

NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS E ÓLEOS ESSENCIAIS

Data de submissão: 08/01/2025

Data de aceite: 03/02/2025

Alex Paulo Martins do Carmo

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) - Laboratório de Fitotecnia (LFIT).
Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0007160322635250>

Júlia Caetano Vimercati

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) - Laboratório de Fitotecnia (LFIT).
Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8495226823692790>

João Paulo Ferreira Neris

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) - Laboratório de Fitotecnia (LFIT).
Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2705613993783229>

David da Silva Gomes

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) - Laboratório de Fitotecnia (LFIT).
Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8790699095461548>

Marta Simone Mendonça Freitas

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) - Laboratório de Fitotecnia (LFIT).
Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7600570653495353>

RESUMO: Dentre os diversos metabólitos produzidos pelas plantas encontram-se os secundários, grupo no qual se encaixam os óleos essenciais, que ajudam na sobrevivência das plantas, atuando como defensivos contra patógenos e competidores. Sendo misturas complexas, os óleos essenciais podem ser extraídos de diversas partes das plantas através de diferentes métodos de acordo com a necessidade. Influências biótica e abióticas são fatores cruciais para a composição e produção dos óleos essenciais, sendo a nutrição mineral um dos aspectos fundamentais para sua produção. Embora existam algumas tendências sobre como os nutrientes afetam a biossíntese de metabólitos, a relação não é uniforme e varia entre espécies, necessitando de mais estudos.

PALAVRAS-CHAVE: macronutrientes,

metabólitos secundários, terpenos.

MINERAL NUTRITION OF PLANTS AND ESSENTIAL OILS

ABSTRACT: Among the various metabolites produced by plants are secondary metabolites, a group that includes essential oils, which aid in plant survival by acting as defenses against pathogens and competitors. Being complex mixtures, essential oils can be extracted from various plant parts through different methods depending on the need. Biotic and abiotic influences are crucial factors for the composition and production of essential oils, with mineral nutrition being a fundamental aspect for their production. Although there are some trends on how nutrients affect the biosynthesis of metabolites, the relationship is not uniform and varies among species, requiring further studies.

KEYWORDS: macronutrients, secondary metabolites, terpenes.

1 | INTRODUÇÃO

Dentre os compostos produzidos pelo metabolismo secundário das plantas encontram-se os óleos essenciais, componentes orgânicos e vitais para a planta, por desempenharem um importante papel na sobrevivência, atuando como agentes contra ação herbívora, fúngica e bacteriana, além de serem responsáveis pelo sabor e aroma específico das plantas. Estas características são atrativas para fins industriais, no processamento de alimentos, na perfumaria e na medicina. Sua composição e funcionalidade são expressos de acordo com a individualidades das espécies vegetais, da família, do gênero e da espécie (Almeida et al., 2008; Rezende et al., 2016; Taiz et al., 2017).

A composição e qualidade dos óleos essenciais pode ser influenciado por diversos fatores bióticos e abióticos, dentre os fatores abióticos o fornecimento de nutrientes minerais que, em ausência ou em excesso, podem determinar o rumo das rotas metabólicas e conseqüentemente tem extrema importância na produção de biomassa, bem como a produção e qualidade dos óleos essenciais.

Hawkesford et al. (2012), classificam 14 elementos químicos como nutrientes minerais essenciais, dividindo-os em dois grandes grupos: macro e micronutrientes, baseando-se nos teores requeridos pelos vegetais. Os macronutrientes são nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre e os micronutrientes são ferro, zinco, manganês, cobre, cloro, boro, molibdênio e níquel. Cada nutriente mineral presente nas plantas possui funções características, como armazenamento e transferência de energia, estrutural, abertura e fechamento de estômatos, síntese e estabilidade de parede celular e ativação enzimática.

Diversos estudos que envolvem o fornecimento de macronutrientes e produção de óleos essenciais, em várias plantas, tem demonstrado modificações do perfil químico e aumento ou diminuição na produção dos óleos essenciais, com variações nas formas de fornecidos, doses, e combinações com outros manejos (Lima, 2015; Freitas et al., 2020; Peçanha et al., 2021; Peçanha., 2023; Carmo, et al., 2024). Apesar de importante a

nutrição das plantas na produção dos óleos essenciais, não há uma regra estabelecida para todas as culturas, devendo ser estudada e avaliada a nutrição mineral para cada espécie (Dobson e Bernays, 1994; Chrysargyris et al., 2017). A compreensão da influência dos macronutrientes para cada cultura permite alcançar diferentes padrões de biossíntese de óleos essenciais, podendo aumentar a produtividade e alterar a concentração e a qualidade dos óleos essenciais.

