

# APLICACIONES DE LA INTERACCION DE LAS RADIACIONES IONIZANTES CON LA MATERIA EN MEDICINA E INDUSTRIA

I.Q. Laura Fornaro

## 1. Introducción

Cuando las radiaciones ionizantes interactúan con la materia ocurren distintos efectos sobre las radiaciones y sobre la materia. Muchos de estos efectos han sido utilizados con muy diferentes fines dando lugar a aplicaciones en varios campos, entre los que se destacan las aplicaciones en medicina e industria.

Básicamente, existen dos disposiciones diferentes: una en que la radiación atraviesa o retrodispersa en el material y otra en que la radiación actúa sobre y modifica el material; entre ambas dan lugar a todas las aplicaciones, según se indica en las Figuras 1 y 2. En la Figura 1.a se esquematizan aquellos casos en que se mide la actividad de la radiación luego de que esta atraviesa o retrodispersa en un cierto material, por ejemplo para la medida y control de espesores y niveles en la industria. En la Figura 1.b se esquematizan los casos en que se obtiene una imagen luego de que la radiación atraviesa un cierto material, por ejemplo para inspección de equipajes y cargas (los visores de equipajes de los aeropuertos, en que el “material” es el equipaje), o en radiografía o gammagrafía de piezas en la industria, en que el “material” es la pieza, o para diagnóstico en medicina, en radiología estática (radiología general, mamografía, odontología, tomografía computada) o a tiempo real (fluoroscopia, angiografía), casos en que el “material” es el ser humano o animal. En la Figura 2 se esquematizan las aplicaciones en que la radiación al incidir en un material produce modificaciones en dicho material, como por ejemplo cuando se inhiben o eliminan microorganismos al irradiar alimentos o material médico, cuando se inhibe el brote de alimentos o se modifica la estructura de tejidos, todos casos de aplicaciones industriales de las radiaciones ionizantes. También la modificación de un material se emplea en medicina con fines de terapia cuando las radiaciones ionizantes inciden en tumores (radioterapia, gammaterapia, braquiterapia e irradiación de tumores con partículas aceleradas por ciclotrón).

Se detallarán a continuación algunas de estas aplicaciones.

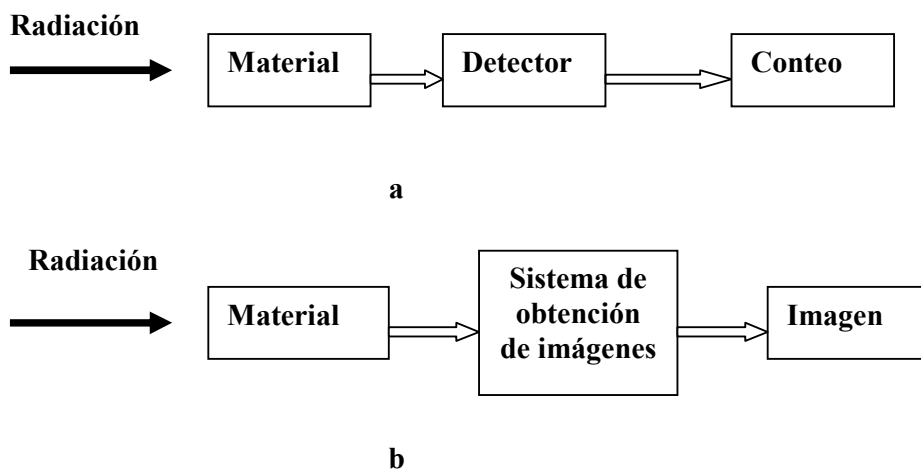
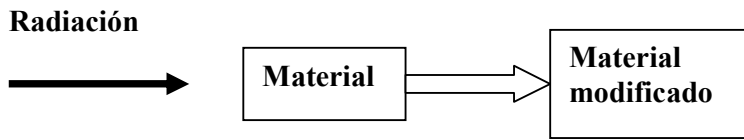


Figura 1



**Figura 2**

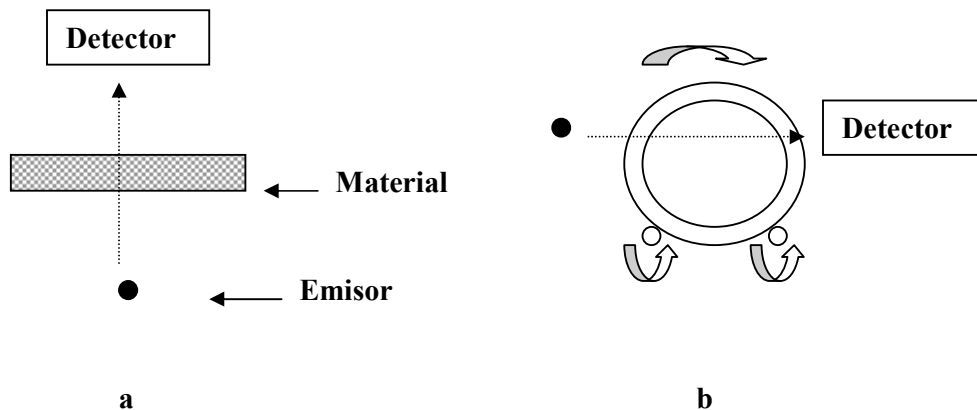
**Aplicaciones basadas en la medida de la actividad transmitida o retrodispersada por un material**

**2.1. Determinación de espesores por transmisión de radiación**

Una de las aplicaciones más comunes de las radiaciones ionizantes en la industria es la determinación y/o control de espesores (o densidades si el espesor es conocido, o de la corrosión de una cañería a la que se ha reducido el espesor original, u obstrucciones, etc.) y el método más sencillo es por transmisión de radiación según se indica en la Figura 3.a, para un caso estático y en la Figura 3.b para el control de uniformidad de espesor de tubos.

