

Artigo

Extração Assistida por Micro-ondas e Química Verde**Tsukui, A.; Rezende, C. M.***Rev. Virtual Quim.*, 2014, 6 (6), 1713-1725. Data de publicação na Web: 10 de novembro de 2014<http://www.uff.br/rvq>**Microwave Assisted Extraction and Green Chemistry**

Abstract: The discussion about Green Chemistry and application of the microwave irradiation, particularly in chemical laboratories, will be shown in this manuscript as a way to review the work involving the microwave extraction of natural products and making a parallel situation with principles of Green Chemistry. The presence of microwave devices in laboratories is now common. From various scientific publications it was found that the microwave-assisted extraction has been gaining attention due to obtained high yields and short extraction times, concomitantly reducing waste, promoting efficiency in the extraction. Microwave appears as a new look for the existing extraction methodologies with environmental sustainability.

Keywords: Green Chemistry; extraction; waste; microwave.

Resumo

A discussão acerca do tema química verde e a aplicação da irradiação por micro-ondas, particularmente em laboratórios de química, será abordada neste manuscrito como forma de rever os trabalhos envolvendo a extração de produtos naturais por micro-ondas, fazendo um paralelo com os aspectos que vão de encontro aos princípios da química verde. A presença de aparelhos de micro-ondas nos laboratórios é recorrente, desde aparelhos mais simples, como os aparelhos de uso doméstico, aos mais sofisticados. A partir das diversas publicações de artigos científicos foi possível constatar que a extração por micro-ondas vem ganhando destaque por apresentar alto rendimento de produto extraído, curto tempo de extração e redução dos resíduos gerados. Surge um novo olhar para as metodologias de extração já existentes através das micro-ondas, aliando-se a isso a preocupação com a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Química Verde; extração; resíduos; micro-ondas.

* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Laboratório de Aromas 626A, Cidade Universitária, CEP 21941-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ annatsukui@ufrj.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20140111](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20140111)

Extração Assistida por Micro-ondas e Química Verde

Anna Tsukui,* Claudia M. Rezende

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Laboratório de Aromas 626A, Cidade Universitária, CEP 21941-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

* annatsukui@ufrj.br

Recebido em 10 de novembro de 2014. Aceito para publicação em 10 de novembro de 2014

1. Introdução
2. Química Verde
3. Irradiação por micro-ondas
4. Extração assistida por micro-ondas na área de produtos naturais e alimentos
5. Considerações Finais

1. Introdução

Nos tempos atuais, existe uma preocupação crescente da comunidade científica quando a abordagem envolve o desenvolvimento científico e a geração de resíduos. Aos processos químicos vem se introduzindo medidas que amenizem, reduzam ou até mesmo zerem a geração de resíduos nocivos ao meio ambiente.

A preocupação em desenvolver estratégias sustentáveis na área da Química e afins é observada pelo número crescente de publicações científicas em revistas conceituadas na área de Química Verde. Algumas delas são o *ACS-Catalysis*, *ChemSusChem* e *Green Chemistry*, sendo este último referência na publicação de trabalhos neste domínio e voltado especialmente para o desenvolvimento de tecnologias dirigidas à redução de resíduos nocivos ao meio ambiente. Novas propostas,

em conjunto com o avanço tecnológico, podem ser uma alternativa para a redução dos impactos ambientais, mesmo que de forma gradativa.

Há diversas temáticas relacionadas aos princípios da Química Verde, como catálise, solventes alternativos e desenvolvimento de processos mais seguros e eficientes. Aqui será abordado o tema irradiação micro-ondas e processos de extração, como uma alternativa para a redução de resíduos através da utilização de pequena quantidade de solventes ou mesmo sua ausência nos laboratórios de pesquisa.

2. Química Verde

A Química Verde deu início nos EUA pela *Environmental Protection Agency* (EPA)– Agência de Proteção Ambiental, em colaboração com a *American Chemical*

Society (ACS)- Sociedade Americana de Química e o *Green Chemistry Institute*, com implementação de programas que visavam a prevenção e controle de poluentes. Desde então, outros países vêm incentivando

pesquisas na inovação e desenvolvimento de tecnologias que vão ao encontro dos princípios da Química Verde.