2 | INFLUÊNCIA DOS MACRONUTRIENTES NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DE ÓLEOS ESSENCIAIS EM ESPÉCIES VEGETAIS

Óleos essenciais são misturas complexas extraídas de plantas medicinais e aromáticas, podendo ser obtidos de flores, folhas, cascas, rizomas e frutos, por metodologias específicas (Figueiredo et al., 2014). A composição dos óleos essenciais são majoritariamente terpenos e/ou seus derivados (Bizzo et al., 2009; Felipe e Bicas, 2017). Os terpenos são formados pela polimerização de unidades de isopreno e esteroide (Sarin, 2005) e são divididos em seis grupos: monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos, tetraterpenos e esteróis, entre os quais estão carotenos, glicosídeos cardiotônicos, taxol, entre outros (Shilpa et al., 2010).

A composição e qualidade dos óleos essenciais pode ser influenciada por diversos fatores bióticos e abióticos, dentre os fatores abióticos o fornecimento de nutrientes minerais que, em ausência ou em excesso, podem determinar o rumo das rotas metabólicas e conseqüentemente tem extrema importância na produção de biomassa, bem como a produção e qualidade dos óleos essenciais, no entanto, apesar de algumas tendências serem reconhecidas, não é possível estabelecer regras sólidas e estáveis sobre a ação dos nutrientes minerais nessa biossíntese devido à grande especificidade da atuação de cada nutriente no metabolismo secundário das diferentes espécies vegetais (Dobson e Bernays, 1994; Gobbo-Neto e Lopes, 2007; El Gendy et al., 2015; Chrysargyris et al., 2017).

Para que um nutriente seja considerado essencial, este deve estar envolvido no metabolismo da planta, não pode ser substituído por outro e em sua ausência a planta não completa seu ciclo (Arnon e Stout, 1939). Quatorze elementos químicos essenciais como nutrientes minerais podem ser classificados em dois grupos principais: macronutrientes e micronutrientes, de acordo com as quantidades necessárias para o crescimento das plantas. (Hawkesford et al., 2012). Os macronutrientes incluem nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, enquanto os micronutrientes são ferro, zinco, manganês, cobre, cloro, boro, molibdênio e níquel. Cada um desses nutrientes minerais desempenha funções específicas nas plantas, como a armazenagem e transferência de energia, manutenção estrutural, regulação da abertura e fechamento dos estômatos, síntese e estabilidade da parede celular, além da ativação das enzimas.

Avanços na compreensão da influência dos macronutrientes na regulação da

biossíntese de óleos essenciais, podem contribuir para um aumento na produção e na qualidade de compostos de interesse de diversas espécies medicinais. Segundo Lima et al. (2003) em situações de estresse nutricional, as plantas podem modular rotas biossintéticas para sustentar-se em ambientes adversos. Por fazer parte do metabolismo secundário, a produção de terpenos e conseqüentemente de óleos essenciais tende a se elevar nessas condições como mecanismo de defesa vegetal.

2.1 Nitrogênio

O Nitrogênio (N) é um dos nutrientes absorvidos em maior concentração pelas plantas e apresenta resposta positiva sobre a produção de biomassa (Souza et al., 2007). Absorvido preferencialmente na forma de nitrato ou amônio (Hawkesford et al., 2012), este elemento desempenha um papel vital no crescimento e desenvolvimento das plantas, como constituinte essencial de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila e enzimas (Tripathi et al., 2017). A resposta das plantas a diferentes doses de nitrogênio nem sempre é previsível no que diz respeito à produção de metabólitos secundários (Souza et al., 2007).

A deficiência em nitrogênio pode levar a um acúmulo de carboidratos, fornecendo desta forma substrato para a síntese de metabólitos secundários não nitrogenados, como os terpenos. Entretanto, apesar da produção de terpenóides acontecer em condições de acúmulo de carboidratos, deve-se levar em consideração que a biossíntese de enzimas e a construção de estruturas multicelulares de armazenagem, requerem o suprimento adequado em nutrientes, como nitrogênio, enxofre e fósforo, desta forma o acúmulo de terpenóides pode acontecer em situações de deficiência nutricional, porém somente quando esta é moderada (Gershenzon, 1984).

Alguns trabalhos foram desenvolvidos com adubação nitrogenada e produção de óleos essenciais, com resultados contraditórios. Amaral et al. (2008) testaram doses superiores às recomendadas de nitrogênio em plantas de *Chamomilla recutita* e observaram incrementos no rendimento dos óleos essenciais, pois esse nutriente promoveu o aumento da massa seca das plantas e dos capítulos florais, entretanto Souza et al., (2007) observaram em plantas de *Mentha piperita* cultivadas nas maiores doses de nitrogênio decréscimos no rendimento dos óleos essenciais.

Entretanto estudos envolvendo respostas nutricionais em plantas medicinais demonstram a importância do nitrogênio (N) na produção e qualidade de óleos essenciais, como os trabalhos de Sarab et al. (2008), Vilanova et al. (2018) e De Moura Guerra et al. (2020). Esses autores verificaram incremento no teor e rendimento de óleos essenciais em função das maiores doses de N aplicadas em plantas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.). A mesma característica foi observada por Said-Al Ahl et al. (2009) em plantas de orégano (*Origanum vulgare* L.), entretanto para plantas de satureja (*Satureja hortensis* L.), Skubij e Dzida, (2019) observaram maiores teores de carvacrol na menor dose de nitrogênio

aplicada em plantas, influenciando a qualidade dos óleos essenciais das plantas.