Conociendo el coeficiente de absorción del material a controlar (o determinando éste experimentalmente) y en función de la ecuación  $A = A_0 e^{-\mu x}$  ya vista, puede determinarse el espesor del material.

Como la medida de actividad se realiza mediante circuitos electrónicos, es muy sencillo ya sea registrar ésta o ajustar los valores para control de producción.



**Figura 3**

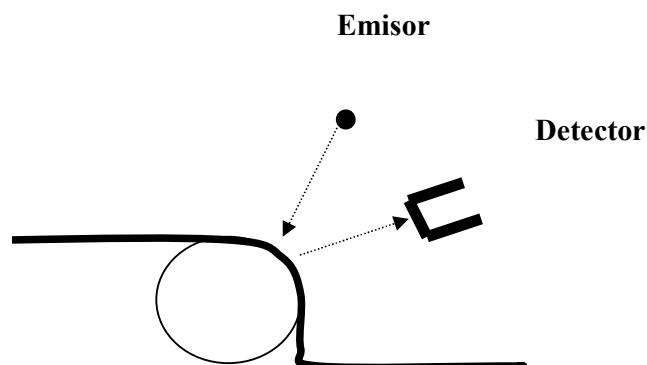
En la Figura 4 se muestra un sistema de control de corrosión de cañerías.



**Figura 4**

## **2.2. Determinación de espesores por retrodispersión de la radiación**

Como se ha visto en el repartido de interacción de las radiaciones con la materia, uno de los efectos de la interacción de la radiación  $\beta$  es la retrodispersión. Este efecto es particularmente útil para la determinación de espesores de aquellos materiales a los que es difícil acceder por ambos lados, como debe hacerse en la determinación por transmisión. En estos casos (paredes pintadas, telas que deslizan sobre un cilindro) el espesor se determina por retrodispersión. Como este efecto depende mucho del Z del material a medir y del Z del material soporte, lo más adecuado es calibrar el sistema a fin de determinar o controlar el espesor utilizando primeramente espesores conocidos. Un esquema de este método de determinación y control de espesores se muestra en la Figura 5.



**Figura 5**

### 2.3. Control de niveles por transmisión y por retrodispersión

También son muy utilizados los radioisótopos en la Industria para la determinación y sobre todo el control de niveles de tanques, recipientes, etc. sobre todo en aquellos casos en que es difícil ubicar otro tipo de control (flotador) por tratarse de líquidos corrosivos, lugares inaccesibles, altas temperaturas, etc. En la Figura 6 se dan algunos ejemplos de controles de niveles por transmisión (a.-e.) y por retrodispersión (f., g.). También se indica la curva de actividad medida en función de la altura del líquido, que da una idea de la sensibilidad en el control del nivel.

Lo anterior puede aplicarse al control de nivel en sólidos, como es el caso de control del llenado de bolsas o cajas.

