

Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre la aplicación de las radiaciones ionizantes para la higienización de la carne fresca, los preparados cárnicos y los productos cárnicos

Miembros del Comité Científico

Manuel Barat Baviera, María Antonia Ferrús Pérez, Guillermina Font Pérez, Arturo Hardisson de la Torre, Antonio Herrera Marteache, Félix Lorente Toledano, Ascensión Marcos Sánchez, Amelia Martí del Moral, María Rosario Martín de Santos, M^a Rosa Martínez Larrañaga, Antonio Martínez López, Emilio Martínez de Victoria Muñoz, Cristina Nerín de la Puerta, Gaspar Pérez Martínez, Catalina Picó Segura, Rosa María Pintó Solé, Antonio Pla Martínez, José Luis Ríos Cañavate, Jordi Salas Salvadó, Jesús Simal Gándara

Secretario Técnico

Vicente Calderón Pascual

Número de referencia: AESAN-2013-003

Documento aprobado por el Comité Científico en su sesión plenaria de 24 de septiembre de 2013

Grupo de Trabajo

Antonio Martínez López (Coordinador)
María Antonia Ferrús Pérez
Guillermina Font Pérez
Arturo Hardisson de la Torre
Antonio Herrera Marteache
María Rosario Martín de Santos
M^a Rosa Martínez Larrañaga
Cristina Nerín de la Puerta
Cristina Alonso Andicoberry (AESAN)

Resumen

En la Unión Europea, la irradiación de alimentos está regulada por medio de dos directivas. La Directiva 1999/2/CE regula los aspectos técnicos y generales para llevar a cabo el proceso, etiquetado de los alimentos irradiados y las condiciones para autorizar la irradiación de alimentos, y la Directiva 1999/3/CE establece una lista positiva comunitaria de alimentos e ingredientes alimentarios autorizados para el tratamiento con radiación ionizante. Hasta el momento, esta lista contiene una única categoría de alimentos: hierbas aromáticas secas, especias y condimentos vegetales, y la dosis máxima absorbida autorizada es de 10 kGy. En España, la normativa específica que regula el tratamiento de alimentos con radiaciones ionizantes, el Real Decreto 348/2001, no autoriza el tratamiento de productos de origen animal y tan sólo permite el tratamiento de hierbas aromáticas secas, especias y condimentos vegetales. No obstante, teniendo en cuenta a los diferentes documentos publicados por la FDA (*Food and Drug Administration*) y EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria) se concluye que la irradiación de la carne podría ser una herramienta eficaz para reducir la presencia de microorganismos alterantes y patógenos no contemplados en el Reglamento (CE) N° 2073/2005, relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios. En relación a las posibles consideraciones toxicológicas, aquellos alimentos irradiados dentro de los límites establecidos en la legislación parecen ser seguros y nutricionalmente adecuados. Sin embargo, un aumento de la cantidad y variedad de alimentos irradiados en la Unión Europea supondría un aumento previsible de la ingesta diaria de los mismos en todo el rango poblacional y sería necesario revisar los estudios actuales, ya que con los datos de los que se dispone no se puede inferir el riesgo al que se podría estar expuesto por un mayor y más amplio consumo de sustancias radiolíticas.

Palabras clave

Irradiación, carne, derivados cárnicos.

Report of the Scientific Committee of the Spanish Agency for Food Safety and Nutrition (AESAN) on the application of ionizing radiation for sanitizing fresh meat, meat preparations and meat products.

Abstract

In the EU, food irradiation is regulated by two Directives. Directive 1999/2/EC regulates general and technical aspects for carrying out the process, labeling of irradiated foods and the conditions for authorizing food irradiation and Directive 1999/3/EC provides a positive Community list of foods and food ingredients authorized for treatment with ionizing radiation. So far, this list contains a single food category: dried aromatic herbs, spices and vegetable seasonings, and the authorized maximum absorbed dose is 10 kGy. In Spain, the specific regulation for the treatment of food with ionizing radiation, Royal Decree 348/2001, does not authorize the processing of foodstuffs of animal origin and only allows the treatment of dried aromatic herbs, spices and vegetable seasonings. Nevertheless, taking into account different documents published by the FDA (Food and Drug Administration) and the EFSA (European Food Safety Authority), it can be concluded that meat irradiation might be an effective tool to reduce the content of pathogenic and spoilage microorganisms not considered by Regulation (EC) No 2073/2005 on microbiological criteria for foodstuffs. In regard to potential toxicological considerations, foods irradiated in the range established by the legislation seem to be safe and nutritionally suitable. However an increase in quantity and variety of irradiated foodstuffs in the European Union is bound to predictably increase their daily intake in all population ranges and therefore it would be necessary to review the current studies to determine the actual risk due to a larger and ampler intake of radiolytic compounds.

Key words

Ionizing irradiation, meat and meat derivatives.

Introducción

La irradiación de alimentos es un tratamiento físico no térmico, con alta energía, que emplea radiaciones ionizantes. Durante el tratamiento, los alimentos se exponen brevemente a una fuente de energía radiante, que puede ser de tres tipos: rayos gamma, rayos X o electrones acelerados (UE, 1999a). Este proceso se realiza en una instalación protectora autorizada.

La irradiación de alimentos se emplea con varios fines. Entre los objetivos más habituales autorizados por la legislación vigente (UE, 1999a) se encuentran la reducción de la incidencia de toxiinfecciones alimentarias por destrucción de microorganismos patógenos, evitar la alteración de origen microbiano por destrucción de la biota contaminante, la reducción de la pérdida de alimentos al retardar o evitar los procesos de maduración, germinación y envejecimiento de los alimentos y la eliminación y reducción de plagas dañinas para las plantas y de plaguicidas.

En la Unión Europea, la irradiación de alimentos está regulada por medio de dos directivas. La Directiva 1999/2/CE (UE, 1999a) regula los aspectos técnicos y generales para llevar a cabo el proceso, etiquetado de los alimentos irradiados y las condiciones para autorizar la irradiación de alimentos; y la Directiva 1999/3/CE (UE, 1999b) establece una lista positiva comunitaria de alimentos e ingredientes alimentarios autorizados para el tratamiento con radiación ionizante. Hasta el momento, esta lista contiene una única categoría de alimentos: hierbas aromáticas secas, especias y condimentos vegetales y la dosis máxima absorbida autorizada es de 10 kGy.

Estas directivas dieron un plazo a los Estados miembros para mantener sus autorizaciones anteriores siempre que los alimentos e ingredientes alimentarios implicados estuvieran avalados por un informe favorable de Instituciones Científicas o del Comité Científico de la Alimentación Humana (SCF) de la Comisión Europea y las dosis absorbidas no superaran los límites establecidos. Por otra parte, la Comisión Europea está planteando un proyecto de Reglamento en relación con las radiaciones ionizantes, pero por el momento no se ha iniciado ningún trámite.

De acuerdo con el artículo 4, apartado 6, de la Directiva 1999/2/CE, siete Estados miembros han mantenido las autorizaciones anteriores: Bélgica, Francia, Italia, Países Bajos, Polonia, Reino Unido y República Checa. Y algunos de ellos tienen autorizado el tratamiento con radiaciones ionizantes de productos de origen animal, tal y como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Productos de origen animal cuyo tratamiento por radiaciones ionizantes está autorizado en los Estados miembros

	Bélgica	Francia	Países Bajos	Reino Unido	R. Checa
Carne de pollo	Sí	Sí	–	–	Sí
Aves de corral	Sí	Sí	–	–	Sí
Volatería	Sí	–	–	Sí	Sí
Carne de aves de corral recuperada mecánicamente	Sí	Sí	–	–	Sí
Menudillos de aves de corral	Sí	Sí	–	–	Sí
Ancas de rana congeladas	Sí	Sí	Sí	–	Sí
Sangre, plasma y coágulos deshidratados	Sí	Sí	–	–	Sí
Pescados y mariscos	Sí	–	–	Sí	Sí
Gambas congeladas	Sí	Sí	–	–	Sí
Gambas	–	–	Sí	–	–
Clara de huevo	Sí	Sí	Sí	–	Sí
Caseína y caseinatos	Sí	Sí	–	–	Sí

Fuente: Lista de los alimentos o ingredientes alimentarios que los Estados miembros autorizan a tratar con radiación ionizante (UE, 2009).

Sin embargo, de acuerdo con el último informe de la Comisión sobre los alimentos e ingredientes alimentarios tratados con radiaciones ionizantes, en el año 2011, tan sólo Bélgica, Francia y los Países Bajos hicieron uso de sus autorizaciones para irradiar alimentos de origen animal (UE, 2012).

En España, la normativa específica que regula el tratamiento de alimentos con radiaciones ionizantes, el Real Decreto 348/2001 (BOE, 2001), tan sólo permite el tratamiento de hierbas aromáticas, especias y condimentos vegetales, excluyendo cualquier otro alimento.

El Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) elaboró en 2004 un informe relativo a la aplicación de las radiaciones ionizantes a los alimentos. Sin embargo, su publicación es anterior a la nueva normativa europea de higiene alimentaria, completada en el año 2005. Por ello, se solicita que el Comité Científico de la AESAN realice un informe sobre la aplicación de las radiaciones ionizantes para la higienización de la carne fresca, los preparados cárnicos y los productos cárnicos listos para el consumo, en el que se deberá valorar:

1. La eficacia de la aplicación de las radiaciones ionizantes para la higienización de la carne fresca, los preparados cárnicos y los productos cárnicos listos para el consumo, teniendo en cuenta la existencia de medidas de control de la contaminación microbiana ya establecidas por la legislación de la Unión Europea.
2. Los posibles riesgos que pueda presentar la ingesta de estos productos tratados con radiaciones ionizantes para la salud de los consumidores.

Definición de los productos a los que se refieren los términos de referencia de este informe

1. Definición de carne, carne fresca, carne picada y carne separada mecánicamente

De acuerdo con el Reglamento (CE) N° 853/2004 (UE, 2004b), se entiende por “carne” las partes comestibles, incluida la sangre y los despojos, de los siguientes animales:

- Ungulados domésticos: los animales domésticos de las especies bovina (incluidas las especies *Bubalus* y *Bison*), porcina, ovina y caprina, así como los solípedos domésticos.
- Aves de corral: las aves de cría, incluidas las aves que no se consideran domésticas pero que se crían como animales domésticos, con excepción de las ratites.
- Lagomorfos: los conejos, liebres y roedores.
- Caza silvestre: los ungulados, lagomorfos y aves silvestres, así como otros mamíferos terrestres que se cazan para el consumo humano, incluidos los mamíferos que viven en territorios cerrados en condiciones de libertad similares a las de los animales de caza silvestre.

