



Uso da radiação gama na agricultura

Antonio Bisconsin-Junior^{1*}, Luciano Topolniak¹, Aldison Diego Fonseca Dias¹, Michelly Caroline Rezende Medina¹, Claudinei de Oliveira¹, Nanci do Nascimento²

¹Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Campus Ariquemes, Ariquemes - RO. ²Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo - SP.

Autor para correspondência: Antonio Bisconsin-Junior (antonio.bisconsin@ifro.edu.br)

Resumo

Enquanto a população mundial cresce, a quantidade de terra disponível para a produção de alimentos continua a mesma, o que torna necessário o uso de tecnologias que sejam capazes de aumentar a produtividade, preservar a qualidade e conservar os alimentos após a colheita. Neste contexto, esta revisão apresenta as diversas aplicações da radiação gama na agricultura, avaliando os benefícios e malefícios do uso desta tecnologia, que tem conferido benefícios, como o crescimento acelerado, melhoramento da produção, resistência às pragas e maior tempo de preservação. Para tanto, a radiação gama pode ser utilizada no solo, nas sementes, durante a produção e no pós-colheita de diversos alimentos de origem vegetal. Na aplicação em sementes, geralmente, a radiação gama apresenta efeitos negativos na germinação e crescimento da planta, contudo esses efeitos são considerados vantajosos para o armazenamento de sementes que serão consumidas. Quanto ao solo, foi possível observar que certas doses de radiação gama afetam apenas grupos específicos de micro-organismos, sendo possível reduzir o uso de agrotóxicos. Os maiores benefícios encontrados dizem respeito ao controle de pragas nas lavouras e na preservação dos vegetais após a colheita. O manejo de insetos-pragas é realizado com a radioentomologia, que consiste em tornar os insetos machos estéreis por irradiação e liberá-los em lavouras infestadas, para acasalarem com as fêmeas sem resultados positivos. No pós-colheita, a irradiação tem sido utilizada para inativar micro-organismos patógenos e deterioradores, desinfestar produtos armazenados, inibir o brotamento de bulbos e tubérculos, bem como para alterar o metabolismo de amadurecimento e senescência dos vegetais.

Palavras-chave: radiação ionizante, solo, semente, produção, pós-colheita.

Recebido para publicação: 04/05/2016 - Aprovado: 04/07/2016

Use of gamma radiation in agriculture

Abstract

As the world population increases, the amount of available land for food production remains the same. Therefore, the use of technologies is required to enhance productivity, maintain the quality and preserve post-harvested food. In this context, this review presents several applications of gamma radiation in agriculture, assessing the benefits and drawbacks of the use of this technology that has conferred benefits, such as accelerated growth, improvement of production, pest resistance and increased time of preservation. Therefore, gamma radiation might be used in the soil, seeds, during production and post-harvest of various plant foods. In seeds, generally, the gamma radiation application has negative effects on germination and plant growth, although this is considered advantageous for the storage of seeds which will be consumed in the diet. As for the soil, it was observed that certain doses of gamma radiation only affect specific groups of microorganisms, being possible to reduce the use of pesticides. The greatest benefits were found for pest control in crops and preservation of post-harvest plant foods. The control of pests is accomplished by radio entomology, which consists of sterilizing male insects by irradiation and releasing them in infested fields to mate with females without positive results. For the post-harvest, irradiation is used to inactivate microorganisms, disinfest stored products, inhibit sprouting in bulbs and tubers, as well as alter the metabolism of plant foods.

Keywords: ionizing radiation, soil, seed, yield, post-harvest.

Introdução

Muitos vegetais têm relevante importância alimentar e, portanto, de grande interesse econômico e social. A fome no mundo é pauta nas mais diversas discussões em encontros de líderes globais uma vez que a quantidade de solo disponível para a produção de alimentos continua a mesma e a densidade demográfica do planeta só faz aumentar. Nesse ínterim, é necessário traçar estratégias visando o aumento da produção de alimentos na mesma área de cultivo, melhorando as cultivares para que tenham mais vigor, sejam fortalecidas contra as pragas agrícolas e que produzam maiores quantidades. Portanto, é preciso pensar em tecnologias que permitam alavancar a produção em todas as suas fases, seja na garantia de preservação e germinação das sementes, na preparação e reposição de nutrientes do solo, garantindo o crescimento saudável das espécies com o controle das pragas nocivas às plantas. É necessário ainda, aumentar a produção dos vegetais, fazendo com que a produtividade dos mesmos seja consideravelmente melhorada, bem como garantir o armazenamento e preservação dos vegetais após sua colheita, prolongando a vida útil dos mesmos.

Muito se tem feito para melhorar a qualidade e a produtividade destes alimentos, como a utilização de agrotóxicos nas lavouras para controle de insetos, bactérias e fungos, porém a aplicação destes compostos químicos de forma intensa pode causar contaminação da matéria prima com toxinas, prejudicando a saúde dos consumidores.