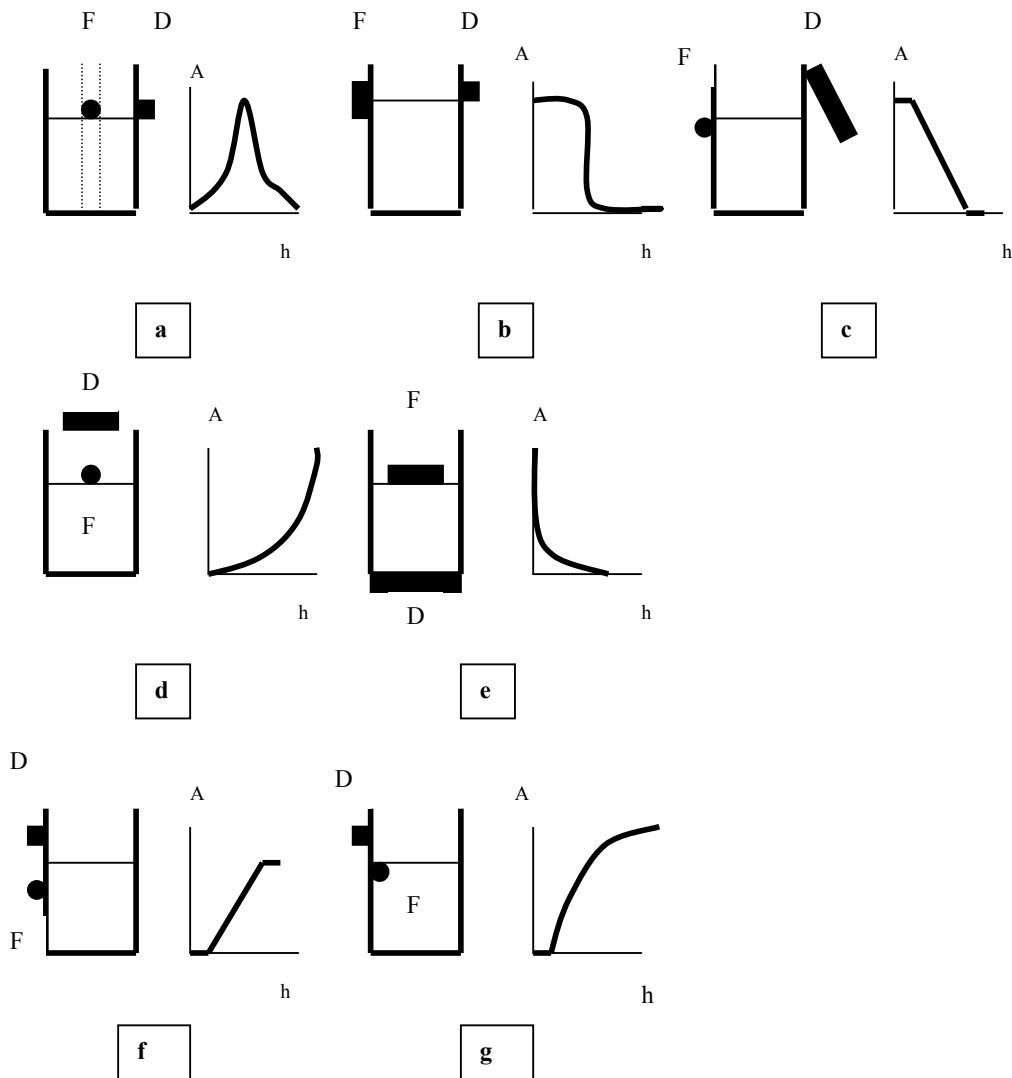


Figura 6

## **2. 4. Ventajas y desventajas del uso de las radiaciones ionizantes para medida y control de espesores y niveles**

El uso de sistemas con radiaciones ionizantes en la determinación de espesores y niveles tiene varias ventajas frente a otros métodos alternativos, tales como: es un método no destructivos; el sistema no sufre daños ni contaminación y puede desplegar altas velocidades; el equipo puede trabajar en continuo; como existen generadores de rayos X y radioisótopos emisores de diferentes radiaciones y con diferentes rangos de energía, existe una amplia gama de posibilidades que cubre la determinación de espesores en un amplio rango y de muchos materiales; como pueden no estar en contacto con el material son especialmente indicados para líquidos corrosivos, viscosos y materiales a alta temperatura.

Las mayores desventajas de dicho uso son: la instalación del sistema requiere un muy buen blindaje y buenas condiciones de seguridad laboral, el sistema funciona siempre, y las precauciones de trabajo deben tomarse aún cuando no se estén realizando determinaciones. Sin embargo, cumpliendo con las normas de seguridad estos sistemas no representan riesgos para el trabajador.

## **2. Obtención de imágenes con radiaciones ionizantes**

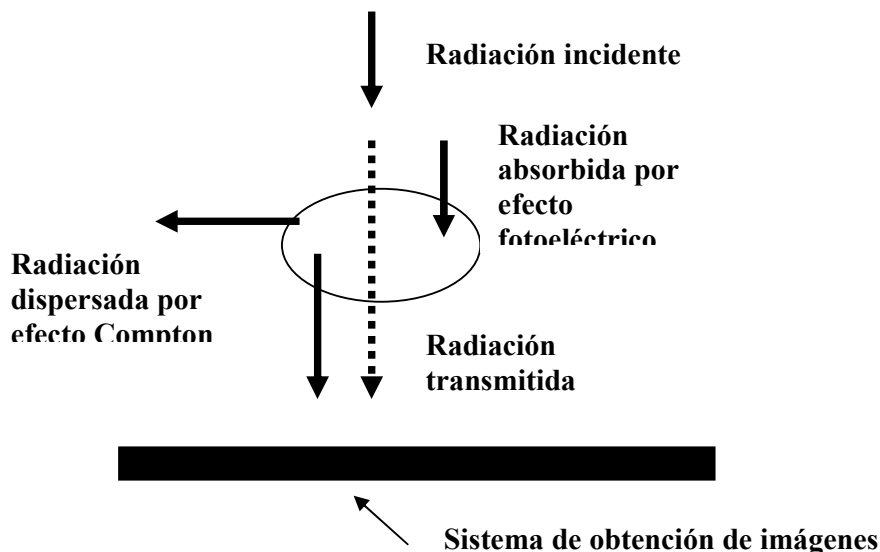
### **3.1. Conceptos de obtención de imágenes con radiaciones ionizantes. Aplicaciones en la industria y en medicina**

La obtención de una imagen utilizando radiaciones ionizantes es consecuencia de la absorción diferencial de dicha radiación por parte del objeto a estudiar (una pieza metálica, el contenido de una valija, órganos de un ser humano o animal). Dada una radiación de una cierta energía, materiales de distinto  $Z$  y densidad tendrán distintos coeficientes de absorción de la radiación,  $\mu$ . Entonces, las distintas partes de una pieza, los distintos objetos dentro de una valija y los distintos tejidos (músculo, intestinos, hueso) de un ser humano, absorberán diferenciadamente la radiación. Como se indicó en el repartido de Interacción de las radiaciones ionizantes con la materia, la absorción de la radiación se realiza mayormente por efecto fotoeléctrico, que depende mucho del  $Z$  del medio, mientras que por efecto Compton hay absorción parcial y dispersión de la radiación, dependiendo la absorción en menor medida de  $Z$ . En la Figura 7 se esquematizan los procesos que llevan a la obtención de una imagen. Para explicarlos, y sólo por simplicidad se supondrá que el dispositivo para obtención de imágenes es un film fotográfico, el que permanece blanco si no le incide radiación y se ennegrece más cuanto más radiación le incide. Las partes del objeto de mayor  $Z$  absorben la radiación por efecto fotoeléctrico, la radiación no pasa, no incide en el film y éste queda blanco. Las partes del objeto de menor  $Z$  no absorben tanto la radiación, ésta sigue su camino, incide en el film y éste queda gris o negro. Por efecto Compton se dispersa radiación, que “vela” la imagen y radia hacia los alrededores del objeto.