Lima, (2015) estudando as deficiências de macronutrientes e boro em plantas de capim limão (*Cymbopogon citratus*) observou que as plantas de *Cymbopogon citratus* cultivadas sob omissão de nitrogênio tiveram redução no rendimento de óleos essenciais nas folhas intermediárias. Os constituintes dos óleos essenciais de *C. citratus* também foram afetados pela ausência em nitrogênio, os teores de linalol, citronelal, neral e geraniol foram reduzidos. Observou-se também, ausência de mirceno no óleo, além de aumento nos teores de geraniol e citral (Neral+Geraniol)

Os monoterpenos são constituintes dos óleos essenciais do gênero *Cymbopogon* e são formados por duas unidades isoprênicas biologicamente ativas (isopentenil pirofosfato e dimetil difosfato) que se fundem para formar o geraniol difosfato, precursor dos monoterpenos. Estes isoprenoides requerem acetil-CoA, ATP e NADPH para sua síntese. Dessa forma, a biossíntese de óleos essenciais é dependente de nitrogênio, uma vez que este elemento é constituinte da molécula de NADPH, enxofre, na molécula de acetil-CoA e fósforo já que este nutriente está particularmente envolvido na transferência de energia na forma de ATP (Dubey et al., 2003).

Vilanova et al. (2018) avaliando o efeito de doses de nitrogênio e diferentes taxas de aplicação de água, no crescimento e produção de óleos essenciais no manjeriço, observaram que a maior dose de N (160 kg ha^{-1}) e disponibilidade hídrica (110% da capacidade de campo), proporcionou o maior teor (1,58%) e rendimento ($82,9 \text{ mL planta}^{-1}$) de óleos essenciais. Na análise de qualidade foram identificados 20 compostos, com predominância de fenilpropanoides no tratamento mencionado e de monoterpenos nos demais tratamentos. De Moura Guerra et al. (2020) avaliando doses de nitrogênio e duas épocas de corte em plantas de manjeriço, observaram que para o primeiro corte o maior teor de óleos essenciais foi observada na dose de 150 kg ha^{-1} e no segundo corte na maior dose de nitrogênio aplicado (250 kg ha^{-1}).

Bernáth et al. (1986), observaram em experimento com *Mentha arvensis* L. aumento no rendimento dos óleos essenciais em aproximadamente 100% quando fornecido um suprimento maior de nitrogênio e em *Ocimum basilicum* L. Zhejzkov et al. (2008) obtiveram o máximo rendimento de óleos essenciais em manjeriço nas doses médias de nitrogênio. Enquanto Sarab et al. (2008) observaram maior rendimento nas maiores concentrações para a mesma espécie.

2.2 Fósforo

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o metabolismo vegetal, pois desempenha importante função nos processos de respiração e fotossíntese e está presente em componentes estruturais das células, como nos fosfolípidios de membrana, nas moléculas de ácidos nucleicos e também em componentes metabólitos de transferência e

armazenamento de energia, como ATP (Taiz e Zeiger, 2017; Marschner's, 2012).

Os terpenos são sintetizados a partir da junção de moléculas de Isopentenil difosfato (IPP) com dimetilalil difosfato (DMAPP), catalisadas por enzimas fósforo dependentes (Despinasse et al., 2017; Ashraf et al., 2019; Zhang et al., 2019), desta forma o fósforo participa diretamente na síntese dos compostos presentes nos óleos essenciais. A importância da complementação fosfatada em plantas aromáticas e medicinais é ressaltada, sobretudo quando o interesse é voltado para a síntese de linalol e seus derivados, uma vez que é conhecida a importância do fósforo por estar diretamente presente nesta rota metabólica.

Estudando os efeitos de diferentes espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na produção e qualidade de óleos essenciais de *Mentha arvensis* L., cultivada com diferentes doses de fósforo. Freitas et al. (2004) concluíram que a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e as doses de P influenciam o crescimento, os teores e a composição dos óleos essenciais das plantas de *Mentha arvensis* L.

Rodrigues et al. (2004) avaliando doses de P em duas épocas de coleta, 65 e 95 dias, verificaram aos 95 dias que o teor máximo de óleos essenciais, 2,192 dag kg⁻¹, em menta foi obtido na dose de 19,5 mg L⁻¹ de fósforo, e observaram decréscimo nos teores a partir dessa dose.

David et al. (2006), estudando o rendimento e composição de óleos essenciais em plantas de Menta (*Mentha pulegium* L.) em função das doses de P, verificaram até a primeira colheita, maiores teores de mentona e mentofurano nas maiores dose de P (23 mg L⁻¹) e nas menores doses de P (7,75 mg L⁻¹), respectivamente. David et al. (2007) constataram maior rendimento de óleos essenciais em plantas de *Mentha piperita* L., sob cultivo hidropônico, com decréscimo em 50% da concentração de P, utilizando a solução de Hoagland e Arnon (1950). Ramos et al. (2005) na mesma cultura, não observaram influência de doses do fósforo nos teores de óleos essenciais.