Diante da busca por alimentos mais saudáveis, tem-se pesquisado à adoção de práticas alternativas, que possam ao mesmo tempo, controlar pragas e manter a qualidade do produto. O uso controlado da radiação gama na agricultura tem sido uma das principais alternativas para aumentar a produtividade, a qualidade e a conservação de alimentos, sem afetar a saúde do homem. As aplicações da radiação gama estão na esterilização de materiais, melhoramento genético, preservação de alimentos, retardo do amadurecimento de frutas, prevenção do brotamento e na esterilização de insetos (CDTN, 1999). Em 1981, a preservação de alimentos pelo tratamento com a radiação gama foi aprovada pelo Comitê Misto da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO / WHO) e pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). No Brasil está em vigor a resolução RDC Nº 21, de 26 de janeiro de 2001, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde que aprova o regulamento técnico para irradiação de alimentos (BRASIL, 2001).

Irradiação é a aplicação de radiações ionizantes, como os raios gama, raios X, radiações alfa e beta, que são capazes de produzir substâncias ionizadas ao transpassar uma molécula ou elemento (WIENDL, 2010). Os efeitos da radiação podem ocorrer de duas formas: diretamente, quando a molécula sensível à radiação é imediatamente atingida e ionizada; indiretamente, quando moléculas de água são atingidas gerando radicais livres que irão danificar a molécula. Os danos indiretos são, em geral, muito maiores que aqueles causados de maneira direta (GORDON, 1957).

1. Uso da radiação gama no solo

O solo é definido como sendo a camada externa da superfície terrestre, formado pelas rochas por meio dos processos físicos, químicos e biológicos de transformação ao longo das eras geológicas. A adubação para o plantio pode ocasionar a transferência de radionuclídeos dos substratos para o solo e, conseqüentemente, para o alimento, tornando o conhecimento das doses de radiação ionizante empregadas de suma importância para um efetivo controle dos possíveis danos ao ser humano e ao meio ambiente.

De acordo com Gebremikael et al. (2015) a irradiação está se tornando uma ferramenta potencial em estudos ecológicos do solo, pois permite a possibilidade de matar

seletivamente o organismo alvo variando a dose, causando alterações mínimas nas propriedades bioquímicas do solo, em comparação com o tratamento em autoclave e de congelamento.

O método de esterilização ideal é aquele suficiente para atingir a completa eliminação de organismos sem afetar negativamente as propriedades do solo. A penetração da radiação gama no solo é inversamente proporcional à densidade do meio que atravessa, sendo que qualquer matéria contida entre o emissor e o sensor pode afetar significativamente a detecção dos raios gama. Isto faz com que as medições radiométricas sejam essencialmente superficiais, tendo um alcance médio de 30 a 40 cm de profundidade (MINTY, 1988).

Segundo a IAEA diversos estudos mostram que gêneros alimentícios crus são frequentemente contaminados com um ou mais tipos de micro-organismos patogênicos. A fonte de contaminação é variável, podendo ser oriunda dos métodos de criação do animal, incluindo contaminações por alimentos e meio ambiente, confinamento, abate automatizado, uso de produtos contaminantes no solo ou água residuária em hidroponia, uso de esterco como fertilizante, ou condições de colheita e processamento. Estes fatores devem levar à contaminação dos alimentos com vários micro-organismos patogênicos. Por meio das Boas Práticas de Agricultura / Aquicultura os níveis de contaminação microbiana dos alimentos podem ser mantidos a um nível mínimo, porém esta contaminação não pode ser totalmente prevenida (RUBIO et al., 2001).

Segundo Mcnamara et al. (2003), o uso de irradiação é um método confiável para a esterilização, pois provoca mínimas perturbações de propriedades físicas, apesar de ter alguns efeitos sobre as propriedades químicas do solo. A vantagem da irradiação é a elevada eficácia na esterilização e a não ocorrência de contaminação química após o tratamento, sendo muito utilizada para experiências de reinoculação. Por causar o mínimo de perturbação, o maior interesse no potencial da irradiação é poder usá-la como uma ferramenta para manipular seletivamente a biodiversidade no solo. A desvantagem do uso da irradiação é em relação ao ciclo do nitrogênio, pois mesmo depois de diversas semanas da irradiação, os solos se mantinham desequilibrados em seu teor de nitrogênio. Em termos da biologia do solo, dose de 15 kGy é capaz de eliminar os fungos e doses de 20 a 70 kGy, dependendo do tipo de solo, algas e bactérias podem ser eliminadas. Com 5 kGy é possível eliminar os invertebrados, embora possa demorar algumas semanas para que todas as espécies morram. A dose correta de aplicação depende muito das propriedades iniciais do solo, geralmente, quanto maior o teor

de matéria orgânica, maior será a dose utilizada, podendo muitas vezes requerer doses superiores a 50 kGy.

Mori et al. (2006) observaram que a radiação ionizante apresentou eficiência para degradação dos agrotóxicos existentes em dois tipos de solo, um de textura média e o outro de textura muito argilosa. No caso do solo de textura média, a eficiência foi mais elevada, sendo que uma dose de 20 kGy removeu a totalidade dos agrotóxicos em todas as camadas; no caso do solo argiloso, foram necessárias doses maiores que 30 kGy para remover quase a totalidade dos agrotóxicos presentes. A eficiência do processamento do solo por radiação ionizante depende do tipo de contaminação, das características do solo contaminado e também do teor de umidade.

2. Uso da radiação gama em sementes

Em pesquisas bibliográficas sobre a submissão de sementes à irradiação é possível encontrar amplo número de trabalhos publicados sobre testes realizados com as mais diversas espécies de plantas, buscando aferir a influência, seja ela positiva, negativa ou neutra, sobre a germinação das sementes.

