desenvolvimento de produtos cosméticos e terapêuticos. A busca e a seleção dos estudos foram organizadas segundo as etapas propostas pelo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020, contemplando identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos (Page *et al.*, 2021).

A busca bibliográfica foi realizada nas plataformas Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Frontiers, utilizando descritores e palavras-chave em português e inglês relacionados aos eixos centrais da pesquisa. Os termos foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, de acordo com a especificidade de cada estratégia de busca. Foram utilizados termos relacionados a plantas medicinais e aromáticas, metabólitos secundários, compostos bioativos, estresse vegetal, estresses abióticos e bióticos, elicitación, elicitores, produção de metabólitos, sistemas de cultivo, caracterização metabólica e aplicações cosméticas e terapêuticas.

Entre as combinações empregadas, destacam-se: ("medicinal plants" OR "aromatic plants") AND ("secondary metabolites" OR "bioactive compounds") AND ("elicitation" OR "elicitors"); ("drought stress" OR "water deficit") AND ("aromatic plants" OR "medicinal plants") AND ("essential oil" OR "secondary metabolites"); ("UV-B radiation" OR "ultraviolet radiation") AND ("flavonoids" OR "phenolic compounds") AND ("medicinal plants"); ("salinity stress" OR "salt stress") AND ("phenolic compounds" OR "antioxidant compounds"); ("methyl jasmonate" OR "salicylic acid") AND elicitation AND ("secondary metabolites" OR "bioactive compounds"); ("chitosan" OR "microbial elicitor") AND ("phenolic compounds" OR "secondary metabolites"); ("hairy root culture" OR "cell

suspension culture") AND elicitation AND ("secondary metabolites"); ("plant polyphenols" OR "plant secondary metabolites") AND ("photoprotection" OR "skin"); e ("plant extract" OR "essential oil") AND ("topical" OR "cosmetic") AND ("anti-inflammatory" OR "wound healing"). Foram consideradas publicações científicas disponíveis entre 2020 e 2026, conforme os critérios estabelecidos para a composição do corpus da revisão.

Foram incluídos artigos originais que apresentassem dados experimentais, clínicos ou de desenvolvimento tecnológico próprios, publicados no período estabelecido, e que abordassem a produção de metabólitos secundários por plantas, preferencialmente medicinais e aromáticas, submetidas a estresse biótico ou abiótico, ou a aplicação desses compostos em produtos cosméticos e em saúde humana. Foram excluídos artigos de revisão, revisões sistemáticas, metanálises, capítulos de livros, teses, dissertações, protocolos de ensaio clínico sem resultados, registros duplicados e estudos que não apresentassem relação direta com os eixos temáticos ou não fornecessem informações pertinentes ao objetivo da revisão.

A seleção dos estudos foi realizada de forma sequencial, considerando as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, conforme a estrutura do PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021). Inicialmente, foram reunidos os registros recuperados pelas diferentes combinações de descritores e verificadas possíveis duplicidades. Na etapa de triagem, foram avaliados títulos e resumos, sendo excluídos os estudos incompatíveis com a temática ou com os critérios de seleção. Os trabalhos potencialmente elegíveis foram submetidos à leitura do texto completo, etapa em que foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão. O percurso de seleção resultou na inclusão efetiva de 52 artigos originais.

As informações dos estudos selecionados foram sistematizadas considerando, conforme a disponibilidade nos artigos, a espécie vegetal, condição de estresse, tipo de elicitor ou estratégia de elicitação, condições de aplicação, metabólitos secundários investigados, resposta metabólica observada e potencial de utilização dos compostos em produtos cosméticos e terapêuticos. Essa organização permitiu comparar os estudos quanto às condições utilizadas para indução ou modulação do metabolismo secundário e às respostas observadas nas diferentes espécies vegetais.

A análise foi realizada de forma qualitativa, descritiva e interpretativa, utilizando a análise de conteúdo como procedimento para organização e interpretação do material selecionado (Bardin, 2016). A análise compreendeu as etapas de pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados, inferência e interpretação. Na pré-análise, foi realizada a

organização do corpus e a leitura dos artigos selecionados. Na exploração do material, foram identificadas unidades de conteúdo relacionadas ao estresse vegetal, à elicitación, à produção de metabólitos e às aplicações dos compostos. Posteriormente, os conteúdos foram agrupados por aproximação temática e analisados de maneira integrada.

A análise resultou em cinco eixos temáticos: resposta metabólica ao estresse vegetal; estresses abióticos e produção de metabólitos; elicitación e sistemas de produção; caracterização metabólica e ferramentas ômicas; e aplicações cosméticas e terapêuticas. Essas categorias permitiram organizar os achados segundo a relação entre as condições de estresse, as estratégias de elicitación, as respostas metabólicas observadas, as ferramentas utilizadas para sua caracterização e as possibilidades de aproveitamento dos compostos bioativos no desenvolvimento de produtos cosméticos e terapêuticos.

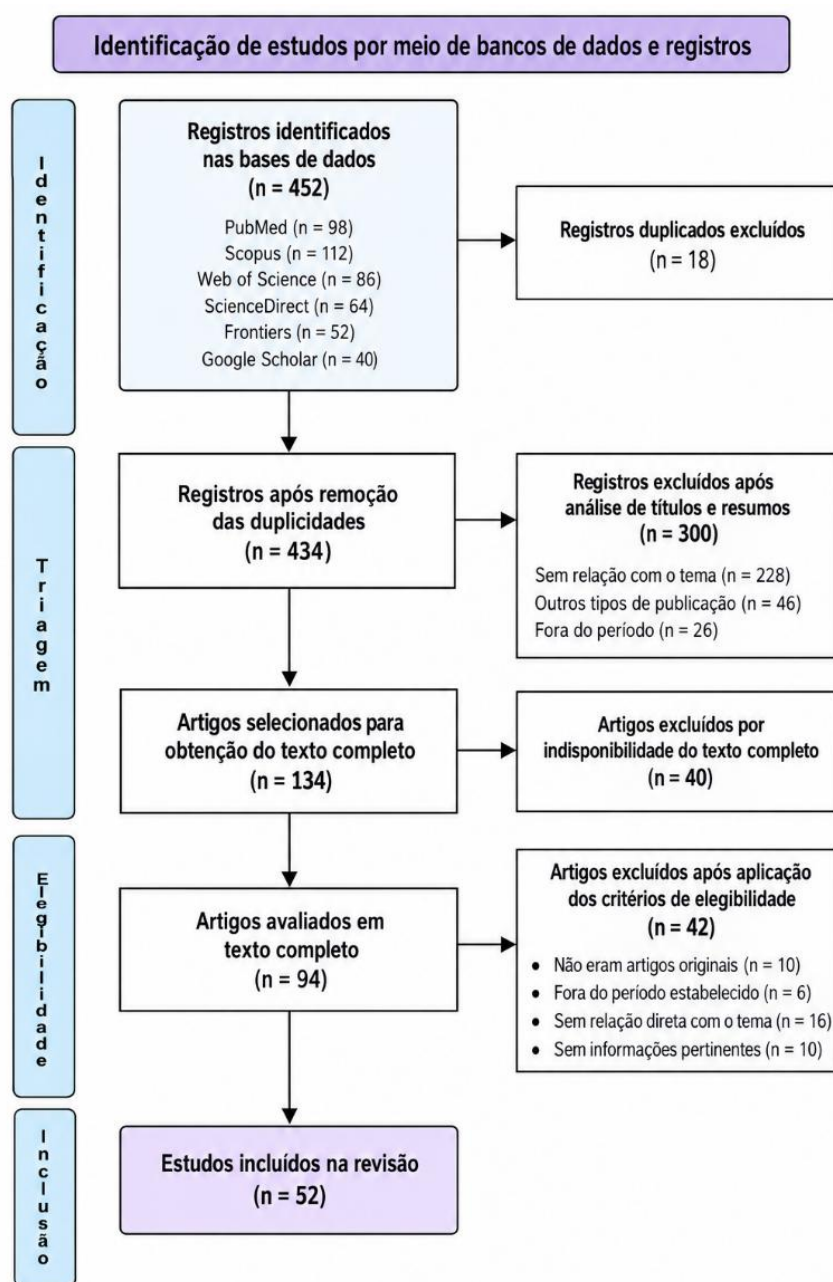
Por se tratar de uma revisão da literatura, baseada exclusivamente em informações provenientes de estudos científicos previamente publicados, não houve participação direta de seres humanos ou animais, coleta de dados primários ou intervenção experimental. Dessa forma, não houve necessidade de submissão do estudo a Comitê de Ética em Pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6

A busca bibliográfica resultou em 452 registros identificados nas bases de dados e plataformas selecionadas. Após a remoção de 18 registros duplicados, permaneceram 434 registros para a etapa de triagem. A análise dos títulos e resumos levou à exclusão de 300 registros que não atendiam aos critérios estabelecidos, sendo 228 por ausência de relação com o tema, 46 por corresponderem a outros tipos de publicação e 26 por estarem fora do período delimitado. Dos 134 artigos selecionados para obtenção do texto completo, 40 foram excluídos em razão da indisponibilidade do texto integral. Assim, 94 artigos foram avaliados quanto à elegibilidade, dos quais 42 não atenderam aos critérios definidos. Ao final do processo, 52 artigos originais foram incluídos na revisão, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão



Fonte: Próprios autores, 2026

Os 52 estudos contemplaram estresses abióticos (déficit hídrico, salinidade, UV-B e variações térmicas), estratégias de eliciação química e biótica, sistemas in vitro (culturas celulares, calos e raízes transformadas) e ferramentas de caracterização metabólica e ômicas. A apresentação foi organizada em cinco eixos: resposta metabólica ao estresse, estresses abióticos, eliciação e sistemas de produção, caracterização metabólica por ferramentas ômicas e aplicações cosméticas e terapêuticas.

