

Processo de irradiação em resíduos agroindustriais

João Pedro de Azevedo Barros¹

O mundo enfrenta desafios significativos na gestão das vastas quantidades de matérias-primas geradas pela agricultura, aquicultura, silvicultura e pecuária, com estimativas de perdas de até 50 % ao longo das diversas etapas, desde a colheita até o consumo. Esses resíduos agroindustriais, devido à sua composição e degradabilidade mais lenta, frequentemente resultam em acumulação e impactos ambientais adversos. No entanto, eles também contêm concentrações consideráveis de compostos bioativos valiosos, sugerindo um potencial significativo para serem reincorporados em novas aplicações. A radiação ionizante emergiu como uma técnica promissora para o reaproveitamento de resíduos, destacando-se entre os métodos disponíveis devido à sua característica de tecnologia limpa, que não gera resíduos adicionais nem aumenta a temperatura durante o processamento, ao contrário dos métodos convencionais. Essa abordagem oferece uma nova perspectiva para o gerenciamento de resíduos, visando não apenas a redução do desperdício, mas também a criação de produtos de alto valor agregado com menor impacto ambiental. Desta forma, esse capítulo aborda as pesquisas mais recentes sobre o uso da energia nuclear como uma solução inovadora e viável para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais. Ela examina os efeitos positivos e negativos dessa tecnologia na preservação nutricional e na disponibilidade de compostos bioativos, além de abordar a aceitação dessa tecnologia e a disseminação das informações sobre seus benefícios em alimentos e resíduos.

INTRODUÇÃO

Desde o advento dos raios X, pesquisadores avaliam a possibilidade de utilização da radiação ionizante para preservar e prolongar a vida útil de produtos alimentícios visando a segurança do alimento. A tecnologia de irradiação é um processo físico que envolve a exposição do alvo a um dos três tipos de energia ionizante: radiação gama, raios X e feixes de elétrons. As alterações provocadas pela irradiação nos produtos alimenta-

¹ Pesquisa orientada pela Prof.^ª Dr.^ª Anna Lucia C. H. Villavicencio.

res são semelhantes às observadas no processamento geral de alimentos, como aquecimento, lavagem ou congelamento. Porém, como vantagem, a irradiação pode aumentar a vida útil dos produtos alimentícios preservando as características organolépticas e nutricionais. No entanto, o consumo de alimentos irradiados não era um conceito popular até que avanços significativos nas pesquisas forneceram evidências de seus benefícios e segurança, ampliando o leque de aplicações da tecnologia de irradiação para o fornecimento de resíduos nutricionalmente preservados para reutilização industrial, incorporação como ingrediente e desenvolvimento de novos produtos, contribuindo não só para a sustentabilidade do processo, mas também para agregar valor à matéria-prima (Madureira *et al.*, 2020a).

Décadas de pesquisa acompanharam o uso da irradiação em alimentos, com suas vantagens superando algumas desvantagens. Agora, mais do que nunca, a ciência está a ser pressionada para desenvolver e aplicar processos de produção sustentáveis, um compromisso assinado por 163 países a ser alcançado até 2030. A Agenda 2030 elegeu dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados à concretização dos direitos humanos e à promoção do desenvolvimento sustentável nas suas dimensões social, econômica e ambiental, compromisso global assumido por 193 países (ONU, 2015).

Em vista da imensa pressão política, ambiental e social que a indústria alimentar enfrenta para se tornar sustentável e permanecer competitiva, tem-se buscado alternativas viáveis e que tragam benefícios para ambas as partes (indústria e meio ambiente). Os resíduos e subprodutos agroindustriais não fazem parte da cadeia de valor e podem impactar negativamente o meio ambiente. Porém, apesar de serem matérias-primas secundárias, são um recurso renovável com fitoquímicos valiosos como óleos essenciais, polifenóis e taninos, entre outros. A maioria desses compostos são bioativos, podem ser recuperados da matriz de biomassa e podem ser utilizados como agentes antioxidantes ou antimicrobianos. Tecnologias como a irradiação para segurança do alimento representam uma alternativa mais verde aos processos térmicos intensivos em energia, e esforços devem ser feitos para expandir seu uso e aceitação, a fim de evitar perdas econômicas significativas resultantes da perda ou contaminação de alimentos e o descarte inadequado de resíduos contendo substâncias próprias para consumo (Moreira; Castell-Perez, 2021).

Com base nas informações mencionadas anteriormente, esse capítulo destaca o crescente interesse no tratamento, reutilização e aplicação de resíduos agroindustriais que passaram por processo de irradiação, abor-

dando também o ponto de vista ambiental, social e económico. Além disso, destaca a energia nuclear como alternativa segura e a inovação tecnológica aliada à promoção do desenvolvimento sustentável.