A alta qualidade das sementes é um pré-requisito para que sejam obtidas mudas vigorosas, uniformes e com alta produtividade e qualidade. Vários testes têm sido empregados com o objetivo de estimular o desempenho das sementes em campo e/ou armazenamento, sendo o teste de envelhecimento acelerado um dos mais utilizados na avaliação do potencial fisiológico de sementes (COSTA et al., 2008).

A radiação gama oriunda de fonte de cobalto-60 é bastante utilizada para esterilização, visando a prevenção, decomposição e a toxicidade de origem microbiana em diversos produtos. Santos et al. (2010) utilizando diversas doses de radiação gama, verificaram que o tratamento de irradiação afeta negativamente o vigor e a germinação das sementes de amendoim. Por outro lado, Miranda et al. (2009) aplicaram doses de 0 a 5 Gy de radiação gama em sementes de arroz da cultivar BRS-7Taim e observaram uma diferença significativa na germinação entre sementes com diferentes teores de água, ou seja, sementes secas e sementes úmidas responderam de maneira diferentes. Contudo, a fisiologia das sementes de arroz não foi afetada.

Wiendl (2010), irradiou sementes de tomate, híbrido Gladiador, com doses baixas de radiação gama de Cobalto-60 e analisou todos os estágios da planta a fim de identificar melhorias ocasionadas pela irradiação. Na aplicação de doses de 5 a 10 Gy houve melhoria no

desenvolvimento da planta em relação a sua altura, como também um aceleração no seu crescimento. Entretanto, doses de 12,5 a 20 Gy inibiram o desenvolvimento da planta, ficando próximo ao obtido na amostra controle (não irradiada). Para o número de frutos, a dose de 10 Gy apresentou maior número comparado com o controle. Quando irradiadas com 15 Gy observou-se o surgimento de doenças de origem fúngica e a dose de 20 Gy originou a melhor média no peso do fruto. Assim, a dose de 10 Gy apresentou valores superiores entre os resultados.

Veiga et al. (1978) irradiaram sementes de trigo para induzir a mutação e melhoramento do trigo, utilizando as variedades IAC-5 e BH-1146. O trabalho buscou reduzir o porte da IAC-5 e dar resistência a BH-1146 contra a ferrugem-do-colmo. Mil sementes de cada variedade foram irradiadas com doses de 300, 400 e 500 Gy de raios do tipo gama, avaliando-se os efeitos fisiológicos das irradiações, tais como sobrevivência, altura da planta, número de sementes por espiga e número de espigas férteis. Concluíram que houve diminuição na sobrevivência, na altura das plantas, no número de espigas férteis e no número de sementes por espiga (Tabela 1). Em 33 destas progênies foram observados espigamento precoce; 3 progênies apresentaram baixo porte; 6 foram altamente vigorosas e uma demonstrou pouco vigor e folhas menores. Ao final do trabalho obtiveram com a variedade IAC-5, 3 variedades mutantes denominadas TIACENA-1, TIACENA-2 e TIACNEA-3. Estas variações foram definidas pela diferença de porte, sendo que TIACENA-2 teve uma redução de 50% comparada com a variedade original.

Tabela 1. Características dos mutantes de trigo obtidos pela irradiação de sementes da variedade IAC-5 com raios gama.

Nome	Espigamento (dias)	Colheita (dias)	Altura (cm)
IAC-5 (controle)	65	142	125
TIACENA-1	63	139	80
TIACENA-2	54	134	60
TIACNEA-3	61	139	70

Fonte: Veiga et al. 1978

Silva et al. (2010) trabalharam na irradiação de cultivares de arroz BRS Querência e BRS Fronteira para obter variedades mutantes com maior produtividade, precocidade, menor porte e maior resistência a pragas. Utilizou doses de 0 (controle), 200, 250, 300 e 350 Gy para

sementes com 13% de umidade, e 0 (controle), 50, 100, 150 e 200 Gy para sementes com 25% de umidade. No primeiro estágio em bandejas plásticas, analisou-se a altura da planta, comprimento das raízes, número de folhas e massa seca da parte aérea e das raízes. As plântulas foram transplantadas para o campo onde completaram seu ciclo de vida. A partir dos resultados obtidos constatou-se que a aplicação das doses de 300 e 350 Gy afetaram negativamente a germinação. No campo observou-se redução no tamanho das plantas, como também alterações na largura e espessura dos grãos (BRS Querência) e número de grãos (BRS Fronteira). Na cultivar irradiada BRS Querência a largura das folhas foi afetada negativamente com doses a partir de 300 Gy, sendo que doses de 200 Gy reduziram significativamente a altura das plantas. Na cultivar BRS Fronteira, a dose de 200 Gy resultou em aumento de 11,95% no comprimento das folhas e a altura aumentou linearmente com a dose aplicada até 300 Gy.

3. Uso da radiação gama na produção de alimentos

Diante do grande desafio de aumentar a produção de alimentos, a partir da intensificação da agricultura existente, merecem destaque os avanços na área da biotecnologia, que vieram para estimular o desenvolvimento agrícola por meio de incrementos em produtividade. Agências como a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), IAEA (*International Atomic Energy Agency – Austria*) e CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Brasil), a partir da década de 1960, organizaram-se para elaborar programas nas áreas de agricultura e alimentação com a finalidade de combater pragas, aumentar a produção e melhorar a qualidade dos produtos com o uso de métodos nucleares, que incluíram entre outros, o uso de isótopos e da radiação, para melhorar a eficiência das lavouras (GÓMEZ, 2014).