Resposta metabólica ao estresse vegetal

As plantas medicinais e aromáticas apresentam elevada plasticidade metabólica, modificando seu metabolismo especializado em resposta ao ambiente por meio de percepção, sinalização intracelular e redirecionamento de recursos para a síntese de compostos protetores (Khaldari *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). O aumento de fenólicos, flavonoides, terpenoides e outros metabólitos resulta da integração entre percepção do estímulo, sinalização molecular, regulação transcricional, atividade enzimática e disponibilidade de precursores. A resposta depende do tipo, intensidade e duração do estímulo, do estágio fisiológico e da capacidade de aclimação, exigindo compreensão das vias biossintéticas e dos mecanismos de sinalização que conectam a percepção do estresse à alteração do metabolismo especializado.

Vias biossintéticas centrais

Os metabólitos de interesse cosmético e terapêutico agrupam-se em três classes principais. Os compostos fenólicos, incluindo ácidos fenólicos, flavonoides, taninos e lignanas, derivam predominantemente da via do chiquimato e da via dos fenilpropanoides, com a fenilalanina amônia-liase (PAL) como principal enzima reguladora (Rahmani e Radjabian, 2024; Shoja *et al.*, 2022). Os terpenoides, incluindo monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos e triterpenos, são sintetizados pela via do mevalonato (MVA), no citosol, e pela via do 2-C-metil-D-eritritol-4-fosfato (MEP), nos plastídios, constituindo os componentes majoritários dos óleos essenciais com amplo interesse tecnológico (Guan *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2025; Wei *et al.*, 2022). Os alcaloides, derivados principalmente de aminoácidos, embora farmacologicamente relevantes, apresentam resposta ao estresse mais espécie-específica.

A regulação do metabolismo fenólico ocorre em múltiplos níveis: a atividade de PAL responde rapidamente a estímulos externos, enquanto genes estruturais das vias biossintéticas, como chalcona sintase, flavonol sintase e glicosiltransferases, são regulados por fatores de transcrição das famílias MYB, bHLH e WRKY (Rahmani e Radjabian, 2024; Shoja *et al.*, 2022). A ramificação da via fenilpropanoide em flavonoides, antocianinas, taninos e lignanas depende também da disponibilidade de precursores, cofatores e sinais hormonais (Liu *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2022). Nas vias isoprenoides, genes das etapas iniciais das vias MEP e MVA, como DXS, DXR, HDS e HDR, constituem pontos críticos de controle, podendo ter sua expressão alterada após aplicação de elicitores, especialmente jasmonatos (Khaldari *et al.*, 2025).

Sinalização hormonal e transdução de sinais

A percepção do estresse inicia uma cascata de sinalização que conecta o estímulo ambiental à reprogramação metabólica. Os principais reguladores são o ácido jasmônico (JA) e seu derivado metilado metil jasmonato (MeJA), o ácido salicílico (SA), o ácido abscísico (ABA) e o etileno, que interagem entre si determinando quais processos serão ativados (Khaldari *et al.*, 2025; Sobhy *et al.*, 2024). O JA/MeJA associam-se fortemente às respostas de defesa, o ABA é central na resposta a déficit hídrico e salinidade, o SA atua sobretudo na defesa contra agentes bióticos e o etileno modula respostas ao estresse, crescimento e senescência (Ghassemi-Golezani e Nikpour-Rashidabad, 2022; Sobhy *et al.*, 2024). A aplicação exógena desses compostos constitui elicitación química: MeJA e SA podem induzir alterações na produção de fenólicos, flavonoides e terpenoides em diferentes espécies medicinais e aromáticas (Attaria *et al.*, 2026; Woch *et al.*, 2023; Zayed *et al.*, 2023). A percepção inicial envolve picos de cálcio citosólico e produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), ativando cascatas de MAPKs e fatores de transcrição que culminam na expressão de genes de biossíntese especializada. Em *Curcuma wenyujin*, *Mentha arvensis* e *Blumea balsamifera*, a aplicação de MeJA alterou a expressão de genes das vias MVA e MEP e elevou a produção de terpenoides (Guan *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2025; Wei *et al.*, 2022).

Estresse oxidativo e sistema antioxidante

A produção de ERO é componente recorrente da resposta vegetal ao estresse. Quando excede a capacidade antioxidante, instala-se o estresse oxidativo, mas, em níveis controlados, essas espécies funcionam como moléculas sinalizadoras ativadoras da aclimação (Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). O sistema antioxidante vegetal combina componentes enzimáticos, como superóxido dismutase, catalase e peroxidases, e não enzimáticos, entre os quais fenólicos e flavonoides, conectando funcionalmente metabolismo secundário e homeostase redox (Ben Romdhane *et al.*, 2022; Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025).

Em cevada submetida à seca e ao calor em campo, o aumento de fenólicos totais esteve associado à atividade de enzimas antioxidantes e à capacidade de sequestro de radicais livres avaliada por DPPH (Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). Há, contudo, um limite fisiológico: estresse leve ou moderado favorece a indução de mecanismos de defesa, enquanto

condições severas ultrapassam a capacidade antioxidante e reduzem crescimento e biomassa (Wanti e Utami, 2025).

Priming e memória de estresse

O priming metabólico corresponde ao estado fisiológico em que uma exposição prévia e moderada condiciona a planta a responder de forma mais rápida e eficiente a um estresse subsequente, constituindo alternativa estratégica para aumentar a resposta do metabolismo especializado sem manter o cultivo sob estresse severo durante todo o ciclo (Laftouhi *et al.*, 2023). Essa memória envolve reprogramação de respostas bioquímicas e moleculares que preparam as vias de síntese para responder com maior velocidade quando o estímulo é reaplicado (Hosseini e Heidari, 2025). Em *Mentha pulegium*, variações climáticas ao longo de quatro safras consecutivas alteraram a proporção dos constituintes dos óleos essenciais e sua capacidade antioxidante, confirmando que a história ambiental gera assinaturas químicas específicas (Laftouhi *et al.*, 2023). Em *Lavandula angustifolia*, estresses prévios em campo modularam genes biossintéticos e alteraram a qualidade e bioatividade do óleo essencial (Hosseini e Heidari, 2025). A padronização dessa estratégia depende, contudo, da definição rigorosa de intensidade do estímulo inicial, intervalo entre aplicações e estágio fenológico ideal (Hosseini e Heidari, 2025; Laftouhi *et al.*, 2023).

10

ELICITAÇÃO ABIÓTICA E ACUMULAÇÃO DE METABÓLITOS

Os estresses abióticos, incluindo déficit hídrico, salinidade, radiação UV-B, temperaturas extremas e determinados estresses químicos, atuam como limitações ao crescimento, mas, em intensidade controlada, funcionam como estímulos capazes de modificar a síntese e o acúmulo de metabólitos especializados via alterações no balanço redox, na sinalização hormonal, na expressão gênica e na atividade de enzimas biossintéticas. As respostas não são uniformes entre espécies: o mesmo estresse pode aumentar determinado grupo de metabólitos em uma espécie e reduzir o crescimento em outra, exigindo análise simultânea de tipo de estresse, intensidade, espécie, sistema de cultivo e desfecho metabólico (Tabela 1).

Tabela 1: Efeito de estresses abióticos sobre a acumulação de metabólitos secundários em plantas medicinais e aromáticas