1 EFEITOS DA IRRADIAÇÃO EM ALIMENTOS E RESÍDUOS

A radiação ionizante de raios gama é um dos meios mais eficientes para descontaminação de alimentos e resíduos. Uma vez absorvida por um material biológico, a radiação gama tem efeito direto e indireto no material que a recebe. O efeito direto decorre da interação direta da radiação com estruturas celulares essenciais, como DNA/RNA (mais pronunciado em estruturas de fita simples), proteínas e membranas. Isto não só perturba a função celular, mas também incapacita os microrganismos de se replicarem ou regenerarem. O efeito indireto, por sua vez, resulta da interação da radiação com o meio aquoso das células, gerando radicais livres altamente reativos, reação comumente conhecida como radiólise. Esses radicais livres irão interagir com os demais componentes celulares dos microrganismos, como as organelas presentes na matriz citoplasmática, causando danos generalizados que correspondem a 70 % de todos os efeitos da radiação. Como a irradiação pode ser aplicada em alimentos embalados, as possibilidades de reinfestação e recontaminação são limitadas (Tripathi *et al.*, 2023; Fanaro *et al.*, 2015; Moreira; Castell-Perez, 2021).

A irradiação é considerada um processo “frio” porque não envolve aumento significativo da temperatura das amostras irradiadas. A primeira vantagem conferida por esta propriedade é a possibilidade de tratar materiais resfriados, congelados ou sensíveis ao calor. Alimentos e produtos residuais que passam por processos de irradiação têm uma vida útil mais longa do que o processamento térmico, embora retenham seus sabores e aromas, que são diminuídos pelos métodos de processamento convencionais que empregam alguma forma de aquecimento. Por outro lado, os métodos de resfriamento, como o congelamento, têm a vantagem de causar alterações mínimas nas características sensoriais e nas propriedades nutricionais dos alimentos e resíduos; entretanto, quando comparados aos tratamentos térmicos, são considerados leves, pois seu impacto no aumento da vida útil é baixo. As alterações químicas nos alimentos irradiados são pequenas e poucas deficiências nutricionais foram relatadas; entretanto, algumas vitaminas são sensíveis à degradação irradiativa, como as vitaminas C, E, A e B12, embora, nas doses permitidas (até 10 kGy), essas reduções sejam pequenas em relação à variação natural do teor de vitaminas nestes alimentos. A tecnologia de irradiação, portanto, surge como

uma estratégia promissora ao aliar o aumento da vida útil à preservação nutricional dos alimentos e resíduos tratados. Também evita a dependência de métodos químicos, como aditivos alimentares, comumente utilizados em produtos industrializados (Kilcast, 1994; Nishihira, 2020).

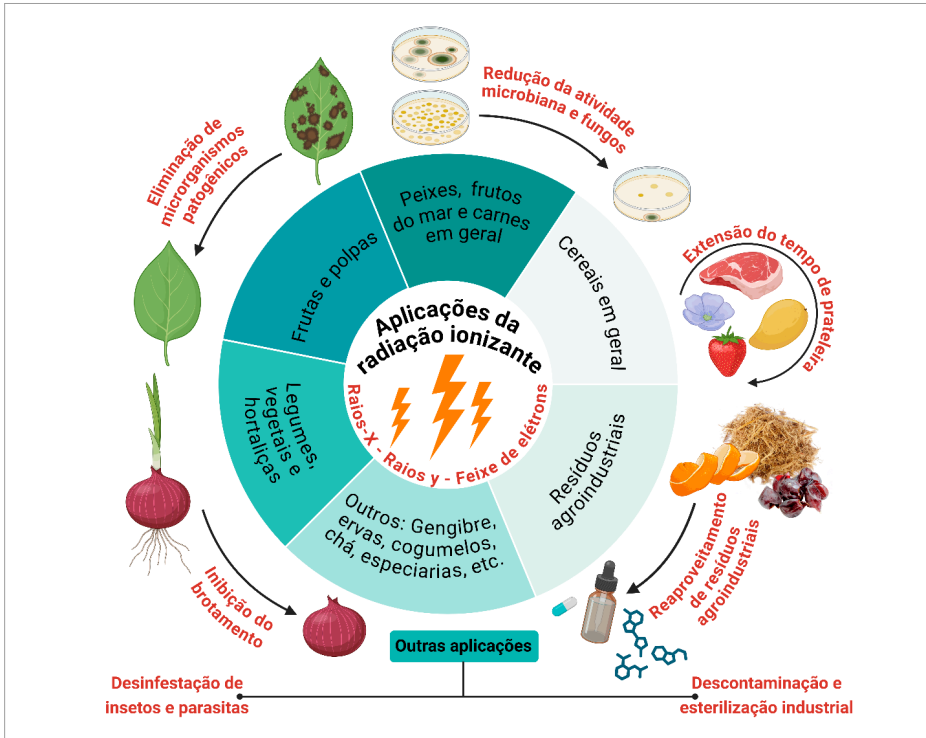
2 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Vários estudos têm sido realizados sobre a utilização da irradiação em alimentos e resíduos, utilizando diferentes dosagens de acordo com os objetivos a que se destinam. No caso da irradiação de alimentos, são consideradas doses baixas aquelas até 1 kGy, doses médias de 1 a 10 kGy e doses altas acima de 10 kGy. Essa classificação corrobora com dados disponíveis na literatura, onde Ehlermann (2016) relatou que com doses baixas já é possível alcançar a segurança fitossanitária de frutas, hortaliças, grãos e cereais. Algumas dessas aplicações do processo de irradiação podem ser observadas na figura 24. Doses médias, por sua vez, proporcionam prolongamento do prazo de validade, inativação de bactérias patogênicas (em alguns produtos animais e vegetais) e melhorias nas propriedades tecnológicas dos alimentos. Por outro lado, altas doses são utilizadas em processos industriais de descontaminação e esterilização; porém, para alimentação, são bastante restritos, como refeições pré-preparadas, dietas hospitalares, dietas esterilizadas de astronautas e alguns temperos (Villavicencio, 2021; Sahoo *et al.*, 2022).