A radioentomologia é uma técnica de irradiação que se baseia no princípio de que doses certas doses de radiação gama são capazes de esterilizar os insetos (CENA, 1992). O uso desta técnica na agricultura consiste na criação e esterilização, por meio da radiação gama, de insetos antes de chegarem à maturidade. Quando constatada a infestação de determinada praga, produz-se e solta uma grande quantidade de machos estéreis na lavoura infestada, que irão acasalar com as fêmeas sem resultados positivos, levando à extinção da espécie (GAINES, 1975). A possibilidade de reduzir custos, com o controle de pragas e eliminar a aplicação de produtos químicos nas lavouras, tem incentivado a criação de novas

empresas, e levado aquelas já consolidadas a utilizar as técnicas de esterilização por radiação, como a empresa Moscamed, de Juazeiro (BA).

Na biofábrica da Moscamed ocorre a produção de machos estéreis da mosca-da-fruta-do mediterrâneo (*Ceratitidis capitata*), variedade Vienna 8, desenvolvida pela IAEA. Os machos estéreis concorrem com os machos selvagens nas lavouras de manga, uva, goiaba, acerola e laranja. Essas moscas causam prejuízos de aproximadamente US\$ 120 milhões aos fruticultores brasileiros. Pesquisas científicas mostraram que as fêmeas cruzam apenas com um macho ou poucos machos durante o seu ciclo reprodutivo, então para combatê-las, criou-se machos estéreis em laboratório, depois estes foram soltos nas plantações para cruzar com fêmeas selvagens. No processo, os machos são irradiados com uma fonte de Cobalto-60 para se tornar estéreis. Inicialmente, a irradiação era realizada no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, porém, atualmente ocorre na Universidade Federal de Pernambuco (ERENO, 2007).

Segundo Silveira (2015), a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) de Bento Gonçalves (RS), também desenvolve pesquisas de esterilização por meio de radiação, porém nesta região os pesquisadores trabalham com a mosca-da-fruta-sul-americana (*Anastrepha fraterculus*), que prejudica alguns cultivares. Apenas na cultura da maçã, a mosca-da-fruta-sul-americana causa, aproximadamente, perdas anuais de R\$ 30 milhões, mais custo da aplicação dos inseticidas e dos danos na colheita, o que representa 2% da produção. Durante o processo, as pupas produzidas na estação experimental de fruticultura em Vacaria (RS) são levadas semanalmente para o Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), onde são expostas à radiação para serem esterilizadas, e quando voltam ao Rio Grande do Sul já são moscas adultas estéreis, para então serem liberadas nas áreas onde ocorrem as infestações.

4. Uso da radiação gama no pós-colheita

O termo pós-colheita refere-se às técnicas aplicadas para conservação e armazenamento de produtos agrícolas como grãos, frutas, hortaliças, tubérculos, entre outros, logo após a colheita até o consumo ou processamento. Essas técnicas são importantes pois, ao contrário dos alimentos de origem animal, os tecidos vegetais permanecem íntegros, mantendo seus processos fisiológicos e bioquímicos normais. Portanto, o objetivo da pós-colheita é manter os produtos agrícolas recém colhidos em condições adequadas, retardar as

deteriorações e evitar alterações químicas e físicas indesejáveis (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

A aplicação da radiação ionizante no pós-colheita é baseada principalmente no fato de que este tipo de radiação causa danos efetivos no DNA, sendo capaz de inativar células vivas. Portanto, micro-organismos, gametas de insetos e o meristema das plantas não conseguem se reproduzir. Além disso, são mínimas as outras mudanças químicas induzidas pela radiação nos alimentos (THAYER, 1990). Assim sendo, a tecnologia de irradiação provou ser efetiva em reduzir perdas pós-colheita, desinfestar produtos armazenados e inativar micro-organismos (KUME et al., 2009).

Tabela 2. Quantidade de alimentos irradiados no mundo para diferentes finalidades no pós-colheita (*em toneladas*).

Local	Inativar micro-organismos (temperos e vegetais)	Inativar insetos (grãos e frutas)	Inibir brotamento (tubérculos e bulbos)
América	101.400	7.000	-
<i>Brasil</i>	20.000	3.000	-
Europa	3.649	11	-
Ásia e Oceania	62.912	4.580	88.196
África	17.725	70.000	-
Mundo (Total)	185.686	81.593	88.196

Fonte: Kume et al. (2009)

4.1. Inativação de micro-organismos

Entre a colheita e a mesa do consumidor, os alimentos frescos podem ser contaminados com patógenos, como bactérias, vírus e fungos. O consumo de alimentos contaminados com esses patógenos pode causar intoxicações ou infecções de origem alimentar, sendo que os patógenos mais comuns e que desafiam a segurança dos produtos frescos são *Salmonella* e *Escherichia coli* (FRANCO e LANDGRAF, 2003).