O Quadro 1 apresenta os 12 princípios da Química Verde, segundo Anastas (1998).²

Quadro 1. Os 12 princípios da Química Verde

<p>1. Prevenção. Evitar a geração de resíduo é melhor do que tratá-lo após sua produção.</p>	<p>2. Economia de Átomos. Métodos sintéticos devem ser planejados com intuito de maximizar a incorporação de todos os átomos dos materiais de partida no produto final.</p>	<p>3. Síntese de Produtos Menos Perigosos. Quando viável, a síntese de um produto químico deve utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao meio ambiente.</p>
<p>4. Planejamento de Produtos Seguros. O emprego de produto químico deve ser planejado de modo que realize a função desejada e ao mesmo tempo não seja tóxico.</p>	<p>5. Solventes e Auxiliares mais Seguros. O uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes de separação, etc.) deve ser descontinuado sempre que possível e quando utilizadas devem ser inócuas.</p>	<p>6. Busca pela Eficiência de Energia. A utilização de energia pelos processos químicos deve ser minimizada. Se possível, os processos químicos devem ser conduzidos à temperatura e pressão ambientes.</p>
<p>7. Uso de Fontes Renováveis de Matéria Prima. A utilização de matérias-primas renováveis deve ser escolhida em detrimento de fontes não renováveis quando aplicar técnica economicamente viável.</p>	<p>8. Evitar a Formação de Derivados. A derivatização desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária por processos físicos e químicos) deve ser minimizada ou, se possível, evitada, porque estas etapas requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos.</p>	<p>9. Catálise. Reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são melhores que reagentes estequiométricos.</p>
<p>10. Planejamento para a Degradação. Os produtos químicos precisam ser planejados de tal modo que, ao final de sua função, se fragmentem em produtos de degradação inócuos e não persistam no ambiente.</p>	<p>11. Análise em Tempo Real para a Prevenção da Poluição. É preciso que haja desenvolvimento futuro de metodologias analíticas que viabilizem um monitoramento e controle dentro do processo, em tempo real, antes da formação de substâncias nocivas.</p>	<p>12. Química Intrinsecamente Segura para a Prevenção de Acidentes. As substâncias, bem como a maneira pela qual uma substância é utilizada em um processo químico, devem ser escolhidas a fim de minimizar o potencial para acidentes químicos, incluindo vazamentos, explosões e incêndios.</p>

Observa-se, com frequência, que a palavra-chave "Green Chemistry" (ou no português, Química Verde) vem frequentemente atrelada a pesquisas correlacionadas ao desenvolvimento sustentável, biodiversidade, biocombustíveis, tecnologias limpas de processos industriais com minimização ou eliminação de resíduos e efluentes tóxicos, tanto ao nível industrial como também em laboratórios de pesquisa. Dentre as técnicas mais atuais, destaca-se a irradiação assistida por micro-ondas e as reações ativadas por ultrassom, bem como processos envolvendo células fotovoltaicas e a combustível, biocatálise e biotransformação, além de metodologias analíticas verdes e tratamentos de efluentes com tecnologias verdes, mostrando a importância da Química Verde em praticamente todos os setores produtivos.³

3. Irradiação por micro-ondas

E o que são as micro-ondas? Para melhor entendimento do assunto será apresentado adiante a teoria das micro-ondas e os princípios do mecanismo de aquecimento envolvidos durante a atuação das micro-ondas em um material.

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com componentes de campo elétrico e magnético. A irradiação de micro-ondas trabalha na faixa de frequência entre 0,3 a 300 GHz e comprimento de onda (λ) variando entre 1 mm e 1m. Na Figura 1 observam-se as bandas de frequência das micro-ondas no espectro eletromagnético, onde sua região está localizada entre o infravermelho e as ondas de rádio.^{4,5}

Em resumo, os princípios envolvidos no aquecimento por micro-ondas fazem referência a alguns conceitos físicos e químicos, tais como temperatura, ligação química, estrutura molecular, momento de dipolo, polarização, capacidade calorífica e constante dielétrica.⁶

O mecanismo de aquecimento pelas micro-ondas ocorre de maneira diferente do aquecimento convencional (condução, irradiação e convecção). No aquecimento convencional, o recipiente e todo o material contido no mesmo sofre aquecimento, resultando em um gradiente de temperatura do meio mais aquecido para o menos aquecido. O aquecimento por micro-ondas ocorre de forma contrária ao convencional (Figura 2), decorrente do mecanismo de aquecimento envolvido no sistema, a rotação de dipolo e condução iônica.⁵

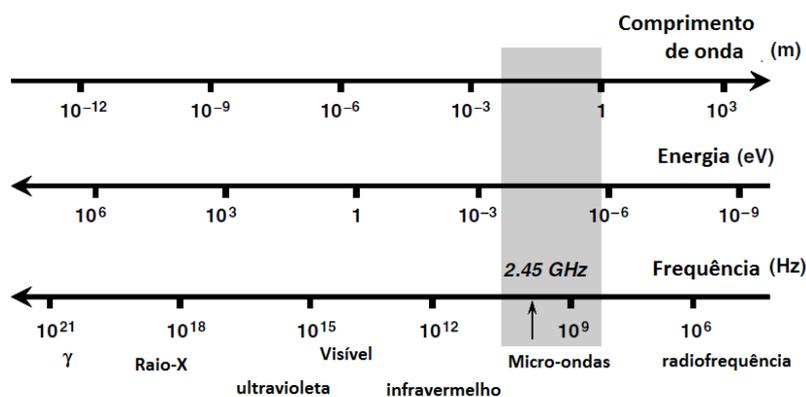


Figura 1. Espectro eletromagnético. (Adaptado da ref.5 com autorização. Copyright©2009 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemanha)

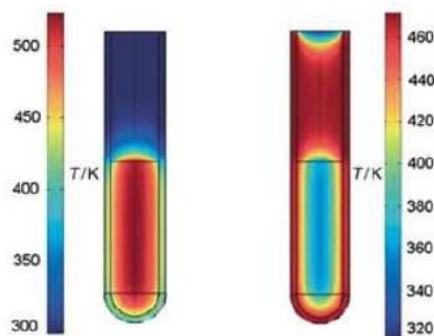


Figura 2. Gradiente de temperatura para o aquecimento por micro-ondas (esquerda) e em banho em óleo (direita) depois de 1 minuto de aquecimento. (Reprodução da ref.9 com autorização. Copyright © 2004 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemanha)