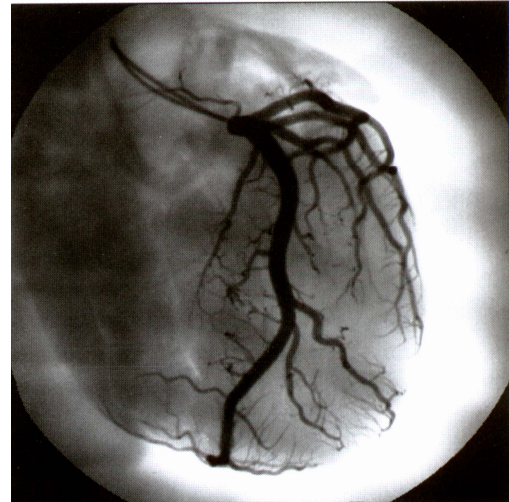
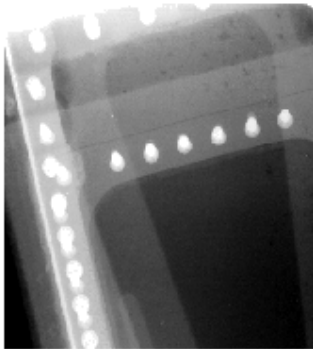
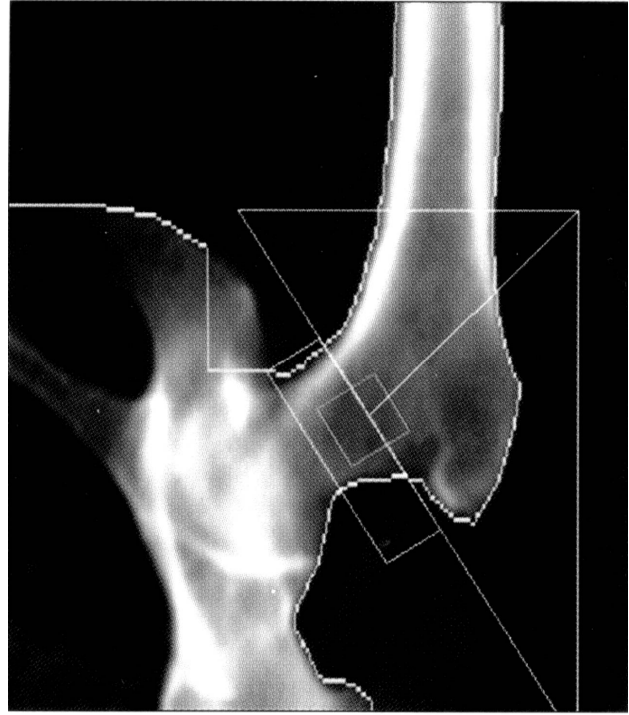
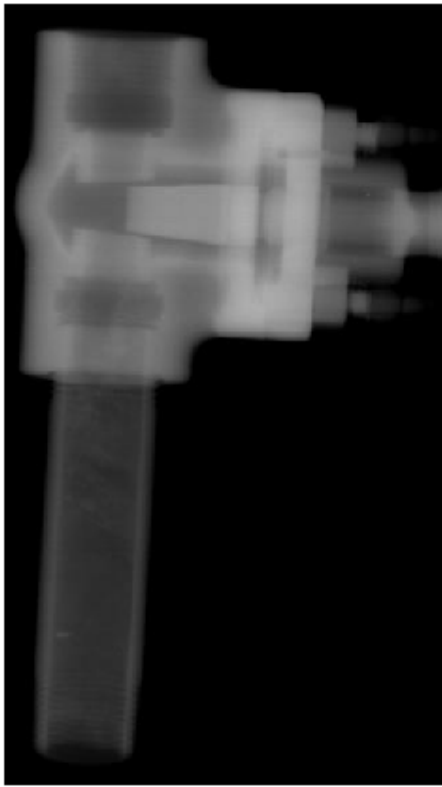
Es interesante detallar algunos ejemplos de obtención de imágenes con radiaciones ionizantes. Sea una pieza de metal con una fisura, falla, desgaste, etc.: el metal absorbe la radiación, poca lo atravesará y por tanto en la imagen aparecerá blanco. En la fisura habrá aire, de menor  $Z$  que el del metal, la radiación será menos absorbida, pasará a través del aire y en la imagen la fisura aparecerá negra. La misma absorción diferencial mostrará una obstrucción o la corrosión de una cañería. En la Figura 8 se muestra una gammagrafía de una válvula abierta y otra mostrando la corrosión de una ala de avión de aluminio, obtenidas utilizando radiación del  $^{192}\text{Ir}$ . Sea una valija: la ropa, de bajo  $Z$ ,

absorberá poca radiación y aparecerá en negro en la imagen, un cuchillo, tijera u otro objeto de alto Z absorberá más y aparecerá blanco en la imagen. Y sea un ser humano: la absorción en grasa (Z promedio 6.3) será menor que en músculo (Z promedio 7.4) y que en hueso (Z promedio 13.8). Por tanto el hueso será el que más absorba la radiación y aparecerá blanco en la imagen, resultando músculo y grasa en tonos grises. Cuando se desea obtener imágenes de órganos o conjunto de órganos de Z similar se utiliza contraste mediante la adición de sustancias de alto Z (contraste con sulfato de bario para el intestino,  $Z_{Ba} = 56$ , o contraste con compuestos de yodo,  $Z_I = 53$ , para estudios de arterias cardíacas en angiografía o de útero y trompas de Falopio). En la Figura 9 se muestran una imagen de hueso y otra de contraste en angiografía, ambas obtenidas con generadores de rayos X.