Geralmente, são usadas doses de irradiação na faixa de 0,2 a 0,8 kGy para reduzir em 1 logaritmo as bactérias patogênicas de produtos frescos. Contudo, vírus e fungos patogênicos, geralmente, são mais resistentes à irradiação, necessitando de 1 a 3 kGy para atingir redução de 1 logaritmo (ARVANITTOYANNIS et al., 2009).

Rajkowski e Thayer (2000) avaliaram o uso da radiação gama (de 0 a 3 kGy) na inativação de *Salmonella* spp. e *Escherichia coli* patogênica (O157:H7) em brotos comestíveis (alfafa, brócolis e rabanete). Aproximadamente, 0,5 kGy foi suficiente para inativar em 1 logaritmo *Salmonella* spp., enquanto que apenas 0,32 kGy obteve o mesmo efeito em *E. coli*. Doses na ordem de 2 kGy inativaram em mais de 4 logaritmos *Salmonella* spp. e mais de 5 logaritmos de *E. coli*.

Quatro tipos diferentes de fungos *Alternaria alternata*, *Aspergillus flavus*, *Trichoderma viride* e *Curvularia geniculata*, foram inoculados em amostras de arroz e submetidos à irradiação (0 a 4,2 kGy). A inativação dos fungos *A. alternata* e *A. flavus* foi observada com doses de 1 a 2 kGy, sendo que estas espécies são responsáveis por causar doenças respiratórias e intoxicação nos seres humanos. No caso de *T. viride* e *C. geniculata*, causadores de doenças em plantas, doses de 0,5 a 1,0 kGy foram necessárias para a inativação (MAITY et al., 2011).

Além dos patogênicos, existe o grupo de micro-organismos deterioradores, que mesmo não causando doenças nos seres humanos, são responsáveis por grande parte das perdas pós-colheita dos produtos agrícolas. Deste modo, o controle dos deterioradores auxilia estendendo a vida de prateleira dos produtos frescos.

Aziz et al. (2006) avaliaram o efeito de diferentes doses de radiação gama (1 a 15 kGy) na microflora natural de quatro cereais de importância econômica (trigo, cevada, milho e sorgo). Para contagem total de bactérias aeróbias, a dose de 5 kGy foi capaz de diminuir em 2 logaritmos e 10 kGy reduziu em 3 logaritmos em todos os cereais avaliados. Enquanto, o uso de 5 kGy nos cereais foi suficiente para eliminar todos os fungos.

4.2. Inativação de insetos (irradiação fitossanitária)

Alimentos frescos que são transportados entre países e regiões podem carregar insetos com capacidade de se estabelecer em novas áreas, prejudicando plantações, meio ambiente e a economia. Para evitar que espécies invasoras se espalhem em novas áreas são realizadas avaliações de risco de pragas e restrições sobre o movimento de produtos frescos. Somente com o uso de medidas fitossanitárias eficazes, vegetais frescos podem ser

transportadas de regiões afetadas por pragas para outras regiões ou países. Os insetos que mais causam preocupações fitossanitárias no comércio de alimentos frescos são: moscas da fruta (família Tephritidae), borboletas e mariposas (ordem Lepidoptera), e cochonilhas (família Pseudococcidae) (HALLMAN, 2011).

Os tratamentos fitossanitários mais comuns incluem o emprego do frio (entre 0 a 2 °C), calor (entre 44 a 48 °C), fumigação (pesticidas voláteis) e radiação ionizante (FOLLET e NEVEN, 2006). O uso da radiação ionizante para tratamento fitossanitário tem crescido em diversos países em um número cada vez maior de vegetais contra um número crescente de espécies de insetos. Devido às políticas de restrição ao uso de pesticidas voláteis (fumigantes), a aplicação comercial da irradiação aumentou, em média, 10% ao ano desde 2000. Diversos protocolos de tratamento por irradiação de vegetais estão ganhando a aceitação internacional, e com isso, mais países e mercados estão adotando este procedimento (HALLMAN, 2011).

A primeira exportação de produto a granel tratado por irradiação para fins fitossanitários foi a manga, da Austrália para Nova Zelândia, em dezembro de 2004. Atualmente, existem 12 instalações de irradiação em sete países (EUA, Brasil, China, Indonésia, Filipinas, Austrália e Ucrânia) que fazem irradiação fitossanitária, sendo que em 2014 mais de 22.000 toneladas de produto fresco foram tratadas nestas instalações. A previsão é que o número de instalações e o volume de produto irradiado aumentem dentro de um futuro próximo (HALLMAN e BLACKBURN, 2016).

O tratamento fitossanitário genérico é uma dose de radiação ionizante específica que é usada para tratar um grupo de insetos e/ou de produtos, contudo nem todas as situações (insetos e/ou produtos) foram testadas quanto à eficácia. Embora o tratamento genérico apresente certas limitações no uso fitossanitário, por falta de testes, o conceito encontrou larga aceitação comercial. Praticamente todas as irradiações fitossanitárias comerciais estão sendo realizadas utilizando doses genéricas (HALLMAN, 2012).

A dose genérica mais utilizada é o mínimo de 400 Gy para todos os insetos, exceto pupas e adultos de mariposas e borboletas (ordem Lepidoptera). Esta dose é aprovada para a exportação de produtos para os Estados Unidos e para a Nova Zelândia (FDA, 2004; MPI, 2014). Existe uma série de novas propostas para doses genéricas (Tabela 3). Estas novas propostas têm como finalidade indicar doses eficazes para insetos resistentes, e também, de propor doses menores de radiação ionizante em grupos específicos de insetos, promovendo o uso de doses genéricas menores que as praticadas atualmente.