A interação da componente campo elétrico com a matriz é chamada de mecanismo de rotação de dipolo. É necessário que a molécula possua um momento dipolar para que o alinhamento com o campo elétrico seja aplicado. Ao retirar o campo elétrico as moléculas retornam ao seu estado desordenado, a energia que foi absorvida durante a orientação nos dipolos é dissipada na forma de calor, aquecendo o meio. Este mecanismo é dependente da frequência do campo

elétrico e do tempo necessário para que os dipolos retornem ao seu estado de desordem inicial (tempo de relaxação) (Figura 3). Se o dipolo não tiver tempo suficiente para realinhar (irradiação de alta frequência) ou reorientar rapidamente (irradiação de baixa frequência) com o campo aplicado, o aquecimento não ocorre. Como o campo elétrico na frequência de 2,45GHz oscila (muda de sinal) $4,9 \times 10^9$ vezes por segundo, ocorre um pronto aquecimento destas moléculas.^{5,7,10,11}

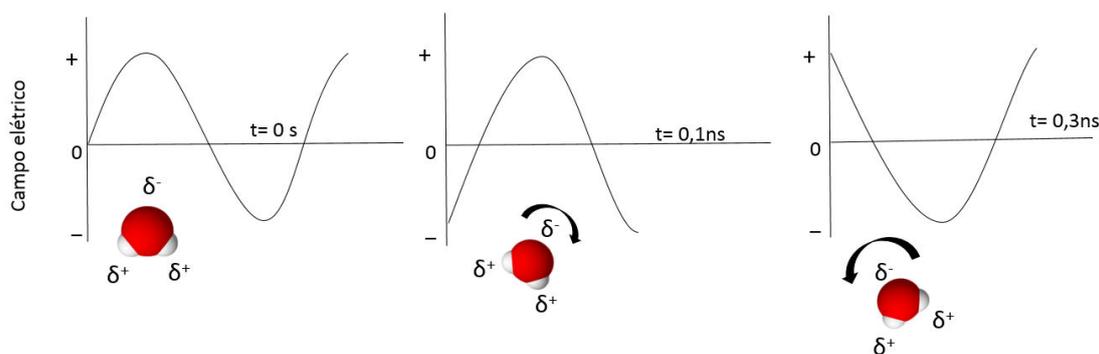


Figura 3. Moléculas com e sem influência do campo elétrico.(Adaptado da ref.5 com autorização. Copyright©2009 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemanha)

O mecanismo por condução iônica (Figura 4) envolve a perda por fricção, que ocorre através da migração de íons dissolvidos sob a ação de um campo eletromagnético. Esta

perda depende do tamanho, da carga, da condutividade dos íons dissolvidos e interação destes últimos com o solvente empregado.¹¹

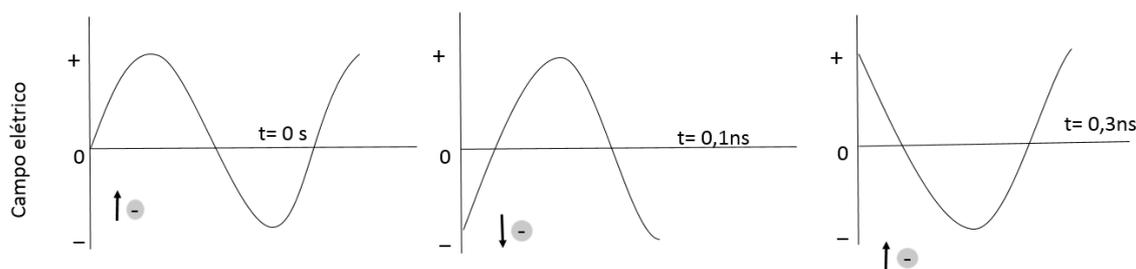


Figura 4. Exemplo de condução iônica. (Adaptado da ref.5 com autorização. Copyright©2009 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemanha)

Para que o aquecimento por micro-ondas seja eficiente, também se faz necessário que o frasco utilizado para a extração seja feito de material transparente às micro-ondas, como quartzo ou teflon. Todo o material dentro do frasco é aquecido diretamente, conforme os mecanismos de aquecimento por micro-ondas mencionados anteriormente, e é comum observar que partes do frasco que contém o material a ser analisado continuam na temperatura próxima ao ambiente logo após ser aquecido.

Além dos mecanismos de aquecimento apresentados é necessário que o material utilizado no sistema seja capaz de absorver a energia de micro-ondas e convertê-la em calor.^{5,7,8} A absorção das micro-ondas é dependente das propriedades dielétricas do material. Essa absorção ocorre pelo fator de perda que é expresso como o quociente $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$, onde ϵ'' é a perda dielétrica, que é um

indicativo de eficiência com o qual a radiação eletromagnética é convertida em calor. O ϵ' é a constante dielétrica que descreve a polarização de moléculas no campo elétrico. Em geral, os solventes podem ser classificados como de alta ($\tan \delta > 0,5$), média ($\tan \delta > 0,1 - 0,5$) e baixa ($\tan \delta < 0,1$) absorção de micro-ondas. O meio reacional onde $\tan \delta$ é alta é devido a absorção eficiente e, conseqüentemente, o aquecimento é rápido.⁵