Estudando a influência de concentrações de fósforo (3,75; 7,5; 11,25; 15,0; 22,5 e 30,0 mg L⁻¹) na concentração de terpenos em *Cannabis sativa*, Cockson et al. (2020) observaram incremento na concentração de geraniol nas menores doses de fósforo aplicado, e não verificaram diferença significativa nas concentrações de α -Pineno, Mirceno, Limoneno, Eucaliptol e β -cariofileno para as doses aplicadas.

Peçanha et al. (2021) observaram que os óleos extraídos das plantas de Lavanda (*Lavandula angustifolia*), sem complementação fosfatada (0 mg.dm⁻³ de P), apresentaram qualidade reduzida devido à baixa porcentagem de alguns compostos usados como marcadores de qualidade e que adubação fosfatada é um importante fator para a produção de óleos de lavanda, com maior produção de óleos estimado na dose de 77 mg dm³ do fosforo.

2.3 Potássio

O potássio é capaz de ativar pelo menos 60 diferentes enzimas envolvidas no metabolismo vegetal, sendo assim, a quantidade deste nutriente no tecido da planta interfere na taxa de ativação enzimática e reações químicas (Prajapati e Modi, 2012). O aumento na concentração deste nutriente pode levar ao estímulo de atividades enzimáticas, levando à maior taxa fotossintética, síntese de carboidratos e aumento na produção de óleos essenciais (El-Leithy et al., 2013).

Peçanha (2017) observou redução significativa na porcentagem relativa de espilantol, na cultura do jambu, em cultivo hidropônico sob omissão de potássio. Khalid (2013) observou que os três constituintes majoritários dos óleos essenciais, α -cadinol, γ -cadineno e acadineno foram afetados pelas diferentes doses de potássio empregadas no cultivo, todavia, observou-se que a dose mediana (173,2 Kg.ha⁻¹) proporcionou o maior rendimento. Avaliando o teor de óleos essenciais em função de doses de potássio no híbrido *Mentha x gracilis* Sole, sob cultivo hidropônico, Garlet et al. (2007) verificaram maior teor de óleo na maior dose de K estudada (690 mg L⁻¹), no entanto, na mesma concentração o rendimento por planta e a concentração de linalol foram menores.

Estudando as deficiências de macronutrientes e boro em plantas de capim limão (*Cymbopogon citratus*), Lima (2015) observou redução para três componentes: mirceno, citronelol e geraniol nos óleos essenciais de plantas crescidas com omissão de potássio.

Hashemabadi et al. (2015) constataram incremento no conteúdo de óleos essenciais nas flores de calêndula sob a maior dose da fertilização com sulfato de potássio. Freitas et al. (2020), avaliando a aplicação de fontes (KCl e K₂SO₄) e doses (50, 100, 150 e 200 mg kg⁻¹) de K em plantas de coentro (*Coriandrum sativum* L.), observaram influência da aplicação de sulfato de potássio no rendimento de óleos essenciais nos frutos e na concentração de linalol. As maiores concentrações foram obtidas em 153,8 mg kg⁻¹ (0,15 g) e 131,3 mg kg⁻¹ (0,43 mg), respectivamente, enquanto a aplicação de cloreto de potássio influenciou de forma linear decrescente a concentração de linalol conforme aumento das doses.

Em plantas de orégano, Said-Al Ahl e Hussein (2010) observaram influência da presença de potássio no teor de óleos essenciais. Foram identificados 20 compostos nos óleos através de análise cromatográfica, onde o carvacrol foi o composto dominante, seguido por p-cimeno e γ -terpineno. Khalid (2013) observou incremento nos teores de óleos essenciais em função de doses crescentes de K₂O em *Calendula officinalis*.

Peçanha et al. (2023) testando o desempenho de plantas de *L. dentata* cultivadas sob cinco doses (0, 50, 100, 200 e 300 mg dm⁻³) de K fornecidas por meio de duas fontes: KCl e K₂SO₄, observaram que o rendimento do óleo essencial foi maior quando se aplicou K₂SO₄, sendo o rendimento máximo calculado (1,44%) alcançado quando se aplica a dose máxima estimada de 206 mg dm⁻³ de K na forma de K₂SO₄.

2.4 Cálcio

O cálcio (Ca) é um nutriente que contribui no crescimento e desenvolvimento vegetal, atuando na melhoria da estrutura da parede celular, incrementando a produção de frutos, além de estimular o crescimento radicular (Karley e White, 2009; Kumar et al., 2017). Alguns trabalhos demonstram a importância do Ca na bioprodução de óleos essenciais, tanto no rendimento, quanto na modificação do perfil químico.