Estresse	Espécies	Compostos/desfechos	Principais resultados	Estudos
Déficit hídrico	Satureja spp.; Lavandula angustifolia; Mentha longifolia; Mentha piperita	Rendimento e composição de OE; relação água-produtividade	Estresse moderado a severo altera produtividade; biostimulantes atenuam o estresse e elevam OE; restrição hídrica melhora qualidade sem comprometer o óleo	Rezaei-Chiyaneh <i>et al.</i> (2023); Hosseini e Heidari (2025); Singh <i>et al.</i> (2022); Duman e Ödemiş (2026); Taheri-Garavand <i>et al.</i> (2024)
Déficit hídrico	Thymus vulgaris; Melissa officinalis; Withania somnifera; Indigofera stachyodes; Hordeum vulgare	Fenólicos, flavonoides, OE, DPPH, enzimas antioxidantes, transcriptoma e metaboloma	Elevação de fenólicos e flavonoides; flavonoides e ácidos fenólicos entre as classes mais moduladas; cevada silvestre mais responsiva à seca e ao calor combinados	Kamyab <i>et al.</i> (2024); Farahani <i>et al.</i> (2025); Jayathilaka <i>et al.</i> (2025); Ye <i>et al.</i> (2025); Karamzadeh <i>et al.</i> (2025); Mohagheghian <i>et al.</i> (2025)
Salinidade	Rosmarinus officinalis; Ocimum basilicum; Anethum graveolens	Fenóis, flavonoides, OE, enzimas antioxidantes	Fenóis e flavonoides aumentam com a intensidade do estresse; inoculantes microbianos e reguladores de crescimento atenuam danos e modulam composição do OE	Solgi <i>et al.</i> (2025); Hassanzadeh <i>et al.</i> (2026); Ghassemi-Golezani e Nikpour-Rashidabad (2022)
Radiação UV-B	Tetrastigma hemsleyanum; Vaccinium corymbosum; Ginkgo biloba; trigo de grão azul	Flavonoides, genes biossintéticos, transcriptoma	UV-B eleva flavonoides via fotorreceptor UVR8 e módulo transcricional HY5-MYB-FLS; resposta dose-, tempo- e espécie-dependente	Bai <i>et al.</i> (2022); Song <i>et al.</i> (2022); Liu <i>et al.</i> , 2023; Li <i>et al.</i> (2024)
Temperatura baixa	Ocimum basilicum	Fenólicos, fenilpropanoides, expressão gênica	Frio induz rápida reprogramação do metabolismo fenólico de defesa	Rezaie <i>et al.</i> (2020)
Materiais e nanopartículas	Salvia tebesana	Fenóis, flavonoides, atividade de PAL, antioxidante	Nano-TiO ₂ isolado ou combinado a MeJA eleva fenólicos e atividade da PAL e antioxidante	Shoja <i>et al.</i> (2022)
Variação climática multianual	Mentha pulegium	Composição química e antioxidante do OE	Fatores meteorológicos cumulativos alteram composição e potência antioxidante entre safras	Laftouhi <i>et al.</i> (2023)

DÉFICIT HÍDRICO

O déficit hídrico constitui o estresse abiótico mais frequentemente investigado e associa-se a modificações nos fenólicos, flavonoides e óleos essenciais, com resposta vegetal intensificada quando combinada a calor, bioestimulantes ou condicionadores de solo. A redução da disponibilidade de água altera potencial hídrico, abertura estomática, assimilação de carbono e equilíbrio oxidativo, mas em intensidade controlada desencadeia mecanismos de defesa que favorecem o acúmulo de metabólitos. Em *Satureja* spp., estresse moderado e severo modificaram biomassa e rendimento de OE, com atenuação por bioestimulantes (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2023); em *Lavandula angustifolia*, diferentes níveis de déficit alteraram respostas bioquímicas e moleculares e a atividade antibacteriana do OE (Hosseini e Heidari, 2025).

Em *Mentha longifolia*, a seca intermitente modificou o conteúdo de OE e o estado nutricional (Singh *et al.*, 2022), e em *Mentha piperita* níveis moderados de déficit permitiram economizar água sem comprometer a qualidade do óleo (Duman e Ödemiş, 2026). Em *Thymus vulgaris*, a combinação de estresse hídrico e nanopartículas e endófitos elevou fenólicos, flavonoides e OE (Kamyab *et al.*, 2024); em *Melissa officinalis* a associação com nanosilício e polímeros superabsorventes aumentou flavonoides totais (Farahani *et al.*, 2025); e em *Withania somnifera* o ácido salicílico foliar sob seca favoreceu polifenóis e flavonoides (Jayathilaka *et al.*, 2025). Análises integradas de transcriptoma e metaboloma em *Indigofera stachyodes* confirmaram o papel central da via fenilpropanoide, com flavonoides e ácidos fenólicos entre as classes mais moduladas pela seca nas raízes (Ye *et al.*, 2025), e em cevada cultivada e silvestre, especialmente sob combinação de seca e calor, houve maior acúmulo de fenólicos e flavonoides e aumento da capacidade de sequestro de radicais livres (Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). Os resultados não sustentam relação linear entre intensidade e produção: quando o estresse se torna severo, a redução de biomassa supera o ganho de concentração, comprometendo o rendimento global. Modelos preditivos baseados em redes neurais artificiais otimizaram as relações irrigação e qualidade em *Satureja rechingeri* (Taheri-Garavand *et al.*, 2024). Assim, a irrigação deficitária controlada destaca-se como ferramenta eficaz quando aplicada dentro de janela específica de intensidade, duração e equilíbrio entre biomassa e enriquecimento da matéria-prima.

Salinidade

A salinidade combina efeitos osmóticos e iônicos: elevada concentração de sais reduz o potencial hídrico e provoca acúmulo de Na^+ e Cl^- nos tecidos, com repercussões no crescimento, mas também como gatilho de respostas antioxidantes e metabólicas. Em alecrim, teores de fenóis e flavonoides aumentaram com a intensidade do estresse, com tratamentos adjuvantes reduzindo danos e melhorando a qualidade do OE (Solgi *et al.*, 2025); em manjerição, a inoculação com bactérias promotoras de crescimento sob salinidade elevou flavonoides, fenóis e atividade antioxidante, modificando a composição do OE (Hassanzadeh *et al.*, 2026); e em endro, o estresse salino alterou composição do OE e potencial antioxidante, com resposta modulada por reguladores de crescimento (Ghassemi-Golezani e Nikpour-Rashidabad, 2022). A faixa ideal preserva a capacidade de aclimação, mas a interpretação da salinidade como fator promotor deve considerar a tolerância da espécie, tornando a associação entre estresse moderado e estratégias de mitigação uma alternativa viável para aproveitamento de solos salinizados.

Radiação ultravioleta B

A radiação UV-B funciona como sinal ambiental diretamente percebido pelo fotorreceptor UVR8, cuja ativação desencadeia alterações transcricionais na biossíntese de flavonoides e outros compostos fotoprotetores. Em *Tetrastigma hemsleyanum*, diferentes doses e comprimentos de onda modularam seletivamente o acúmulo de flavonoides (Bai *et al.*, 2022); em calos de mirtilo, a exposição ao UV-B induziu vias biossintéticas associadas à sinalização por UVR8 (Song *et al.*, 2022); em *Ginkgo biloba*, o módulo GbHY5-GbMYB1-GbFLS promoveu a biossíntese de flavonoides sob radiação (Liu *et al.*, 2023); e em trigo de grão azul, flavonoides e genes correlatos variaram ao longo do tempo pós-exposição (Li *et al.*, 2024). A resposta ao UV-B depende de dose e tempo: níveis moderados favorecem proteção, enquanto exposições excessivas provocam danos severos; regimes de iluminação controlada em sistemas protegidos permitem maior padronização da exposição.

Temperatura, materiais e estresses combinados

A temperatura interfere na atividade enzimática, na fluidez das membranas e no metabolismo energético: tanto o frio quanto o calor alteram o metabolismo especializado de forma dependente da espécie e da duração da exposição. Em manjerição, o frio elevou fenólicos

totais e modulou genes da via dos fenilpropanoides (Rezaie *et al.*, 2020); e em *Mentha pulegium*, variações climáticas interanuais confirmaram a influência cumulativa dos fatores meteorológicos sobre a composição do OE (Laftouhi *et al.*, 2023). Em *Salvia tebesana*, o nano-TiO₂ isolado ou combinado com MeJA elevou fenólicos, flavonoides e a atividade da PAL (Shoja *et al.*, 2022); e em cevada a combinação de seca e calor promoveu maior acúmulo de fenólicos e flavonoides do que os estresses isolados (Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). Assim, a elicitação abiótica não precisa se limitar a um estímulo único, desde que doses, duração e interações sejam rigorosamente definidas.

O déficit hídrico constitui o estresse abiótico mais frequentemente investigado e associa-se a modificações nos fenólicos, flavonoides e óleos essenciais, com resposta vegetal intensificada quando combinada a calor, bioestimulantes ou condicionadores de solo. A redução da disponibilidade de água altera potencial hídrico, abertura estomática, assimilação de carbono e equilíbrio oxidativo, mas em intensidade controlada desencadeia mecanismos de defesa que favorecem o acúmulo de metabólitos. Em *Satureja* spp., estresse moderado e severo modificaram biomassa e rendimento de OE, com atenuação por bioestimulantes (Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2023); em *Lavandula angustifolia*, diferentes níveis de déficit alteraram respostas bioquímicas e moleculares e a atividade antibacteriana do OE (Hosseini e Heidari, 2025).

14

Em *Mentha longifolia*, a seca intermitente modificou o conteúdo de OE e o estado nutricional (Singh *et al.*, 2022), e em *Mentha piperita* níveis moderados de déficit permitiram economizar água sem comprometer a qualidade do óleo (Duman e Ödemiş, 2026). Em *Thymus vulgaris*, a combinação de estresse hídrico e nanopartículas e endófitos elevou fenólicos, flavonoides e OE (Kamyab *et al.*, 2024); em *Melissa officinalis* a associação com nanosilício e polímeros superabsorventes aumentou flavonoides totais (Farahani *et al.*, 2025); e em *Withania somnifera* o ácido salicílico foliar sob seca favoreceu polifenóis e flavonoides (Jayathilaka *et al.*, 2025).