Tabela 3. Doses genéricas de irradiação fitossanitária aprovadas e propostas.

Insetos	Dose (Gy)	Aprovada e em uso
Tephritidae (moscas das frutas)	150	Sim
Insetos, exceto pupa e adultos de Lepidoptera	400	Sim
Insetos e Tetranychidae (ácaros aranhaços), exceto pupa e adultos de Lepidoptera	400	Sim
Ácaros	500	Sim
Pragas de lichia e manga para Nova Zelândia	250	Sim
Pragas de manga para Malásia	300	Sim
Pupa de Lepidoptera	400	Não
Ovos e larvas de Lepidoptera	250	Não
Moscas das frutas do gênero <i>Anastrepha</i>	70	Não
Cochonilha	250	Não
Besouros da superfamília Curculionoidea (<i>weevil</i> , em inglês)	150	Não
Insetos, exceto pupa e adultos de Lepidoptera	300	Não

Fonte: Hallman e Blackburn, 2016

4.3. Alterações no metabolismo da planta

A radiação gama é capaz de inibir o brotamento de bulbos e tubérculos, permitindo um tempo maior para a comercialização destes produtos. Estas estruturas vegetais são altamente sensíveis à radiação ionizante, devido à alta concentração de tecido meristemático, que quando exposto à radiação sofre danos no DNA impedindo a mitose das células. O uso da

radiação gama para inibir o brotamento é largamente utilizado na China e no Japão, sendo que em 2005 mais de 88.000 toneladas de alimentos foram irradiadas para este fim nos dois países (KUME et al., 2009).

A inibição do brotamento do alho por radiação gama varia de acordo com a dose aplicada e o estágio de desenvolvimento que a planta se encontra durante a irradiação. O uso de doses superiores a 30 Gy são capazes de inibir o brotamento do alho tanto no período de dormência do bulbo como após esse período. Enquanto, a dose de 10 Gy é capaz de inibir em 60% o brotamento na fase pós-dormência, apresentando nenhum efeito na fase de dormência (PELLEGRINI et al., 2000).

Curzio e Croci (1988) avaliaram os efeitos do uso de 50 Gy de radiação gama em alho e cebola durante o armazenamento por 300 dias. Comparados aos não irradiados (grupo controle), os bulbos irradiados apresentaram melhor retenção de peso, menor índice de apodrecimento e não brotaram durante o armazenamento. Contudo, altas doses de radiação gama (maior que 3,0 kGy) em bulbos causam mudanças indesejáveis, como amolecimento e sabores indesejáveis (LU et al., 1987).

Doses de radiação gama de 50, 100 e 150 Gy foram aplicadas em batatas por Rezaee et al. (2011). A partir de 100 Gy os autores observaram que as doses foram capazes de inibir o brotamento e reduzir a perda de peso após cinco meses de armazenamento (8 e 16 °C). Porém, o uso de doses maiores causou a degradação da vitamina C, sendo que a dose de 150 Gy reduziu entre 20 a 40% o ácido ascórbico.

Além de inibir o brotamento, a radiação ionizante interage com diversas biomoléculas das plantas, sendo capaz de modificar o funcionamento normal do metabolismo. Deste modo, a tecnologia de irradiação é capaz de acelerar ou retardar as etapas de desenvolvimento do fruto, como o amadurecimento e a senescência (ARVANITOYANNIS et al., 2009).

Zaman et al. (2007) estudaram o efeito da radiação gama no aumento da vida de prateleira de bananas. Três doses de radiação gama (0,3 kGy, 0,4 kGy e 0,5 kGy) foram avaliadas, sendo que todas foram capazes de estender a vida de prateleira em 20 dias, comparado ao grupo controle (não irradiado). Não ocorreram mudanças significativas nos constituintes químicos e nas características sensoriais das bananas irradiadas, apenas ocorreu uma pequena degradação da vitamina C.

A irradiação de goiabas com 0,25 kGy foi capaz de suprimir a respiração e a produção de etileno e, por consequência, adiou o amadurecimento da fruta. Esses efeitos

causaram um aumento na vida de prateleira em 4 dias, mantendo a qualidade da fruta e reduzindo o índice de senescência. Também, o tratamento por radiação gama não causou mudanças físicas e bioquímicas (SINGH e PAL, 2009).

Hussain et al. (2008) aplicaram diversas doses de radiação gama (1,0 a 2,0 kGy) em pêssegos e observaram que doses entre 1,2 e 1,4 kGy auxiliaram na retenção de peso, firmeza e teor de açúcares. A vida de prateleira aumentou em 6 dias nas frutas armazenadas em temperatura ambiente e 20 dias sob refrigeração. Entretanto, doses acima de 1,5 kGy favoreceram a perda de firmeza e de açúcares na fruta.

Considerações finais

A utilização da radiação ionizante na agricultura tem sido benéfica em várias fases, desde o melhoramento genético das espécies, bem como na produção, controle de pragas e no armazenamento dos frutos, prolongando a vida dos mesmos e preservando suas qualidades fisiológicas.

