

4. Irradiación de alimentos

4.1. Reseña histórica

Inmediatamente después de que Röntgen descubriera los rayos X en 1895 y del descubrimiento de la radiactividad por parte de Becquerel al año siguiente, surgió la idea de usar radiaciones ionizantes para preservar alimentos. Recién en 1921 se estableció una aplicación de la irradiación de alimentos al considerar el uso de rayos X para eliminar el parásito *Trichinella spiralis* en carne de cerdo. A este hecho le siguieron otros estudios y patentes, pero los altos costos y dificultades para disponer las fuentes de radiación ionizante impidieron la aplicación industrial del proceso.

Con el advenimiento de los reactores nucleares y los aceleradores de electrones en los años '40 y '50 se estimuló el desarrollo de nuevos proyectos de investigación en el campo de la irradiación de alimentos. De esta manera, la irradiación de alimentos se fue transformando en un proceso técnicamente factible. Durante los años '60 y '70 comenzaron las investigaciones acerca de la salubridad de los alimentos irradiados. En 1970 y con el fin de promover un programa de investigación mundial sobre la salubridad de los alimentos irradiados, 19 países comenzaron a ejecutar el Proyecto Internacional en Irradiación de Alimentos. Este proyecto fue auspiciado por el IAEA, la FAO y la OECD. Tanto los resultados obtenidos en este proyecto como los obtenidos en otras investigaciones fueron evaluados por el Comité Conjunto de Expertos de la FAO/OIEA/OMS. En 1980, este comité llegó a la conclusión que “la irradiación de cualquier alimento con una dosis total promedio de hasta 10 kGy no presenta riesgo toxicológico ni tampoco introduce problemas nutricionales o microbiológicos especiales”. Sobre esta base, el Codex Alimentarius publicó en 1984 la “Norma general para alimentos irradiados” y el “Código internacional recomendado de prácticas para el funcionamiento de instalaciones de irradiación utilizadas para el tratamiento de alimentos”. La publicación de este documento tuvo gran influencia sobre otros desarrollos internacionales y sirvió de base para la legislación de muchos países.

4.2. Aspectos generales

4.2.1. Fuentes de radiación permitidas

La irradiación de alimentos consiste en exponer el alimento a radiaciones ionizantes, las cuales tienen la capacidad de convertir átomos y moléculas en iones, mediante la remoción de electrones. No todos los tipos de radiaciones ionizantes son adecuados para la irradiación de alimentos, ya sea porque no penetran lo suficiente en el material irradiado o porque inducen radiactividad en el material.

Los siguientes tipos de radiaciones ionizantes pueden ser usados para la irradiación de alimentos (FAO/OMS, 1984):

- Rayos γ emitidos por los radionucleídos ^{60}Co y ^{137}Cs .
- Rayos X generados por máquinas que operan a un nivel de energía de hasta 5 MeV.
- Electrones provenientes de generadores que operan a un nivel de energía de hasta 10 MeV.

4.2.1.1. Fuentes de rayos gamma

Los rayos gamma usados en el procesamiento de alimentos son provenientes de fuentes de alta actividad de ^{60}Co o ^{137}Cs (Jarrett, 1982). Los modos de decaimiento de estos radioisótopos son mostrados en la Figura 8. El ^{60}Co , con un período de semidesintegración de 5,27 años y con emisión de rayos gamma de 1,17 y 1,33 MeV de energía, es producido por irradiación del cobalto metálico en un reactor nuclear. El ^{137}Cs , con un período de semidesintegración de 30,17 años y emisión de rayos gamma de energía 0,66 MeV, es un producto de fisión de los elementos combustibles de un reactor nuclear. Actualmente, las fuentes de rayos gamma en operación para tratar alimentos son de ^{60}Co (IAEA, 2007). Este hecho se basa fundamentalmente en que con el ^{60}Co disminuye el riesgo de contaminación al medio ambiente, debido a que ese radionucleído se presenta en forma metálica, mientras que el ^{137}Cs es usualmente proporcionado como “pellets” de CICs, el cual es soluble en agua. En particular, Argentina produce ^{60}Co desde 1986 en la Central Nuclear de Embalse (Córdoba). Esta producción permite no sólo cubrir totalmente las necesidades a nivel nacional, sino que genera excedentes que permiten su exportación.