Fazio (2007), avaliando o rendimento de óleos essenciais em função de níveis de Cálcio a partir da solução de Hoagland e Arnon (1950) em *Mentha piperita* L., observou as menores doses de Ca proporcionaram diminuição no rendimento de óleos essenciais. Fazio (2011) observou que a variação de cálcio na solução nutritiva também influenciou no rendimento e composição química dos óleos essenciais em plantas de *Mentha piperita* L. Supanjani et al. (2005), testando diferentes concentrações de cálcio em solução nutritiva, no cultivo de *Chrysanthemum coronarium*, observaram que à medida que os teores de Ca na solução aumentaram, até 40 mM, houve incremento na produção de óleos essenciais. Estudando as deficiências de macronutrientes e boro em plantas de capim limão (*Cymbopogon citratus*), Lima, (2015) observou que o menor rendimento de óleos (%) foi verificado nas plantas crescidas sob deficiência de cálcio, sendo cerca de 45% inferior ao tratamento completo, e ocorreu uma redução nos teores de mircenol e geraniol.

O cálcio além de ser constituinte da lamela média e parede celular e atuar na manutenção da integridade de membranas, também é importante como cofator de enzimas que atuam na hidrólise de ATP e fosfolipídeos, é mensageiro secundário de respostas a sinais ambientais e hormonais e agente regulador de processos metabólicos, quando ligado à calmodulina (Taiz e Zieger, 2017).

Parreiras (2017) observou modificação no perfil químico dos óleos essenciais sob pulverização com cloreto de cálcio em diferentes concentrações em plantas de Ateyoia (*Annona x atemoya*), onde das 25 substâncias encontradas, 14 diferiram em função da concentração de CaCl_2 . Danh et al. (2011) não observaram influência de doses de Ca aplicado na forma de CaCO_3 no rendimento e composição química dos óleos essenciais em plantas de vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L.).

2.5 Magnésio

O Magnésio (Mg) é um dos macronutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal e desempenha várias funções fisiológicas nas células vegetais (Chaudhry et al., 2021). Participa de forma direta do processo de fotossíntese como componente da molécula de clorofila, além de atuar na estabilidade da membrana (Marschner, 2012; Ceylan et al., 2016). Além disso, o Mg tem várias outras funções, atuando também como cofator e modulador alostérico para mais de 300 enzimas, incluindo carboxilases, fosfatases, proteínas quinases, RNA polimerases e ATPases (Hawkesford et al., 2012).

Fávaro et al. (2011) observaram influência do teor de magnésio no rendimento de óleos essenciais em mudas de eucalipto-limão (*Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill e L.A.S. Johnson). Szöke et al. (2004) verificaram correlação positiva entre o aumento da concentração de Mg na solução nutritiva e os teores de óleos essenciais em plantas de camomila (*Matricaria recutita* L.).

A produção de óleos essenciais e a produção de mirceno, linalol e geraniol, em *Cymbopogon citratus* foram reduzidos pela ausência de magnésio na solução nutritiva (Lima, 2015). Os terpenos são produzidos através do metabolismo secundário, a partir de compostos do metabolismo primário. A deficiência de magnésio leva à redução da atividade fotossintética, uma vez que este nutriente é constituinte da molécula de clorofila, além de ser importante na ativação de inúmeras enzimas no metabolismo vegetal. Desta forma, a produção destes compostos pode ser reduzida quando sob situações de escassez de nutrientes (Taiz e Zieger, 2017). Muitas reações de fosforilação de compostos precursores estão envolvidas na biossíntese de óleos essenciais e se mostram dependentes de ATP e íons Mg^{+2} (Ranaweera e Thilakaratne, 1992).

2.6 Enxofre

O enxofre (S) faz parte de 0,1% a 0,5% da massa seca das plantas, atuando como constituinte dos aminoácidos cisteína e metionina e, portanto, de proteínas, sendo ambos aminoácidos precursores de outros compostos contendo S, como coenzimas e produtos vegetais secundários, estando também envolvido no acúmulo de óleos (Sfredo e Lantmann, 2007; Hawkesford et al., 2012).

Os monoterpenos podem ser sintetizados a partir de duas rotas: ácido mevalônico (MVA) e metil-eritritol-4-fosfato (MEP). Na rota MVA o IPP é produzido a partir da descarboxilação e pirofosforilação do ácido mevalônico que é produzido a partir da redução de 3 hidróxi-3metil-glutaril coenzima A (HMG-CoA), oriundo da condensação de três unidades de acetil CoA (Ganjewala e Luthra, 2010; Dubey et al., 2003). O enxofre é componente da molécula acetil CoA, desta forma sua ausência interfere no metabolismo de carboidratos, podendo ocasionar alterações na produção de óleos essenciais no metabolismo secundário (Marschner, 2012). Lima, (2015) estudando as deficiências de macronutrientes e boro em plantas de capim limão (*Cymbopogon citratus*) observou que as plantas de *Cymbopogon citratus* cultivadas sob omissão de enxofre tiveram sua produção de óleos reduzida.