Na aplicação em sementes, geralmente, a radiação gama apresenta efeitos negativos na germinação, todavia, há de se observar que esse efeito é vantajoso para o armazenamento das sementes, uma vez que inibir a germinação é requisito para melhor conservação, possibilitando que tais sementes sejam transportadas do local de produção para lugares onde serão consumidos, prologando o tempo de vida de prateleira.

Os maiores benefícios observados dizem respeito ao controle de pragas nas lavouras e na preservação dos frutos após a colheita. Quanto ao solo, foi possível observar que é possível reduzir o uso de agrotóxicos, que tanto agredem a natureza, substituindo-os por doses de radiação que afetam apenas os micro-organismos desejados. Dessa forma, verifica-se o benefício no quesito produtividade, pois, protegendo as plantas de seus predadores se obtém a produção desejada de maneira eficaz. No pós-colheita, a irradiação é utilizada para inativar micro-organismos, desinfestar produtos armazenados, inibir o brotamento de bulbos e tubérculos, assim como para alterar o metabolismo de amadurecimento e senescência dos vegetais.

As desvantagens do uso da radiação podem variar de acordo com o objetivo pretendido. Se o emprego da mesma pode inibir o processo germinativo, pode-se avaliar de forma negativa caso o objetivo fosse o melhoramento, porém, pode ser considerado um efeito positivo se a intenção fosse a conservação do vegetal. Outra forma que pode ser considerada negativa diz respeito ao controle de pragas, pois ao longo do tempo a natureza se modifica,

podendo surgir novas espécies resistentes. No entanto, é importante o uso controlado desta tecnologia, pois existe a necessidade de produzir mais alimentos, para uma população cada vez mais crescente, em solo cada vez mais desgastado, com clima cada vez mais controverso.

Agradecimentos

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP) e ao Instituto Federal de Rondônia (IFRO) por promoverem o curso de extensão Efeitos Biológicos da Radiação, que possibilitou a produção deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ARVANITOYANNIS, I. S.; STRATAKOS, A. C.; TSAROUHAS, P. Irradiation Applications in Vegetables and Fruits: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.49, p.427-462, 2009.

AZIZ, N. H.; SOUZAN, R. M.; AZZA, S. Effect of γ -irradiation on the occurrence of pathogenic microorganisms and nutritive value of four principal cereal grains. **Applied Radiation and Isotopes**, v.64, p.1555–1562, 2006.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 21, de 26 de janeiro de 2001. Aprova o regulamento técnico para irradiação de alimentos. Brasília, 2001.

CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear). **Fator sobre irradiação de alimentos** – Série de fichas descritivas do grupo consultivo internacional sobre irradiação de alimentos (ICGFI). Belo Horizonte: CDTN, 1999, 465p.

CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura). **Aplicações da energia nuclear para o desenvolvimento da agricultura brasileira**. 1972. Disponível em: - <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/080/22080379.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2016.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças**. 2ª ed. Lavras: UFLA, 2005. 785p.

COSTA, C. J.; TRZECIAK, M. B.; VILLELA, F. R. Potencial fisiológico de sementes de brássicas com ênfase no teste de envelhecimento acelerado. **Horticultura Brasileira**, v.26, n.2, 144-148, 2008.

CURZIO, O. A.; CROCI, C. A. Radioinhibition process in Argentinian garlic and onion bulbs. **International Journal of Radiation Applications & Instrumentation**, v.31, n.1, p.203-206, 1988.

ERENO, D. Machos estéreis combatem mosca-das-frutas, que causa sérios prejuízos aos exportadores. **Revista Online Pesquisa FAPESP**, v.133, 2007. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2007/03/01/biofabrica-no-sertao/>>. Acesso em: 3 mar 2016.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia de Alimentos**. 2ª ed. São Paulo: Atheneu, 2003. 172p.

FDA (US Food and Drug Administration). Processing and Handling of Food 21 CFR Part 179. Irradiation in the Production: Washington, DC, USA, p. 76844–76847, 2004.

FOLLET, P. A.; NEVEN, L. G. Current trends in quarantine entomology. **Annual Review of Entomology**, v.51, p.359-385, 2006.

GAINES, M. **Energia Atômica**. São Paulo: Melhoramentos EDUSP, 1975. 157p.

GEBREMIKAEL, M. T.; DE WAELE, J.; BUCHAN, D.; SOBOKSA, G. E.; DE NEVE, S. The effect of varying gamma irradiation doses and soil moisture content on nematodes, the microbial communities and mineral nitrogen. **Applied Soil Ecology**, v.2, p.1-13, 2015.

GÓMEZ, P. G. **ONU recorre à tecnologia nuclear na luta contra fome**. 2014. Disponível em <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/noticias/onu-recorre-a-tecnologia-nuclear-na-luta-contra-fome>>. Acesso em: 5 mar 2016.

GORDON, S.A. The Effects of Ionizing Radiation on Plants: Biochemical and Physiological Aspects. **The Quarterly Review of Biology**, v.32, n.1, p.3-14, 1957.

HALLMAN, G. J. Phytosanitary applications of irradiation. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.10, p.143-151, 2011.

HALLMAN, G. J. Generic phytosanitary irradiation treatments. **Radiation Physics and Chemistry**, v.81, p.861-866, 2012.