De acordo com os mecanismos descritos, solventes polares absorvem bem micro-ondas (como água, metanol, etanol), enquanto que substâncias menos polares (hexano, diclorometano, acetona) ou substâncias com momento de dipolo nulo absorvem fracamente as micro-ondas. A Tabela 1 apresenta o fator de perda dielétrica de alguns solventes químicos.^{5,10}

Tabela 1. Fator de perda dielétrica de alguns solventes químicos (20°C e 2,45GHz).^{4,5} (Adaptado das refs.4 e 5 com autorização. Copyright©2002, American Chemical Society and Copyright©2009 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemanha)

Solventes	Alto ($\tan \delta > 0,5$)	Solventes	Médio ($\tan \delta 0,1-0,5$)	Solventes	Baixo ($\tan \delta < 0,1$)
Etilenoglicol	1,350	2-Butanol	0,447	Clorofórmio	0,091
Etanol	0,941	1,2-Diclorobenzeno	0,280	Acetonitrila	0,062
Dimetilsulfóxido	0,825	1-Metil-2-pirrolidona	0,275	Acetato de etila	0,059
2-Propanol	0,799	Ácido acético	0,174	Acetona	0,054
Ácido fórmico	0,722	<i>N,N</i> -dimetilformamida	0,161	Tetraidrofurano	0,047
Metanol	0,659	1,2-Dicloroetano	0,127	Diclorometano	0,042
Nitrobenzeno	0,589	Água	0,123	Tolueno	0,040
1-Butanol	0,571	Clorobenzeno	0,101	Hexano	0,020

Os métodos convencionais de aquecimento em sistema aberto (por ex. placa de aquecimento) apresentam vantagens, uma vez que são fáceis de manipular e tem baixo custo de investimento, devido à ausência de sofisticadas tecnologias. No entanto, os processos que os utilizam apresentam alguns inconvenientes como o usualmente elevado consumo de reagente e solvente, risco de perda de analito e longo tempo de reação, devido ao intervalo prolongado, necessário para que ocorra o aquecimento no interior do material, além do emprego de temperatura limitada. Soluções são alcançadas com o emprego de reatores, mas exigem um investimento inicial razoável.¹²

Ao contrário do que ocorre nos métodos convencionais de aquecimento, a temperatura de reação pode exceder o ponto de ebulição do solvente empregado para a extração em um sistema fechado empregando micro-ondas. O ajuste da temperatura será limitada apenas pelo limite de pressão e/ou temperatura do frasco utilizado pelo equipamento de micro-ondas. Uma grande vantagem reside na redução drástica do volume de solvente e a massa de material a ser analisado, o que acarreta na redução de resíduos e torna este sistema uma alternativa para novos métodos de extração de compostos orgânicos.^{1,12}

Ao se fazer a comparação entre o aquecimento convencional e por micro-ondas há a preocupação com especulações sobre a existência de efeitos térmicos, efeitos específicos de micro-ondas e efeitos não térmicos de micro-ondas.^{5,11}

De Souza e Miranda (2011)¹¹ fazem uma abordagem bastante explicativa dos efeitos citados acima. “...Os efeitos térmicos podem ser entendidos como consequência direta das altas temperaturas reacionais, que podem ser obtidas quando reagentes e solventes polares são irradiados com micro-ondas...” Sobre os efeitos específicos os autores explicam: “...todos aqueles efeitos térmicos que não podem ser reproduzidos pelo aquecimento convencional. Neste contexto se encontram o superaquecimento de solventes à pressão

atmosférica, o aquecimento seletivo de reagentes e a formação de hot spots (pontos isolados de alta temperatura no meio reacional). É importante ressaltar que apesar destes efeitos serem produzidos exclusivamente na presença da irradiação de micro-ondas, seus resultados observados são função do aumento da temperatura reacional...” E quanto aos efeitos não térmicos “...correspondem a todos aqueles efeitos que não podem ser explicados como térmicos ou específicos de micro-ondas...” , onde houver aumento da probabilidade de choques intermoleculares devido às sucessivas mudanças de orientação das moléculas polares, em função da oscilação do campo elétrico e mecanismos polares com formação de espécies carregadas no estado de transição, haverá o favorecimento pela irradiação de micro-ondas, devido à interação com o campo elétrico gerado.

4. Extração assistida por micro-ondas na área de produtos naturais e alimentos

O termo empregado para designar a extração por micro-ondas é comumente encontrado nas publicações científicas como "Microwave-assisted extraction (MAE)" ou no português "Extração assistida por micro-ondas". Ao longo dos anos, as publicações com emprego da MAE vêm ganhando destaque no meio científico, principalmente nos laboratórios de química, segundo a base de dados SciFinder.

Ao inserir, nesta base de dados, a palavra-chave "Microwave-assisted extraction", com busca no período de 1996 a 2014, foi possível observar várias publicações em periódicos científicos, em números crescentes, e em setores diversificados como alimentos, aproveitamento de resíduos, processos de produção e catálise, análise ambiental, entre outros (Figura 5). Por favorecer, com maior precisão, o controle das condições do procedimento experimental como tempo, temperatura, agitação magnética, permitir

operar em sistema fechado via frascos vedados hermeticamente, evita-se possíveis degradações térmicas e oxidação do material, por exemplo, além de ganhar reprodutibilidade no experimento.