Estudos da literatura mostram que a maioria dos efeitos desejados nos alimentos, como inibição de brotação, atraso no processo de maturação, desinfecção de insetos e redução da carga microbiana, podem ser obtidos em doses baixas e médias-baixas de irradiação. A revisão elaborada por Xavier *et al.* (2018) apresenta uma lista de estudos sobre o controle de microrganismos em produtos de origem animal utilizando tecnologia de radiação. Além disso, o estudo de Štajner *et al.* (2007), relatou que doses médias de irradiação entre 1 e 10 kGy aumentaram significativamente o conteúdo total de fenólicos e taninos das sementes de soja. Também foi observado maior acúmulo de fenólicos e flavonóides na irradiação de cogumelos frescos, mas para algumas variedades não houve diferença significativa nestes compostos (Fernandes *et al.*, 2012). Enquanto doses maiores são utilizadas principalmente em produtos desidratados, o que se justifica pela interação das moléculas de água com a radiação ionizante, levando à formação de radicais livres e interações/reações com o material irradiado prejudiciais ao consumo. Fanaro *et al.* (2015), em estudo com chá

verde, verificaram que existe uma relação proporcional entre o aumento da atividade de água e a diminuição da dose de irradiação necessária para reduzir a contaminação microbiológica, sem interferir no teor dos principais flavonóides e na atividade antioxidante em doses de até 5,0 kGy.

Figura 24: Aplicações da radiação ionizante na indústria alimentícia



Fonte: Ilustração do autor.

Conforme destacado na literatura, a irradiação de alimentos oferece vantagens significativas na redução da carga microbiológica e na extensão da vida útil dos produtos, preservando suas propriedades organolépticas e nutricionais. Além disso, a aplicação da irradiação como tecnologia para melhorar as qualidades nutricionais tem sido explorada, podendo ser estendida aos resíduos agroindustriais. Estes subprodutos, como cascas, polpas, sementes e caroços, frequentemente contêm concentrações mais elevadas de compostos bioativos do que as partes comestíveis dos produtos primários. Por exemplo, os compostos fenólicos são encontrados predominantemente nos subprodutos devido à sua função na proteção contra radiação UV, acumulando-se nos tecidos dérmicos das plantas (Babbar

et al., 2015; Ben-Othman *et al.*, 2020). A seguir, serão apresentados os principais estudos sobre resíduos agroindustriais e os impactos da tecnologia de radiação ionizante nos processos de despolimerização, biodisponibilidade e extração de compostos bioativos.

3 COMPOSTOS BIOATIVOS EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos agroindustriais da indústria alimentícia são ricos em compostos bioativos (elementos nutricionais extras, como compostos fenólicos, carotenóides, prebióticos, probióticos, fibras, vitaminas e minerais, entre outros). Esses compostos têm potencial para serem utilizados em alimentos funcionais, nutracêuticos, aditivos alimentares e também encontram aplicação nas indústrias farmacêutica, química e cosmética. Além disso, cada um desses compostos tem sua importância e função no organismo, mas os compostos mais extensivamente estudados são os fenólicos, um dos mais diversos e extensos grupos de metabólitos, com uma rica família de fitoquímicos divididos em diversas subclasses: flavonóides, ácidos fenólicos, cumarinas, estilbenos e taninos. Estes compostos atuam como agentes quimiopreventivos e inibidores do estresse oxidativo; entretanto, não estão presentes em abundância na dieta regular e precisam ser consumidos principalmente de fontes vegetais (raízes, caules, folhas, flores e frutos) porque contribuem com propriedades antioxidantes, antimicrobianas, antitumorais e anti-inflamatórias. Os carotenóides são compostos notáveis pela sua ampla distribuição natural, diversas estruturas químicas e funções variadas. Exemplos são alfa-caroteno, beta-caroteno, luteína, zeaxantina e licopeno. Embora sejam micronutrientes, presentes em níveis muito baixos, os carotenóides estão entre os constituintes alimentares mais importantes por serem substâncias bioativas com ação antioxidante, efeitos benéficos no combate a doenças e também precursores da vitamina A (Madureira *et al.*, 2020a).