Peçanha (2017) observou maior porcentagem relativa de espilantol nos óleos essenciais de jambu sob omissão de enxofre em relação à solução nutritiva completa. Walia e Kumar (2021) verificaram incremento no rendimento de óleos essenciais em função da adubação com enxofre em plantas de calêndula selvagem (*Tagetes minuta* L.). Zahedifar e Najafian (2015) estudando doses de enxofre em plantas de *Satureja hortensis*

L. observaram variação dos constituintes dos óleos essenciais em função de doses de enxofre, onde as maiores doses incrementaram os teores de carvacrol, enquanto as doses intermediárias foram mais adequadas para os conteúdos de α -tujeno, α -Pineno, mirceno e α -terpineno, com incremento de 43%, 21%, 13% e 27%, respectivamente em relação ao tratamento controle.

3 | PERSPECTIVAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de serem nomeados como secundários, os produtos do metabolismo secundário das plantas apresentam grande importância para os vegetais em diversas funções, como a defesa da planta em situações adversas, apresentando também importância farmacológica medicinal devido a sua composição diversa e suas funcionalidades.

Por conta da grande diversidade de plantas há sempre a necessidade de estudos e pesquisas acerca das culturas para aprimorar as técnicas de nutrição mineral, de forma eficiente para se obter óleos essenciais de alto rendimento e qualidade. Apesar de serem observadas algumas tendências destas relações, não existe um padrão, como ocorre em outros metabólitos como os compostos fenólicos e nitrogenados.

Embora existam diversos trabalhos mostrando a relação entre os níveis de macronutrientes e a regulação da biossíntese de terpenos, que constituem majoritariamente os óleos essenciais, ainda são poucos os estudos que mostram essa importante relação, necessitando de mais estudos dos nutrientes de forma individual, em conjunto com outros nutrientes e com outros fatores ambientais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Gustavo et al. Estresse oxidativo em células vegetais mediante aleloquímicos. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 61, n. 1, p. 4237-4247, 2008.
- AMARAL, W. et al. Desenvolvimento, rendimento e composição de óleo essencial de camomila [*Chamomila recutita* (L.) Rauschert] sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 10, n. 4, p. 1-8, 2008.
- ARNON, Daniel Isaac; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiology**, v. 14, n. 2, p. 371, 1939.
- ASHRAF, A.; SULTAN, P.; QAZI, P.; RASOOL, S. Approaches for the genetic improvement of Lavender: A short review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 2, p. 736-740, 2019.
- BERNÁTH, Jenó. Production ecology of secondary plant products. In: Herbs, spices, and medicinal plants: **Recent advances in botany, horticulture, and pharmacology**. v. 1, p. 185-234, 1986.
- BIZZO, Humberto R.; HOVELL, Ana Maria C.; REZENDE, Claudia M. Óleos essenciais no Brasil: aspectos gerais, desenvolvimento e perspectivas. **Química Nova**, v. 32, p. 588-594, 2009.

CARMO, A. P. M. do et al. Electrical conductivity of nutrient solutions affects the growth, nutrient levels, and content and composition of essential oils of *Acmella oleracea* (L.) RK Jansen from southeastern Brazil. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 15, p. 100968, 2024.

CEYLAN, Yasemin et al. Magnesium applications to growth medium and foliage affect the starch distribution, increase the grain size and improve the seed germination in wheat. **Plant and Soil**, v. 406, p. 145-156, 2016.

CHAUDHRY, Ahmad Hassan et al. Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 4, p. 1819, 2021.

CHRYSARGYRIS, Antonios et al. Antioxidant and antibacterial activities, mineral and essential oil composition of spearmint (*Mentha spicata* L.) affected by the potassium levels. **Industrial Crops and Products**, v. 103, p. 202-212, 2017.

COCKSON, Paul et al. Impact of phosphorus on cannabis sativa reproduction, cannabinoids, and terpenes. **Applied Sciences**, v. 10, n. 21, p. 7875, 2020.

DANH, Luu Thai et al. Effect of calcium on growth performance and essential oil of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) grown on lead contaminated soils. **International Journal of Phytoremediation**, v. 13, n. sup1, p. 154-165, 2011.

DAVID, E. F. S.; BOARO, C. S. F.; MARQUES, M. O. M. Rendimento e composição do óleo essencial de *Mentha piperita* L., cultivada em solução nutritiva com diferentes níveis de fósforo. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 8, n. 4, p. 183-188, 2006.

DAVID, Evelize de Fátima Saraiva; MISCHAN, Martha M.; BOARO, Carmen Sílvia Fernandes. Desenvolvimento e rendimento de óleo essencial de menta (*Mentha x piperita* L.) cultivada em solução nutritiva com diferentes níveis de fósforo. **Biotemas**, v. 20, n. 2, p. 15-26, 2007.

DE MOURA GUERRA, Antonia Mirian Nogueira et al. Nitrogênio influencia o acúmulo de biomassa e o rendimento de óleo essencial de manjerição. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 24739-24756, 2020.

DESPINASSE, Y. et al. Bornyl-diphosphate synthase from *Lavandula angustifolia*: a major monoterpene synthase involved in essential oil quality. **Phytochemistry**, v. 137, p. 24-33, 2017.

DOBSON, Heidi EM. Floral volatiles in insect biology. In: **Insect-Plant Interactions**. p. 47-82, 1993.