Somente o periódico *Green Chemistry* (Royal Society of Chemistry), o mais conceituado na área de Química Verde no âmbito internacional, teve 89 artigos publicados no campo da extração assistida por micro-ondas no período acima compreendido. Entre eles, destacam-se as

publicações relativas a processos sintéticos em geral (44), seguido daquelas relativas à biomassa, entre os quais os produtos naturais (23).

Especificamente quanto à aplicação e o desempenho da extração assistida por micro-ondas aos compostos ativos de plantas, observa-se uma maior eficiência da técnica em relação aos métodos convencionais como Soxhlet,^{13,14} extração por ultrassom e extração por aquecimento em refluxo simples.¹⁵⁻¹⁸

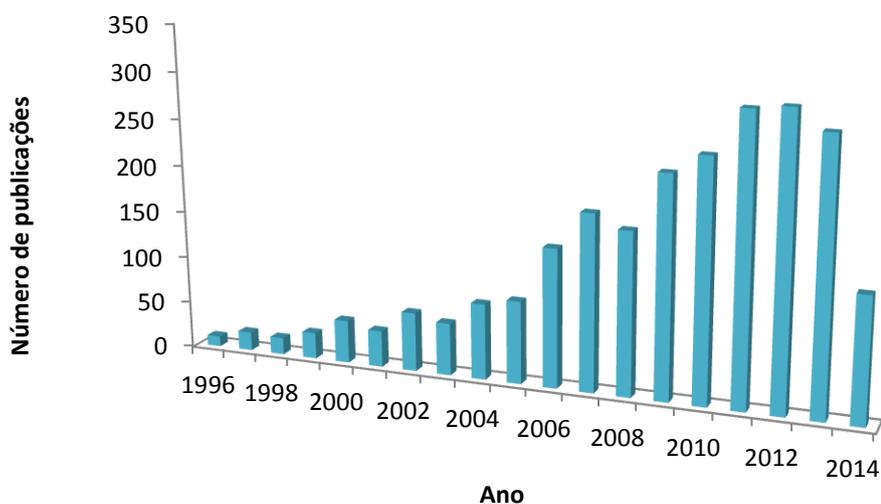


Figura 5. Número de publicações referente às palavras-chave *microwave-assisted extraction* na base de dados SciFinder (período 1996-2014)

Nas áreas de alimentos e da química de produtos naturais, a maioria dos artigos se refere à extração de compostos fenólicos.

Milutinovic e colaboradores (2014)¹⁹ avaliaram o teor de polifenóis (expresso em equivalentes de ácido gálico-GAE) e a atividade antioxidante (FRAP e DPPH), pelo ensaio de sequestro de radical livre, em extratos de resíduo de cavalinha (*Equisetum arvense*, Equisetaceae), empregando a extração assistida por micro-ondas e um método convencional (extração sólido-líquido com agitação). A melhor condição obtida foi a extração por micro-ondas utilizando 40 ml de etanol (solução 54 %), 1 grama do resíduo de cavalinha, e em apenas 80 segundos de extração. O resultado foi bastante

interessante, já que superou o teor de polifenóis extraído por 12 h no método convencional (161,57 e 120,27 mg GAE/g em matéria seca, respectivamente). As condições que favoreceram o teor elevado de polifenóis também elevaram a atividade antioxidante em FRAP e DPPH.

Recentemente, Tsukui e colaboradores (2014)²⁰ realizaram a extração-assistida por micro-ondas do óleo de grão de café verde (*Coffea arabica* L., Rubiaceae) e a compararam ao método de extração convencional por extrator Soxhlet, frequentemente empregado para a obtenção de óleo de café. Neste estudo, foi comparada a capacidade extrativa dos métodos, bem como a seletividade da

extração em relação aos diterpenos majoritários presentes no café (cafestol e caveol) (Figura 6).

O rendimento em óleo foi equivalente para a extração assistida por micro-ondas e por Soxhlet (58,6 – 76,1 g/kg e 74,9 – 94,7 g/kg de grão, respectivamente). A Figura 7 apresenta o fluxograma do experimento. Pode-se observar ainda que a extração do óleo por micro-ondas foi realizada em 10 min, com redução da quantidade de solvente, o que torna o processo extrativo por micro-ondas bem interessante. Ao analisar a composição do óleo extraído por cromatografia líquida acoplada à

espectrometria de massas, observou-se um aumento no teor dos diterpenos e consequente redução do teor de triglicerídeos e ácidos graxos. Pelo processo no micro-ondas, o teor de diterpenos chega a ser até 6 vezes maior em comparação à extração convencional, considerando a relação tempo x rendimento. Outra vantagem deste método foi a realização da metanólise dos diterpenos esterificados no mesmo em equipamento de micro-ondas. A análise destes teores foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência acoplada a detetor de UV.²⁰

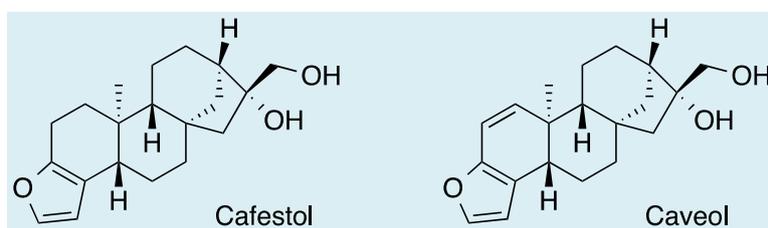


Figura 6. Estrutura química dos diterpenos cafestol (a) e caveol (b)