Embora não exista um método ideal para extrair esses compostos, as tecnologias de radiação ionizante demonstraram melhorar o rendimento de extração de compostos bioativos de alguns resíduos, uma alternativa promissora para a quebra de compostos complexos em compostos bioativos que são facilmente assimiláveis, facilitando sua absorção pelo corpo e, conseqüentemente, sua biodisponibilidade e bioacessibilidade quando consumidos. Na última década, vários estudos foram publicados sobre a extratibilidade e melhoria das propriedades bioativas de compostos químicos em alimentos irradiados e resíduos agrícolas, permitindo sua incorpo-

ração em produtos alimentícios e contribuindo para o desenvolvimento de alimentos funcionais (Madureira *et al.*, 2020a; Levy; Villavicencio, 2020).

4 RADIAÇÃO IONIZANTE EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

A implementação da utilização de substâncias extraídas de resíduos agroindustriais na alimentação humana requer avaliação criteriosa de seus efeitos quando absorvidos pelo organismo. Testes *in vitro* de genotoxicidade e citotoxicidade definem se um composto bioativo extraído de um resíduo pode ser assimilado de forma segura e eficiente pelo organismo e então utilizado para consumo. Além disso, os resíduos precisam passar por pré-tratamentos que visam reduzir a carga microbiana para garantir a segurança e reduzir a perecibilidade sem perder as propriedades nutricionais. Apesar disso, os métodos convencionais de pré-tratamento, como secagem e lavagem, afetam negativamente a presença e quantidade de compostos bioativos (Sagar *et al.*, 2018; *et al.*, 2024). Neste contexto, a radiação ionizante tem se destacado como uma técnica promissora dentre os recursos atualmente disponíveis. Mais de 60 países em todo o mundo possuem regulamentações que permitem a irradiação de produtos para consumo humano (AIEA, 2023).

Desta forma, essa técnica permite diversas aplicações, contribuindo significativamente para a sustentabilidade e valorização desses resíduos. As principais aplicações desses resíduos incluem a produção de farinhas, bagaço, cápsulas, cascas, talos, folhas, extratos e pós, que podem ser utilizados em diversas indústrias, como a alimentícia e farmacêutica. A seguir, algum dos principais estudos utilizando o processo de irradiação com o intuito de aperfeiçoar processo e aumentar o valor agregado dos produtos, abordando os principais efeitos nos compostos.

Para casca da amêndoa (*Prunus amygdalus*), Harrison e Were (2007) relataram que a irradiação de extratos de casca de 4 a 12,7 kGy aumentou o conteúdo fenólico total e a atividade antioxidante em até 45 % em comparação com o controle não irradiado. No mesmo ano, o trabalho de Pérez *et al.* (2007) mostraram aumento de 35 % no teor de compostos fenólicos em extratos de folhas secas de alecrim (*Rosmarinus officinalis* L.) irradiados a 30 kGy em comparação com amostras controle não irradiadas. Amílcar *et al.* (2011) avaliaram a influência da irradiação gama no potencial antioxidante de frutos e cascas de castanhas (*Castanea sativa* Mill.), apontando efeito benéfico independente da dose utilizada ($0,27 \pm 0,04$ kGy ou $0,54 \pm 0,04$ kGy) (Antonio *et al.*, 2011). Folhas de Curcuma

alismatifolia (*Zingiberaceae*) tratadas com radiação gama aumentaram o conteúdo fenólico total em 32,7 % (15 kGy) e 51,4 % (20 kGy), enquanto para flavonóides totais houve aumento de 29,8 % (15 kGy) e 78,3 % (20 kGy) (Taheri *et al.*, 2014).

Khattak e Rahman (2016) avaliaram o efeito da radiação ionizante sobre alguns atributos de qualidade e propriedades biológicas de folhas de *Ziziphus mauritiana*. Os resultados mostraram que o tratamento com 12,5 kGy de radiação gama levou a maior concentração de compostos bioativos, principalmente fenólicos e flavonóides, além de melhorar as propriedades biológicas das folhas, como atividade antibacteriana e antioxidante (Khattak; Rahman, 2016). O bagaço de maçã é uma fonte atraente de compostos fenólicos. O trabalho de Ito *et al.* (2017) revelaram que a irradiação da farinha de bagaço de maçã a 1 kGy foi capaz de aumentar a extratibilidade de compostos fenólicos individuais e totais, bem como o potencial antioxidante.