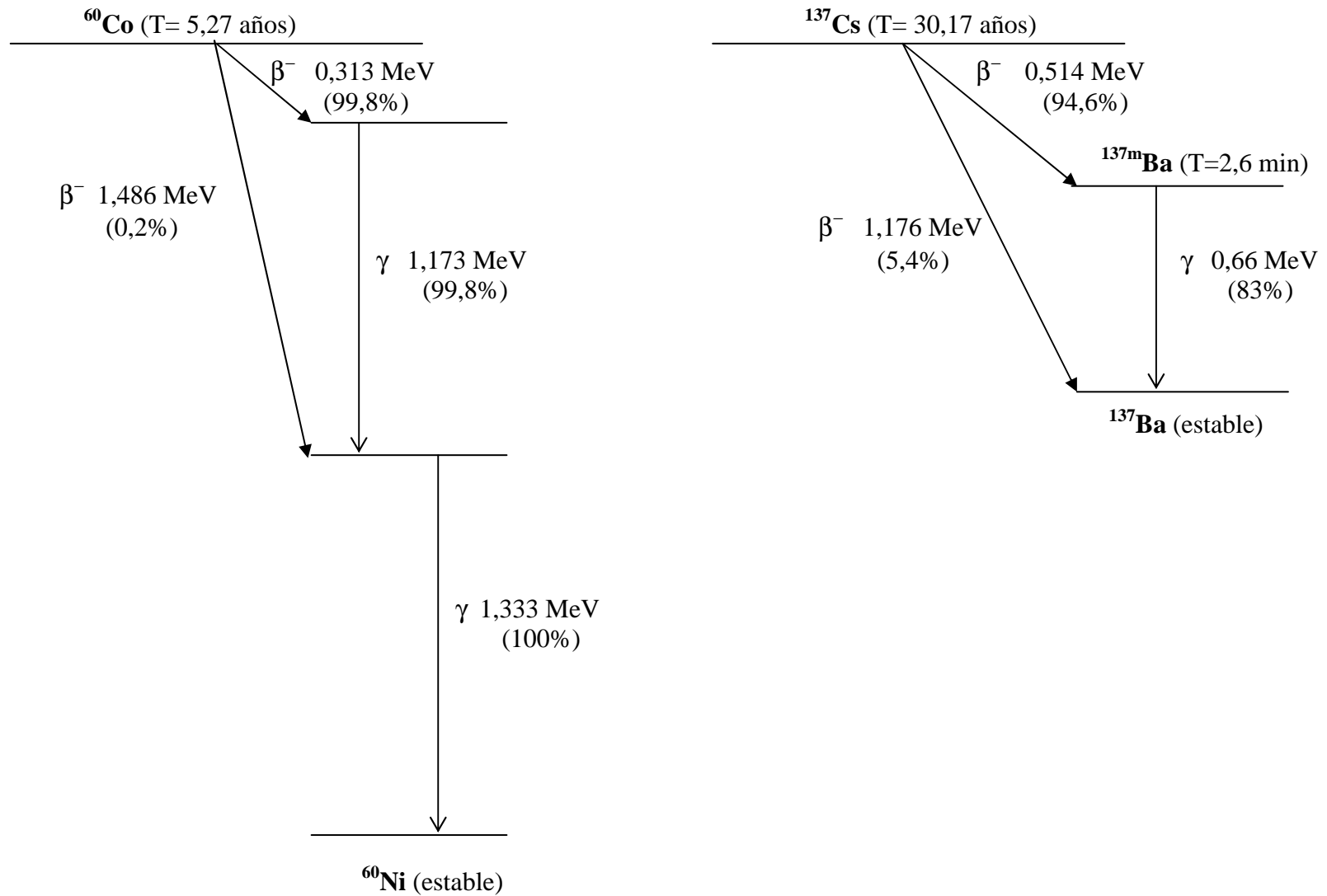


Figura 8: Esquemas de desintegración simplificados de ^{60}Co y ^{137}Cs .

4.2.1.2. Otras fuentes

- Fuentes de rayos X: Los rayos X son producidos cuando la materia es bombardeada con electrones de elevada energía cinética. Un tubo de rayos X característico consiste en una lámpara de vidrio al vacío, que contiene un filamento cargado negativamente (cátodo) y una pieza metálica con carga positiva (ánodo), ubicados uno frente a otro. El filamento emite electrones cuando es calentado por el pasaje de corriente eléctrica. Estos electrones inciden sobre el metal, produciendo rayos X. Este tipo de fuentes no es usada a escala comercial.

- Aceleradores de electrones: Existen varios diseños de aceleradores de electrones, pero todos ellos tienen algunas características en común. La fuente de electrones es un filamento calentado en un tubo al vacío. Los electrones así producidos son atraídos hacia el extremo positivo del tubo; ellos son acelerados a muy alta velocidad, cercana a la velocidad de la luz. Cuanto mayor es la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, mayor es la velocidad de los electrones.

De acuerdo a la energía del haz de electrones, los aceleradores están divididos en tres grupos: de baja, media y alta energía (Woods y Pikaev, 1994). Los de baja energía (hasta 300 keV) y los de media energía (300 keV – 1 MeV) pueden ser usados sólo para tratar superficies o materiales muy finos, debido a que estos electrones no penetran más que unos pocos milímetros. Considerando el procesamiento de alimentos, ellos sólo son de interés para la esterilización de films o láminas de materiales para envasar. Los aceleradores de electrones de alta energía producen electrones con una energía superior a 1 MeV. En general, se considera que la profundidad de penetración de un haz de electrones en un producto alimenticio es de 5 mm por MeV. Debido a su poca penetración, los electrones no pueden ser usados para irradiar carcasas de animales ni grandes bultos u otros materiales de gran espesor. Sin embargo esta dificultad puede resolverse en parte convirtiendo los electrones en Rayos X (Diehl, 1990).

4.2.2. Consideraciones acerca de la dosis

Cuando la radiación ionizante penetra en un alimento, toda o parte de la energía de la radiación es absorbida por el medio, siendo la misma definida como dosis absorbida. La unidad con la cual se mide la dosis absorbida es el Gray (Gy), siendo $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad}$. La energía absorbida por unidad de tiempo es llamada velocidad de dosis.

Las técnicas para medir las dosis de radiación pueden dividirse en métodos primarios o absolutos y métodos secundarios. Los métodos primarios involucran la determinación directa de la dosis absorbida mediante tres métodos físicos: calorimetría, ionización o centelleo. De éstos, los dos primeros son usados para la calibración inicial de los dosímetros químicos o secundarios, los cuales son usados para las mediciones de rutina. En la práctica, el dosímetro Fricke o del sulfato ferroso es probablemente el dosímetro químico más ampliamente usado en irradiación de alimentos. La reacción inducida por radiación es la oxidación del ion ferroso (Fe^{++}) a ion férrico (Fe^{+++}) en una solución ácida y en presencia de oxígeno. La concentración de ion férrico es medida por el incremento en la absorbancia a una longitud de onda de 305 nm. Para los rayos gamma del ^{60}Co , el rendimiento para la producción de ion férrico es de $15,6 \text{ Fe}^{+++}/100 \text{ eV}$, o $9,74 \times 10^{17}$ iones/Joule. En aplicaciones comerciales de radiación, también resultan convenientes los dosímetros químicos sólidos. Así, polímeros tales como polimetilmetacrilato (PMMA) son muy útiles para la dosimetría de rutina en un rango de dosis entre 1 y 50 kGy. Para rangos de dosis aún más bajos puede ser usada la dosimetría con colorantes radiocrómicos. Estos y otros sistemas dosimétricos son descritos en detalle por autores tales como McLaughlin y col. (1982) y Spinks y Woods (1990).