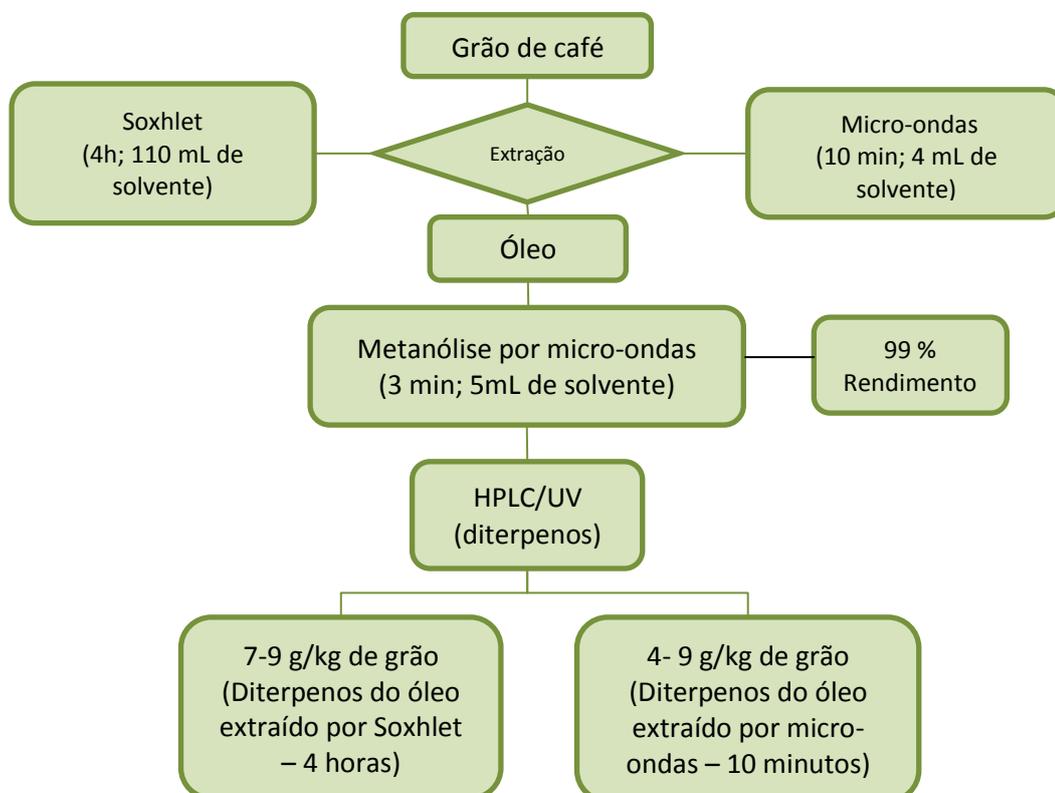


Figura 7. Fluxograma de obtenção de diterpenos do óleo de café verde a partir da extração-assistida por micro-ondas x extração por Soxhlet

Um aspecto interessante que vem sendo introduzido nos trabalhos que empregam MAE refere-se ao uso de líquidos iônicos (LI), usualmente derivados do cátion imidazólio. Lou e colaboradores (2012)²¹ concluíram que a variação do ânion e/ou do cátion do LI apresenta efeitos sobre a extração dos compostos fenólicos de *Arctium lappa* L. (bardana), dependente também da potência de irradiação, tempo e proporção matriz: LI. O rendimento de ácido caféico e quercetina obtido por líquido iônico-MAE foi maior do que com MAE sem LI. Em comparação com a extração com refluxo convencional, houve aumento de eficiência com tempo de extração mais curto (de 5h para 30s).

Entre outros estudos, a associação LI-MAE também foi aplicada na extração de canferol e quercetina de *Bauhinia championii*,²² quercetina de *Psidium guajava* (goiaba),²³ bem como de rutina a partir de *Saururus chinensis* e *Flos sophorae*, duas plantas chinesas.²⁴ Em todos os casos, a extração de flavonoides empregando LI-MAE foi ânion-dependente, o que se justifica pela

presença dos vários grupos OH e anéis aromáticos dos flavonoides, solvatados pelas ligações de hidrogênio que realizam com os ânions dos LI. A associação LI-MAE aparece como uma forte conotação de Química Verde, pois tem capacidade para substituir solventes mais tóxicos, como o metanol, frequentemente empregados em processos extrativos de constituintes polares presentes em plantas.

A Tabela 2 apresenta alguns trabalhos descritos na literatura sobre a eficiência da MAE em comparação aos métodos convencionais, aplicados a plantas. A maioria dos trabalhos retrata a resposta quanto ao rendimento, eficiência na extração com amostras mais limpas e menor tempo de extração. Deve-se ressaltar que o emprego de micro-ondas pode ser considerado como uma alternativa para minimizar a geração de resíduos, devido ao emprego de amostra e solvente em menor quantidade, diferentemente ao que ocorre nos métodos convencionais de aquecimento.