Madureira *et al.* (2020b) relataram que doses de até 22 kGy no bagaço de azeitona melhoraram em 2,4 vezes a capacidade de extração dos principais compostos fenólicos presentes na matriz. Porém, observou-se que a dosagem de 10 kGy apresentou maior quantidade de compostos fenólicos totais. Este resultado pode ser justificado devido ao processo de despolimerização que auxilia na extratibilidade, revelando que há um limite na aplicação da dose irradiada para preservação dos compostos. Bashir *et al.* (2017) relataram que o tratamento com radiação gama de farinha de trigo integral e amido resultou na modificação de suas propriedades físico-químicas, como diminuição dos parâmetros de pasta, aumento da estabilidade de congelamento-descongelamento, solubilidade em água e capacidade de absorção de água em comparação aos tratamentos enzimáticos e químicos.

Apesar dos estudos demonstrarem aumento na quantidade de compostos bioativos e melhoria na qualidade geral do produto, alguns autores não detectaram tais fenômenos em doses de até 5 kGy, mas apenas que a irradiação conservou tais compostos, evitando possível degradação, o que é ainda considerado um benefício atrativo no processo de conservação e preservação. Sultão *et al.* (2018) não observaram aumento na concentração de antocianinas totais em amostras de farelo de arroz irradiado na dosagem de 2,5 kGy. Resultado semelhante foi obtido por D'Angelis (2020), em que a composição nutricional, bem como a concentração de compostos bioativos, atividade antioxidante e propriedades tecnológicas das farinhas integrais de sorgo irradiadas não foram aumentadas na dosagem aplicada

de 5 kGy, porém, sua qualidade foi mantida sem causar alterações nos macronutrientes e micronutrientes presentes. As diferentes aplicações da irradiação em resíduos agroindustriais e a faixa de dosagem são mencionadas no quadro 2.

Quadro 2: Aplicações, doses e efeitos da irradiação em resíduos agroindustriais

Resíduo agroindustrial	Dose (kGy)	Principais efeitos	Referências
Casca de pistache	10, 20, 30, 40, 50, e 60	Redução do teor de taninos e da atividade antioxidante dos extratos, mas aumentou o teor de fenólicos totais.	Behgar <i>et al.</i> , 2011
Semente de lótus	2,5, 5, 7,5, 10, 15, e 30	Aumento significativo de cinzas (>10 kGy) e carboidratos (30 kGy), com aumento de fenólicos e taninos totais.	Bhatt; Sridhar, 2008
Semente de damasco	6 e 9	Aumento do índice de acidez e espectro de absorção de cor em óleo extraído de semente de damasco exposta a doses de 9 kGy.	Al-Bachir; Koudsi, 2019
Casca de pitaya vermelha	1, 2, e 4	Melhora no teor de vitamina C, capacidade antioxidante e compostos fenólicos totais.	Santos <i>et al.</i> , 2022
Casca de amendoim	2,5 e 5	O tratamento melhorou a atividade antioxidante da fração fenólica livre e as cascas foram microbiologicamente seguras para consumo.	Camargo <i>et al.</i> , 2015
Bagaço de azeitona	5, 10, 16 e 22	Melhora a extratibilidade de compostos em pelo menos 2 vezes. Aumento da atividade antioxidante no bagaço de azeitona.	Madureira <i>et al.</i> , 2020b

Fontes: Elaborado pelo autor.

Além dos resíduos mencionados no quadro 2, outros estudos já foram realizados com casca de banana (*Musa acuminata*), semente de uva (*Vitis vinifera*) e bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). As doses utilizadas nesses estudos ficaram entre 0,2 e 20 kGy, mas para bagaço da cana-de-açúcar são utilizadas doses mais elevadas, entre 5 e 2000 kGy. Esses resultados, e as diversas aplicações da radiação ionizante em resíduos agroindústrias, refletem a importância do uso dessa técnica para o reaproveitamento de subprodutos que podem aumentar o valor agregado e ainda contribuir para sustentabilidade.