Se entiende por “carne fresca” la carne que no ha sido sometida a procesos de conservación distintos de la refrigeración, la congelación o la ultracongelación, incluida la carne envasada al vacío o envasada en atmósfera controlada.

Además, la “carne picada” se define como la carne deshuesada que ha sido sometida a una operación de picado en trozos y que contiene menos de 1 % de sal. La “carne separada mecánicamente” (CSM) es el producto obtenido extrayendo la carne de los huesos carnosos después del deshuesado, o de las canales de las aves, por medios mecánicos que ocasionan la pérdida o alteración de la estructura de la fibra muscular.

2. Definición de preparado cárnico

De acuerdo con el Reglamento (CE) N° 853/2004 (UE, 2004b), los “preparados de carne” se definen como la carne fresca, incluida la carne que ha sido troceada, a la que se han añadido productos alimenticios, condimentos o aditivos, o que ha sido sometida a transformaciones que no bastan para alterar la estructura interna de la fibra muscular ni, por lo tanto, para eliminar las características de la carne fresca.

3. Definición de producto cárnico

Los “productos cárnicos” son los productos transformados resultantes de la transformación de la carne o de la nueva transformación de dichos productos transformados, de modo que la superficie de corte muestre que el producto ha dejado de poseer las características de la carne fresca (UE, 2004b).

4. Definición de alimento listo para su consumo

De acuerdo con la legislación (UE, 2005), los “alimentos listos para el consumo (LPC)” se definen como los alimentos destinados por el productor o el fabricante al consumo humano directo sin necesidad de cocinado u otro tipo de transformación eficaz para eliminar o reducir a un nivel aceptable los microorganismos peligrosos. En el ámbito de este informe se referirá a los productos cárnicos cuyo consumo, en términos generales, no requiere de ulteriores transformaciones o cocinado.

Normativa europea de higiene alimentaria

Los Reglamentos (CE) N° 852/2004 y 853/2004 (UE, 2004a, 2004b) establecen las bases de la aplicación de la higiene alimentaria por parte de los operadores alimentarios. En concreto, el Reglamento (CE) N° 852/2004 indica cuales son las obligaciones generales de la industria en materia de higiene y el 853/2004 aplica las mismas a los productos alimenticios de origen animal. Ambas disposiciones fundamentan el ejercicio de la higiene en el análisis de peligros y el control de puntos críticos y señalan cuáles son las obligaciones que deben cumplir los operadores alimentarios en materia de criterios microbiológicos, con el fin de garantizar la higiene de los procesos y la seguridad de los alimentos.

El Reglamento (CE) N° 2073/2005 relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios (UE, 2005) y sus posteriores modificaciones (Reglamento (CE) N° 1441/2007, Reglamento (CE) N° 365/2010 y Reglamento (CE) N° 209/2013) establecen criterios microbiológicos para ciertos microorganismos, así como las normas de aplicación que deben cumplir los operadores de empresas del sector alimentario al aplicar las medidas de higiene generales y específicas contempladas en el Reglamento (CE) N° 852/2004. En estos reglamentos, los únicos patógenos que se recogen en los criterios de seguridad alimentaria para carnes, preparados y productos cárnicos son *Salmonella* y *Listeria monocytogenes*, en el caso de los productos listos para el consumo.

Microorganismos de las carnes frescas y productos derivados. Vías de contaminación y de recontaminación

Los microorganismos que alteran la carne llegan a ella por infección del animal vivo, (contaminación endógena) o por invasión *post mortem* (contaminación exógena).

Hay que destacar el notable éxito conseguido en el control de patógenos que originan algunas zoonosis clásicas tras la aplicación en la Unión Europea (UE) del Reglamento (CE) N° 2160/2003 sobre el control de salmonelosis y otros agentes zoonóticos (UE, 2003), y más concretamente tras la aplicación de los programas de saneamiento. Estos, junto a la inspección veterinaria en los mataderos, impiden que se liberen al consumo carne de animales enfermos y canales con lesiones características de distintas enfermedades animales. Sin embargo, cada vez preocupan más los microorganismos que no originan síntomas ni lesiones y que pasan desapercibidos en la inspección sanitaria ante y *post mortem* a la que se someten los animales en el matadero.

Las posibilidades de contaminación y crecimiento microbiano aumentan a lo largo del procesado de la canal, en el despiece y en la preparación de los derivados cárnicos, ya que la superficie de contacto con el ambiente es mayor. Las condiciones medioambientales y de manejo (equipos, utensilios, operarios, entre muchos otros factores), y las características de la carne determinan finalmente la cantidad y calidad de microorganismos presentes en las carnes frescas. Debido a la gran variedad de fuentes de contaminación, los tipos de microorganismos que suelen encontrarse en las carnes son muchos y muy variables. Entre estos microorganismos destacan patógenos como *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* spp., *Campylobacter* spp., *Escherichia coli* verotoxigénicos, *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes*, virus de la hepatitis E y *Toxoplasma gondii*, entre otros.

Los tipos y la cantidad de microorganismos presentes en los productos elaborados a base de carne dependen también de las condiciones sanitarias del medio ambiente del cual provenga el alimento, de las

propiedades y calidad microbiológica de algunos ingredientes adicionados, del cuidado de quien procesa y maneja el producto y de las condiciones posteriores de almacenamiento, manejo y distribución del mismo, por ejemplo, el tratamiento térmico o el loncheado (Cheftel y Culioli, 1997).

El último informe de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria sobre zoonosis, agentes zoonóticos y brotes de toxiinfecciones alimentarias (EFSA, 2013) pone de manifiesto aspectos que conviene considerar en relación con la microbiología de la carne. En 2011, el patógeno que mayor número de casos confirmados de toxiinfecciones alimentarias produjo en el hombre fue *Campylobacter*, con 220 209 casos. En el caso de este patógeno, el incremento en el número de casos ha sido constante en los últimos 4 años y continúa siendo elevada su presencia en carne de aves en todos los países de la Unión Europea, con una media de 31,3 % de muestras positivas.

A *Campylobacter* le sigue *Salmonella* con 95 548 casos y una reducción del 5,4 % respecto a 2010, y de un 37,9 % con relación a 2007, lo que demuestra la eficacia de los programas de control en granja, matadero y de los productos. La carne picada y los preparados cárnicos son las categorías de productos donde los incumplimientos de los criterios microbiológicos fueron mayores.

El número de casos de listeriosis ascendió a 1 476, cifra ligeramente inferior a la de 2010, con un porcentaje de fallecimientos del 12,7 %. Los mayores incumplimientos de los criterios microbiológicos se produjeron en embutidos fermentados. Con relación a las cepas verotoxigénicas de *E. coli* se registraron 9 485 casos, con un 2,6 % de incremento respecto a 2010. De los casos en los que se identificó el serogrupo, O157 fue el más frecuente. Desde el año 2008, el número de casos continúa en aumento. En productos de origen animal, los aislamientos más frecuentes se producen en carne de bovino. En 2011 se confirmaron 7 017 casos de yersiniosis, con un incremento del 3,5 % respecto a 2010. En la carne y productos cárnicos de cerdo se producen los aislamientos más frecuentes.

Como se ha señalado anteriormente, el reglamento de criterios microbiológicos (Reglamento (CE) N° 2073/2005) no incluye la obligatoriedad de detección en carne, preparados y productos cárnicos de patógenos tan importantes como *Campylobacter*, cepas verotoxigénicas de *E. coli* o *Yersinia enterocolítica*. La presencia de estos patógenos en carne cruda implica que, por contaminación cruzada, puedan llegar a muchos otros alimentos, superficies, equipamiento industrial y manipuladores. En consecuencia, la carne, preparados y productos cárnicos crudos deben ser manipulados con extrema precaución. El tratamiento térmico y otras técnicas de procesado pueden destruir los agentes patógenos presentes en la carne o en los ingredientes incorporados, garantizando así la inocuidad final del producto comercializado. No obstante, hay que tener presente que algunos derivados cárnicos se lonchean después del tratamiento térmico o del proceso de curado/maduración, pudiéndose producir entonces una contaminación adicional a partir de los equipos y superficies, con patógenos como *Listeria monocytogenes*. También se debe considerar la marcada tendencia de esta bacteria a formar biopelículas. *Listeria* se adhiere a las superficies mediante la síntesis de polisacáridos extracelulares y son numerosos los estudios que ponen de manifiesto la resistencia de estas biopelículas al uso de desinfectantes. El Reglamento (CE) N° 2073/2005 establece para los alimentos listos para el consumo niveles máximos de *Listeria monocytogenes* de 100 ufc/g durante toda la vida útil del producto. Sin embargo, otros países el criterio establecido es de tolerancia cero para esta bacteria; es decir, ausencia de *Listeria monocytogenes* en 25 gramos.

Eficacia de la aplicación de radiaciones ionizantes para la higienización de la carne fresca, preparados cárnicos y productos cárnicos

La radiación ionizante destruye los microorganismos al producir lesiones en elementos críticos celulares que, la mayoría de las veces, es el material genético. Este daño impide la multiplicación y diversas funciones celulares. El daño en el material genético tiene lugar como resultado de una colisión directa de la energía radiante o como resultado de la ionización de una molécula adyacente, habitualmente agua, que interacciona con el material genético. Además, la radiación produce otros efectos debidos a la interacción directa e indirecta con diversos componentes celulares, como membranas, enzimas y elementos citoplasmáticos. Puede que estas interacciones tengan acción letal por sí mismas, aunque parece que en la mayoría de los casos no lo son si no existe un daño en el material genético. Estas interacciones pueden jugar un papel decisivo en la supervivencia de las bacterias con alteraciones subletales, ya que una célula que no ha recibido un daño genético letal puede ser destruida mediante otras formas que complican o impiden la supervivencia de la célula. Un aspecto importante es que el daño es al azar y no está relacionado con una "diana" genética específica o con un componente celular. Esta circunstancia constituye un importante factor en la explicación de los mecanismos bacterianos de radiorresistencia (AESAN, 2004).

Existe una amplia variación en la sensibilidad de los diferentes organismos frente a la radiación. La radiorresistencia de los microorganismos podría ordenarse de mayor a menor como se indica a continuación: virus > esporas bacterianas > bacterias Gram positivas > bacterias Gram negativas > mohos y levaduras > parásitos (AESAN, 2010) (EFSA, 2011b).