Tabela 2. Extração-assistida por micro-ondas (MAE) em diferentes matrizes

Matriz	Analito	Experimental	Observação	Referência
Plantas variadas	Pesticidas Organo-clorados	Soxhlet: 80 mL MAE: 15 mL	Menor consumo de solvente e tempo de extração comparado ao Soxhlet.	25
Grão de café verde	Compostos fenólicos	Soxhlet e MAE: Parâmetros iguais de tempo, temperatura, amostra e solvente (1:4, p/v).	Rendimento em cafeína e ácido clorogênicos maior para extração por micro-ondas.	13
Beterraba (<i>Beta vulgaris</i>)	Betalainas	Agitação orbital x MAE. Amostra e solvente (0,1g : 25mL, p/v).	Rendimento em betaninas e betaxantinas maior para extração por micro-ondas.	17
<i>Artemisia afra</i>	Óleo essencial	Hidrodestilação (180min) x "MAE" (10 min).	Números iguais de substâncias identificadas. Perfil cromatográfico com percentagem de área relativa próximas.	26
Chá preto	Compostos fenólicos	Preparo da bebida por micro-ondas em diversas condições de tempo e potência.	Extração de compostos fenólicos independente da potência aplicada, mas dependente da temperatura do meio.	27
<i>Curcuma longa</i>	Curcumina	MAE, Soxhlet, CO ₂ supercrítico e ultrassom.	Maior rendimento por micro-ondas (90%), após imersão em água e posterior extração	14

		Imersão em água ou etanol e posterior extração com etanol ou acetona.	com acetona.	
Toranja	Pectina	MAE com variação no tempo (2 a 14 min) e potência. Banho em aquecimento (90°C/90min).	Rendimento em pectina de 27% para micro-ondas e 19% em banho de aquecimento.	28

5. Considerações Finais

A eficiência do aquecimento por micro-ondas é a principal vantagem da técnica de extração assistida por micro-ondas (MAE). O emprego de recipientes fechados permite o uso de temperaturas mais elevadas, acelerando o processo extrativo do composto alvo. O volume de solvente usualmente empregado na extração assistida por micro-ondas (MAE) é cerca de 10 vezes menor do que o volume empregado nas técnicas convencionais de extração, com usual aumento do rendimento e da reprodutibilidade do processo.

Ao observar o caminho percorrido pela pesquisa ao longo dos anos, percebemos a preocupação crescente com o desenvolvimento científico x sustentabilidade. Quando se consegue cumprir o trajeto com alguns quesitos da Química Verde, pode se dizer que há a utilização mais consciente dos recursos naturais, além da preocupação com o meio ambiente. Segundo o exposto anteriormente, conclui-se que é crescente o interesse da comunidade científica pela irradiação por micro-ondas, que vem apresentando benefícios referentes à eficiência, redução do tempo de extração, etapas reduzidas no preparo de amostra e geração de pequena quantidade de resíduos, levando a um novo olhar para os métodos de extração descritos na literatura e ao melhoramento da qualidade dos resultados concomitantemente à preocupação com o meio ambiente.

Referências Bibliográficas

- ¹ Lenardão, E. J.; Freitag, R. A.; Dabdoub, M. J.; Batista, A. C. F.; Silveira, C.C. "Green Chemistry" - Os 12 Princípios da Química Verde e sua Inserção nas Atividades de Ensino e Pesquisa. *Química Nova* **2003**, *26*, 123. [[Link](#)]
- ² Anastas, P. T.; Warner, J.; *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford. University Press: Oxford, 1998. [[Link](#)]
- ³ Corrêa, A. G.; Zuin, V. G. Química Verde: fundamentos e aplicações. São Carlos: EdUFSCar 2009. [[Link](#)]
- ⁴ Larhed, M.; Moberg, C.; Hallberg, A. Microwave-accelerated homogeneous catalysis in organic chemistry. *Accounts of Chemical Research* **2002**, *35*, 717. [[CrossRef](#)]
- ⁵ Kappe, C. O.; Dallinger, D.; Murphree, S. S.; *Practical Microwave Synthesis for Organic Chemists*, Wiley-VCH: Weinheim, Alemanha, 2009. [[Link](#)]
- ⁶ Rosini, F.; Nascentes, C. C.; Nóbrega, J. A. Experimentos didáticos envolvendo radiação micro-ondas. *Química Nova* **2004**, *27*, 1012. [[Link](#)]
- ⁷ Barboza, A. C. R.N.; Cruz, C. V. M. S.; Graziani, M. B.; Lorenzetti, M. C. F.; Sabadini, E. Aquecimento em forno de micro-ondas/desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. *Química Nova* **2001**, *24*, 901. [[Link](#)]
- ⁸ Al-Mayman, S. I.; Al-Zahrani, S. M. Catalytic Cracking of Gas Oils in Electromagnetic Fields: Reactor Design and Performance. *Fuel Processing Technology* **2003**, *80*, 169. [[CrossRef](#)]
- ⁹ Kappe, C. O. Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis. *Angewandte*