Si los dosímetros son distribuidos en distintas partes del producto irradiado, su evaluación mostrará dónde fue absorbida la máxima dosis ($D_{\text{máx}}$) y la dosis mínima ($D_{\text{mín}}$). Estos valores permiten establecer la relación de uniformidad de dosis $D_{\text{máx}}/D_{\text{mín}}$, la cual depende de varios factores tales como el diseño de la planta, el tipo de producto irradiado y la energía de la radiación. Para propósitos de investigación, se considera conveniente una relación $D_{\text{máx}}/D_{\text{mín}}$ de 1,2 o aún de 1,4. Sin embargo, para irradiaciones comerciales una relación de 2 o 3 a menudo se considera aceptable, especialmente si la densidad del material procesado es poco uniforme.

Otra característica importante en un proceso de irradiación es la dosis total promedio, cuyo valor es la media aritmética de las dosis determinadas por los dosímetros distribuidos al azar en el producto a irradiar.

Diferentes dosis de radiación pueden ser aplicadas a los alimentos para lograr distintos objetivos, tal como se muestra en la Tabla 1 (Diehl, 1990). La clasificación en bajas, medias y altas dosis aplicadas a alimentos siguen una propuesta del Comité Conjunto de Expertos de la FAO/IAEA/OMS en su reunión de 1980.

Tabla 1: Dosis de radiación recomendadas para diferentes propósitos

| Alimento | Principal objetivo | Significado de atacar el objetivo | Rango de dosis (kGy) |
|---|---|--|----------------------|
| Tratamiento con bajas dosis (hasta 1 kGy) | | | |
| Papas, batatas, cebollas, ajos, echadotes | Extensión del período de almacenaje | Inhibición de la brotación | 0,05 - 0,15 |
| Ciertas frutas y vegetales | Mejoramiento de las propiedades de conservación | Retraso de la maduración y senescencia | 0,25 - 1,00 |
| Granos de cereal, harina, frutas secas, nueces, legumbres | Prevención de pérdidas causadas por insectos | Destrucción o esterilización sexual de insectos | 0,20 - 0,70 |
| Frutas | Prevención de la propagación de pestes. Tratamiento de cuarentena | Destrucción o esterilización sexual de insectos | 0,20 - 0,70 |
| Carne | Prevención de enfermedades parasitarias transmitidas por los alimentos | Destrucción de parásitos tales como <i>Trichinella spiralis</i> y <i>Taenia saginata</i> | 0,30 - 0,50 |
| Tratamiento con dosis medias (entre 1 y 10 kGy) | | | |
| Ciertas frutas y vegetales, pan cortado | Prolongación de las propiedades de conservación | Reducción de poblaciones de bacterias, hongos y mohos | 1 - 3 |
| Carne, aves de corral, pescado | Mejoramiento del almacenaje refrigerado | Reducción de la población de microorganismos capaces de desarrollar a bajas temperatura | 1 - 5 |
| Carne, aves de corral, huevos, polvo de huevo, ancas de rana, productos de mar congelados y otros alimentos que contienen microorganismos patógenos | Prevención de intoxicación alimentaria | Destrucción de <i>Salmonella</i> , <i>Shigella</i> , <i>Campylobacter</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Yersinia</i> y otros patógenos no formadores de esporas | 3 - 10 |
| Espicias, vegetales secos y otros ingredientes de alimentos | Prevención de la contaminación de alimentos por el agregado de ingredientes | Reducción de la población de microorganismos en ingredientes | 3 - 10 |
| Tratamiento con altas dosis (entre 10 y 45 kGy) | | | |
| Carne, aves de corral | Asegurar el almacenaje a largo plazo sin refrigeración | Destrucción de organismos de la putrefacción y patógenos, incluyendo los formadores de esporas | 25 - 45 |
| Viandas de hospital o constituyentes de tales viandas | Suministro de viandas estériles a pacientes | Idem anterior | 25 - 45 |

4.3. Química de las radiaciones

4.3.1. Fundamentos

Cuando los rayos gamma o rayos X interactúan con un material, pueden ocurrir principalmente tres tipos de efectos generándose electrones con elevada energía cinética:

- efecto fotoeléctrico
- efecto Compton
- producción de pares (formación de pares de electrones y positrones)

El efecto fotoeléctrico predomina con fotones de energías menores de 0,1 MeV y la producción de pares ocurre principalmente con fotones de energías superiores a 1,02 MeV. Estos dos fenómenos son de menor importancia en la irradiación de alimentos donde, para un rango de energías intermedias, el efecto Compton es el predominante.

Tal como se representa en la Figura 9, en el efecto Compton un fotón incidente interactúa con un electrón de un átomo del material absorbedor, de tal manera que un electrón orbital es eyectado. Después de este choque, el fotón continúa su recorrido con otra dirección y menor energía, pudiendo repetir el proceso con otro átomo.