Existen varios aspectos que han preocupado a los diferentes organismos científicos e investigadores en relación al uso de la irradiación en alimentos y su efecto en los microorganismos, siendo los principales la posibilidad de mutación, la transformación en microorganismos patógenos o la reversión de la virulencia en microorganismos atenuados, la estimulación de la producción de toxinas, la reducción de la microbiota natural del alimento, así como que esta tecnología sea utilizada en sustitución de las prácticas higiénicas correctas o para enmascarar productos alterados, ya que destruiría también los microorganismos indicadores (AESAN, 2004) (EFSA, 2011b). La implicación de microorganismos patógenos en brotes de toxiinfecciones alimentarias por eliminación de la microbiota natural del alimento irradiado es una teoría que parece haber sido refutada por diversos estudios sobre carne de pollo y de vacuno irradiadas, en los que se demostró que el crecimiento de *Salmonella* spp. y *Escherichia coli* O157:H7 era el mismo que en matrices no irradiadas (Szczerwiska et al., 1991) (Dickson y Olson, 2001).

La mutación en bacterias y otros organismos es un proceso bien conocido y, aunque se puede producir de manera espontánea, la radiación ionizante es uno de los procesos reconocidos como mutagénico, al igual que otros procesos físicos y químicos (AESAN, 2004) (EFSA, 2011b). Sin embargo, mientras que no parece que la irradiación induzca patogenicidad en bacterias no patógenas, sí que parece reducir la virulencia en otras patógenas (AESAN, 2004). Además, otros autores ya demostraron que la irradiación no parece aumentar la resistencia antibiótica, ni aquellas resistentes a antibióticos parecen ser más resistentes a la radiación (EFSA, 2011b). Por otro lado, Levanduski y Jaczynski (2008) demostraron que, de manera similar a lo que ocurre con otras técnicas de inactivación, *E. coli* tiene la capacidad de desarrollar resistencia a la radiación con electrones acelerados si las mismas poblaciones de la bacteria en el alimento se someten a radiaciones continuadas, aunque el mecanismo por el cual desarrollan la radiorresistencia es aún desconocido.

Es importante destacar que la aplicación de radiaciones ionizantes a las dosis autorizadas para el tratamiento de alimentos no inactiva las toxinas bacterianas y micotoxinas preformadas en el alimento (EFSA, 2011b).

Los sistemas actuales de gestión de la seguridad alimentaria se basan en un planteamiento integrado desde el lugar de producción primaria hasta su puesta en el mercado o exportación. En particular, se deben aplicar los principios de Buenas Prácticas Higiénicas (BPH) y el sistema APPCC a lo largo de toda la cadena alimentaria, de acuerdo con el Reglamento (CE) N° 852/2004 (UE, 2004a). Asimismo, los alimentos deben cumplir las condiciones de seguridad alimentaria e higiene establecidos en otros reglamentos, como el N° 853/2004 y N° 2073/2005 (UE, 2004b, 2005). Además, el Real Decreto 348/2001 indica, en su artículo 4, que los productos que vayan a someterse a tratamiento con radiaciones ionizantes deben estar en condiciones adecuadas de salubridad. Es decir, que el tratamiento con radiaciones ionizantes no exime del cumplimiento de la normativa de higiene alimentaria vigente.

Por otro lado, además, la propia Directiva 1999/2/CE, en los considerandos indica que: "(13) considerando que los productos alimenticios podrán tratarse mediante radiaciones ionizantes sólo en caso de que haya una necesidad de higiene alimentaria, una ventaja, tecnológica o de otro tipo, que pueda demostrarse, o un beneficio para el consumidor y sólo si dichos productos son sanos y están en buenas condiciones, ya que el tratamiento con radiaciones ionizantes no debe ser utilizado como un sustituto de las medidas higiénicas o sanitarias o de las prácticas correctas de elaboración o de cultivo".

La irradiación puede ser una herramienta efectiva para reducir o eliminar los microorganismos (alterantes y patógenos) de los alimentos, especialmente en la carne, preparados y productos cárnicos para consumo en crudo o en los productos cárnicos loncheados. Patógenos como *Campylobacter* spp., *Yersinia* spp., *Escherichia coli* verotoxigénico o las formas vegetativas de *Bacillus cereus* tienen valores de dosis requerida para reducir en un 90 % una población de microorganismos (D_{10}) comprendidos entre 0,14-0,30 kGy, dependiendo del tipo de producto. *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* y las formas vegetativas de *Clostridium perfringens* tienen valores D_{10} comprendidos entre 0,40-0,80 kGy. Las esporas son más resistentes que las formas vegetativas con valores D_{10} de 3,4 kGy para las esporas de *Clostridium botulinum* tipo A y B (EFSA, 2011b).

Actualmente, se acaba de autorizar un tratamiento de higienización sólo de canales de bovinos. El Reglamento (CE) N° 101/2013 relativo a la utilización de ácido láctico para reducir la contaminación de superficie de las canales de bovinos (UE, 2013) autoriza a los operadores de empresas del sector alimentario a utilizar ácido láctico para reducir la contaminación microbiológica de superficie de canales, medias canales o cuartos de bovinos en el matadero.

Este Reglamento sin duda abre la puerta a la autorización de nuevos sistemas de higienización de carnes que en ningún caso deberán considerarse como una sustitución de las prácticas higiénicas de sacrificio y de los procedimientos de funcionamiento, ni como una alternativa para cumplir los requisitos establecidos en los reglamentos que integran el conocido como paquete de higiene.

Riesgos potenciales de la ingestión de alimentos irradiados para la salud de los consumidores

1. Consideraciones toxicológicas de los alimentos irradiados

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 1999), basándose en los estudios de toxicidad *in vivo* descritos en la bibliografía científica y utilizados para la evaluación del riesgo de alimentos irradiados, estableció que aquellos alimentos irradiados con dosis incluso mayores de 10 kGy se consideran seguros y nutricionalmente adecuados. Los estudios revisados, realizados principalmente en roedores y monos, son numerosos, aunque la mayor parte no son representativos (principalmente por una metodología deficiente, análisis estadístico, y falta de precisión de las condiciones exactas de irradiación). Ciertos trabajos publicados en animales de experimentación evalúan las propiedades toxicológicas de los productos radiolíticos e indican que algunos compuestos de 2-alquilciclobutanonas pueden producir lesiones *in vitro* en el ADN. No obstante, al no existir estudios *in vivo*, no se consideran de riesgo genotóxico para el hombre. En relación con otros productos radiolíticos no existen estudios de toxicidad relevantes publicados.

Posteriormente, la Agencia Francesa de Seguridad Sanitaria de los Alimentos (AFSSA, 2007), en un estudio de evaluación de otros trabajos científicos más recientes, tampoco aportó nueva información para la evaluación de la seguridad. Se han descrito resultados negativos en estudios de genotoxicidad *in vitro* de alimentos gamma irradiados (1,5-30 kGy) que incluyen test de Ames, de aberración cromosómica en células de mamíferos, y de micronucleos (Hyun-Ja et al., 2001) (Sung-Kee et al., 2001) (Kim et al., 2003) (Hong-Sun et al., 2004) (Yook et al., 2004) (Yu et al., 2004) (Il-Jun et al., 2005) (Kang et al., 2005) (Yook et al., 2005) (Nazzaro et al., 2007) y en estudios de genotoxicidad *in vivo* donde los animales experimentales (roedores, rata y ratón) reciben en su dieta alimentos irradiados (Yook et al., 2005).

Con respecto a los estudios de toxicidad a largo plazo, tampoco se tiene nueva información. Hagiwara et al. (2005), en un estudio de toxicidad crónica (90 días) en ratas tratadas en la dieta con el edulcorante taumatin irradiado (5,0 kGy), no observaron ningún efecto adverso atribuible a su consumo (2 889 mg/kg p.c./día). Diversos estudios de carcinogenicidad y de reproducción de varias generaciones en ratas, ratones, perros y monos alimentados durante 2 años con alimentos irradiados a dosis de 27,9 y 55,8 kGy no demostraron ningún efecto relacionado con el tratamiento. Únicamente en los estudios de reproducción de varias generaciones en ratas se ha descrito un pequeño descenso en el peso corporal o en el aumento de peso corporal, que parece estar más relacionado con la nutrición y con la falta de palatabilidad de la dieta.

El único efecto adverso descrito en las últimas publicaciones es la aparición de leucoencefalomielopatía (LEM) en gatos alimentados con dieta irradiada (36,3-47,3 kGy y ≥ 50 kGy) (Palmer y Cavanagh, 1995) (Hendricks et al., 2001) (Cassidy et al., 2007) (Child et al., 2009) (Caulfield et al., 2009) (Duncan et al., 2009), aunque en felinos (guepardo, león) está descrito un síndrome clínico-patológico similar sin etiología definida y aparición espontánea (Palmer et al., 2001) (Maratea et al., 2006) (Cassidy et al., 2007).

En los estudios descritos por Caulfield et al. (2009), algunos gatos alimentados con una dieta irradiada con rayos gamma (25,7-53,6 kGy) durante 224 días presentaron lesiones típicas asociadas con LEM. Estos autores encontraron que las dietas irradiadas con dosis de 25,7-38,1 kGy y con dosis de 38,1-53,6 kGy presentaban concentraciones de peróxidos del orden de 10 a 60 veces superiores a las observadas en dietas no irradiadas, así como también reducciones en la concentración de vitamina A de un 43-48 %. No obstan-

te, no está claramente demostrado que una deficiencia de vitamina A o un incremento de peróxidos, o su combinación, sea la causa de los efectos neurológicos asociados con LEM. Además, no es posible hacer una correlación entre la enfermedad de LEM en el gato y la posible aparición de esta enfermedad en el hombre, donde la fisiopatología de esta alteración no está bien establecida. También hay que considerar que los efectos neurológicos observados en el gato se han observado a dosis de irradiación que exceden el rango de dosis autorizado para los alimentos de consumo humano (1-10 kGy).