- Chemie International Edition* **2004**, *43*, 6250. [CrossRef]
- ¹⁰ Sanseverino, A. M. Micro-ondas em Síntese Orgânica. *Química Nova* **2002**, *25*, 660. [Link]
- ¹¹ de Souza, R. O. M. A.; Miranda, L. S. M. Irradiação de micro-ondas aplicada à síntese orgânica: uma história de sucesso no Brasil. *Química Nova* **2011**, *24*, 497. [Link]
- ¹² Sítio da Anton Paar - Preparação de amostras. Disponível em: <<http://www.anton-paar.com/br-pt/produtos/grupo/preparacao-da-amostra/>>. Acesso em: 30 julho 2014.
- ¹³ Upadhyay, R.; Ramalakshmi, K.; Rao, L. J. M. Microwave-assisted Extraction of Chlorogenic Acids from Green Coffee Beans. *Food Chemistry* **2012**, *130*, 184. [CrossRef]
- ¹⁴ Wakte, P. S.; Sachin, B. S.; Patil, A. A.; Mohato, D. M.; Band, T. H.; Shinde, D. B. Optimization of microwave, ultra-sonic and supercritical carbon dioxide assisted extraction techniques for curcumin from *Curcuma longa*. *Separation and Purification Technology* **2011**, *79*, 50. [CrossRef]
- ¹⁵ Pan, X.; Niu, G.; Liu, H. Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves. *Chemical Engineering and Processing* **2003**, *42*, 129. [CrossRef]
- ¹⁶ Barrera Vázquez, M. F.; Comini, L. R.; Martini, R. E.; Núñez Montoya, S. C.; Bottini, S.; Cabrera, J. L. Comparisons between conventional, ultrasound-assisted and microwave-assisted methods for extraction of anthraquinones from *Heterophyllaea pustulata* Hook f. (Rubiaceae). *Ultrasonics Sonochemistry* **2014**, *21*, 478. [CrossRef]
- ¹⁷ Cardoso-Ugarte, G. A.; Sosa-Morales, M. E.; Ballard, T.; Liceaga, A.; San Martín-González, M. F. Microwave-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*). *LWT-Food Science and Technology* **2014**, *59*, 276. [CrossRef]
- ¹⁸ Dahmoune, F.; Spigno, G.; Moussi, K.; Remini, H.; Cherbal, A.; Madani, K. *Pistacialentiscus* Leaves as a Source of Phenolic Compounds: Microwave-assisted Extraction Optimized and Compared with Ultrasound-assisted and Conventional Solvent Extraction. *Industrial Crops and Products* **2014**, *61*, 31. [CrossRef]
- ¹⁹ Milutinovic, M.; Radovanovic, N.; Rajilic-Stojanovic, M.; Siler-Marinkovic, S.; Dimitrijevic, S.; Dimitrijevic-Brankovic, S. Microwave-assisted extraction for the recovery of antioxidants from waste *Equisetum arvense*. *Industrial Crops and Products* **2014**, *61*, 388. [CrossRef]
- ²⁰ Tsukui, A.; Santos Júnior, H. M.; Oigman, S. S.; de Souza, R. O. M. A.; Bizzo, H. R.; Rezende, C. M. Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. *Food Chemistry* **2014**, *164*, 266. [CrossRef]
- ²¹ Lou, Z.; Wang, H.; Zhu, S.; Chen, S.; Zhang, M.; Wang, Z. Ionic liquids based simultaneous ultrasonic and microwave assisted extraction of phenolic compounds from budock leaves. *Analytica Chimica Acta* **2012**, *24*, 28. [CrossRef]
- ²² Xu, W.; Chu, K.; Li, H.; Zhang, Y.; Zheng, H.; Chen R.; Chen, L. Ionic liquid-based microwave-assisted extraction of flavonoids from *Bauhinia championii* (Benth.) Benth. *Molecules* **2012**, *17*, 14323. [CrossRef]
- ²³ Du, F.-Y.; Xiao, X.-H.; Luo, X.-J.; Li, G.-K. Application of ionic liquids in the microwave-assisted extraction of polyphenolic compounds from medicinal plants. *Talanta* **2009**, *78*, 1177. [CrossRef]
- ²⁴ Zeng, H.; Wang, Y.; Kong, J.; Nie, C.; Yuan, Y. Ionic liquid-based microwave-assisted extraction of rutin from chinese medicinal plants. *Talanta* **2010**, *83*, 582. [CrossRef]
- ²⁵ Barriada-Pereira, M.; Concha-Graña, E.; González-Castro, M. J.; Muniategui-Lorenzo, S.; López-Mahía, P.; Prada-Rodríguez, D.; Fernández-Fernández, E. Microwave-assisted Extraction versus Soxhlet Extraction in the Analysis of 21 Organochlorine Pesticides in Plants. *Journal of Chromatography A* **2003**, *1008*, 115. [CrossRef]
- ²⁶ Asfaw, N.; Licence, P.; Novitskii, A. A.; Poliakov, M. Green chemistry in Ethiopia: the cleaner extraction of essential oils from *Artemisia afra*: a comparison of clean technology with conventional methodology. *Green Chemistry* **2005**, *7*, 352. [CrossRef]

²⁷ Spigno, G.; Faveri, D. M. Microwave-assisted extraction of tea phenols: A phenomenological study. *Journal of Food Engineering* **2009**, *93*, 210. [[CrossRef](#)]

²⁸ Bagherian, H.; Ashtiani, F. Z.; Fouladitajar, A.; Mohtashamy, M. Comparisons between

conventional, microwave- and ultrasound-assisted methods for extraction of pectin from grapefruit. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **2011**, *50*, 1237. [[CrossRef](#)]