Resulta interesante destacar que la obtención de imágenes con radiaciones X y gamma de piezas, objetos y seres humanos es consecuencia directa de los rangos de energía de esas radiaciones y de los valores de los coeficientes de absorción de piezas, objetos comunes y tejidos humanos para dichas energías. Si se quisieran emplear rayos X para radiología de piezas gruesas de hierro o acero inoxidable, simplemente un pequeño espesor absorbería totalmente los rayos X y se obtendría una imagen completamente blanca, no se “vería” la pieza (algo similar a enviar luz a un objeto completamente opaco). Por el contrario, si se quiere emplear radiación gamma para obtener una imagen de órganos de un ser humano (aparte de los riesgos de una irradiación con mayor energía) dado el coeficiente de absorción de los tejidos, la radiación sería muy poco absorbida, los atravesaría y se obtendría una imagen totalmente negra: tampoco se “verían” los órganos (algo similar a enviar luz a un vidrio completamente transparente). Entonces, la obtención de imágenes con radiaciones ionizantes se debe a los particulares valores de energía de esas radiaciones y de los coeficientes de absorción de los materiales, correspondiendo al ser humano presentar una absorción diferencial en las energías de los rayos X, de ahí que estos se usen habitualmente para radiografía de humanos, como es el caso de la Figura 9. Asimismo, debido al mayor coeficiente de absorción de los materiales de alto Z como los metales para la radiación X, éstos materiales deben ser estudiados con radiación  $\gamma$  en el proceso llamado gammagrafía, usando una fuente emisora  $\gamma$  de energía relativamente alta ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ). De ahí que las imágenes de la Figura 8 se hayan obtenido con radiación gamma.



**Figura 7**



**Figura 8**

**Figura 9**

## **2.2. Sistemas de obtención de imágenes con radiaciones ionizantes**

Existen variados sistemas de obtención de imágenes con radiaciones ionizantes. En principio estos sistemas pueden basarse en métodos directos o indirectos de obtención de la imagen, los que se esquematizan en la Figura 10. Como se observa en dicha figura, el método directo determina que cada radiación provoque una señal mucho menos dispersa que en el indirecto, determinando una imagen con mucha mejor resolución espacial. Entre los métodos indirectos se encuentran los films fotográficos (las “placas de rayos X”), que se vienen usando por más de 100 años pero que tienen algunas desventajas tales como baja eficiencia, revelado posterior a la irradiación y sin procesamiento ni almacenamiento digital de la imagen. Allí la radiación interacciona con los átomos de plata de la emulsión de la película y de ahí surge, indirectamente, la imagen luego del revelado. También son métodos indirectos de obtención de imágenes las pantallas con fósforos ( $Gd_2O_2S:Tb$ ) o con detectores de centelleo ( $NaI(Tl)$ ,  $CsI(Tl)$ ), en los que la radiación determina la emisión de luz que es colectada por fotomultiplicadores o por fotodiodos, causando una señal eléctrica indirecta. Estos sistemas tienen también desventajas, sobre todo la dispersión de la luz que determina una baja resolución espacial de las imágenes. Sin embargo, por transformar la radiación en pulsos eléctricos, permiten la digitalización de la imagen. El método directo de obtención de imágenes consiste en el depósito de materiales detectores de radiaciones ionizantes (semiconductores o semiconductores compuestos) sobre los dispositivos semiconductores de obtención de imágenes digitales (los que se usan en cámaras y videos digitales y en las fotocopiadoras color). En estos sistemas al incidir la radiación, en lo que será cada punto de la imagen, se producen portadores de carga en el material semiconductor detector y éstos son colectados por el dispositivo de imágenes (TFT: thin film transistor). Sin duda estos sistemas sustituirán a los indirectos, pues ofrecen muchas ventajas, tales como una mejor calidad de imagen, el procesamiento digital de ésta, alto rango dinámico, rápida adquisición y display, reducción de la dosis, archivo digital, diagnóstico asistido por computadora, mayor capacidad de análisis de datos y procesamiento de imágenes y telerradiografía para facilitar las consultas radiológicas. Mención especial merece la mamografía, donde el tamaño de microcalcificaciones que interesan en la detección del cáncer de mama es menor a  $500 \mu m$ . La detección temprana del cáncer de mama depende y mucho de la capacidad del sistema de imagenología para resolver las distribuciones características y las formas de las pequeñas microcalcificaciones en el tejido de la mama, lo que implica resoluciones espaciales de por lo menos  $50 \mu m$ . Utilizando films de semiconductores compuestos podrá realizarse mamografía digital con mejor resolución espacial, detectando las microcalcificaciones más tempranamente y reduciendo la dosis, punto muy importante ya que la radiación puede causar cáncer de mama.

En las Figuras 11 y 12 se muestran sistemas de obtención de imágenes directas y digitales con radiación X (radiología digital), que recién están comenzando a comercializarse.