Con respecto a estudios en humanos existe una información muy limitada. Se han llevado a cabo estudios controlados en jóvenes de la Armada de los Estados Unidos (Bierman et al., 1958) alimentados con alimentos irradiados (25-40 kGy) durante 15 días, no observándose ningún efecto adverso. Similarmente, Plough et al. (1957) realizaron estudios en voluntarios humanos sanos alimentados durante 15 días con carne de cerdo enlatada irradiada (30 kGy) y tampoco observaron ningún efecto adverso. Un trabajo posterior (Shao y Feng, 1988) realizado en jóvenes alimentados durante 90 días con diversos tipos de alimentos irradiados, incluida carne (irradiada a dosis de 8 kGy) tampoco describe efecto adverso alguno. No se han descrito más estudios de ensayos clínicos en humanos.

Considerando los datos disponibles en la bibliografía y que la cantidad de alimentos irradiados en la Unión Europea es muy limitada, EFSA (2011a) concluye que no existe causa inmediata de preocupación para los alimentos irradiados, aunque debe clarificarse la posible importancia para la salud humana del efecto de LEM registrado en gatos.

2. Radiactividad inducida y aspectos toxicológicos de los productos radiolíticos

No hay datos que indiquen que existe radiactividad inducida en los alimentos irradiados. De hecho, algunos estudios han demostrado que la radiactividad inducida en carne picada tratada con rayos X a 7,5 MeV es poco importante e incluso inferior a la naturalmente presente en algunos alimentos (Grègoire et al., 2003).

La irradiación de los productos alimenticios es un proceso controlado pero que produce cambios detectables en el alimento, especialmente de carácter químico. Aunque muchas de estas transformaciones son pequeñas y no difieren en exceso de las producidas por otros tratamientos, principalmente térmicos, deben tenerse en cuenta, especialmente si el alimento sufre además, otro tipo de procesos durante su producción. En general, la cantidad de reacciones químicas inducidas por la radiación en los alimentos depende de muchos factores, siendo los más importantes la dosis absorbida, el tipo de instalación, la presencia o ausencia de oxígeno y la temperatura. También tiene influencia la composición del alimento y su estado físico (congelado, fresco, sólido, líquido, etc.).

Los productos radiolíticos son productos químicos estables originados por diversas reacciones entre los radicales libres y los iones excitados, que producen de manera primaria, productos intermedios muy reactivos. El resultado de las reacciones químicas es dependiente del tipo de alimento (EFSA, 2011a). El efecto en las moléculas es mayor cuanto mayor es el tamaño de las mismas, siendo los ácidos nucleicos las moléculas más afectadas. Por otro lado, la irradiación de las moléculas de agua da lugar a radicales libres con un marcado carácter oxidante o reductor y muy reactivos. De hecho, se considera que los efectos secundarios de la irradiación de los alimentos son mayores cuanto mayor es el contenido acuoso de los mismos (AESAN, 2004).

Aunque existen numerosas publicaciones sobre alimentos irradiados, el número de publicaciones relevantes sobre la evaluación de la seguridad es limitado. La mayoría de los estudios abordan las propiedades toxicológicas de los productos radiolíticos, principalmente los compuestos 2-alkilciclobutanonas (2-ACB). A partir de los cuatro principales ácidos grasos, palmítico, esteárico, oleico y linoleico, las correspondientes ciclobutanonas formadas son 2-dodecilciclobutanona (2-dDCB), 2-tetradecilciclobutanona (2-tDCB), 2-tetradecenilciclobutanona (2-tDeCB) y 2-tetradeca-5',8'-dienilciclobutanona (2-tDdeCB). Algunas publicaciones sobre estudios de genotoxicidad y estudios de toxicidad crónica de las 2-ACBs demuestran una capacidad citotóxica y genotóxica, al menos *in vitro*, dependiente del grado de insaturación y de la longitud de la cadena de ácidos grasos (Hartwig et al., 2007). El riesgo para el hombre no se ha podido definir ante la ausencia de estudios *in vivo*. Ciertos estudios de toxicidad crónica con 2-ACBs en ratas demuestran una incidencia significativa de tumores de colon (Raul et al., 2002). No hay evidencias convincentes de que las alkilciclobutanonas sean genotóxicas o mutagénicas cuando se consumen en una dieta habitual (O'Bryan et al., 2008). Sommers et al. (2006) admiten que las 2-ACB se deben seguir estudiando por su toxicidad potencial en el ser humano, pero también afirman que deberían estudiarse en el contexto de la dieta humana total y teniendo en cuenta que la irradiación de alimentos posiblemente reduciría las enfermedades transmitidas por los alimentos, las hospitalizaciones y las muertes.

Hasta hace poco, las 2-ACB no se habían detectado en alimentos no irradiados. Sin embargo, Variyar et al. (2008) publicaron su detección en anacardos y nuez moscada no irradiados. Por el contrario, Chen et al. (2012) no consiguieron detectar ni identificar estos marcadores en muestras de nuez moscada (*Myristica fragans*), no irradiadas, de cinco orígenes distintos, frente a muestras sometidas a irradiaciones de hasta 5 kGy, en los que sí se detectaron e identificaron.

Durante la irradiación se originan también otros productos radiolíticos definidos, tipo furanos, hidrocarburos y óxidos de colesterol, que pueden aparecer incluso con los tratamientos térmicos convencionales. Los furanos son considerados como posibles carcinógenos para el hombre (EFSA, 2004). Los hidrocarburos formados tras la irradiación de sus respectivos triglicéridos (ácido palmítico, esteárico, oleico y linoleico) son considerados potenciales genotóxicos por su estructura molecular. Los óxidos de colesterol están asociados a diversos efectos tóxicos como citotoxicidad, mutagénesis o carcinogenicidad, y también están directamente correlacionados con el desarrollo de arterioesclerosis y enfermedad cardíaca coronaria en el hombre (Guardiola et al., 1996) (Nam et al., 2001) (Meyner et al., 2005) (O'Bryan et al., 2008).

3. Alteraciones por irradiación en la calidad de los alimentos

En general, en los productos cárnicos, la irradiación acelera la oxidación lipídica ya que la radiación ionizante genera radicales hidroxilo, potente iniciador este tipo de oxidación. Los radicales hidroxilo, especies más reactivas de oxígeno, se generan por la radiación ionizante a partir de las moléculas de agua. Generalmente la carne posee un contenido de agua igual o superior al 75 %, por lo que la irradiación puede generar radicales hidroxilo en estos productos. Los cambios oxidativos inducidos por la irradiación en la carne son dosis-dependientes. Se vienen usando diversas sustancias para prevenir o minimizar la oxidación de los lípidos por irradiación (antioxidantes), incluyendo antioxidantes fenólicos. Ciertos compuestos de polifosfatos, como el tripolifosfato sódico, son excelentes quelatos de metales e inhibidores de

la oxidación lipídica. También el envasado al vacío o en una atmósfera controlada, y la adición de ácidos orgánicos como cítrico y ascórbico a la carne fresca, son medidas eficaces para reducir los problemas de alteración del color en la carne irradiada; el ácido ascórbico, por su mayor efecto antioxidante en un envasado aeróbico, es más eficaz que el ácido cítrico a la hora reducir la intensidad del color en la carne irradiada (Nam y Ahn, 2002) (Ahn et al., 2013).

Proteínas

Las reacciones químicas que se producen por irradiación de las proteínas dependen de la estructura de las mismas, de su estado (nativo o desnaturalizado), de su estado físico, de la composición de aminoácidos, de la presencia de otras sustancias en el alimento y del tratamiento de irradiación en sí (EFSA, 2011a). El tratamiento de avellanas a dosis de 10 kGy produce desnaturalización y agregación de las proteínas, modificando su estructura (Dogan et al., 2007), y a dosis mucho más bajas se modifica el perfil proteico de las trufas negras (Nazzaro et al., 2007). Es importante tener en cuenta que cualquier modificación del perfil proteico de un alimento puede modificar su potencial alergénico.

La irradiación puede producir también productos radiolíticos de bajo peso molecular derivados de los péptidos, tales como amoniaco, ácidos cetónicos, productos similares a las amidas y diaminoácidos (EFSA, 2011a).

Los principales cambios inducidos por la irradiación de las proteínas afectan a los aminoácidos, siendo los aromáticos y azufrados los más sensibles. Así, la irradiación de la fenilalanina produce la aparición de tres isómeros de la tirosina (para, meta y orto) y la irradiación de aminoácidos como la cisteína, la fenilalanina y la glicina da lugar a α, α' -diaminoácidos (Hein et al., 2000) (EFSA, 2011a).

Lípidos

La irradiación de los lípidos da lugar a numerosas reacciones químicas cuya intensidad depende de varios factores, como la concentración de los mismos, su estado físico, su perfil de insaturación, la presencia de antioxidantes en el alimento, las condiciones ambientales, el tratamiento de irradiación y el tipo de almacenamiento y sus condiciones (EFSA, 2011a).

En términos generales, la irradiación acelera el proceso de oxidación lipídica, algo que es más relevante en alimentos con un elevado contenido graso y de ácidos grasos muy insaturados, en los que se forman numerosos radicales libres debido a esa oxidación (O'Bryan et al., 2008). Aunque este efecto puede reducirse ante la presencia de antioxidantes en el alimento, estos no siempre pueden evitar la alteración organoléptica producida por sustancias volátiles azufradas, cuyo umbral de olor es muy bajo (EFSA, 2011a), u otras. En general, el uso de bajas temperaturas, la presencia de oxígeno, antioxidantes y un adecuado material de envase minimizan la oxidación lipídica (Stefanova et al., 2010).

Además, la irradiación de los lípidos puede generar 2-ACB y ciertos hidrocarburos. De hecho, la detección de estos compuestos se emplea en los métodos químicos de referencia para la detección de irradiación (métodos estándar europeos EN1785 y EN1784, respectivamente).

Los triglicéridos y los ácidos grasos generan hidrocarburos como productos radiolíticos. Los ácidos poliinsaturados son más susceptibles que los monoinsaturados y los saturados. Además, la irradiación produce una reducción significativa de ácidos grasos poliinsaturados en el alimento (Ahn et al., 2013). La

irradiación puede, además, inducir isomerización *cis-trans*, por lo que en los alimentos irradiados podrían aparecer ácidos grasos *trans*, incluso a dosis absorbidas inferiores a 8 kGy (Brito et al., 2002).

La irradiación de los lípidos puede también favorecer la aparición de óxidos del colesterol, un grupo de esteroides con una estructura similar a la del colesterol pero que contienen grupos hidroxilo, cetona o epóxido en el núcleo esterol o a la cadena lateral de la molécula de colesterol (Nam et al., 2001) (EFSA, 2011a). Aunque las cantidades encontradas en la carne irradiada por los diferentes autores no parece ser superior a las encontradas en carnes procesadas con otros tratamientos, es importante indicar que los óxidos de colesterol son compuestos con conocidos efectos aterogénicos, citotóxicos, mutagénicos y carcinogénicos (Guardiola et al., 1996).