Así, los electrones generados por efecto Compton o aquellos provenientes de máquinas generadoras de electrones pasan a través de la muestra (del alimento) causando los siguientes efectos primarios:



Los electrones removidos de los átomos o moléculas en los procesos primarios pueden tener suficiente energía para causar nuevas ionizaciones, disociaciones o excitaciones. A menudo esto ocurre cerca de la ionización original, dando lugar a pequeños grupos de eventos llamados “spur” a lo largo de la trayectoria original o “track” (Woods y Pikaev, 1994).

Las moléculas excitadas pueden sufrir desexcitación liberando la energía en forma de luz, o pueden recibir energía adicional de otra interacción, dando lugar a su posterior disociación o ionización.

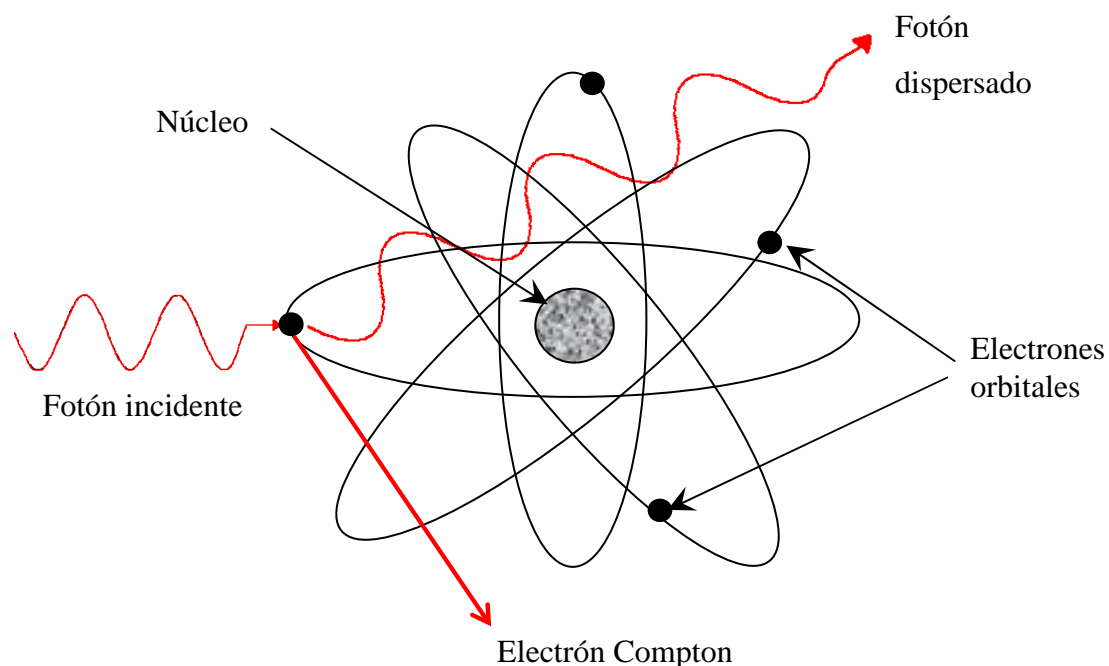


Figura 9: Esquema representativo del efecto Compton.

Los radicales libres producidos como resultado del efecto primario son altamente reactivos, y pueden sufrir reacciones tales como recombinación, dimerización, o captura electrónica, dando lugar a los efectos secundarios.

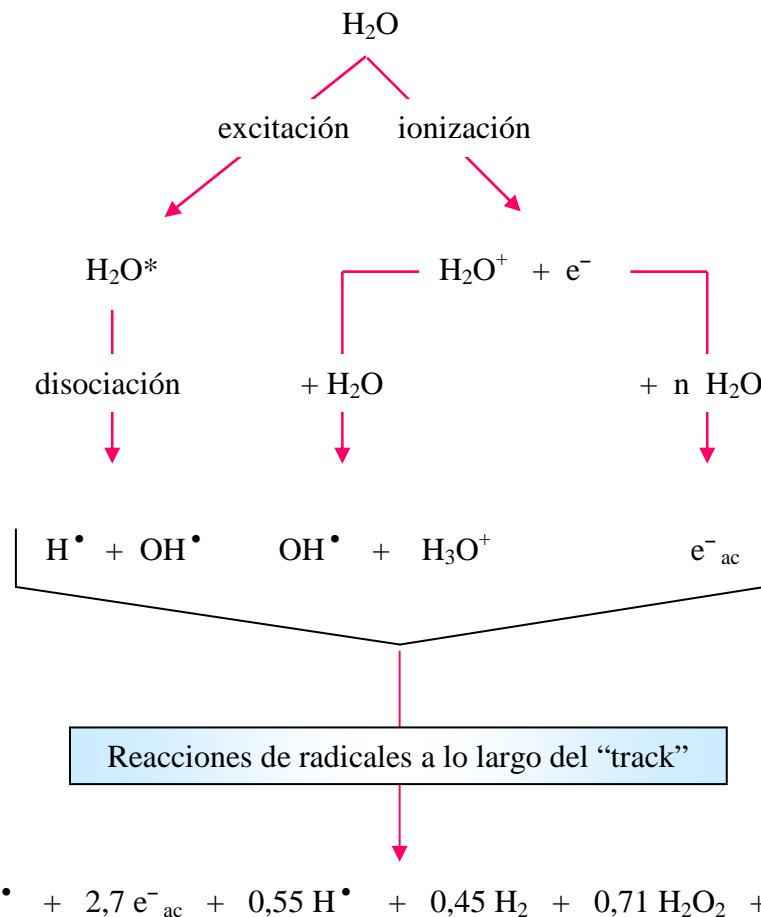
Los procesos secundarios involucran la interacción de los productos de los procesos primarios y pueden conducir a la formación de compuestos distintos a aquellos presentes inicialmente. Mientras que los procesos primarios son independientes de las condiciones de trabajo, los efectos secundarios dependen de las estructuras químicas específicas y de las condiciones experimentales tales como dosis, velocidad de dosis y temperatura. La presencia de impurezas o aditivos pueden ser determinantes en la formación de productos.