DUBEY, V. S.; BHALLA, R.; LUTHRA, R. An overview of the non-mevalonate pathway for terpenoid biosynthesis in plants. **Journal Bioscience**, v. 28, n. 5, p. 637-646, 2003.

EL GENDY, A. G. et al. Effect of nitrogen and potassium fertilizer on herbage and oil yield of chervil plant (*Anthriscus cerefolium* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 69, p. 167-174, 2015.

EL-LEITHY, A. S. et al. Effect of nitrogen and potassium biofertilization on growth, yield and essential oil production of white horehound, *Marrubium vulgare* L. **J. Hortic. Sci. Ornament. Plants**, v. 5, n. 1, p. 46-59, 2013.

FÁVARO, Érica Alexandrino et al. Boro e magnésio na produção de óleo essencial de *Corymbia citriodora* e teor de clorofila. **Floresta**, v. 41, n. 1, p. 39-46, 2011.

- FAZIO, Juliana Leticia. **Cálcio e ethephon no desenvolvimento e produção de óleo essencial de menta (*Mentha Piperita* L.), cultivada em solução nutritiva**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu. 2007.
- FAZIO, Juliana Leticia. ***Mentha piperita* cultivada com variação de cálcio. Trocas gasosas e óleo essencial**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu. 2011.
- FELIPE, L. O.; BICAS, J. L. Terpenos, aromas e a química dos compostos naturais. ***Química Nova na Escola***, v. 39, n. 2, p. 120-130, 2017.
- FIGUEIREDO, A. Cristina; PEDRO, Luis G.; BARROSO, José G. Plantas aromáticas e medicinais - óleos essenciais e voláteis. ***Revista da APH N.*** °, v. 114, p. 30, 2014.
- FREITAS, M. S. M.; MARTINS, M. A.; VIEIRA, I. J. C. Produção e qualidade de óleos essenciais de *Mentha arvensis* em resposta à inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. ***Pesquisa Agropecuária Brasileira***, v. 39, p. 887-894, 2004.
- FREITAS, Marta Simone Mendonça et al. Potassium sources and doses in coriander fruit production and essential oil content. ***Horticultura Brasileira***, v. 38, p. 268-273, 2020.
- GANJEWALA, Deepak; LUTHRA, Rajesh. Essential oil biosynthesis and regulation in the genus *Cymbopogon*. ***Natural Product Communications***, v. 5, n. 1, p. 1934578X1000500137, 2010.
- GARLET, Tânea Maria Bisognin et al. Produção e qualidade do óleo essencial de menta em hidroponia com doses de potássio. ***Ciência Rural***, v. 37, p. 956-962, 2007.
- GERSHENZON, Jonathan. Changes in the levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress. In: ***Phytochemical Adaptations to Stress***. Boston, MA: Springer US, 1984. p. 273-320.
- GOBBO-NETO, Leonardo; LOPES, Norberto P. Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. ***Química Nova***, v. 30, p. 374-381, 2007.
- HASHEMABADI, D. et al. Improvement of the yield and essential oils quantitative in calendula (*Calendula officinalis* L.) by using different planting arrangement and potassium fertilizer. ***Journal of Ornamental Plants***, v. 2, n. 3, p. 147-154, 2015.
- HAWKESFORD, M. et al. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). ***Mineral nutrition of higher plants***. 2. ed. London: Elsevier Ltda, 2012. p. 135-189.
- HOAGLAND, Dennis Robert; ARNON, Daniel Israel. **The water-culture method for growing plants without soil**. 1938.
- KARLEY, Alison J.; WHITE, Philip J. Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. ***Current Opinion in Plant Biology***, v. 12, n. 3, p. 291-298, 2009.
- KHALID, Khalid A. Effect of potassium uptake on the composition of essential oil content in *Calendula officinalis* L. flowers. ***Emirates Journal of Food and Agriculture***, v. 25, n. 3, p. 189, 2013.
- KUMAR, Jitendra et al. Influence of foliar application of mineral nutrients at different growth stages of guava. ***Journal of Plant Nutrition***, v. 40, n. 5, p. 656-661, 2017.

LIMA, H. R. P.; KAPLAN, M. A. C.; CRUZ, A. V. D. M. Influência dos fatores abióticos na produção e variabilidade de terpenóides em plantas. *Floresta e Ambiente*, v. 10, n. 2, p. 71-77, 2003.

LIMA, Thaísa Capato. **Macronutrientes e boro em *Cymbopogon citratus* (D.C.) STAPF: Composição mineral, sintomas visuais e produção de óleos essenciais**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

MARSCHNER, Horst (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 684 p.

PARREIRAS, Nathália de Souza. **Aplicação de cálcio em pré-colheita de atemoia 'Thompson': trocas gasosas, óleo essencial de folhas e características físico-químicas dos frutos**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 71 p. 2017.

PEÇANHA, D. A. **Deficiência de nutrientes minerais em *Acmella oleracea*: teores minerais, sintomas visuais, espilantol e compostos fenólicos**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 69 p. 2017.