Estudos mais recentes, com o uso da radiação ionizante em resíduos agroindustriais, com o objetivo de reaproveitamento, melhoria e aperfeiçoamento de processos estão sendo desenvolvidos. Durante a produção de azeite de abacate, tanto a casca, quanto a semente são descartados

logo de início, somente a polpa é utilizada para a extração do azeite. Após a extração, um novo resíduo é gerado, a polpa que sofreu o processo de extração. Apesar de ser um resíduo do processo, esses componentes apresentam grandes quantidades de compostos bioativos, ácido graxos benéficos, vitaminas e minerais, dentre outros. Quando utilizado a radiação ionizante nesses resíduos, foi observado um aumento da capacidade de extração de compostos bioativos da casca, semente e polpa de abacate (após a extração do azeite). Para as amostras irradiadas, houve melhora na quantidade de compostos fenólicos totais para os três resíduos analisados, mas com diferentes níveis de impactos, resultado da suscetibilidade à irradiação e das características de cada resíduo. Resultado similar também foi observado para atividade antioxidante, mas que para algumas vias (ABTS e FRAP) não houve diferença significativa entre o irradiado e não irradiado (Barros *et al.*, 2024).

Outro estudo em andamento, também visando o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, proveniente do processamento do café, como palha e casca (Figura 25), apresentam uma grande quantidade compostos, além da ótima capacidade antioxidante. Isso reflete diretamente os benefícios do reaproveitamento de resíduos agroindústrias, uma vez que muitos dos compostos estão normalmente presentes nas cascas das frutas e legumes. Com o auxílio do processo de irradiação, foi observado melhora significativa no teor de compostos fenólicos, ABTS, FRAP e ORAC, tanto na casca, quanto na palha do café. Além disso, o rendimento de extração para palha e casca sem irradiação não apresentou diferença significativa, mas observa-se que a dose de 5 kGy proporcionou aumento na extrabilidade do composto, tal efeito também pode ser justificado pelos efeitos físicos da irradiação na estrutura dos compostos. Sendo assim, a utilização de resíduos agroindustriais, como casca e palha de café, como matéria-prima para obtenção de extratos ricos em compostos bioativos com ação antioxidante, é uma estratégia promissora que pode ser ainda potencializada com o uso de radiação ionizante. Além disso, a utilização de casca e palha de café ajuda a reduzir a quantidade de resíduos agroindustriais e agrega valor a esse resíduo específico, aumentando as possibilidades de aplicação em outras áreas.

Em geral, a influência da irradiação nos compostos bioativos e na capacidade antioxidante dos alimentos pode depender de vários fatores, incluindo a dose de radiação aplicada, o tipo de alimento, a natureza dos compostos bioativos presentes e as condições de armazenamento pós-irradiação, dentre outros. Devido à complexidade da relação entre os efeitos da radiação ionizante e os compostos presentes, são necessários

mais estudos específicos para melhor e compreender esses efeitos, além de otimizar o uso da irradiação para preservar e melhorar a qualidade nutricional dos alimentos.

Figura 25: Resíduos agroindústrias do café: palha (A) e casca (B).



Fonte: Acervo do autor.

CONCLUSÕES

A irradiação é uma técnica de processamento de alimentos e resíduos não térmica, não química, ambientalmente limpa e energeticamente eficiente, usada para prolongar a vida útil de alimentos frescos ou processados, evitando a contaminação com microrganismos prejudiciais e, ao mesmo tempo, preservando as propriedades organolépticas e nutricionais. Nas últimas décadas, o uso da radiação ionizante se expandiu em vários países para desinfestação de pragas, redução da carga microbiana em produtos agrícolas e carnes, inibição de brotações e, mais recentemente, revelou-se uma técnica promissora para aplicação aos resíduos agroindustriais, ao permitir a extração de importantes compostos bioativos que podem ser utilizados em novas formulações, contribuindo não só para agregar valor à matéria-prima, mas também para a sustentabilidade do processo, evitando descarte, acúmulo e impacto ambiental negativo. Apesar de possuir grande potencial na agroindústria, a aplicação da irradiação ionizante no processamento de produtos destinados

ao consumo ainda é subestimada. Várias décadas de pesquisa têm se esforçado para determinar as vantagens versus poucas desvantagens de submeter materiais alimentares à radiação, o que resultou em vários organismos internacionais, como a OMS, AIEA, FAO e FDA, certificando que a irradiação de alimentos é um método de processamento seguro para o ambiente e para a saúde humana. Ainda assim, para chegar ao consumidor comum, é fundamental que os governos e a mídia exerçam mais confiança nos produtos irradiados para que esta tecnologia ganhe maior aceitabilidade na sociedade moderna.

Além de preservar e/ou aumentar a quantidade de compostos presentes e a atividade antioxidante nos resíduos, a irradiação também apresenta outras vantagens que destacam ainda mais essa tecnologia. Portanto, a tecnologia de radiação ionizante é uma opção muito interessante para o gerenciamento e reaproveitamento de resíduos agroindustriais, mas ainda é um processo que requer mais investigação para analisar os efeitos da irradiação sobre esses resíduos e identificar as melhores doses de irradiação que permitem o melhor aproveitamento. uso desses extratos de resíduos

■ REFERÊNCIAS

AL-BACHIR, M.; KOUDSI, Y. Some characteristics of oil extracted from gamma irradiated apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies* [s.l.], v. 25, n. 1, p. 24–30, 2019.