HALLMAN, G. J.; BLACKBURN, C. M. Phytosanitary Irradiation. **Foods**, v.5, n.1, p.1-10, 2016.

HUSSAIN, P. R.; MEENA, R. S.; DAR, M. A.; WANI, A. M. Studies on enhancing the keeping quality of peach (*Prunus persica* Bausch) Cv. Elberta by gamma-irradiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v.77, p.473-481, 2008.

KUME, T.; FURUTA, M.; TODORIKI, S.; UENOYAMA, N.; KOBAYASHI, Y. Status of food irradiation in the world. **Radiation Physics and Chemistry**, v.78, p.222-226, 2009.

LU, J. Y.; STEVENS, C.; YAKUBU, P.; LORETAN, P. A. Gamma, electron beam and ultraviolet radiation on control of storage rots and quality of Walla Walla onions. **Journal of Food Processing & Preservation**, v.12, p.53-62, 1987.

MAITY, J. P.; KAR, S.; BANERJEE, S.; SUDERSHAN, M.; CHAKRABORTY, A.; SANTRA, S. C. Effects of gamma radiation on fungi infected rice (*in vitro*). **International Journal of Radiation Biology**, v.87, n.11, p.1097-1102, 2011.

MCNAMARA, N. P.; BLACK, H. I. J.; BERESFORD, N. A.; PAREKH, N. R. Effects of acute gamma irradiation on chemical, physical and biological properties of soils. **Applied Soil Ecology**, v.24, n.3, p.117-132, 2003.

MINTY B. R. S. **A review of airborne gamma-ray spectrometric data-processing techniques**. Canberra: Australian Government Publishing Service. 1988. 48 p.

MIRANDA, H. L. C.; BOBROWSKI, V. L.; TILLMANN, M. A. A.; DODE, L. B.; MENEGHELLO, G. E. Qualidade fisiológica de sementes de arroz submetidas à radiação gama. **Ciencia Rural**, v.39, n.5, p.1320-1326, 2009.

MORI, M. N.; OIKAWA, H.; SAMPA, M. H. O.; DUARTE, C. L. Degradation of chlorpyrifos by ionizing radiation. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v.270, n.1, p.99-102, 2006.

MPI (Ministry for Primary Industries). **Importation and clearance of fresh fruits and vegetables into New Zealand**; MPI Standard 152.02.; MPI: Wellington, New Zealand, 2014.

PELLEGRINI, C. N.; CROCI, C. A.; ORIOLI, G. A. Morphological changes induced by different doses of gamma irradiation in garlic sprouts. **Radiation Physics and Chemistry**, v.57, p.315-318, 2000.

RAJKOWSKI, K.; THAYER, D. W. Reduction of Salmonella spp. and strains of *Escherichia coli* O157:H7 by gamma radiation of inoculated sprouts. **Journal of Food Protection**, v.63, n.7, p.871-875, 2000.

REZAEI, M.; ALMASSI, M.; FARAHANI, A. M.; MINAEI, S.; KHODADADI, M. Potato sprout inhibition and tuber quality after post harvest treatment with gamma irradiation on different dates. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v.13, n.6, p.829-842, 2011.

RUBIO, T.; ARAYA, E.; AVENDADO, S.; LOPEZ, L.; ESPINOZAS, J. M.; VARGAS, M. Effect of ionizing radiation on fresh vegetables artificially contaminated with *Vibrio Cholerae*. IAEA-TECDOC-1213. Irradiation to control vibrio infection from consumption of raw seafood and fresh produce. Results of a co-ordinated research project organized by the Pan American Health Organization and the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. 2001.

SANTOS, T. S.; ALMEIDA, F. A. C.; SUASSUNA, T. M. F.; COUTINHO, W. M.; ALMEIDA, P. B. A. Resposta de sementes de amendoim a diferentes doses de radiação gama (^{60}Co). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.10, p.1074-1078, 2010.

SINGH, S. P.; PAL, R. K. Ionizing radiation treatment to improve postharvest life and maintain quality of fresh guava fruit. **Radiation Physics and Chemistry**, v.78, p.135-140, 2009.

SILVA, A. S. **Radiação gama na indução de variabilidade em cultivares de arroz irrigado.** Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 2010. 75p.

SILVEIRA, E. Empresas desenvolvem métodos de criação de insetos para polinização e combate a pragas. **Revista Online Pesquisa FAPESP**, v. 236, 2015. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2015/10/14/producao-alada/>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

THAYER, D. W. Food irradiation: benefits and concerns. **Journal of Food Quality**, v.13, n.3, p.147-169, 1990.

VEIGA, A. A.; CAMARGO, C. E. O.; FELÍCIO, J. C.; TULMANN NETO, A.; ANDO, A.; BARROS, C. B. Indução de mutação no melhoramento do trigo. **Bragantia**, v.37, n.12, p.103-108, 1978.

WIENDL, T. A. **Efeitos de baixas doses de radiação do Co-60 (Radio-hormesis) em sementes de tomate.** Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear, Aplicações) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 71p.

ZAMAN, W.; PAUL, D.; ALAM, K.; IBRAHIM, M.; HASSAN, P. Shelf life extension of banana (*Musa sapientum*) by gamma radiation. **Journal of Bio-science**, v.5, p.47-53, 2007.