El proceso global que produce cambios químicos como resultado de la irradiación de algún medio es llamado radiólisis, y los productos de los efectos primarios y secundarios son productos radiolíticos.

4.3.2. Efectos de la radiación ionizante sobre el agua

4.3.2.1. Radiólisis del agua

El principal componente de la mayoría de los alimentos es el agua. Su proporción es aproximadamente del 70% en carnes, 80% en frutas y 90% en muchos vegetales. Por lo tanto, la radiólisis del agua es de particular interés en irradiación de alimentos. Estos efectos pueden ser expresados de manera simplificada en el siguiente esquema:



en el cual los números son valores G, que representan la cantidad de átomos o moléculas que cambian (que reaccionan o se producen) por 100 eV de energía absorbida por el medio.

Cuando una solución acuosa es irradiada, las moléculas del sustrato pueden ser afectadas directamente por la radiación ionizante, o ellas pueden ser afectadas por reacciones con especies reactivas intermediarias de la radiólisis del agua. Los primeros son efectos directos y los últimos son efectos indirectos. Esta terminología no solo es aplicada

a soluciones acuosas. Si una mezcla de dos sustancias es irradiada, cada sustancia será expuesta tanto a efectos directos como indirectos causados por productos radiolíticos reactivos de la otra sustancia.

4.3.2.2. Influencia de las condiciones de irradiación

Cuando se irradia un alimento dado, los efectos químicos son básicamente independientes del tipo de radiación usada (rayos gamma, rayos X o electrones), siempre que las radiaciones penetren igualmente en todas las partes del alimento. Sin embargo, otros factores pueden ejercer una influencia significativa sobre los efectos producidos.

- *Dosis:* La magnitud de los efectos primarios y secundarios dependerá de la energía de radiación absorbida por la sustancia irradiada, esto es, de la dosis de radiación. La dosis afecta la magnitud de los cambios radiolíticos que ocurren en un alimento irradiado. La formación de productos usualmente se incrementa linealmente con la dosis. Sin embargo, este podría no ser el caso en el rango de muy altas dosis, ya que los productos radiolíticos formados pueden ser destruidos por la misma radiación, de tal manera que la formación del producto no incrementará con la dosis. En irradiación de alimentos se supone en general un incremento lineal de los efectos con el incremento de la dosis.

- *Oxígeno:* La presencia o la ausencia de oxígeno durante la irradiación puede tener una importante influencia en el curso de la radiólisis. Los agentes reductores e^-_{ac} y H^\bullet formados en la radiólisis del agua pueden reaccionar con el oxígeno dando lugar a la formación de peróxido de hidrógeno. Por lo tanto, la formación de este compuesto en sistemas irradiados depende de la concentración de oxígeno. Con la irradiación también se puede formar ozono, un agente oxidante muy poderoso. A través de estas reacciones, las pequeñas cantidades de oxígeno presentes en un alimento pueden ser rápidamente consumidas, creando una condición anaeróbica. En el caso de irradiación con electrones con dosis mayores que 0,6 kGy esta condición se mantiene debido a que el oxígeno del sistema es eliminado a una velocidad mayor que aquella con la que es reemplazado por la difusión del oxígeno atmosférico. Debido a que las fuentes gamma entregan una dosis de radiación a una velocidad de dosis mucho menor que los aceleradores de electrones, el oxígeno puede difundir en la muestra durante la irradiación y, por lo tanto, las condiciones anóxicas no existen a menos que la muestra sea irradiada en vacío o bajo nitrógeno u otro

gas protector. De este modo, debido a la diferencia en la velocidad de dosis, el efecto total de la irradiación con electrones sobre un material, puede a veces, ser diferente de aquel producido por la irradiación gamma, a igual dosis. Este efecto aparente de la velocidad de dosis es en realidad un efecto del oxígeno.

- *Temperatura*: La temperatura durante la irradiación también influye sobre la magnitud de los cambios radiolíticos. Ha sido establecido que los efectos de la radiación sobre varios constituyentes de los alimentos pueden ser considerablemente minimizados si el producto se mantiene congelado durante la irradiación (Diehl, 1990). Este efecto se atribuye al hecho que los radicales son atrapados en el material congelado, reduciéndose drásticamente su velocidad de difusión y la reactividad de los mismos (Taub y col., 1978).

- *pH*: El pH influye en los cambios radiolíticos de un sistema porque afecta las siguientes reacciones de equilibrio:



Por lo tanto, un medio ácido favorecerá la desaparición de e^{-}_{ac} mientras que un medio alcalino podría favorecer la formación del mismo.

4.3.3. Efectos de la radiación ionizante sobre otros componentes de los alimentos

Sin considerar el agua, los principales componentes de los alimentos son los carbohidratos, lípidos y proteínas, siendo las vitaminas y minerales importantes componentes minoritarios.

- *Proteínas*: Las proteínas están compuestas por cadenas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Por lo tanto, el estudio del efecto de la radiación sobre los aminoácidos puede proveer información valiosa para entender los cambios inducidos por radiación en las moléculas de proteínas (Urbain, 1977). Los principales cambios radiolíticos en soluciones acuosas de aminoácidos alifáticos simples son la desaminación y descarboxilación. Los productos resultantes incluyen NH_3 , CO_2 , H_2 , aminas, ácidos alifáticos y aldehídos. Los aminoácidos que contienen azufre, tales como cistina, cisteína y

metionina, probablemente son los más sensibles a la radiación. Usualmente el grupo azufrado es oxidado, formándose H_2S , S elemental o compuestos volátiles de azufre.