Análises integradas de transcriptoma e metaboloma em *Indigofera stachyodes* confirmaram o papel central da via fenilpropanoide, com flavonoides e ácidos fenólicos entre as classes mais moduladas pela seca nas raízes (Ye *et al.*, 2025), e em cevada cultivada e silvestre, especialmente sob combinação de seca e calor, houve maior acúmulo de fenólicos e flavonoides e aumento da capacidade de sequestro de radicais livres (Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). Os resultados não sustentam relação linear entre intensidade e produção: quando o estresse se torna severo, a redução de biomassa supera o ganho de concentração, comprometendo

o rendimento global. Modelos preditivos baseados em redes neurais artificiais otimizaram as relações irrigação e qualidade em *Satureja rechingeri* (Taheri-Garavand *et al.*, 2024). Assim, a irrigação deficitária controlada destaca-se como ferramenta eficaz quando aplicada dentro de janela específica de intensidade, duração e equilíbrio entre biomassa e enriquecimento da matéria-prima.

Salinidade

A salinidade combina efeitos osmóticos e iônicos: elevada concentração de sais reduz o potencial hídrico e provoca acúmulo de Na^+ e Cl^- nos tecidos, com repercussões no crescimento, mas também como gatilho de respostas antioxidantes e metabólicas. Em alecrim, teores de fenóis e flavonoides aumentaram com a intensidade do estresse, com tratamentos adjuvantes reduzindo danos e melhorando a qualidade do OE (Solgi *et al.*, 2025); em manjerição, a inoculação com bactérias promotoras de crescimento sob salinidade elevou flavonoides, fenóis e atividade antioxidante, modificando a composição do OE (Hassanzadeh *et al.*, 2026); e em endro, o estresse salino alterou composição do OE e potencial antioxidante, com resposta modulada por reguladores de crescimento (Ghassemi-Golezani e Nikpour-Rashidabad, 2022). A faixa ideal preserva a capacidade de aclimação, mas a interpretação da salinidade como fator promotor deve considerar a tolerância da espécie, tornando a associação entre estresse moderado e estratégias de mitigação uma alternativa viável para aproveitamento de solos salinizados.

15

Radiação ultravioleta B

A radiação UV-B funciona como sinal ambiental diretamente percebido pelo fotorreceptor UVR8, cuja ativação desencadeia alterações transcricionais na biossíntese de flavonoides e outros compostos fotoprotetores. Em *Tetrastigma hemsleyanum*, diferentes doses e comprimentos de onda modularam seletivamente o acúmulo de flavonoides (Bai *et al.*, 2022); em calos de mirtilo, a exposição ao UV-B induziu vias biossintéticas associadas à sinalização por UVR8 (Song *et al.*, 2022); em *Ginkgo biloba*, o módulo GbHY5-GbMYB1-GbFLS promoveu a biossíntese de flavonoides sob radiação (Liu *et al.*, 2023); e em trigo de grão azul, flavonoides e genes correlatos variaram ao longo do tempo pós-exposição (Li *et al.*, 2024). A resposta ao UV-B depende de dose e tempo: níveis moderados favorecem proteção, enquanto exposições

excessivas provocam danos severos; regimes de iluminação controlada em sistemas protegidos permitem maior padronização da exposição.

Temperatura, materiais e estresses combinados

A temperatura interfere na atividade enzimática, na fluidez das membranas e no metabolismo energético: tanto o frio quanto o calor alteram o metabolismo especializado de forma dependente da espécie e da duração da exposição. Em manjerição, o frio elevou fenólicos totais e modulou genes da via dos fenilpropanoides (Rezaie *et al.*, 2020); e em *Mentha pulegium*, variações climáticas interanuais confirmaram a influência cumulativa dos fatores meteorológicos sobre a composição do OE (Laftouhi *et al.*, 2023). Em *Salvia tebesana*, o nano-TiO₂ isolado ou combinado com MeJA elevou fenólicos, flavonoides e a atividade da PAL (Shoja *et al.*, 2022); e em cevada a combinação de seca e calor promoveu maior acúmulo de fenólicos e flavonoides do que os estresses isolados (Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). Assim, a elicitação abiótica não precisa se limitar a um estímulo único, desde que doses, duração e interações sejam rigorosamente definidas.

Elicitação Biótica, Química E Sistemas *in vitro*

16

A elicitação também pode ser desencadeada por estímulos que mimetizam sinais associados às interações biológicas da planta, como patógenos, componentes de parede celular, polissacarídeos, moléculas sinalizadoras e fitormônios, reconhecidos pelos tecidos vegetais e que ativam respostas semelhantes às defesas naturais. A vantagem em relação ao estresse ambiental não controlado é a possibilidade de aplicar o estímulo em concentração conhecida, em momento definido, investigando precisamente relações dose, tempo e resposta. Os sistemas *in vitro* ampliam esse controle, permitindo manipular meio, concentração do elicitor, condições ambientais e período de exposição (Tabela 2).

Tabela 2: Elicitação biótica, química e em sistemas *in vitro* em plantas medicinais e aromáticas.

Elicitor / sistema	Modelos vegetais	Resposta metabólica	Estudos
MeJA e SA	Ocimum basilicum; Phoenix dactylifera; Salvia verticillata; Solanum tuberosum; Givotia moluccana;	Acúmulo de fenólicos, flavonoides, mentol e terpenoides; estresse oxidativo/nitrosativo; regulação de genes MEP e MVA	Attaria <i>et al.</i> (2026); Ben Romdhane <i>et al.</i> (2022); Khaldari <i>et al.</i> (2025); Rahmani e Radjabian (2024); Sobhy <i>et al.</i> (2024);

Elicitor / sistema	Modelos vegetais	Resposta metabólica	Estudos
	Ocimum spp.; Mentha piperita		Woch <i>et al.</i> (2023); Zayed <i>et al.</i> (2023)
Quitosana	Dracocephalum kotschy; Iberis amara; Piper betle var. nigra; Annona cherimola	Elevação de metabólitos secundários, ácidos fenólicos, flavonoides e atividade antioxidante; aumento da absorção de nutrientes	Antolínez-Pérez <i>et al.</i> (2025); Kahromi e Khara (2021); Taghizadeh <i>et al.</i> (2024); Wanti e Utami (2025)
Extrato de levedura; pectina; elicitação combinada	Oryza sativa (arroz Hassawi) em suspensão celular	Produção de polifenóis e aumento da capacidade antioxidante	El-Beltagi <i>et al.</i> (2022)
Elicitação em suspensão celular	Withania coagulans	Aumento de vitanolídeos bioativos e da atividade antioxidante	Dorrazehi <i>et al.</i> (2024)
Raízes transformadas (hairy roots)	Salvia miltiorrhiza; Trigonella foenum-graecum	Elevação de tanshinonas e fenólicos; aumento de sapogeninas esteroidais, com destaque para diosgenina	Rastegarnejad <i>et al.</i> (2024); Rezazadehfar <i>et al.</i> (2024)
Interação com patógenos e metabolômica	Pisum sativum com Aphanomyces euteiches; elicitação por padrões moleculares (PTI)	Alterações em fitoalexinas e biomarcadores de resistência (derivados do ácido cinâmico, flavonoides glicosilados)	Hossain <i>et al.</i> (2024); Muñoz Hoyos <i>et al.</i> (2024)
Elicitação química e terpenos	Curcuma wenyujin; Mentha arvensis; Blumea balsamifera	Regulação transcricional das vias MVA e MEP; aumento de terpenos e L-borneol; resposta dose-dependente	Guan <i>et al.</i> (2024); Huang <i>et al.</i> (2025); Wei <i>et al.</i> (2022)

Fonte: próprios autores, 2026.

Elicitores fitormonais: metil jasmonato e ácido salicílico

O MeJA é um dos elicitores químicos mais investigados por integrar a sinalização central de defesa. Em células meristemáticas cambiais de manjerição, reprogramou o perfil metabólico elevando fenólicos e a atividade antioxidante (Zayed *et al.*, 2023); em Phoenix dactylifera induziu alterações oxidativas e nitrosativas transitórias associadas ao aumento de metabólitos antioxidantes (Ben Romdhane *et al.*, 2022); e em Salvia verticillata a combinação de

nanotubos de carbono com MeJA elevou ácidos fenólicos e modificou fitormônios endógenos (Rahmani e Radjabian, 2024).

Em batata, SA e MeJA elevaram os fenóis totais pré-infecção por *Erwinia carotovora*, modificando a resposta adaptativa (Sobhy *et al.*, 2024); em calos de *Givotia moluccana*, SA e JA aumentaram fenóis totais, flavonoides e parâmetros antioxidantes (Woch *et al.*, 2023); e em *Ocimum spp.*, MeJA e SA elevaram fenólicos e flavonoides (Attaria *et al.*, 2026). O MeJA ganha destaque na síntese de terpenoides: em *Curcuma wenyujin* regulou genes das vias MVA e MEP promovendo síntese de terpenos (Wei *et al.*, 2022); em *Mentha arvensis* elevou a produção de monoterpenoides (Huang *et al.*, 2025); e em *Blumea balsamifera* doses moderadas aumentaram expressão da via MEP e acúmulo de L-borneol (Guan *et al.*, 2024). Logo, a eficácia depende de dose e tempo de exposição, exigindo calibração precisa entre dose, tempo e espécie vegetal.