Hidratos de carbono

La irradiación produce modificaciones en los mono y polisacáridos a las dosis autorizadas por la legislación, dando lugar a aldehídos, ácido fórmico y peróxido de hidrógeno (Frejaille y Saintlebe, 1981) (Raffi et al., 1981) (Fan, 2003).

En alimentos listos para el consumo (LPC) que contengan glucosa, fructosa o sacarosa pueden formarse furanos cuando se irradian a las dosis autorizadas. Además, la cantidad de furanos detectados en el alimento parece ser superior a la producida por otros tratamientos y tiende a aumentar a pH más ácidos (Fan, 2005). Fan y Sommers (2006) encontraron que la producción de furanos tiende a ser mayor cuando la irradiación se aplica en disoluciones acuosas de los ingredientes presentes en alimentos LPC, como salchichas de pavo o ternera, que cuando se aplica sobre el alimento en sí, tal y como llega al consumidor. Además, el tratamiento con radiaciones ionizantes parece compensar la producción de furanos debida al tratamiento térmico previo al que se someten este tipo de productos LPC, con excepción de alimentos como los zumos, más ricos en hidratos de carbono y ácido ascórbico (Fan, 2005).

Vitaminas

La irradiación de los alimentos provoca pérdidas de vitaminas de manera similar a otros tratamientos, principalmente térmicos.

La sensibilidad a la radiación depende del tipo de vitamina, siendo las hidrosolubles las más sensibles. Dentro de ellas, la tiamina muestra la mayor sensibilidad y se observan pérdidas muy elevadas en carnes (Stewart, 2009), especialmente en carne de cerdo. El ácido fólico también experimenta pérdidas elevadas en carnes irradiadas a dosis de hasta 3 kGy (Galán et al., 2010) (Galán et al., 2013). Por otro lado, la riboflavina, la vitamina B6, la vitamina B12 y la niacina parecen ser bastante radiorresistentes (Fox et al., 1989).

Las vitaminas liposolubles presentan sensibilidades muy variables a la irradiación, siendo la vitamina E la más sensible, especialmente cuando el alimento se irradia en presencia de oxígeno (EFSA, 2011a). La vitamina K es la más resistente.

En términos generales, las vitaminas parecen ser más sensibles cuando se irradian en disolución que cuando se irradian en el alimento (EFSA, 2011a).

Otros componentes e ingredientes del alimento

Sales inorgánicas

Los aniones inorgánicos reaccionan poco con los radicales primarios, salvo en el caso de los nitratos que, en presencia de electrones solvatados, se transforman en nitritos. La irradiación gamma parece favorecer la capacidad del ácido ascórbico de reducir los nitritos. De esta manera, la formación de N-nitrosaminas parece ser menor en los productos cárnicos tratados a dosis superiores a los 5 kGy (Ahn et al., 2004).

Efectos sobre anti-nutrientes

Los efectos de la irradiación sobre determinados componentes considerados como anti-nutrientes se han observado, principalmente, en estudios realizados a dosis de irradiación superiores a las autorizadas y recomendadas. Sin embargo, algunos autores han observado reducciones relevantes de fitatos y taninos en leguminosas irradiadas a dosis de 5 kGy (El-Niely, 2007). Es importante indicar que otros estudios concluyen que el efecto de la radiación sobre fitatos y taninos en alimentos como el mijo es muy bajo si el alimento no se somete a un tratamiento térmico posterior (ElShazali et al., 2011).

Efectos sobre los aditivos

Algunos aditivos pueden verse afectados por la irradiación y contribuir a la aparición potencial de productos radiolíticos dañinos en el alimento. En un estudio se detectó benceno en muestras de jamón de pavo irradiado LPC (Zhu et al., 2005). El benceno procedía de la descarboxilación del benzoato potásico, aditivo presente en el jamón de pavo.

4. Materiales del envasado

La mayoría de los productos alimenticios se irradian ya envasados con el fin de evitar la recontaminación y mantener la calidad del alimento. La irradiación de los alimentos envasados es una tecnología mundialmente reconocida para preservar los alimentos y es una alternativa a las técnicas de esterilización térmica. Por ello, las características de los materiales del envase adquieren una gran importancia desde el punto de vista de la seguridad alimentaria. Si el envase es adecuado, la irradiación no debería comprometer las propiedades funcionales del mismo, ni facilitar la migración de componentes inadecuados o peligrosos del material envasado al alimento (ICGFI, 1999) (AESAN, 2010). La sección 179.45 del Código de Regulaciones Federales N° 21 de los EE UU (FDA, 2006) define las clases de materiales de envasado utilizados para el tratamiento de irradiación, sus requerimientos y especificaciones. En este documento la dosis máxima de irradiación autorizada para el tratamiento de materiales de envasado es 10 kGy (FDA, 2006).

La irradiación de los alimentos ya envasados da lugar a cambios químicos y físicos en los materiales plásticos del envase (Buchalla et al., 1993a) (FDA, 2008). Los principales cambios químicos en los materiales poliméricos se producen por dos reacciones que compiten entre sí: polimerización y degradación. La primera prevalece en atmósferas inertes y en vacío, mientras que la segunda domina en presencia de oxígeno (FDA, 2008). La interacción de las radiaciones ionizantes con los materiales del envase origina radicales libres e iones que afectan al polímero y a los compuestos de bajo peso molecular presentes en el material plástico (AESAN, 2010), y también provoca la aparición de nuevos compuestos, además de

umentar la cantidad de los ya existentes. En caso de aparecer nuevos compuestos, estos son de bajo peso molecular y no se han identificado aún marcadores químicos únicos en el material de envasado irradiado (IFST, 2006), ya que estos dependen del material. La aparición de productos de degradación es muy dependiente de la presencia de oxígeno y de la dosis de irradiación aplicada y es en estas condiciones en las que debe estudiarse el comportamiento de los materiales, especialmente los nuevos materiales (FDA, 2008).

Una vez que los productos de degradación se han incorporado al material de envase, pueden migrar a los alimentos envasados y producir su contaminación química. Se han estudiado muy poco los efectos de radiaciones ionizantes en los materiales de envase. En los pocos estudios existentes, se pone de manifiesto que en efecto los materiales se degradan en mayor o menor medida, aumentando la concentración de sustancias migrantes, si bien la naturaleza y cuantía de dicha migración depende mucho del material y de la intensidad de radiación aplicada (Buchalla et al., 2002) (Ito et al., 2005) (Park et al., 2006) (Jeon et al., 2007) (Félix et al., 2008) (Oliveira et al., 2012). Las radiaciones inferiores a 10 kGy no provocan cambios sustanciales, pero estos aumentan con radiaciones superiores. En materiales multicapa el problema se agrava, ya que hay muchos más componentes procedentes de los adhesivos, tintas y del propio sustrato (material de cada capa) susceptibles de degradación. Se han identificado, entre otros, el 1,3-diterc-butilbenceno, 2,6-di-terc-butil-1,4-benzoquinona, 4-terc-butil-fenol y los ácidos butanoico y valérico, estos últimos responsables de malos olores. En poliamidas, sin embargo, no se observó degradación por efecto de la irradiación hasta alcanzar dosis de 12 kGy.

En términos generales, se ha observado que la irradiación no modifica la permeabilidad y el deterioro de las propiedades mecánicas, y en ciertos polímeros podría controlarse con los estabilizantes adecuados. Se han detectado productos volátiles tras la irradiación de polietilenos y polipropilenos de baja densidad, siendo los principales hidrocarburos (C_3-C_{13}), alcoholes (C_2-C_3), aldehídos (C_2-C_5), cetonas (C_4-C_8) y ácidos carboxílicos (C_2-C_5) (Buchalla et al., 1993a) (Tyapkova et al., 2009) (Lee, 2010). Los cambios inducidos por la irradiación dependen de la estructura química del polímero, la composición (presencia de aditivos, principalmente) y el procesado previo del plástico, así como de las condiciones de irradiación. Diversos estudios han demostrado que la migración global hacia el alimento es mayor como consecuencia de la irradiación de los materiales, especialmente en medios grasos. También se ha observado una transferencia de color y olor al emplear determinados compuestos plásticos. Los aditivos, especialmente los antioxidantes, se destruyen durante la irradiación y se puede observar un aumento específico de la migración por esta causa. Los estabilizadores térmicos de estaño orgánico empleados en el PVC se degradan hasta cloruro de estaño (IV) ($SnCl_4$) y la migración de estos compuestos al alimento aumenta tras la irradiación gamma (Buchalla et al., 1993b).

Es necesario estudiar en mayor profundidad los efectos de la migración de los materiales envasados para productos cárnicos irradiados. Ciertos países con regulación específica, como Estados Unidos, tienen autorizada la irradiación de multitud de materiales en contacto con los alimentos (FDA, 2008). El principal problema es que en los últimos años, han surgido nuevos materiales en contacto, como los materiales barrera para el oxígeno, que son materiales multicapa de carácter complejo, construidos la mayoría de ellos combinando diferentes materiales con adhesivos, y cuya seguridad es difícil de evaluar. Por ello, con los datos existentes se infiere que es necesario estudiar individualmente el comportamiento del material de envase seleccionado para el proceso de irradiación.

5. Características organolépticas de los productos irradiados

Aunque no es un aspecto específico de seguridad alimentaria, las alteraciones organolépticas debidas a la irradiación de los productos alimenticios deben tenerse en cuenta, pues a pesar de las potenciales ventajas de la irradiación de carne, productos cárnicos y preparados cárnicos, estos aspectos cualitativos limitan su uso en la industria cárnica.

Los estudios realizados sobre carne de cerdo, pavo y ternera demuestran que la irradiación produce la aparición de sustancias volátiles responsables del olor característico por aumento de la cantidad de hidrocarburos y sustancias azufradas, destacando el metil mercaptano y el sulfuro de hidrógeno (Stewart, 2010); además, acelera la oxidación lipídica y modifica el color de la carne fresca y los productos cárnicos (Lee y Ahn, 2005) (Stewart, 2010) (Yang et al., 2011) (Ahn et al., 2013). Este olor característico ha llegado a describirse como "olor a perro mojado", "olor dulzón", "metálico" o "a quemado" y depende de la dosis aplicada. Los componentes de la carne principalmente implicados en la producción de estos olores desagradables parecen ser los lípidos (Stewart, 2010), aunque algunos autores han determinado que el olor procedente de las sustancias producidas por la degradación radiolítica de los aminoácidos azufrados es más fuerte y astringente, y que la aportación al olor de las sustancias volátiles procedentes de lípidos es pequeña en comparación (Lee y Ahn, 2003).