Los aminoácidos con estructura cíclica pueden sufrir la ruptura del anillo. La desaminación de aminoácidos aromáticos ocurre, pero no en el mismo grado que con los aminoácidos alifáticos. La hidroxilación de anillos aromáticos es la principal reacción de la fenilalanina y la o-tirosina.

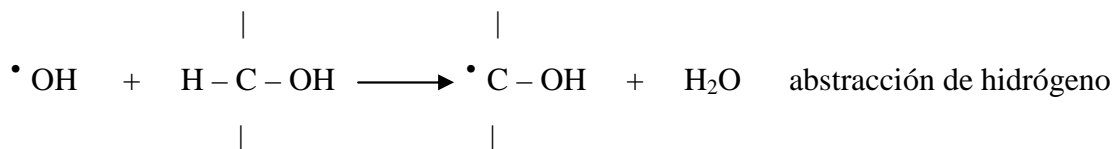
Una molécula de proteína responde a la radiación en forma dual: como una entidad proteica y como aminoácidos individuales. En cierto grado, el efecto particular de la radiación está relacionado con la estructura de la proteína; su composición, si está en forma natural o desnaturalizada, deshidratada o en solución, líquida o congelada y con la presencia o ausencia de otras sustancias. El fenómeno de la desnaturalización por irradiación se manifiesta por sí mismo como cambios en la viscosidad de soluciones, en la solubilidad, en el comportamiento electroforético, en cambios en el espectro de absorción, en reacciones con enzimas y en cambios inmunológicos. También se ha observado que ocurren la fragmentación y agregación de proteínas (Delincée, 1983a).

En términos de la proteína como un todo, las consecuencias de los cambios recién descritos pueden ser variadas, como por ejemplo la desnaturalización, el deterioro o la alteración de las características funcionales en sistemas biológicos, cambios que pueden ser letales para un organismo.

El valor nutritivo de las proteínas está ampliamente relacionado con sus aminoácidos. Las dosis empleadas en irradiación de alimentos no producen cambios significativos en la composición de aminoácidos de las proteínas; en consecuencia, la irradiación no causa pérdidas nutricionales apreciables en el valor proteico.

- *Carbohidratos:* Los carbohidratos forman parte de la mayoría de los alimentos. Como sustancias cristalinas ellos son muy sensibles a la radiación, dando un gran número de productos incluyendo H_2 , CO_2 , aldehídos, cetonas, ácidos y otros carbohidratos. Dauphin y Saint-Lèbe (1977) y Adam (1983) han dado una descripción detallada de los productos radiolíticos formados de diversos sacáridos irradiados en distintas condiciones.

En presencia de agua, ocurre la degradación oxidativa debido a la acción directa e indirecta de la radiación. Por acción indirecta, los carbohidratos son atacados principalmente por radicales $\bullet OH$. Estos radicales abstraen predominantemente el hidrógeno de los enlaces C – H, formando H_2O :



Los radicales resultantes reaccionan posteriormente a través de mecanismos de desproporción, dimerización y deshidratación, produciendo ácidos, cetonas y aldehídos. La irradiación de hidratos de carbono en presencia de oxígeno causa reacciones secundarias.

Los oligosacáridos forman monosacáridos y productos similares a aquellos obtenidos con la irradiación de azúcares simples.

Los polisacáridos también se degradan por irradiación a través del clivaje de la unión glicosídica. Esto conduce a la formación de unidades menores de carbohidratos tales como glucosa o maltosa, dando como resultado un ablandamiento y pérdida de textura de algunas frutas, y disminución de la viscosidad de soluciones de polisacáridos.

La irradiación de carbohidratos en estado seco produce cambios en su punto de fusión, la rotación óptica y el espectro de absorción. Los productos radiolíticos formados incluyen formaldehído, acetona, lactonas, glioxal y peróxido de hidrógeno, mientras que se liberan gases tales como H₂, CO₂, CH₄ y CO.

Cuando los carbohidratos en solución son irradiados se producen malonaldehído y desoxicompuestos. El pH de la mayoría de los alimentos limita en gran parte la producción de estos compuestos. Las proteínas y los aminoácidos, entre otras sustancias, protegen a los carbohidratos del cambio radiolítico. Debido a esto es difícil extrapolar los resultados obtenidos para sistemas simples a sistemas complejos tales como aquellos que existen en alimentos.

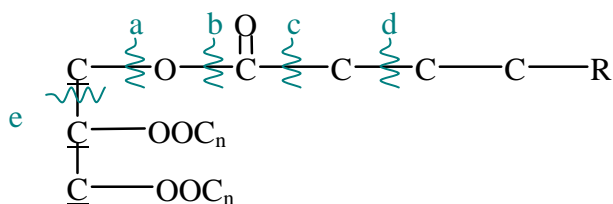
- *Lípidos*: El mecanismo general de la radiólisis de lípidos ha sido profundamente estudiado sobre sistemas modelo, grasas naturales y alimentos con alto contenido lipídico (Nawar, 1977, 1978, 1983) (Hammer y Wills, 1979) (Delincée, 1983b). En contraste con las reacciones de los hidratos de carbono y las proteínas, las reacciones de los lípidos con especies reactivas provenientes de la radiólisis del agua, juegan un rol secundario, al menos desde el punto de vista cuantitativo. Cualitativamente ellas pueden ser importantes en los lípidos de membranas lindantes con los fluidos acuosos celulares.

Las reacciones químicas resultantes de la irradiación de lípidos son afectadas por diversos parámetros, tales como la composición del lípido (saturado o insaturado), la presencia de otras sustancias (por ejemplo antioxidantes), si el lípido está en estado líquido o sólido, y las condiciones de irradiación (dosis, velocidad de dosis, temperatura, presencia

de oxígeno). Particularmente con los lípidos, el tratamiento post-irradiación (atmósfera y temperatura de almacenaje) también es importante.