Polissacarídeos e elicitores de origem biótica

A quitosana, derivada da quitina, é reconhecida pelas plantas como sinal de patógenos potenciais, ativando mecanismos de defesa sem exposição a agente viável e permitindo obter biomassa enriquecida em moléculas bactericidas, fungicidas e antioxidantes antes do processamento industrial (Kahromi e Khara, 2021; Taghizadeh *et al.*, 2024; Wanti e Utami, 2025).

Em *Dracocephalum kotschy*, aplicação foliar elevou ácidos fenólicos e flavonoides antioxidantes e favoreceu a absorção de nutrientes (Kahromi e Khara, 2021); em suspensão celular de *Iberis amara* elevou compostos fenólicos totais (Taghizadeh *et al.*, 2024); em calos de *Piper betle* var. *nigra* aumentou biomassa, flavonoides e capacidade de varredura de radicais livres (Wanti e Utami, 2025); em plântulas de *Annona cherimola*, quitosana associada a SA estimulou metabólitos secundários e enzimas de defesa como peroxidases e PAL (Antolínez-Pérez *et al.*, 2025); e em células de arroz Hassawi, SA, extrato de levedura e pectina elevaram polifenóis e a capacidade antioxidante (El-Beltagi *et al.*, 2022).

Análises metabolômicas em ervilha mostraram que infecção por *Aphanomyces euteiches* altera a síntese de fitoalexinas nas raízes (Hossain *et al.*, 2024), e investigações de PTI identificaram acúmulo de derivados do ácido cinâmico e flavonoides glicosilados com papel no enrijecimento da parede celular (Muñoz Hoyos *et al.*, 2024).

A vantagem central dessas estratégias é ativar vias de defesa por sinais miméticos, com elevada reprodutibilidade experimental.

Sistemas in vitro: culturas celulares, calos e raízes transformadas

Culturas de células, calos e raízes transformadas possibilitam controle direto das condições biossintéticas, com concentrações definidas de elicitor, tempo de exposição preciso e composição de meio controlada.

Em *Withania coagulans*, a elicitação em suspensão celular elevou a produção de vitanolídeos, esteroides naturais com capacidade antioxidante e anti-inflamatória (Dorrazehi *et al.*, 2024); em raízes transformadas de *Salvia miltiorrhiza*, a elicitação elevou a produção de tanshinonas, diterpenos lipofílicos com ação na inibição de processos inflamatórios e no combate ao estresse oxidativo cutâneo (Rastegarnejad *et al.*, 2024); e em *Trigonella foenum-graecum* o processo aumentou a acumulação de sapogeninas esteroidais, com destaque para a diosgenina, precursora de hormônios e compostos dermocosméticos úteis ao estímulo de síntese de colágeno e à manutenção da hidratação da pele (Rezazadehfar *et al.*, 2024).

A comparação entre sistemas indica que culturas celulares oferecem elevado controle experimental e raízes transformadas se destacam na produção de compostos acumulados preferencialmente em tecidos radiculares.

Produtividade, estabilidade genética, idade da cultura, escolha do elicitor e tempo de exposição continuam determinantes da viabilidade econômica (Dorrazehi *et al.*, 2024; Rastegarnejad *et al.*, 2024; Rezazadehfar *et al.*, 2024).

Os sistemas in vitro permanecem como plataformas distintas de produção, indicadas para moléculas de alto valor agregado e para espécies com elevada variação fitoquímica em campo.

Classes De Compostos Induzidas

Diferentes estímulos abióticos e bióticos convergem para um conjunto relativamente recorrente de classes químicas, embora a intensidade e a direção da resposta variem conforme a espécie vegetal (Mohagheghian *et al.*, 2025; Zayed *et al.*, 2023).

Fenólicos e flavonoides surgem como classes predominantes após déficit hídrico, salinidade, UV-B e elicitores químicos, com papel ativo na proteção contra estresse oxidativo, absorção de radiação e imunidade vegetal (Bai *et al.*, 2022; Farahani *et al.*, 2025; Solgi *et al.*, 2025).

Em espécies aromáticas, a indução das vias MVA e MEP altera tanto o rendimento global quanto a proporção de monoterpenos e sesquiterpenos bioativos nos OE, como mentol, carvacrol, timol e L-borneol (Guan *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2025; Khaldari *et al.*, 2025).

Na prática, o estresse agrícola controlado atua como ferramenta de enriquecimento fitoquímico pré-colheita (Tabela 3), permitindo extrair matéria-prima significativamente mais densa em moléculas de interesse e barateando etapas industriais de extração e purificação (Taheri-Garavand *et al.*, 2024; Ikeda *et al.*, 2025; Muzykiewicz-Szymańska *et al.*, 2024).

Não há correspondência única entre tipo de estresse e uma só classe química: o déficit hídrico eleva simultaneamente fenólicos, flavonoides e OE, enquanto a radiação UV-B atua com maior especificidade sobre flavonoides e fotoprotetores, e a elicitação com MeJA e SA modula tanto ácidos fenólicos quanto monoterpenos específicos (Guan *et al.*, 2024; Khaldari *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2023).

O planejamento do estresse deve ser orientado pelo ativo a maximizar: para extratos antioxidantes e fotoprotetores destinados ao mercado dermatológico, déficit hídrico moderado e UV-B; para OE enriquecidos em monoterpenos bioativos, irrigação deficitária e jasmonatos; para moléculas de alto valor em pequena escala, como tanshinonas e sapogeninas, raízes transformadas (Bai *et al.*, 2022; Mohagheghian *et al.*, 2025; Rastegarnejad *et al.*, 2024; Taheri-Garavand *et al.*, 2024).

Tabela 3: Síntese das classes de metabólitos induzidas por tipo de estresse e desfechos bioativos associados.

Estresse / elicitador	Classes e compostos	Espécies representativas	Desfecho e benefício da extração direcionada	Estudos
Déficit hídrico	Ácido rosmarínico, quercetina, rutina, carvacrol, timol, linalol e cânfora	Cevada, tomilho, melissa, Withania, Indigofera, segurelha, lavanda, mentas	Inibição da peroxidação lipídica e degradação de membranas bacterianas; otimiza extratos estáveis para preservação natural e proteção cutânea	Farahani <i>et al.</i> (2025); Hosseini e Heidari (2025); Jayathilaka <i>et al.</i> (2025); Kamyab <i>et al.</i> (2024); Mohagheghian <i>et al.</i> (2025); Rezaei-Chiyaneh <i>et al.</i> (2023); Singh <i>et al.</i> (2022); Ye <i>et al.</i> (2025)
Salinidade	Ácido carnosósico, carnosol, flavonoides glicosilados e monoterpenos	Alecrim, manjeriço, endro	Antioxidantes lipofílicos e hidrofílicos que neutralizam ERO; enriquece matrizes para dermocosméticos	Ghassemi-Golezani e Nikpour-Rashidabad (2022); Hassanzadeh <i>et al.</i> (2026); Solgi <i>et al.</i> (2025)

Estresse / elicitador	Classes e compostos	Espécies representativas	Desfecho e benefício da extração direcionada	Estudos
Radiação UV- B	Flavonoides monoméricos, antocianinas, biflavonoides e caempferol	Tetrastigma, mirtilo, Ginkgo, trigo de grão azul	Acúmulo de fotoprotetores cromóforos e varredores de radicais UV- induzidos; filtros solares e pós-sol botânicos	Bai <i>et al.</i> (2022); Li <i>et al.</i> (2024); Liu <i>et al.</i> (2023); Song <i>et al.</i> (2022)
Baixa temperatura	Ácido rosmarínico e fenilpropanoides totais	Manjeriçã	Aclimação redox com rápida elevação da varredura de radicais livres em processos inflamatórios	Rezaie <i>et al.</i> (2020)
MeJA e SA	Mentol, L-borneol, curcumeno, tanshinonas e ácidos fenólicos	Manjeriçã, Phoenix, Salvia, M. arvensis, Curcuma, Blumea, batata, Givotia, M. piperita	Indução transcricional das vias MVA/MEP; otimiza o isolamento de terpenos puros para o setor farmacêutico e cosmético	Attaria <i>et al.</i> (2026); Ben Romdhane <i>et al.</i> (2022); Guan <i>et al.</i> (2024); Huang <i>et al.</i> (2025); Khaldari <i>et al.</i> (2025); Rahmani e Radjabian (2024); Sobhy <i>et al.</i> (2024); Wei <i>et al.</i> (2022); Woch <i>et al.</i> (2023); Zayed <i>et al.</i> (2023)
Quitosana e elicitación biótica	Polifenóis totais, flavonoides e fitoalexinas	Dracocephalum, Iberis, Piper betle, Annona	Mimetização de ataque por patógenos; extratos com elevada capacidade bactericida e fungicida para higiene corporal	Antolínez-Pérez <i>et al.</i> (2025); Kahromi e Khara (2021); Taghizadeh <i>et al.</i> (2024); Wanti e Utami (2025)
Sistemas in vitro e hairy roots	Tanshinona IIA, criptotanshinona, diosgenina, trigonelina e compostos fenólicos	Salvia miltiorrhiza, Trigonella, Withania, arroz Hassawi	Síntese contínua em biorreatores de metabólitos de alto valor comercial para a indústria farmacêutica	Dorrazehi <i>et al.</i> (2024); El-Beltagi <i>et al.</i> (2022); Rastegarnejad <i>et al.</i> (2024); Rezazadehfar <i>et al.</i> (2024)
Nanopartículas	Fenóis e flavonoides totais via ativação da PAL	Salvia tebesana	Estímulo à rota dos fenilpropanoides para extratos	Shoja <i>et al.</i> (2022)

Estresse / elicitador	Classes e compostos	Espécies representativas	Desfecho e benefício da extração direcionada	Estudos
			antioxidantes de alta performance	

Fonte: próprios autores, 2026.