ANTONIO, A. L.; FERNANDES, A.; BARREIRA, J. C. M.; BENTO, A.; BOTELHO, M. L.; FERREIRA, I. C. F. R. Influence of Gamma Irradiation in the Antioxidant Potential of Chestnuts (*Castanea Sativa* Mill.) Fruits and Skins. *Food and Chemical Toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, [s.l.], v. 49, n. 9, p. 191–823, 2011. DOI: 10.1016/j.fct.2011.02.016.

BABBAR, N.; OBEROI, H. S.; SANDHU, S. K. Therapeutic and nutraceutical potential of bioactive compounds extracted from fruit residues. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, [s.l.], v. 55, n. 3, p. 319–337, 2015. DOI: 10.1080/10408398.2011.653734.

BASHIR, K.; SWER, T. L.; PRAKASH, K. S.; AGGARWAL, M. Physico-chemical and functional properties of gamma irradiated whole wheat flour and starch. *LWT-Food Science and Technology*, [s.l.], v. 76, p. 131–139, 2017. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.10.050

BEHGAR, M.; GHASEMI, S.; NASERIAN, A.; BORZOIE, A.; FATOLLAHI, H. Gamma radiation effects on phenolics, antioxidants activity and in vitro digestion of

pistachio (*Pistachia vera*) hull. *Radiation Physics and Chemistry*, [s.l.], v. 80, n. 9, p. 963–967, 2011. ISSN 0969–806X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.04.016>.

BEN-OTHMAN, S.; JÓUDU, I.; BHAT, R. Bioactives from agri-food wastes: Present insights and future challenges. *Molecules*, [s.l.], v. 25, n. 3, p. 510, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25030510>.

BHAT, R.; SRIDHAR, K. R. Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated lotus (*Nelumbo nucifera*) seeds. *Food Chemistry*, [s.l.], v. 107, n. 1, p. 174–184, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.002>.

CAMARGO, A. C.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; GALLO, C. R.; SHAHIDI, F. Gamma-irradiation induced changes in microbiological status, phenolic profile and antioxidant activity of peanut skin. *Journal of Functional Foods*, [s.l.], v. 12, p. 129–143, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.10.034>.

D'ANGELIS, D. F. Análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais de leites fermentados com potencial probiótico adicionados de farinhas integrais de sorgo irradiadas. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

EHLERMANN, D. A. E. Particular Applications of Food Irradiation: Meat, Fish and Others. *Radiation Physics and Chemistry*, [s.l.], v. 129, p. 53–57, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.027>.

FANARO, G. B.; HASSIMOTTO, N. M. A.; BASTOS, D. H. M.; VILLAVICENCIO, A. L. C. H. Effects of γ -radiation on microbial load and antioxidant proprieties in green tea irradiated with different water activities. *Radiation Physics and Chemistry*, [s.l.], v. 107, p. 40–46, 2015. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2014.09.008](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.09.008)

FERNANDES, A.; ANTONIO, A. L.; BEATRIZ, M. OLIVEIRA, P. P.; MARTINS, A.; FERREIRA, I. C. F. R. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: a review. *Food Chemistry*, [s.l.], v. 135, p. 2, p. 641–650, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.04.136>.

HARRISON, K.; WERE, L. Effect of Gamma Irradiation on Total Phenolic Content Yield and Antioxidant Capacity of Almond Skin Extracts. *Food Chemistry*, [s.l.], v. 102, n. 3, p. 932–37, 2007. DOI: [10.1016/j.foodchem.2006.06.034](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.034).

ITO, V. C.; ZIELINSKI, A. A. F.; AVILA, S.; SPOTO, M.; NOGUEIRA, A.; SCHNITZLER, E.; LACERDA, L. G. Effects of Gamma Radiation on Physicochemical, Thermogravimetric, Microstructural and Microbiological Properties during Storage of Apple Pomace Flour. *LWT– Food Science and Technology*, [s.l.], v. 78, p. 105–113, 2017. DOI: [10.1016/j.lwt.2016.12.016](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.016).

KHATTAK, K. F.; RAHMAN, T. U. Effect of gamma irradiation on the vitamins, phytochemicals, antimicrobial and antioxidant properties of *Ziziphus mauritiana* Lam. leaves, *Radiation Physics and Chemistry*, [s.l.], v. 127, p. 243–248, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.001>.

KILCAST, D. Effect of irradiation on vitamins. *Food chemistry*, [s.l.], v. 49, n. 2, p. 157–164, 1994. DOI:10.1016/0308-8146(94)90152-X.