La porción lipídica o grasa de los alimentos está compuesta básicamente por triglicéridos. Es por ello que generalmente los estudios sobre la radiólisis de lípidos se limitan a esta fracción mayoritaria.

Cuando se irradian grasas se pueden inducir cambios oxidativos y no oxidativos. Los cambios no oxidativos ocurren cuando se excluye el O₂ durante y después de la irradiación. Los productos radiolíticos incluyen H₂, CO₂, CO, alcanos, alquenos y aldehídos. En el caso de grasas insaturadas se produce alguna hidrogenación y se forman cantidades significativas de dímeros. El mecanismo general de la radiólisis no oxidativa de un triglicérido involucra la ruptura preferencial de 5 enlaces de la molécula y al azar en el resto de los enlaces C – C de los ácidos grasos, como se muestra en la siguiente figura:



(Los lugares de clivaje preferidos son a, b, c, d y e; n es el número de átomos de carbono en el AG.)

Los radicales libres formados por estas escisiones principalmente adicionan hidrógeno obtenido por extracción de otras moléculas o, en menor grado, pierden hidrógeno o se combinan con otros radicales libres. De esta manera se forma una serie de sustancias radiolíticas estables (Nawar, 1978).

El proceso oxidativo inducido por irradiación es casi el mismo que el que ocurre sin irradiación, aunque ésta acelera el proceso. Se producen radicales libres cuyo tipo y velocidad de desaparición son afectados por la temperatura. Después de la irradiación estos radicales libres pueden reaccionar con O₂ durante un largo período. Los radicales libres causan la formación de hidroperóxidos, los cuales producen una gran variedad de compuestos incluyendo alcoholes, aldehídos, hidrocarburos, hidroxí y cetoácidos, cetonas, lactonas, oxoácidos y compuestos diméricos.

Los fosfolípidos son una importante clase lipídica debido a su contenido de ácidos grasos insaturados. La tendencia de los FL a oxidarse muy rápidamente es de gran importancia para el desarrollo del sabor en alimentos con alto contenido graso, por ejemplo las carnes. Con respecto a la radiólisis de los FL existe muy poca información. Trabajos realizados con dipalmitoil-fosfatidiletanolamina irradiada con 500 kGy, revelaron la producción del AG del sustrato, hidrocarburos, aldehídos, cetonas y ésteres, productos radiolíticos típicos del AG constitutivo, y consistente con el mecanismo sugerido para la radiólisis (Delincée, 1983b). Cuantitativamente, las cantidades de productos volátiles provenientes del FL irradiado fueron mucho menores que aquellas formadas para los TG. Además de estos compuestos esperados, fueron identificados varios aldehídos de cadena corta, metil y etil ésteres y una serie de metil, etil y propil cetonas. Los mecanismos por los cuales se formaron estos compuestos no son claros. Dada la elevada dosis de radiación usada en esta experiencia (500 kGy), la cual es mucho mayor que las dosis empleadas para el procesamiento de alimentos, la aparición de estos compuestos en alimentos irradiados sería dudosa.

- *Vitaminas*: La estabilidad de las vitaminas frente a la radiación es importante cuando se analizan aspectos nutricionales de los alimentos irradiados. Algunas vitaminas son consideradas sensibles a la radiación ionizante, si bien, como es de esperar, el efecto de la radiación sobre una vitamina depende en gran parte del medio en el cual se encuentra la misma (Tobback, 1977). Un medio complejo como el que existe en los alimentos reduce su sensibilidad a la radiación. Además, cabe aclarar que las dosis usadas y las condiciones de irradiación pueden, en gran parte, alterar su estabilidad (Basson, 1983).

Las vitaminas pueden ser clasificadas de acuerdo a su solubilidad en agua o en lípidos. La amplia variedad de estructuras químicas de las vitaminas implica diferentes respuestas a la radiación. De las vitaminas solubles en agua, la vitamina B₁ (tiamina) es la más sensible. Su estructura química la hace susceptible al ataque de e⁻_{ac}. La vitamina C o ácido ascórbico, otra vitamina soluble en agua, también es sensible a la radiación y forma entre otros productos el ácido dehidroascórbico (Simic, 1983). Otras vitaminas solubles en agua sensibles a la radiación son la riboflavina, vitamina B₁₂ y biotina. Niacina, ácido pantoténico y ácido fólico parecerían ser bastante resistentes.

Entre las vitaminas liposolubles, la vitamina E es la más radiosensible y la vitamina D la menos sensible a la radiación. La vitamina A también es relativamente sensible a la radiación ionizante debido a que su actividad disminuye por isomerización cis-trans

(Tobback, 1977). En cuanto a la estabilidad de la vitamina K, los informes son contradictorios.

- *Minerales*: Los minerales, como tales, no son afectados por la radiación. Sin embargo, el contenido mineral en alimentos secos envasados que han sido esterilizados con radiación ionizante puede ser mayor que en aquellos alimentos esterilizados con calor, debido a que en estos últimos, los minerales pueden perderse con los jugos durante la cocción.

4.4. Aspectos legales

4.4.1. Salubridad de los alimentos irradiados

Los términos “sano” o “salubridad” son usados a menudo en discusiones sobre la inocuidad de alimentos en general y de alimentos irradiados en particular. Con respecto a estos últimos, las consideraciones de salubridad o “seguridad para el consumo” involucran cuatro criterios:

- La ausencia de radiactividad inducida medible (seguridad radiológica).
- La ausencia de productos radiolíticos tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos (seguridad toxicológica).
- La ausencia de microorganismos patógenos viables y sus toxinas (seguridad microbiológica).
- Evitar la pérdida excesiva del valor nutritivo (calidad nutricional).