Parte de estos efectos se puede contrarrestar con un envasado adecuado (Nam et al., 2001) (Nam y Ahn, 2003), con la irradiación de productos congelados (Nam et al., 2002) y con el uso de antioxidantes, combinaciones de antioxidantes y especias, como el romero, la cebolla o el ajo, entre otros (Lee y Ahn, 2005) (Nam et al., 2006) (Ahn et al., 2013). Sin embargo, estas medidas no siempre pueden evitar la alteración organoléptica producida por ciertas sustancias volátiles azufradas con umbral de olor muy bajo (EFSA, 2011a).

En otros productos, como verduras y hortalizas cortadas frescas, el aumento de los compuestos fenólicos por irradiación produce reacciones de coloración y pardeamiento de las hojas (Fan, 2005).

Según EFSA (2011b), los miedos a que la irradiación convierta en vendible un alimento alterado al reducir la percepción de que está alterado son infundados. La irradiación, no puede mejorar el olor, sabor o apariencia visual del alimento alterado. Si un alimento no alterado recibe una dosis no esterilizante, estos alimentos exhibirán las características propias de un producto alterado si finalmente se alteran. El SCF (2003) indicó que "la preocupación sobre el uso abusivo de la irradiación para higienizar alimentos alterados contaminados a unos niveles inaceptables no tiene una base real, ya que la irradiación no restaura la apariencia y las características organolépticas del alimento alterado".

6. Consideraciones nutricionales

La *Food and Drug Administration* (FDA, 2012) ha revisado las posibles pérdidas nutricionales de la carne irradiada. Basado en el conocimiento de que los macronutrientes en la dieta (proteínas, grasas y carbohidratos) y minerales (calcio, hierro) no se alteran significativamente por la irradiación a las dosis permitidas, y aunque ciertas vitaminas sí pueden sufrir reducciones (como la tiamina), la FDA concluye que no existe un efecto adverso sobre el aspecto nutricional por el uso de la radiación ionizante en carne no refrigerada, a dosis máxima de radiación ionizante de 4,5 kGy.

De acuerdo con las conclusiones del Grupo conjunto FAO/OMS/IAEA de estudio sobre irradiación a dosis elevadas (OMS, 1999) en relación a los efectos nutricionales de dosis elevadas (> 10 kGy) sobre

micro y macro nutrientes, los alimentos irradiados son nutricionalmente equivalentes o superiores a los esterilizados térmicamente.

7. Consideraciones microbiológicas

La FDA (2012) ha examinado los efectos las alteraciones inducidas por la radiación en el perfil microbiológico de la carne, y sobre el crecimiento de microorganismos incluyendo *Clostridium botulinum* para determinar la seguridad microbiológica de la carne y sus subproductos irradiados, concluyendo que la irradiación de carne congelada o refrigerada y sus subproductos a dosis máxima de 4,5 kGy no suponen un riesgo para la salud pública por patógenos comunes, incluyendo *Clostridium botulinum*.

Por su parte, EFSA (2011b) confirmó la ausencia de riesgos microbiológicos para el consumidor por el uso de la irradiación y sus consecuencias en la biota microbiana. Para ello, en el informe se consideraron el efecto selectivo sobre la biota microbiana del alimento, producción de mutaciones, efectos en la producción de toxinas, y posibilidad de desarrollo de radiorresistencia, entre otros.

Conclusiones del Comité Científico

En relación al término de referencia 1

La carne y productos cárnicos se deben elaborar de acuerdo con el Reglamento (CE) N° 2073/2005, relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios y sus posteriores modificaciones. Además, la Directiva 1999/2/CE, en los considerandos indica que: "los productos alimenticios podrán tratarse mediante radiaciones ionizantes sólo en caso de que haya una necesidad de higiene alimentaria, una ventaja, tecnológica o de otro tipo, que pueda demostrarse, o un beneficio para el consumidor y sólo si dichos productos son sanos y están en buenas condiciones, ya que el tratamiento con radiaciones ionizantes no debe ser utilizado como un sustituto de las medidas higiénicas o sanitarias o de las prácticas correctas de elaboración o de cultivo".

Sin duda, la irradiación puede ser una herramienta efectiva para reducir o eliminar los microorganismos (alterantes y patógenos) de los alimentos. Por otro lado, y atendiendo al primer término de referencia de este informe y a los alimentos considerados en él, el cumplimiento con el Reglamento (CE) N° 2073/2005 garantizaría la inocuidad de dichos alimentos con relación a los microorganismos patógenos considerados en él. Sin embargo, la irradiación permitiría el control de microorganismos patógenos no contemplados en el Reglamento (CE) N° 2073/2005, como *Campylobacter* spp., *Escherichia coli* shigatoxigénicos, *Yersinia enterocolitica*, etc., contribuyendo a una comercialización de alimentos más seguros. Asimismo sería una medida de control adicional para aquellos microorganismos contemplados en el Reglamento (CE) N° 2073/2005.

En relación al término de referencia 2

De acuerdo con los datos y estudios existentes se puede concluir que las dosis de radiación ionizante comprendidas entre 1-10 kGy son seguras para su uso en carne (sin cocinar, refrigerada y no refrigerada) y sus derivados (EFSA, 2011a).

No hay datos que indiquen que existe radiactividad inducida en los alimentos irradiados. De hecho, algunos estudios han demostrado que la radiactividad inducida en carne picada tratada con rayos X a 7,5 MeV es poco importante e incluso inferior a la naturalmente presente en algunos alimentos.

En relación a las consideraciones toxicológicas de los alimentos irradiados, la OMS (1999), basándose en los estudios de toxicidad *in vivo* descritos en la bibliografía científica y utilizados para la evaluación del riesgo de alimentos irradiados, estableció que aquellos alimentos irradiados con dosis incluso mayores de 10 kGy se consideran seguros y nutricionalmente adecuados. Adicionalmente, EFSA (2011a) concluye que no existe causa inmediata de preocupación para los alimentos irradiados, aunque debe clarificarse la relevancia para la salud humana del efecto de LEM registrado en gatos.

Las cantidades de óxidos de colesterol encontradas en la carne irradiada por los diferentes autores no parece ser superior a las encontradas en carnes procesadas con otros tratamientos. Tampoco hay evidencias convincentes de que las alquilciclobutanonas sean genotóxicas o mutagénicas cuando se consumen en una dieta habitual.

Sin embargo, si se ampliase la autorización de irradiación por parte de la Unión Europea para todos estos productos, incluidos productos LPC, el previsible aumento de la ingesta diaria en todo el rango de población supondría una necesaria revisión de los estudios actuales, ya que con los datos de los que se dispone no se puede inferir el riesgo al que se podría estar expuesto por un mayor y más amplio consumo de sustancias radiolíticas.

La irradiación de carne congelada o refrigerada y sus subproductos a una dosis máxima de 4,5 kGy no parece suponer un riesgo para la salud pública por modificación de patógenos comunes, incluyendo *Clostridium botulinum*. Tampoco hay riesgos microbiológicos para el consumidor debidos al uso de la irradiación y sus consecuencias en la biota microbiana.

No parece existir un efecto adverso de la radiación ionizante sobre las características nutricionales de la carne no refrigerada, a dosis máximas de 4,5 kGy. En dosis superiores a 10 kGy tampoco parece haber cambios nutricionales, en comparación con alimentos esterilizados por calor.

Se recomienda que se estudie el efecto que la irradiación puede tener en el material de envase seleccionado, de forma que se garantice que el proceso de irradiación no altera las características ni químicas ni organolépticas del producto envasado.

Referencias

- AESAN (2004). Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. Opinión del Comité Científico de la AESA sobre una cuestión presentada por la Presidencia de la AESA en relación con la aplicación de radiaciones ionizantes a los alimentos. *Revista del Comité Científico de la AESAN*, 2, pp: 11-43.
- AESAN (2010). Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre las directrices generales respecto a las condiciones que deben cumplir los materiales poliméricos de envasado de alimentos para ser sometidos a radiaciones ionizantes. *Revista del Comité Científico de la AESAN*, 12, pp: 115-131.
- AFSSA (2007). Agence française de sécurité sanitaire des aliments. Revue des données récentes relatives à l'ionisation des denrées destinées à l'alimentation humaine Disponible en: <http://www.afssa.fr/Documents/AAAT-Ra-Ionisation.pdf> [acceso: 16-10-13].
- Ahn, D.U., Kim, I.S. y Lee, E.J. (2013). Irradiation and additive combinations on the pathogen reduction and quality of poultry meat. *Poultry Science*, 92, pp: 534-545.
- Ahn, H.J., Kim, J.H., Jo, C., Lee, J.W., Yook, H.S. y Byun, M.W. (2004). Effects of gamma irradiation on residual nitrite, residual ascorbate, color, and N-nitrosamines of cooked sausage during storage. *Food Control*, 15, pp: 197-203