APLICAÇÕES EM COSMÉTICOS

A utilização industrial de plantas medicinais e aromáticas submetidas a estresse fundamenta-se nas propriedades biológicas dos metabólitos acumulados e na sua viabilidade de incorporação em produtos cosméticos. Compostos fenólicos, flavonoides e terpenoides atuam em frentes complementares na fisiologia cutânea, da varredura de radicais livres e absorção de UV ao controle microbiológico e à inibição de cascatas inflamatórias; o manejo agrônômico por estresse induz o acúmulo desses ativos na biomassa vegetal, garantindo extratos enriquecidos antes do processamento industrial (Tabela 4).

A principal linha de defesa oferecida por esses extratos eliciados reside na capacidade antioxidante e fotoprotetora dos fenólicos acumulados sob estresse. A elevação de ácido rosmarínico e quercetina sob déficit hídrico correlaciona-se com maior sequestro de radicais livres, neutralizando as ERO geradas pela radiação solar e pela poluição que degradam o colágeno cutâneo (Farahani *et al.*, 2025; Karamzadeh *et al.*, 2025; Mohagheghian *et al.*, 2025). Em extratos ricos em polifenóis, como o de romã, essa fotoproteção traduz-se em absorção de UV e inibição de mediadores do fotoenvelhecimento, fornecendo base fitoquímica para protetores solares, sérums antioxidantes e formulações pós-sol (Ikeda *et al.*, 2025). Paralelamente, o estresse abiótico e a aplicação de SA estimulam a via dos fenilpropanoides, acumulando flavonoides monoméricos e ácidos hidroxicinâmicos que atuam como inibidores da tirosinase, bloqueando competitivamente a conversão de DOPA em melanina e modulando hiperpigmentações (Lim *et al.*, 2021; Ye *et al.*, 2025).

Os terpenoides oxigenados induzidos pelo estresse acrescentam valor à higiene da pele por ação antimicrobiana: timol, carvacrol, linalol e eucalyptol promovem ruptura da membrana celular de fungos e bactérias oportunistas, funcionando como antissépticos e conservantes botânicos (Filatov *et al.*, 2022; Muzykiewicz-Szymańska *et al.*, 2024); em *Lavandula angustifolia*

sob déficit hídrico, a proporção de linalol e acetato de linalila no OE altera-se, otimizando a inibição contra patógenos da pele (Hosseini e Heidari, 2025).

Por fim, a modulação dos OE pelo estresse estende-se ao controle de processos inflamatórios cutâneos: monoterpenos como alfa-bisabolol, camazuleno, geraniol e citral inibem citocinas pró-inflamatórias e bloqueiam as cascatas p38MAPK e PI3K/Akt/mTOR, atenuando dor e edema sem os efeitos colaterais de corticoides sintéticos (Bhatt *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2024; El-Otmani *et al.*, 2024); como déficit hídrico, salinidade e elicitação por jasmonatos concentram esses monoterpenoides em lavanda, segurelha e hortelã, o estresse agrícola controlado eleva a eficácia de cosméticos para peles sensíveis e inflamadas (Duman e Ödemiş, 2026; Hosseini e Heidari, 2025; Laftouhi *et al.*, 2023; Rezaei-Chiyaneh *et al.*, 2023).

Tabela 4: Atividade de extratos e óleos essenciais de plantas eliciadas em aplicações cosméticas.

Aplicação cosmética	Material vegetal e compostos majoritários	Modelo experimental	Mecanismo de ação e benefício industrial	Estudos
Fotoproteção, antioxidante e anti-inflamatório	Extrato envelhecido de romã (<i>Punica granatum</i>), punicalaginas, ácido elágico e antocianinas	Ensaio in vitro, in vivo e estudo clínico	Atenuação do fotoenvelhecimento: redução de ERO e inibição da degradação do colágeno UV induzida; base para protetores solares e pós-sol botânicos	Ikeda <i>et al.</i> (2025)
Antioxidante e permeação cutânea	Extratos e OE de <i>Sanguisorba officinalis</i> , ácido rosmarínico e monoterpenos	Ensaio químico, antibacteriano e permeação ex vivo	Elevada varredura celular aliada à permeação na barreira cutânea; sérums antiatrito e cremes antienvelhecimento	Muzykiewicz-Szymańska <i>et al.</i> (2024)
Higiene da pele (antimicrobiano)	Fitocomplexo vegetal com OE rico em timol, carvacrol e cineol	In vitro e in vivo	Inativação de patógenos cutâneos oportunistas; antisséptico e conservante natural em sabonetes e géis	Filatov <i>et al.</i> (2022)
Clareamento e pigmentação	Extratos de plantas costeiras com flavonoides	Inibição enzimática in vitro	Bloqueio direto da tirosinase na conversão de DOPA em	Lim <i>et al.</i> (2021)

	glicosilados e derivados fenólicos		melanina; formulações despigmentantes	
Anti-inflamatório tópico	OE de camomila (<i>Matricaria chamomilla</i>), alfa-bisabolol e camazuleno	Modelo murino de inflamação psoriasiforme	Bloqueio de PI3K/Akt/mTOR e p38MAPK; redução de eritema e descamação; peles sensíveis e dermatoses	Chen <i>et al.</i> (2024)
Anti-inflamatório e analgésico tópico	OE floral de <i>Pelargonium graveolens</i> , citrionelol e geraniol	Modelo in vivo de edema de pata	Redução do extravasamento vascular e do edema tópico; cremes calmantes e pós-procedimentos	El-Otmani <i>et al.</i> (2024)
Anti-inflamatório cutâneo	OE de <i>Cymbopogon distans</i> , monoterpenoides acíclicos, citral e geraniol	Modelos de inflamação da pele	Inibição de citocinas pró-inflamatórias sem dermatite de contato; dermocosméticos calmantes	Bhatt <i>et al.</i> (2024)
Qualidade da matéria-prima	Lavanda, segurelha, hortelã, endro e <i>M. pulegium</i> , linalol, carvacrol, mentol e pulegona	Estudos de campo sob estresse	O estresse abiótico ajusta a proporção de constituintes ativos, elevando a potência bioativa do OE bruto antes da extração	Duman e Ödemiş (2026); Ghassemi-Golezani e Nikpour-Rashidabad (2022); Hosseini e Heidari (2025); Laftouhi <i>et al.</i> (2023); Rezaei-Chiyaneh <i>et al.</i> (2023)

Fonte: próprios autores, 2026.

Aplicações Em Saúde Humana

Os mesmos metabólitos modulados pelo estresse vegetal apresentam aplicações terapêuticas promissoras como agentes cicatrizantes, anti-inflamatórios, fotoprotetores e antimicrobianos; o direcionamento do metabolismo secundário permite obter extratos enriquecidos em fitoquímicos de alto valor farmacológico, mas a validação exige diferenciar o potencial demonstrado em modelos pré-clínicos da comprovação de eficácia e segurança em ensaios clínicos (Tabela 5).

A cicatrização de feridas e queimaduras é a aplicação com maior densidade de evidências pré-clínicas: monoterpenos oxigenados como 1,8-cineol e timoquinona aceleram proliferação celular, migração de fibroblastos e deposição de colágeno, atuando na remoção de ERO e na

inibição de mediadores inflamatórios em modelos animais, incluindo animais diabéticos (Alsarayreh *et al.*, 2022; Erdoğan *et al.*, 2023; Mohammed *et al.*, 2022; Upadhyay *et al.*, 2021).

Esses mecanismos desdobram-se na atenuação de dermatoses inflamatórias crônicas como a psoríase: o OE de camomila, rico em alfa-bisabolol, atua no bloqueio das vias PI3K/Akt/mTOR e p38MAPK, suprimindo recrutamento leucocitário, eritema e hiperplasia epidérmica (Chen *et al.*, 2024); e geraniol, citronelol e citral em OE de *Pelargonium graveolens* e *Cymbopogon distans* promovem analgesia e redução de edema por inibição das vias nociceptivas periféricas (Bhatt *et al.*, 2024; El-Otmani *et al.*, 2024).

Em infecções superficiais, o enriquecimento em taninos e monoterpenos garante ação bactericida contra patógenos oportunistas da pele, com permeação *ex vivo* confirmada pelo estrato córneo (Filatov *et al.*, 2022; Muzykiewicz-Szymańska *et al.*, 2024), e a elicitación hídrica em *Lavandula angustifolia* comprovou a modulação da composição do OE com aumento da bioatividade antimicrobiana (Hosseini e Heidari, 2025).