LEVY, D. S.; VILLAVICENCIO, A. L. C. H. Food Irradiation: Communication Strategies to Bridge the Gap Between Scientists and the Public. In: INAC 2019: International Nuclear Atlantic Conference. Nuclear new horizons: fueling our future. *Proceedings* p. 2.046–2.055, 2020.

MADUREIRA, J.; BARROS, L.; VERDE, S. C.; MARGAÇA, F. M. A.; SANTOS-BUEGA, C.; FERREIRA, I. C. F. R. Ionizing Radiation Technologies to Increase the Extraction of Bioactive Compounds from Agro-Industrial Residues: a review. *J. Agric. Food Chem.*, [s.l.], v. 68, 40, p. 11054–11067, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04984>.

MADUREIRA, J. *et al.* The use of gamma radiation for extractability improvement of bioactive compounds in olive oil wastes. *Science of The Total Environment*, [s.l.], v. 727, 138706, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138706>.

MOREIRA, R. G.; CASTELL-PEREZ, M. E. Fundamentals of food irradiation. In: *Innovative Food Processing Technologies*, [s.l.], p. 1–18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815781-7.00008-1>.

NISHIHARA, J. Safety of irradiated food. In *Genetically Modified and Irradiated Food*. Academic, p. 259–267, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817240-7.00016-4>.

PÉREZ, M. B.; CALDERÓN, N. L.; CROCI, C. A. 2007. Radiation-Induced Enhancement of Antioxidant Activity in Extracts of Rosemary (*Rosmarinus Officinalis* L.). *Food Chemistry*, [s.l.], v. 104, n. 2, p. 585–592, 2007. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.009.

SAGAR, N. A.; PAREEK, S.; SHARMA, S.; YAHIA, E. M.; LOBO, M. G. Fruit and vegetable waste: bioactive compounds, their extraction, and possible utilization, *Compreh. Rev. Food Sci. Food Safety*, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 512–531, 2018. DOI: 10.1111/1541-4337.12330.

SAGAR, N. A.; PATHAK, M.; SATI, H.; AGARWAL, S.; PAREEK, S. Advances in Pre-treatment Methods for the Upcycling of Food Waste: a sustainable approach. *Trends in Food Science & Technology*, [s.l.], p. 1–24, 2024. DOI:10.1016/j.tifs.2024.104413.

SAHOO, M.; ARADWAD, P.; PANIGRAHI, C.; KUMAR, V.; NAIK, S. Irradiation of food. *Novel Technologies in Food Science*, p. 333–373, 2022. DOI: 10.1002/9781119776376.ch9

SANTOS, A. L.; MORAIS, R. A.; SOARES, C. M. S.; VELLANO, P. O.; MARTINS, G. A. S.; DAMIANI, C.; SUZA, A. R. M. Effect of gamma irradiation on the physicochemical, functional and bioactive properties of red pitaya (*Hylocereus costaricensis*) bark flour. *Radiation Physics and Chemistry*, [s.l.], v. 199, p. 1–25, 110371, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110371>.

ŠTAJNER, D.; MILOŠEVIĆ, M.; POPOVIĆ, B. M. Irradiation Effects on Phenolic Content, Lipid and Protein Oxidation and Scavenger Ability of Soybean Seeds. *International Journal of Molecular Sciences*, [s.l.], v. 8, n. 7, p. 618–627, 2007.

TAHERI, S.; ABDULLAH, T. L.; KARIMI, E.; OSKOEIAN, E.; EBRAHIMI, M. Antioxidant capacities and total phenolic contents enhancement with acute gamma irradiation in *Curcuma alismatifolia* (*Zingiberaceae*) leaves. *International Journal of Molecular Sciences*, [s.l.], v. 15, n. 7, p. 13.077–13.090, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms150713077>.

TRIPATHI, J.; SAXENA, S.; GAUTAM, S. Simulation study to assess the effectiveness of gamma radiation for inactivation of viruses on food packaging material. *Radiation Physics and Chemistry*, [s.l.], v. 204, p. 110–678, 2023. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110678 .

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 29 jun. 2024.

VILLAVICENCIO, A. L. C. H. Irradiação de alimentos. In: Khoury, H. J.; LEVY, D. *Investigando as aplicações da radioatividade: curiosidades sobre diferentes áreas de atuação para inspirar professores e jovens pesquisadores*. São Paulo: Recanto das Letras, 2021, p. 164.

XAVIER, M. M. B. S.; FRANCO, R. M.; SOUZA, M. C. L.; DUQUE, S.; ESTEVES, W. T. C. Implications of the use of irradiation in the processing of animal origin foods: review. *Journal of bioenergy and food science*, [s.l.], v. 5, n. 4, p. 131–144, 2018. DOI:10.18067/jbfs.v5i4.257.