- Bierman E.L., Plough, I.C., Sellars, J.H., McGary, V.E., Nevels, E.M., Baker, E.M. y Harding, R.S. (1958). Short-term human feeding studies of foods sterilized by gamma radiation and stored at room temperature. U.S. Army Medical Nutrition Laboratory. Report No 224.
- BOE (2001). Real Decreto 348/2001, de 4 de abril, por el que se regula la elaboración, comercialización e importación de productos alimenticios e ingredientes alimentarios tratados con radiaciones ionizantes. BOE 82 de 5 de abril de 2001, pp: 12.825-12.830.
- Brito, M.S., Villavicencio, A.L.C.H. y Mancini, J. (2002). Effects of irradiation on trans fatty acids formation in ground beef. *Radiation Physics and Chemistry*, 63, pp: 337-340.
- Buchalla, R., Begley, T.H. y Morehouse, K.M. (2002). Analysis of low-molecular weight radiolysis products in extracts of gamma-irradiated polymers by gas chromatography and high-performance liquid chromatograph. *Radiation Physics and Chemistry*, 63, pp: 837-840.
- Buchalla, R., Schuttler, C. y Bogl, K.W. (1993a). Effects of ionizing radiation on plastic food packaging materials: a review. 1. Chemical and physical changes. *Journal of Food Protection*, 56, pp: 991-997.
- Buchalla, R., Schuttler, C. y Bogl, K.W. (1993b). Effects of ionizing radiation on plastic food packaging materials: a review. 2. Global migration, sensory changes and the fate of additives. *Journal of Food Protection*, 56, pp: 998-1005.
- Cassidy, J.P., Caulfield, C.D., Jones, B.R., Worrall, S., Conlon, L., Palmer, A.C. y Kelly, J. (2007). Leukoencephalomyelopathy in specific pathogen-free cats. *Veterinary Pathology*, 44, pp: 912-916.
- Caulfield, C.D., Kelly, J.P., Jones, B.R., Worrall, S., Conlon, L., Palmer, A.C. y Cassidy, J.P. (2009). The experimental induction of leukoencephalomyelopathy in cats. *Veterinary Pathology*, 46, pp: 1.258-1.269.
- Cheftel, J.C. y Culioli, J. (1997). Effect of high pressure on meat: a review. *Meat Science*, 46, pp: 211-236.
- Chen, S., Tsutsumi, T., Takatsuki, S., Matsuda, R., Kameya, H., Nakajima, M., Furuta, M. y Todoriki, S. (2012). Identification of 2-alkylcyclobutanones in nutmeg (*Myristica fragrans*). *Food Chemistry*, doi: 10.1016/j.foodchem.2012.02.176.
- Child, G., Foster, D.J., Fougere, B.J., Milan, J.M. y Rozmanec, M. (2009). Ataxia and paralysis in cats in Australia associated with exposure to an imported gamma-irradiated commercial dry pet food. *Australian Veterinary Journal*, 87, pp: 349-351.
- Dickson, J.S. y Olson, D.G. (2001). Growth rates of *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 in irradiated beef. *Journal of Food Protection*, 64 (11), pp: 1.828-1.831.
- Dogan, A., Siyakus, G. y Severcan, F. (2007). FTIR spectroscopic characterization of irradiated hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Food Chemistry*, 100, pp: 1.106-1.114.
- Duncan, I.D., Brower, A., Kondo, Y., Curlee, F. y Schultz, R.D. (2009). Extensive remyelination of the CNS leads to functional recovery. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, pp: 6.832-6.836.
- EFSA (2004). European Food Safety Authority. Report of the Scientific Panel on Contaminants in the Food Chain on provisional findings on furan in food. *The EFSA Journal*, 137, pp: 1-20.
- EFSA (2011a). European Food Safety Authority. Scientific Opinion on the chemical safety of irradiation of food. *The EFSA Journal*, 9 (4), pp: 1.930.
- EFSA (2011b). European Food Safety Authority. Scientific Opinion on the efficacy and microbiological safety of irradiation of food. *The EFSA Journal*, 9 (4), pp: 2.103.
- EFSA (2013). European Food Safety Authority. The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2011. *The EFSA Journal*, 11, pp: 3.129-3.379.
- El-Niely, H.F.G. (2007). Effect of radiation processing on antinutrients, in-vitro protein digestibility and protein efficiency ratio bioassay of legume seeds. *Radiation Physics and Chemistry*, 76, pp: 1.050-1.057.
- ElShazali, A.M., Nahid, A.A., Salma, H.A. y Elfadil, E.B. (2011). Effect of radiation process on antinutrients, protein digestibility and sensory quality of pearl millet flour during processing and storage. *International Food Research Journal*, 18 (4), pp: 1.401-1.407.
- Fan, X. (2003). Ionizing radiation induces formation of malondialdehyde, formaldehyde, and acetaldehyde from carbohydrates and organic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, pp: 5.946-5.949.

- Fan, X.T. (2005). Formation of furan from carbohydrates and ascorbic acid following exposure to ionizing radiation and thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, pp: 7.826-7.831.
- Fan, X.T. y Sommers, C.H. (2006). Effect of gamma radiation on furan formation in ready-to-eat products and their ingredients. *Journal of Food Science*, 71, pp: C407-C412.
- FDA (2006). Food and Drug Administration. Packaging materials for use during the irradiation of prepackaged foods. *Code of Federal Regulations*, Title 21, Section 179.45.
- FDA (2008). Food and Drug Administration. Regulatory Report: Irradiation of Food Packaging Materials. Disponible en: <http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/IngredientsAdditives-GRASPackaging/ucm110564.htm> [acceso: 3-10-13].
- FDA (2012). Food and Drug Administration. Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food. *Code of Federal Regulations*, Title 21, Section 179, pp: 71.312-71.315.
- Félix J.S., Monteiro, M., Manzoli, J.E., Padula, M., Pezo, D., Romero, J. y Nerin, C. (2008). Identification and migration of degradation compounds from irradiation of multilayer polyamide 6 films for meat foodstuffs and cheese. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391 (3), pp: 847-857.
- Fox, J.B., Thayer, D.W., Jenkins, R.K., Phillips, J.G., Ackerman, S.A., Beecher, G.R., Holden, J.M., Morrow, F.D. y Quirbach, D.M. (1989). Effect of gamma-irradiation on the B-vitamins of pork chops and chicken breasts. *International Journal of Radiation Biology*, 55, pp: 689-703.
- Frejavi, C.M. y Saintlebe, L.R. (1981). Radio-induced products in maize starch - glyceraldehyde, dihydroxyacetone, and 2-hydroxymalonaldehyde. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 29, pp: 548-550.
- Galán, I., García, M.L. y Selgas, M.D. (2010). Effects of irradiation on hamburgers enriched with folic acid. *Meat Science*, 84, pp: 437-443.
- Galán, I., García, M.L. y Selgas, M.D. (2013). Effects of the storage time on the folic acid added to ready-to-eat meat products manufactured by irradiation. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.11.004> [acceso: 3-4-13].
- Grègoire, O., Cleland, M.R., Mittendorfer, J., Dababneh, S., Ehlermann, D.A.E., Fan, X., Käppler, F.K., Logar, J., Meissner, J., Mullier, B., Stichelbaut, F. y Thayer, D.W. (2003). Radiological safety of food irradiation with high energy X-rays: theoretical expectations and experimental evidence. *Radiation Physics and Chemistry*, 67, pp: 169-183.
- Guardiola, F., Codony, R., Addis, P.B., Rafecas, M. y Boatella, J. (1996). Biological effects of oxysterols: current status. *Food and Chemical Toxicology*, 34, pp: 193-211.
- Hagiwara, A., Yoshino, H., Sano, M., Kawabe, M., Tamano, S., Sakaue, K., Nakamura, M., Tada, M., Imaida, K. y Shirai, T. (2005). Thirteen-week feeding study of thaumatin (a natural proteinaceous sweetener), sterilized by electron beam irradiation, in Sprague-Dawley rats. *Food and Chemical Toxicology*, 43, pp: 1.297-1.302.
- Hartwig, A., Pelzer, A., Burnouf, D., Titéca, H., Delincée, H., Briviba, K., Soika, C., Hodapp, C., Raul, F., Miesch, M., Werner, D., Horvatovich, P. y Marchioni, E. (2007). Toxicological potential of 2-alkylcyclobutanones-specific radiolytic products in irradiated fat-containing food-in bacteria and human cell lines. *Food and Chemical Toxicology*, 45, pp: 2.581-2.591.
- Hein, W.G., Simat, T.J. y Steinhart, H. (2000). Detection of irradiated food - Determination of non-protein bound o-tyrosine as a marker for the detection of irradiated shrimps. *European Food Research and Technology*, 210, pp: 299-304.
- Hendricks, W.H., Allan, F.J., Tarttelin, M.F., Collett, M.G. y Jones, B.R. (2001). Suspected zinc-induced copper deficiency in growing kittens exposed to galvanized iron. *New Zealand Veterinary Journal*, 49, pp: 68-72.
- Hong-Sun, Y., Bo-Sook, C., Dong-Ho, K., Ju-Woon, L. y Myung-Woo, B. (2004). Genotoxicological safety of gamma-irradiated salted and fermented anchovy sauce. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 33, pp: 1.192-1.200.
- Hyun-Ja, L., Kun-Ok, K. y Hong-Sun, Y. (2001). In vitro genotoxicological safety of fresh vegetable extract juice by gamma irradiation. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 30, pp: 1.227-1.236.
- ICGFI (1999). International Consultative Group on Food Irradiation. Facts about food irradiation. Disponible en: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/foodirradiation.pdf> [acceso: 14-3-13].