Apesar desse volume pré-clínico, o gargalo translacional persiste: a demonstração clínica de que o extrato de romã rico em polifenóis reduz danos UV na pele humana ilustra o nível de evidência necessário (Ikeda *et al.*, 2025). É fundamental diferenciar a constatação de que um polifenol isolado possui atividade biológica da comprovação de que o extrato de planta estressada é efetivamente mais eficaz e seguro para uso humano.

Tabela 5: Atividade de extratos e óleos essenciais de plantas em saúde humana.

Aplicação terapêutica	Material vegetal e compostos	Modelo experimental	Mecanismo de ação e benefício na saúde	Estudos
Cicatrização de queimaduras	Pomada de 1,8-cineol (eucaliptol) e extrato aquoso de <i>Roylea elegans</i>	Queimadura térmica em ratos Wistar	Reparação tecidual e ação antioxidante: reepitelização acelerada e inibição da peroxidação lipídica, reduzindo o tempo de reestruturação cutânea	Mohammed <i>et al.</i> (2022); Upadhyay <i>et al.</i> (2021)
Cicatrização de feridas e diabetes	Óleo de <i>Nigella sativa</i> (timoquinona) e extratos metanólicos	Defeitos cutâneos em ratos normais e diabéticos	Remodelação tecidual e analgesia: estímulo à proliferação de fibroblastos e deposição de colágeno sob estresse metabólico	Alsarayreh <i>et al.</i> (2022); Erdoğan <i>et al.</i> (2023)
Inflamação psoríaseforme	OE de camomila (<i>Matricaria chamomilla</i>), alfa-bisabolol	Modelo murino de dermatite psoríaseforme (IMQ)	Bloqueio de PI3K/Akt/mTOR e p38MAPK; redução de hiperplasia epidérmica e eritema	Chen <i>et al.</i> (2024)
Dor e inflamação cutânea	OE de <i>Pelargonium graveolens</i>	Edema de pata e inflamação	Redução do extravasamento plasmático e inibição de	Bhatt <i>et al.</i> (2024); El-Otmani <i>et al.</i> (2024)

	<i>Cymbopogon distans</i>	cutânea em roedores	mediadores nociceptivos locais	
Infecções superficiais	Fitocomplexo vegetal e extratos de <i>Sanguisorba officinalis</i> , taninos e monoterpenos	In vitro, in vivo e permeação ex vivo	Inativação de patógenos com travessia efetiva do estrato córneo para tratamento tópico	Filatov <i>et al.</i> (2022); Muzykiewicz-Szymańska <i>et al.</i> (2024)
Antibacteriano induzido por estresse	OE de <i>Lavandula angustifolia</i> sob déficit hídrico	Ensaios de sensibilidade microbiana	Modulação hídrica eleva proporção de constituintes bactericidas antes da extração	Hosseini e Heidari (2025)
Fotoproteção humana	Extrato de romã (<i>Punica granatum</i>), punicalaginas e ácido elágico	Ensaio clínico controlado em humanos	Neutralização de radicais UV induzidos e redução de eritema solar em voluntários humanos	Ikeda <i>et al.</i> (2025)

Fonte: próprios autores, 2026.

Lacunas, Desafios e Perspectivas

O principal desafio da elicitação vegetal está na natureza não linear das respostas metabólicas. Enquanto estímulos moderados favorecem a aclimação e a produção de metabólitos especializados, intensidades excessivas podem comprometer o crescimento, a integridade fisiológica e o rendimento de biomassa. Assim, a otimização das condições de elicitação, considerando intensidade, duração e estágio fenológico, constitui requisito para conciliar enriquecimento fitoquímico e produtividade.

A transposição dos resultados laboratoriais para sistemas produtivos permanece limitada pela heterogeneidade dos protocolos de elicitação, concentrações, métodos de aplicação e técnicas analíticas, além da influência das condições microclimáticas sobre a composição fitoquímica entre safras. Sistemas in vitro e culturas de raízes transformadas oferecem maior controle experimental, mas enfrentam limitações relacionadas aos custos de biorreatores, à estabilidade genética e ao rendimento volumétrico.

A integração de abordagens ômicas, modelagem matemática e inteligência artificial representa uma perspectiva para superar essas limitações. Dados transcriptômicos e metabolômicos permitem identificar vias biossintéticas responsivas aos estímulos, enquanto modelos preditivos podem auxiliar na definição de condições de cultivo, exposição e colheita, favorecendo a precisão e a reprodutibilidade dos processos.

Entre as estratégias agronômicas, destacam-se a irrigação deficitária e a combinação de elicitores, cuja aplicação requer validação em campo, definição de parâmetros operacionais e

análise de viabilidade econômica. Nas aplicações cosméticas e farmacêuticas, a caracterização química, a segurança toxicológica, incluindo fototoxicidade, sensibilização e exposição repetida, e a realização de estudos clínicos padronizados são fundamentais para assegurar qualidade, eficácia e conformidade regulatória.

Portanto, a consolidação da elicitação vegetal como estratégia produtiva depende da integração entre fisiologia vegetal, química analítica, bioprocessos, toxicologia e tecnologia de formulações, de modo a converter respostas metabólicas induzidas por estresse em processos padronizados, economicamente viáveis e capazes de gerar produtos cosméticos e farmacêuticos seguros e eficazes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo do estresse abiótico, químico ou biótico altera o perfil metabólico de plantas medicinais e aromáticas, elevando a concentração de compostos fenólicos, flavonoides e terpenoides na matéria-prima, e otimiza a obtenção de extratos com propriedades antioxidantes, fotoprotetoras, antimicrobianas, anti-inflamatórias e cicatrizantes, fornecendo base técnica para o adensamento de ativos de interesse sem necessidade de modificação genética. Essa elevação do teor por unidade de biomassa representa oportunidade concreta de ganhos de rendimento no processo de extração industrial.

27

A transferência desses achados para a cadeia produtiva exige superar gargalos metodológicos e fisiológicos: a resposta da planta ao estresse não é linear, pois a indução ocorre dentro de janela estreita de intensidade e duração, além da qual o dano celular e a redução de biomassa superam os ganhos de concentração, comprometendo a produtividade global por área.

Soma-se a isso a variabilidade fitoquímica entre safras induzida por fatores microclimáticos em campo, a heterogeneidade dos protocolos de elicitação e a escassez de dados clínicos e de segurança dermatológica. Para que o estresse induzido se consolide como ferramenta agrônoma confiável, o setor depende de avanços na padronização de parâmetros operacionais, integração de ferramentas analíticas para identificação de marcadores químicos, modelagem preditiva, irrigação deficitária controlada e priming fitoquímico, conferindo reprodutibilidade ao cultivo.

Suplantadas essas limitações pela validação em escala agrícola e pela realização de ensaios toxicológicos e clínicos, o manejo do estresse vegetal passa a integrar a rotina de

produção de matérias-primas de forma viável, padronizada e segura, impulsionando a inovação em formulações cosméticas e em abordagens voltadas à saúde humana.

REFERÊNCIAS

ALSARAYREH AZ, *et al.* Efficacy of methanolic extracts of some medicinal plants on wound healing in diabetic rats. *Revista Heliyon*, 2022; 8: e09459.

ANTOLÍNEZ-PÉREZ MF, *et al.* Induction of bioactive secondary metabolites in *Annona cherimola* Mill. (chirimoya) seedlings using chitosan and salicylic acid as elicitors. *Plant-Environment Interactions*, 2025; DOI: 10.1002/peij.70075.

ATTARIA M, UMAIR M, SAJID ZA. Enhancing phytochemical production in *Ocimum* species using methyl jasmonate and salicylic acid as elicitors. *Plant Research Journal*, 2026.

BAI Y, *et al.* Flavonoids metabolism and physiological response to ultraviolet treatments in *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg. *Frontiers in Plant Science*, 2022; 13: 926197.

BEN ROMDHANE A, *et al.* Methyl jasmonate induces oxidative/nitrosative stress and the accumulation of antioxidant metabolites in *Phoenix dactylifera* L. *Biotechnology Letters*, 2022; 44: 1363–1372.

BHATT D, *et al.* Acyclic monoterpenoid-rich essential oil of *Cymbopogon distans* mitigates skin inflammation: a chemico-pharmacological study. *Inflammopharmacology*, 2024; 32: 1187–1203.

CHEN G, *et al.* Essential oil of *Matricaria chamomilla* alleviates psoriatic-like skin inflammation by inhibiting PI3K/Akt/mTOR and p38MAPK signaling pathway. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 2024; 17: 1661–1674.

DORRAZEHI M, *et al.* Elicitation improves the production of bioactive compounds and antioxidant activity in cell suspension culture of *Withania coagulans* (Stocks) Dunal. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2024; 71: 76.

DUMAN İ, ÖDEMIŞ B. Impact of water stress on water-yield relations, oil yield and essential oil quality of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2026.

EL-BELTAGI HS, *et al.* Production and antioxidant activity of secondary metabolites in Hassawi rice (*Oryza sativa* L.) cell suspension under salicylic acid, yeast extract, and pectin elicitation. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 2022; 58: 615–629.

EL-OTMANI N, *et al.* Topical efficacy of *Pelargonium graveolens* flower essential oil: antimicrobial, antioxidant, enzyme inhibition and in vivo topical analgesic and anti-inflammatory efficacy as treatment for skin alterations. *F1000Research*, 2024; 13: 1366.