Basados en estudios toxicológicos, radioquímicos y aquellos que demuestran la ausencia de cualquier efecto adverso resultante del suministro de dietas irradiadas a animales de laboratorio, ganado y pacientes inmunológicamente deprimidos, el Comité Conjunto de Expertos de la FAO/OIEA/OMS concluyó en 1980 que “la irradiación de cualquier artículo alimenticio con una dosis total promedio de hasta 10 kGy no presenta riesgo toxicológico; por lo tanto, no se requieren análisis toxicológicos de alimentos así tratados”. También se encontró que la irradiación de hasta 10 kGy “no introduce problemas nutricionales o microbiológicos especiales”

En este mismo informe se recomienda irradiar alimentos con niveles de energía que no excedan los 10 MeV para electrones acelerados o 5 MeV para rayos X. Bajo estas condiciones nunca ha sido observada radiactividad inducida en alimentos tratados con una dosis de radiación en un rango prácticamente útil de hasta 50 kGy.

Debido a la efectividad del proceso de irradiación para controlar patógenos portados por los alimentos sumado a la posibilidad de realizar el tratamiento de los productos ya envasados (disminución de contaminaciones cruzadas), la mayoría de los funcionarios de seguridad alimentaria del mundo, consideran a la irradiación como un efectivo Punto Crítico de Control (PCC) dentro del Sistema de Análisis de Peligros y Control de Puntos Críticos -HACCP- (Satin, 2002).

4.4.2. Etiquetado

El Comité Conjunto de Expertos en alimentos irradiados de la FAO/IAEA/OMS ha dejado claro que “la irradiación es un proceso físico para el tratamiento de alimentos y como tal es comparable al calentamiento o al congelamiento de alimentos para su preservación” (Diehl, 1990).

El alimento irradiado no necesitaría ser etiquetado por razones de seguridad. Considerando que otras formas de procesamiento de alimentos no son identificadas con un rótulo y que los alimentos irradiados no presentan riesgos, ha sido sugerido que estos no deberían ser especialmente etiquetados.

Los alimentos irradiados no pueden ser reconocidos por los consumidores, por medio de la vista, el olfato, el gusto o el tacto. La única forma segura de saber si un alimento ha sido procesado por irradiación, es si el producto lleva una etiqueta que anuncie claramente el tratamiento mediante un símbolo, con palabras o ambos. El símbolo mostrado en la Figura 10, denominado Radura, tiene reconocimiento internacional para indicar si el producto alimenticio ha sido tratado con radiación ionizante.

Este símbolo fue ideado en 1972 por el Dr. R. M. Ulmann, quién fuera el director de la Planta Piloto de Irradiación de Alimentos de Holanda.



Figura 10. Radura: símbolo reconocido internacionalmente para alimentos irradiados.

4.5. Situación de la irradiación de alimentos en el mundo

Actualmente 41 países cuentan con la aprobación de alimentos irradiados en su legislación (IAEA, 2006). Por orden alfabético ellos son: Argentina, Bangladesh, Bélgica, Brasil, Bulgaria, Canadá, Chile, China, Costa Rica, Croacia, Cuba, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Hungría, India, Indonesia, Irán, Israel, Italia, Japón, Korea del Sur, Méjico, Holanda, Noruega, Pakistán, Filipinas, Polonia, Rusia, Sudáfrica, España, Siria, Taiwan, Tailandia, Ucrania, Inglaterra, Uruguay, Estados Unidos de América, Vietnam y Yugoslavia (Tabla 2) . Suiza lo permite en su legislación pero aún no ha declarado el tipo de alimento a tratar. De los 7 países industrializados sólo Alemania no permite la irradiación de alimentos. El tipo de aprobación puede ser para alimentos en general o algunos en particular además de condicional o incondicional.

En particular en la Argentina la investigación y el desarrollo del procesamiento de alimentos con radiaciones ionizantes comenzó en 1965 por parte de la Comisión Nacional de Energía Atómica. En 1971 el Código Alimentario Argentino reconoce, en su Art. 174, el tratamiento de alimentos con radiaciones ionizantes. A partir de esto se aprobó paulatinamente en forma incondicional la irradiación de los siguientes alimentos: en 1989 papa, ajo, cebolla y frutilla; en 1990 especias y condimentos; en 1992 frutas secas y vegetales deshidratados y en 1994 espárragos y champiñones. Además desde el 2003 el país cuenta con la Norma IRAM 20301, que se refiere a las buenas prácticas de manufactura para el proceso de irradiación de alimentos destinados para el consumo

humano. También en el 2003 la CNEA solicitó la actualización del CAA en cuanto a la irradiación de carnes rojas, carnes de pollo, pescados y mariscos.

Además de la CNEA y la Universidad Nacional del Sur otras instituciones que han investigado sobre el tema son: Universidad Nacional del Comahue, Universidad Nacional de Cuyo y Universidad Católica de San Juan, INTA (Castelar), Universidad Nacional de Entre Ríos y Universidad Nacional de Salta.

En el mundo existen aproximadamente 180 facilidades de irradiación pero se cuenta con información sobre 104. De las cuales 91 cuentan con fuentes isotópicas de Cobalto-60 y 13 operan mediante aceleradores de electrones (IAEA, 2007)

En la Argentina existen tres plantas autorizadas para operar: Planta de Irradiación Semi-Industrial (PISI) ubicada en el Centro Atómico Ezeiza de la Comisión Nacional de Energía Atómica, IONIC S.A. (Tigre-Pcia de Bs.As.) y Sinercom S.A. (Salta).