Como ya se indicó en el repartido de Detectores de Radiaciones Ionizantes, la Cátedra de Radioquímica desarrolla films detectores de semiconductores compuestos (ioduro de mercurio, ioduro de plomo, telururo de cadmio) para imagenología directa y digital de radiaciones X y gamma. Estos films así como los sistemas de crecimiento de films que hemos diseñado y construido se encuentran entre los mejores obtenidos hasta hoy día, y han sido y están siendo presentados en los últimos encuentros que sobre el tema se realizan, siendo además tema de colaboración con Universidades y Compañías extranjeras. En la Figura 13 se muestran films de ioduro de plomo y de ioduro de mercurio obtenidos en nuestro Laboratorio.



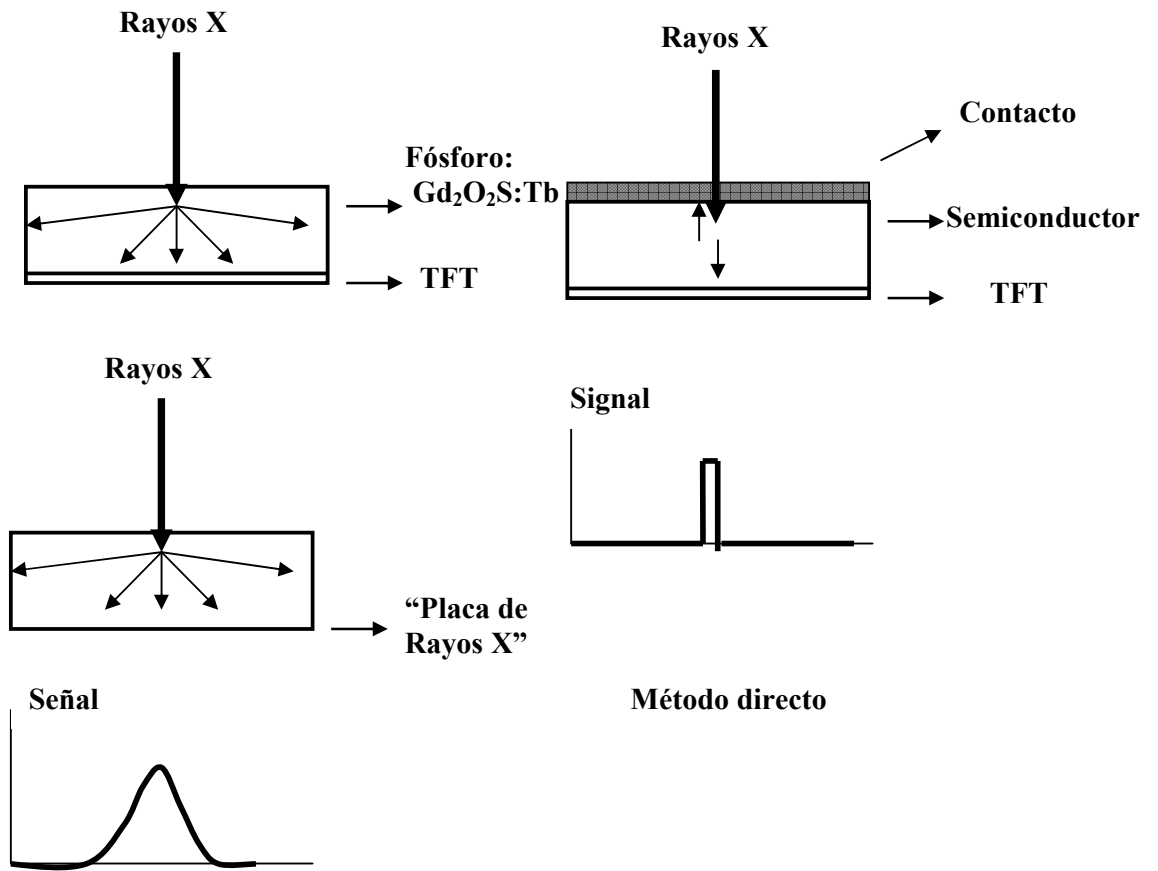
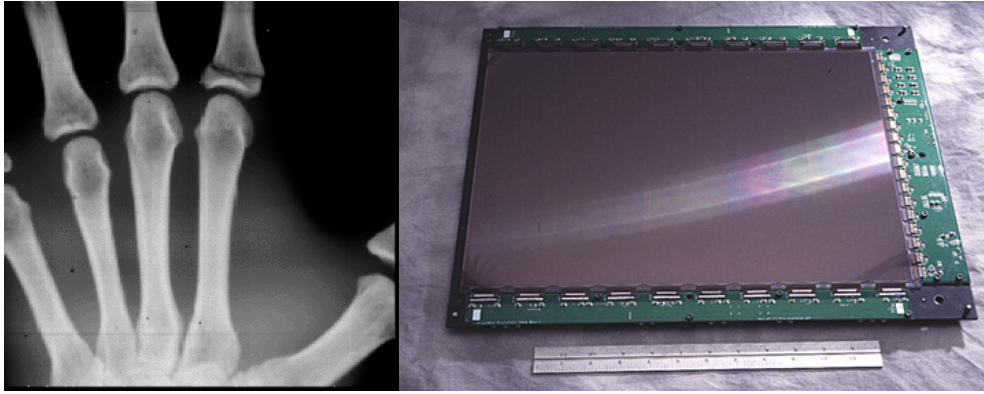