ERDOĞAN Ü, ÖZMEN Ö, ÖZER M. Wound healing, anti-analgesic, and antioxidant activity of *Nigella sativa* Linn. essential based topical formulations in rat model experimental skin defects. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2023; 26(1): 119–132.

FARAHANI F, SHAHHOSEINI R, HATAMI M. Phytochemical, physiological and morphological response of industrial-medicinal plant *Melissa officinalis* L. to drought stress, nanosilicon and superabsorbent polymer. *BMC Plant Biology*, 2025; 25: 142.

FILATOV VA, KULYAK OY, KALENIKOVA EI. In vitro and in vivo antimicrobial activity of an active plant-based quadrocomplex for skin hygiene. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 2022; 10(5): 905–921.

GHASSEMI-GOLEZANI K, NIKPOUR-RASHIDABAD N. Application of growth promoting hormones alters the composition and antioxidant potential of dill essential oil under salt stress. *Scientific Reports*, 2022; 12: 14349.

GUAN L, *et al.* Transcriptome analysis revealed the role of moderate exogenous methyl jasmonate treatments in enhancing the metabolic pathway of L-borneol in *Blumea balsamifera*. *Frontiers in Plant Science*, 2024; 15: 1391042.

HASSANZADEH Z, *et al.* Plant growth-promoting microorganisms enhance biochemical traits, essential oil composition, and antioxidant defense in basil under salt stress. *Scientific Reports*, 2026; 16.

HOSSAIN Z, *et al.* Deciphering *Aphanomyces euteiches*-pea-biocontrol bacterium interactions through untargeted metabolomics. *Scientific Reports*, 2024; 14: 15823.

HOSSEINI R, HEIDARI M. Impact of drought stress on biochemical and molecular responses in lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.): effects on essential oil composition and antibacterial activity. *Frontiers in Plant Science*, 2025; 16: 1506660.

HUANG T, *et al.* Transcriptome analysis reveals regulatory mechanism of methyl jasmonate-induced monoterpenoid biosynthesis in *Mentha arvensis* L. *Frontiers in Plant Science*, 2025; 15: 1517851.

IKEDA Y, *et al.* Photoprotective, antioxidant and anti-inflammatory effects of aged *Punica granatum* extract: in vitro and in vivo insights. *Food Science & Nutrition*, 2025; 13: e70631.

JAYATHILAKA MS, *et al.* Growth and polyphenol content of ashwagandha (*Withania somnifera* L. Dunal) under combined drought stress and salicylic acid treatment. *Discover Plants*, 2025; 2.

KAHROMI S, KHARA J. Chitosan stimulates secondary metabolite production and nutrient uptake in medicinal plant *Dracocephalum kotschyi*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021; 101(7): 2910–2917.

KAMYAB A, *et al.* Boosting drought resistance in thyme (*Thymus vulgaris* L.) by elevating levels of phenolic compounds, flavonoids, and essential oils via nanoparticles and endophytes. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2024; 11.

KARAMZADEH F, ARZANI A, SAEIDI G. Contribution of phenolic compounds and hormones in antioxidant defense responses of wild and cultivated barley genotypes under drought and heat stress. *Scientific Reports*, 2025; 15.

KHALDARI I, AFSHOON E, NIK SH. Phytohormonal elicitation triggers oxidative stress and enhances menthol biosynthesis through modulation of key pathway genes in *Mentha piperita* L. *Scientific Reports*, 2025; 15.

LAFTOUHI A, *et al.* Impact of climate change on the chemical compositions and antioxidant activity of *Mentha pulegium* L. *ACS Omega*, 2023; 8(49): 46598–46613.

LI L, *et al.* UV-B induced flavonoid accumulation and related gene expression in blue-grained wheat at different periods of time. *Frontiers in Plant Science*, 2024; 15: 1520543.

LIM WY, CHAN EWC, PHAN CW. Tyrosinase inhibiting extracts from coastal plants as potential additives in skin whitening formulations. *Current Applied Science and Technology*, 2021; 21(3): 433–443.

LIU S, *et al.* UV-B promotes flavonoid biosynthesis in *Ginkgo biloba* by inducing the GbHY5-GbMYB1-GbFLS module. *Horticulture Research*, 2023; 10: uhad118.

MOHAGHEGHIAN B, SAEIDI G, ARZANI A. Phenolic compounds, antioxidant enzymes, and oxidative stress in barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes under field drought-stress conditions. *BMC Plant Biology*, 2025; 25.

MOHAMMED HA, *et al.* Topical eucalyptol ointment accelerates wound healing and exerts antioxidant and anti-inflammatory effects in rats' skin burn model. *Journal of Oleo Science*, 2022; 71(12): 1771–1783.

MUÑOZ HOYOS L, *et al.* Untargeted metabolomics reveals PTI-associated metabolites. *Plant, Cell & Environment*, 2024; 47: 1513–1528.

30

MUZYKIEWICZ-SZYMAŃSKA A, *et al.* *Sanguisorba officinalis* L. ethanolic extracts and essential oil — chemical composition, antioxidant potential, antibacterial activity, and ex vivo skin permeation study. *Frontiers in Pharmacology*, 2024; 15: 1390551.

PAGE MJ, *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 2021; 372: n71.

RAHMANI N, RADJABIAN T. Integrative effects of phytohormones in the phenolic acids production in *Salvia verticillata* L. under multi-walled carbon nanotubes and methyl jasmonate elicitation. *BMC Plant Biology*, 2024; 24.

RASTEGARNEJAD F, MIRJALILI MH, BAKHTIAR Z. Enhanced production of tanshinone and phenolic compounds in hairy roots culture of *Salvia miltiorrhiza* Bunge by elicitation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2024; 156.

REZAEI-CHIYANEH E, *et al.* Biostimulants alleviate water deficit stress and enhance essential oil productivity: a case study with savory. *Scientific Reports*, 2023; 13: 720.

REZAIE R, ABDOLLAHI MANDOULAKANI B, FATTAHI M. Cold stress changes antioxidant defense system, phenylpropanoid contents and expression of genes involved in their biosynthesis in *Ocimum basilicum* L. *Scientific Reports*, 2020; 10: 5290.

REZAZADEHFAR P, *et al.* Elicitor-enhanced steroidal sapogenin accumulation in hairy root cultures of *Trigonella foenum-graecum*. *Scientific Reports*, 2024; 14.

SHOJA AA, *et al.* Stimulation of phenolic compounds accumulation and antioxidant activity in in vitro culture of *Salvia tebesana* Bunge in response to nano-TiO₂ and methyl jasmonate elicitors. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2022; 149: 423–434.

SINGH R, *et al.* Effects of intermittent drought on the essential oil yield, contents, and nutrient status of *Mentha longifolia* (L.) Huds. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2022; 25(4): 778–790.

SOBHY SE, *et al.* Elicitation of salicylic acid and methyl jasmonate provides molecular and physiological evidence for potato susceptibility to infection by *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*. *Heliyon*, 2024; 10: e28714.

SOLGI M, *et al.* Mitigating salinity stress improved the morphophysiological traits, biochemical properties, and essential oil content and composition of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *BMC Plant Biology*, 2025; 25.

SONG Y, *et al.* UV-B induces the expression of flavonoid biosynthetic pathways in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) calli. *Frontiers in Plant Science*, 2022; 13: 1079087.

TAGHIZADEH M, *et al.* Production of phenolic compounds in *Iberis amara* L. cell suspension culture under chitosan treatment. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 2024.

TAHERI-GARAVAND A, *et al.* Predictive modeling of *Satureja rechingeri* essential oil yield and composition under water deficit and soil amendment conditions using artificial neural networks (ANNs). *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024; 217: 108573. 31

UPADHYAY G, *et al.* In vivo wound-healing and antioxidant activity of aqueous extract of *Roylea elegans* leaves against physically induced burn model in Wistar albino rats. *3 Biotech*, 2021; 11: 447.

WANTI YTN, UTAMI ESW. Influence of chitosan elicitation on biomass, total flavonoids, and antioxidant activity of black betel callus (*Piper betle* L. var *nigra*). *Journal of Tropical Life Science*, 2025; 15(1): 75–86.

WEI Q, *et al.* Transcriptome analysis reveals regulation mechanism of methyl jasmonate-induced terpenes biosynthesis in *Curcuma wenyujin*. *PLoS ONE*, 2022; 17: e0270309.

WOCH N, LAHA S, GUDIPALLI P. Salicylic acid and jasmonic acid induced enhanced production of total phenolics, flavonoids, and antioxidant metabolism in callus cultures of *Givotia moluccana* (L.) Sreem. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 2023; 59: 291–304.

YE Q, *et al.* Transcriptomic and metabolomic analyses of root responses in *Indigofera stachyodes* seedlings under drought stress: a medicinal plant native to karst mountainous regions. *Frontiers in Plant Science*, 2025; 16: 1607789.

ZAYED A, *et al.* Methyl jasmonate elicitation effect on the metabolic profile of cambial meristematic cells culture derived from sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) in relation to antioxidant activity. *Phytochemistry*, 2023; 211: 113720.