PEÇANHA, D. A. et al. Mineral composition, biomass and essential oil yield of french lavender grown under two sources of increasing potassium fertilization. *Journal of Plant Nutrition*, v. 46, n. 3, p. 344-355, 2023.

PEÇANHA, D. A. et al. Phosphorus fertilization affects growth, essential oil yield and quality of true lavender in Brazil. *Industrial Crops and Products*, v. 170, p. 113803, 2021.

PRAJAPATI, K.; MODI, H. A. The importance of potassium in plant growth – A review. *Indian Journal of Plant Sciences*, v. 1, n. 2-3, p. 177-186, 2012.

RAMOS, S. J. et al. Produção de matéria seca e óleo essencial de menta sob diferentes doses de fósforo. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 8, n. 1, p. 9-12, 2005.

RANAWEERA, S. S.; THILAKARATNE, W. P. Mineral nutrition of *Cymbopogon nardus* (L) rendle: part I. effects of magnesium and phosphorus nutrition on growth and the yield of essential oil. *Vidyodaya Journal of Science*, v. 4, n. 1, 1992.

REZENDE, Fernanda Mendes et al. Vias de síntese de metabólitos secundários em plantas. *Laboratório de Ensino de Botânica*, v. 93, 2016.

RODRIGUES, Carlos R. et al. Nutrição mineral, crescimento e teor de óleo essencial da menta em solução nutritiva sob diferentes concentrações de fósforo e épocas de coleta. *Horticultura Brasileira*, v. 22, p. 573-578, 2004.

SAID-AL AHL, H. A. H.; AYAD, Hasnaa S.; HENDAWY, S. F. Effect of potassium humate and nitrogen fertilizer on herb and essential oil of oregano under different irrigation intervals. *Journal of Applied Sciences*, v. 2, n. 3, p. 319-323, 2009.

SAID-AL AHL, H. A. H.; HUSSEIN, M. S. Effect of water stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Ozean Journal of Applied Sciences*, v. 3, n. 1, p. 125-141, 2010.

- SARAB, D. et al. Changes in essential oil content and yield of basil in response to different levels of nitrogen and plant density. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, v. 22, n. 4, p. 850-857, 2019.
- SARIN, Renu. Useful metabolites from plant tissue cultures. *Biotechnology*, v. 4, n. 2, p. 79-93, 2005.
- SFREDO, Gedi J.; LANTMANN, A. F. **Enxofre: nutriente necessário para maiores rendimentos da soja**. 2007. (Relatório técnico).
- SHILPA, K.; VARUN, K.; LAKSHMI, B. S. An alternate method of natural drug production: eliciting secondary metabolite production using plant cell culture. *Journal of Plant Science*, v. 5, p. 222-247, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3923/jps.2010.222.247>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- SKUBIJI, Natalia; DZIDA, Katarzyna. Essential oil composition of summer savory (*Satureja hortensis* L.) cv. Saturn depending on nitrogen nutrition and plant development phases in raw material cultivated for industrial use. *Industrial Crops and Products*, v. 135, p. 260-270, 2019.
- SOUZA, M. A. A.; ARAUJO, O. J.; FERREIRA, M. A.; STARK, E. M. L.; FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Produção de biomassa e óleo essencial de hortelã em hidroponia em função de nitrogênio e fósforo. *Horticultura Brasileira*, v. 25, p. 41-48, 2007.
- SUPANJANI, T. A. R. M. et al. Calcium effects on yield, mineral uptake and terpene components of hydroponic *Chrysanthemum coronarium* L. *International Journal of Botany*, v. 1, p. 146-151, 2005.
- SZÖKE, Éva et al. Effect of magnesium on essential oil formation of genetically transformed and non-transformed chamomile cultures. *Journal of the American College of Nutrition*, v. 23, n. 6, p. 763S-767S, 2004.
- TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MOLLER, Ian M.; MURPHY, Arthur. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TRIPATHI, Anuj Kumar et al. Studies on the effect of nitrogen levels and spacing on quality traits of radish (*Raphanus sativus* L.) cv. Kashi Sweta. *International Journal of Chemistry Studies*, v. 5, n. 6, p. 537-540, 2017.
- VILANOVA, Crisálida Machado et al. Effect of different water application rates and nitrogen fertilisation on growth and essential oil of clove basil (*Ocimum gratissimum* L.). *Industrial Crops and Products*, v. 125, p. 186-197, 2018.
- WALIA, Swati; KUMAR, Rakesh. Nitrogen and sulfur fertilization modulates the yield, essential oil and quality traits of wild marigold (*Tagetes minuta* L.) in the Western Himalaya. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 631154, 2021.
- ZAHEDIFAR, M.; NAJAFIAN, S. H. **Combined effect of soil applied iron and sulfur fertilisers on monoterpene content and antioxidant activity of *Satureja hortensis* L. extract**. 2015. (Relatório técnico).
- ZHANG, Y.; WANG, J.; CAO, X.; LIU, W.; YU, H.; YE, L. High-level production of linalool by engineered *Saccharomyces cerevisiae* harboring dual mevalonate pathways in mitochondria and cytoplasm. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 134, p. 109462, 2020.