- IFST (2006). Institute for Food Science and Technology. Information statement: The Use of Irradiation for Food Quality and Safety. Disponible en: http://www.ifst.org/science_technology_resources/for_food_professionals/information_statements/ [acceso: 3-4-13].
- Il-Jun, K., Young-Hee, K., Cha-Kwon, C., Sung-Hoon, O., Ju-Woon, L. y Myung-Woo, B. (2005). Genotoxicological safety of high-dose irradiated porridges. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 34, pp: 261-266.
- Ito, R., Seshimo, F., Haishima, Y., Hasegawa, C., Isama, K., Yagami, T., Nakahashi, K., Yamazaki, H., Inoue, K., Yoshimura, Y., Saito, K., Tsuchiya, T. y Nakazawa, H. (2005). Reducing the migration of di-2-ethylhexyl phthalate from polyvinyl chloride medical devices. *International Journal of Pharmaceutics*, 3003, pp: 104-112.
- Jeon, D.H., Park, G.Y., Kwak, I.S., Lee, K.H. y Park, H.J. (2007). Antioxidants and their migration into food simulants on irradiated LLDPE film. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 40, pp: 151-156.
- Kang, I.J., Kang, Y.H., Chung, C.K., Oh, S.H., Lee, J.W. y Byun, M.W. (2005). Genotoxicological safety of high-dose irradiated porridges. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 34, pp: 261-266.
- Kim, M.J., Lee, J.W., Seo, J.H., Song, H.P., Yook, H.S., Choi, J.M. y Byun, M.W. (2003). Safety Evaluation on Mutagenicity of White Layer Cake Containing Gamma-Irradiated Egg White. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 32, pp: 1.172-1.175.
- Lee, E.J. y Ahn, D.U. (2003). Production of volatiles from fatty acids and oils by irradiation. *Journal of Food Science*, 68, pp: 70-75.
- Lee, E.J. y Ahn, D.U. (2005). Quality characteristics of irradiated turkey breast rolls formulated with plum extract. *Meat Science*, 71, pp: 300-305.
- Lee, K.T. (2010). Quality and safety aspects of meat products as affected by various physical manipulations of packaging materials. *Meat Science*, 86, pp: 138-150
- Levanduski, L. y Jaczynski, J. (2008). Increased resistance of *Escherichia coli* O157:H7 to electron beam following repetitive irradiation at sub-lethal doses. *International Journal of Food Microbiology*, 121 (3), pp: 328-334.
- Maratea, K.A., Hooser, S.B. y Ramos-Vara, J.Á. (2006). Degenerative myelopathy and vitamin A deficiency in a young black-maned lion (*Panthera leo*). *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 18, pp: 608-611.
- Meyner, A., Andre, A., Lherminier, J., Grandgirard, A. y Demaison, L. (2005). Dietary oxysterols induce in vivo toxicity of coronary endotelial and smooth muscle cells. *European Journal of Nutrition*, 44, pp: 393-405.
- Nam, K.C. y Ahn, D.U. (2002). Effect of double-packaging and acid combination on the quality of irradiated raw turkey patties. *Journal of Food Science*, 67, pp: 3.252-3.257.
- Nam, K.C. y Ahn, D.U. (2003). Double-packaging is effective in reducing lipid oxidation and off-odor volatiles of irradiated raw Turkey meat. *Poultry Science*, 82, pp: 1.468-1.474.
- Nam, K.C., Du, M., Jo, C. y Ahn, D.U. (2001). Cholesterol oxidation products in irradiated raw meat with different packaging and storage time. *Meat Science*, 58, pp: 431-435.
- Nam, K.C., Kim, Y.H., Du, M. y Ahn, D.U. (2002). Off-odor volatiles and pink color development in precooked, irradiated turkey breast during frozen storage. *Poultry Science*, 81 (2), pp: 269-275.
- Nam, K.C., Ko, K.Y., Min, B.R., Ismail, H., Lee, E.J., Cordray, J. y Ahn, D.U. (2006). Influence of rosemary-tocopherol/packaging combination on meat quality and the survival of pathogens in restructured irradiated pork loins. *Meat Science*, 74, pp: 380-387.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Picariello, G., Coppola, R., Reale, A. y Di Luccia, A. (2007). Evaluation of gamma rays influence on some biochemical and microbiological aspects in black truffles. *Food Chemistry*, 103, pp: 344-354.
- O'Bryan, C.A., Crandall, P.G., Ricke, S.C. y Olson, D.G. (2008). Impact of irradiation on the safety and quality of poultry and meat products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48, pp: 442-457.
- Oliveira, C.P., Rodriguez-Lafuente, A., Soares, N. y Nerin, C. (2012) Multiple headspace-solid-phase microextraction as a powerful tool for the quantitative determination of volatile radiolysis products in a multilayer food packaging material sterilized with γ -radiation. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2012.05.013> [acceso: 16-10-13].
- OMS (1999). Organización Mundial de la Salud. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses

- above 10 kGy. Disponible en: http://www.who.int/foodsafety/publications/fs_management/en/irrad.pdf [acceso: 14-10-13].
- Palmer, A.C., Callinan, J.J., Guerin, L.A., Sheahan, B.J., Stronach, N. y Franklin, R.J. (2001). Progressive encephalomyelopathy and cerebellar degeneration in 10 captive-bred cheetahs. *The Veterinary Record*, 149, pp: 49-54.
- Palmer, A.C. y Cavanagh, J.B. (1995). Encephalomyelopathy in young cats. *The Journal of Small Animal Practice*, 36, pp: 57-64.
- Park, G.Y., Cho, S.Y., Jeon, D.H., Kwak, I.S., Lee, K.H. y Park, H.J. (2006). Formation of Monomer Residues in PS, PC, PA-6 and PVC upon γ -Irradiation. *Radiation Physics Chemistry*, 75, pp: 1.055-1.059.
- Plough, I.C., Sellars, J.H., McGary, V.E., Nuss, J., Baker, E., Harding, R.S., Taylor, R.L. y Weiser, O.L. (1957). An evaluation in human beings of the acceptability, digestibility and toxicity of pork sterilized by gamma radiation and stored at room temperature. *United States Army Medical Nutrition Laboratory. Report 204*.
- Raffi, J.J., Agnel, J.P.L., Frejaville, C.M. y Saintlebe, L.R. (1981). Radio-induced products in maize starch – glyceraldehyde, dihydroxyacetone, and 2-hydroxymalonaldehyde. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 29, pp: 548-550.
- Raul, F., Gosse, F., Delincée, H., Hartwig, A., Marchioni, E., Miesch, M., Werner, D. y Burnouf, D. (2002). Food-borne radiolytic compounds (2-alkylcyclobutanones) may promote experimental colon carcinogenesis. *Nutrition and Cancer*, 44, pp: 188-191.
- SCF (2003). Scientific Committee on Food. Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of food. Disponible en: http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scf/out193_en.pdf [acceso: 16-10-13].
- Shao, S. y Feng, J. (1988). Safety estimation of persons feeding from 35 kinds of irradiated diets-chromosome aberrations and SCE analysis of cultured lymphocyte. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 3, pp: 271.
- Sommers, C.H., Delincee, H., Smith, J.S. y Marchiot, E. (2006). Toxicological safety of irradiated foods. En libro: *Food irradiation research and technology*. Sommers, C.H., y Fan, X. Eds. IFT Press, Blackwell Publishing, Ames, IA, pp: 43-61.
- Stefanova, R., Vasilev, N.V. y Spassov, S.L. (2010). Irradiation of food, current legislation framework, and detection of irradiated foods, *Food Analytical Methods*, 3, pp: 225-252.
- Stewart, E.M. (2009). Effect of gamma irradiation on the quality of ready meals and their meat components. En libro: *Irradiation to ensure the safety and quality of prepared meals*. Results of the Coordinated Research Project organised by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture (2002-2006). IAEA, Viena, pp: 313-342.
- Stewart, E.M. (2010). Safety and quality of irradiated food. En libro: *Processing Effects on Safety and Quality of Foods*. Ortega-Rivas, E. Taylor y Francis Group. Boca Raton, Florida, pp: 343-378.
- Sung-Kee, J., Yeon-Ho, H., Hae-Ran, P., Heon, O. y Myung-Woo, B. (2001). Genotoxicological safety of hot water extracts of the gamma-irradiated *Glycyrrhizae radix*, *Aurantii nobilis pericarpium* and *Bupleuri radix* in vitro. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 30, pp: 1.237-1.245.
- Szczawiska, M.E., Thayer, D.W. y Phillips, J.G. (1991) Fate of unirradiated *Salmonella* in irradiated mechanically deboned chicken meat. *International Journal of Food Microbiology*, 14, pp: 313-324.
- Tyapkova, O., Czerny, M. y Buettner, A. (2009). Characterisation of flavour compounds formed by γ -irradiation of polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*, 94, pp: 757-769.
- UE (1999a). Directiva 1999/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de febrero de 1999, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre alimentos e ingredientes alimentarios tratados con radiaciones ionizantes. DO L 66 de 13 de marzo de 1999, pp: 16-23.
- UE (1999b). Directiva 1999/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de febrero de 1999, relativa al establecimiento de una lista comunitaria de alimentos e ingredientes alimentarios tratados con radiaciones ionizantes. DO L 66 de 13 de marzo de 1999, pp: 24-25.
- UE (2003). Reglamento (CE) N° 2160/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de noviembre de 2003, sobre el control de la salmonela y otros agentes zoonóticos específicos transmitidos por los alimentos. DO L 325 de 12 de diciembre de 2003, pp: 1-15.

- UE (2004a). Reglamento (CE) N° 852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios. DO L 139 de 30 de abril de 2004, pp: 1-54.
- UE (2004b). Reglamento (CE) N° 853/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, por el que se establecen normas específicas de higiene, de los alimentos de origen animal. DO L 139 de 30 de abril de 2004, pp: 55-205.
- UE (2005). Reglamento (CE) N° 2073/2005 de la Comisión, de 15 de noviembre de 2005, relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios. DO L 338, de 22 de diciembre de 2005, pp: 1-26.
- UE (2009). 2009/C283/02. Lista de los alimentos o ingredientes alimentarios que los Estados miembros autorizan a tratar con radiación ionizante. DO C 283, de 24 de noviembre de 2009, pp: 5.
- UE (2012). Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo sobre los alimentos e ingredientes alimentarios tratados con radiaciones ionizantes en el año 2011. Disponible en: eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0659:FIN:ES:PDF [acceso: 16-10-13].
- UE (2013). Reglamento (UE) N° 101/2013 de la Comisión, de 4 de febrero de 2013, relativo a la utilización de ácido láctico para reducir la contaminación de superficie de las canales de bovino. DO L 34 de 5 de febrero de 2013, pp: 1-3.
- Variyar, P.S., Chatterjee, S., Sajilata, M.G., Singhal, R.S. y Sharma, A. (2008). Natural existence of 2-alkylcyclobutanones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, pp: 11.817-11.823.
- Yang, H.S., Lee, E.J., Moon, S.H., Paik, H.D., Nam, K. y Ahn, D.U. (2011). Effect of garlic, onion, and their combination on the quality and sensory characteristics of irradiated raw ground beef. *Meat Science*, 89, pp: 202-208.
- Yook, H.S., Cha, B.S., Kim, D.H., Lee, J.W. y Byun, M.W. (2004). Genotoxicological safety of gamma-irradiated salted and fermented anchovy sauce. *Journal of Korean Society of Food Science and Nutrition*, 33, pp: 1.192-1.200.
- Yook, H.S., Byun, M.W., Song, H.P., Lee, J.W., Kim, K.S., Kim, K.H., Lee, H.J. y Kim, D.H. (2005). Assurance on the genotoxicological safety of fermented vegetables pasteurized by gamma irradiation. *Food Science and Biotechnology*, 14, pp: 137-142.
- Yu, Y.B., Jeong, I.Y., Park, H.R., Oh, H., Jung, U. y Jo, S.K. (2004). Toxicological safety and stability of the components of an irradiated Korean medicinal herb, *Paeoniae radix*. *Radiation Physics and Chemistry*, 71, pp: 115-119.
- Zhu, M.J., Mendonca, A., Ismail, H.A., Du, M., Lee, E.J. y Ahn, D.U. (2005). Impact of antimicrobial ingredients and irradiation on the survival of *Listeria monocytogenes* and the quality of ready-to-eat turkey ham. *Poultry Science*, 84, pp: 613-620.