Figura 10

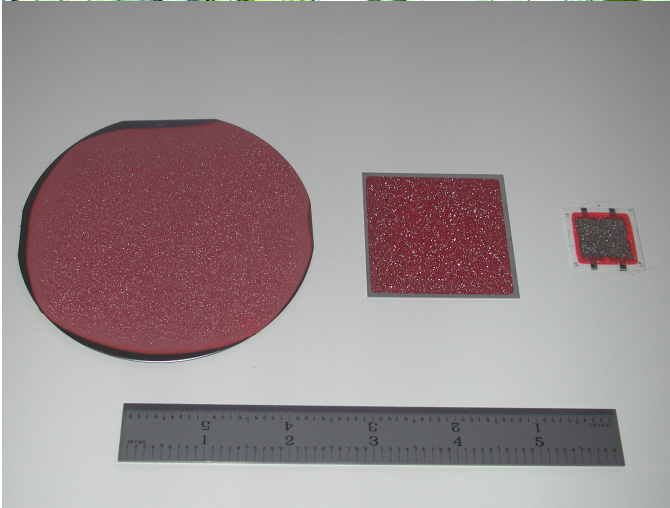
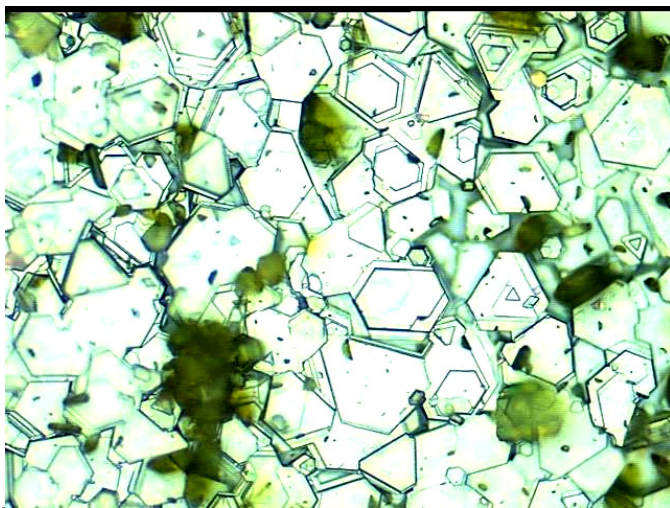
Métodos indirectos



Figura 11



**Figura 12**



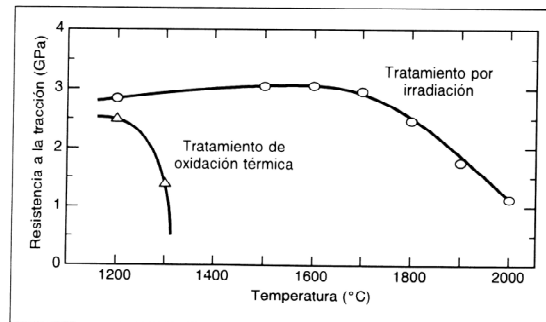
**Figura 13**

#### **4. Aplicaciones basadas en la modificación de un material por las radiaciones ionizantes**

Estas aplicaciones se refieren a los casos en que la materia sufre transformaciones al incidir en ella la radiación. Estas transformaciones pueden ser ionización, cambio molecular, inhibición o destrucción de microorganismos, inhibición de la reproducción celular, etc. Existen muchísimos ejemplos de modificaciones beneficiosas de un material por radiaciones ionizantes, se tratará de resumir las más utilizadas.

La ionización de un medio por radiaciones ionizantes se utiliza en la eliminación de electricidad estática, colocando un emisor de radiaciones con la carga opuesta a la que aparece por ejemplo en rollos de papel o tejido que giran a alta velocidad, o en grandes tanques de combustible.

El cambio molecular incluye aplicaciones como la producción de polietileno reticulado para aislamiento de cables y alambres termorresistentes, tuberías y planchas termoencogibles, revestimientos de superficies para tableros de madera, papel, tejas, planchas de acero, baldosas de yeso, cintas adhesivas, compuestos de madera y plástico resistentes al desgaste y al agua, coagulantes de polímeros de alto peso molecular, neumáticos reticulados, polvo de teflón, lentes de contacto, poliuretano reticulado para cables de sensor de frenos, fibras de carburo de silicio de alta resistencia a la temperatura, como se observa en la Figura 14. También el cambio molecular se aplica en la eliminación de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$  de los gases de combustión de combustibles fósiles (que ocasionan la lluvia ácida) por medio de irradiación con haces de electrones.



**Figura 14**

La inhibición o destrucción de microorganismos se aplica en la irradiación de alimentos, de materiales de uso en medicina y en la desinfección de lodos cloacales. En el caso de la conservación de alimentos se puede proceder a la inhibición del desarrollo de microorganismos logrando que el alimento se preserve en buen estado por más tiempo en condiciones de conservación menos exigentes que si no fue irradiado.

Importa resaltar que la inhibición mencionada se realiza por irradiación del alimento, que de ninguna forma es contaminado, por tanto no es radiactivo y puede consumirse sin riesgo alguno.

La irradiación de alimentos se realiza en unos 30 países, y se conservan cosas tales como especias, pescado fresco y desecado, carne, pollo, mariscos, naranjas, frutillas, peras, mangos, manzanas, papayas, tomates, hongos y queso. Por ejemplo en el caso del pescado, si es irradiado luego de capturado (en algunos casos en el mismo barco de captura) es conservado sólo en hielo, evitándose la conservación a menor temperatura por refrigeración con sistemas de amoníaco, costosos y con riesgos de contaminación de

alimento y personal. Esto se ha realizado en el País en forma experimental en la unidad de irradiación existente en el CIN (Centro de Investigaciones Nucleares), pero no se dispone de una unidad comercial.

La irradiación de material médico y de productos farmacéuticos busca la esterilización total del material, o una disminución importante de la carga microbiana (caso de gomas o polietilenos que se dañan con altas dosis de irradiación). La esterilización por irradiación es alternativa a la que utiliza óxido de etileno, que es tóxico, contamina los materiales y muchas veces reacciona con ellos, y tiene como grandes ventajas la automatización del proceso y el hecho de que la esterilización se produce después del empaquetado, evitando contaminaciones posteriores a éste. Se irradian muy variados materiales, tales como tijeras, catéteres, jeringas, dispositivos intrauterinos, tejidos para injertos, etc. Así han sido esterilizadas (en el exterior) las jeringas descartables que se utilizan comúnmente.

El uso de la irradiación para provocar la inhibición de reproducción celular o incluso la destrucción de células se aplica en la inhibición del brote de alimentos, en la esterilización de insectos y en radioterapia, gammaterapia e irradiación con partículas de ciclotrón en terapia humana. Como se ha visto en el repartido de Efectos biológicos de las radiaciones, estas causan efectos en las células: muerte celular en interfase durante o después de la irradiación con dosis del orden de cientos o miles de rem y muerte celular ligada a la mitosis para dosis del orden de los 25 mrem o menores. La muerte de células ligada a la mitosis es un importante mecanismo que elimina células defectuosas que pueden ser reemplazadas por hijas no dañadas o afectadas en mínimo grado como para interferir su viabilidad.

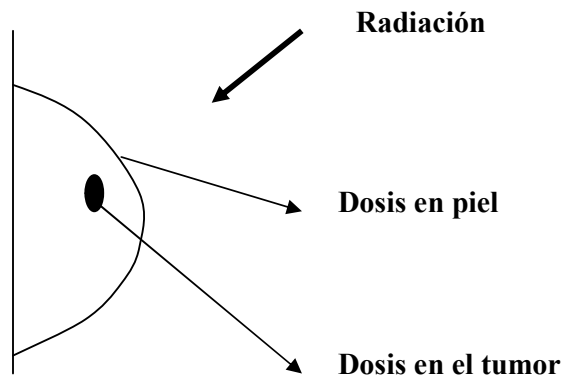
Estos efectos se aplican en la inhibición de brotes de alimentos, deteniendo la reproducción celular de los brotes de papas, cebollas o ajos. Se realiza esto comúnmente en unos treinta países. En Uruguay se ha hecho en forma experimental, no en forma industrial. Es interesante destacar que las papas, cebollas o ajos producidos en Uruguay no pueden exportarse a distancias importantes debido a que brotan antes de llegar a destino (mientras que los mismos productos que se importan para consumo sí fueron irradiados en el exterior...).

También la irradiación se ha utilizado para la esterilización de insectos, para frenar por ejemplo epidemias debidas a la mosca tse-tse en Africa, así como para eliminar insectos de alimentos.

Finalmente, la destrucción de células en mitosis es la base de los tratamientos terapéuticos de tejidos tumorales, que tienen muchas células mitóticas. Se realizan terapias con rayos X (radioterapia, irradiando con equipos de rayos X especiales para tal fin), radiación gamma (gammaterapia, irradiando con radiaciones provenientes de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , etc. o braquiterapia, con fuentes por ejemplo de  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , en forma de agujas insertadas por un cierto tiempo cerca del tumor), otras radiaciones como electrones acelerados en un ciclotrón o radiación beta en braquiterapia con  $^{90}\text{Sr}$ .

Como las células con alta frecuencia de mitosis tienen menos tiempo para recuperarse antes de una nueva división celular respecto a las células de baja frecuencia de mitosis, en el caso de terapias con irradiación externa se utilizan dosis fraccionadas a intervalos lo suficientemente cortos para mantener la reparación del daño celular subletal a un mínimo. La tasa de dosis es muy importante en terapia por radiación: la dosis recibida por el tumor debe tener una incertidumbre máxima de 5%, considerando las incertidumbres del dictamen de la dosis, del cálculo de la dosis que llega realmente al tumor, de la calibración del equipo, de la ubicación del paciente en el lugar de irradiación, etc.

Nuevamente en esta aplicación son importantes los coeficientes de absorción de las radiaciones así como las energías de éstas. En la Figura 15 se esquematiza una mama, con un tumor algo alejado de la piel. Para suministrar una cierta dosis al tumor y teniendo en cuenta que el tejido absorbe radiación, la dosis en la piel será mayor que la recibida por el tumor. Dado los coeficientes de absorción de la mama para radiaciones de diferentes energías, si se irradia con rayos X, de alta absorción, la dosis en piel deberá ser alta y puede llegar a enrojecer o aún quemar la piel. En cambio si se irradia con radiación gamma o con electrones de acelerador, que tienen menor absorción, la dosis en piel podrá ser menor, suministrándose la dosis necesaria al tumor sin dañar la piel. Por eso, según la dosis necesaria, la ubicación del tumor, el tipo de tejido (más o menos denso según la paciente) se indican distintas dosis con distintos tipos de radiación.



**Figura 15**