

## ACCIDENTES RADIOLÓGICOS: METODOLOGÍAS DE DESINCORPORACIÓN DE RADIONÚCLIDOS

E. A. Jiménez- Figueroa<sup>1</sup>, L. Paredes-Gutiérrez<sup>2</sup>, A. Cortés<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Medicina, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Tollocan s/n, Col. Moderna de la Cruz, 50180 Toluca, Edo. México, México. [ajav\\_x@yahoo.com.mx](mailto:ajav_x@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carr. México-Toluca s/n, La Marquesa, 52750 Ocoyoacac, Edo. Méx., México. [lydia.paredes@inin.gob.mx](mailto:lydia.paredes@inin.gob.mx)

<sup>3</sup>Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, México, D.F., México

### Resumen

Derivado del manejo de material radiactivo o nuclear, se tiene el riesgo de ocurrencia de accidentes donde se presenten casos de personas con contaminación radiactiva interna, quienes deberán recibir atención médica especializada para acelerar la desincorporación radiactiva con el propósito de disminuir la dosis absorbida y los efectos biológicos asociados. En este trabajo se identificaron tratamientos de desincorporación radiactiva, en función del radionúclido, tipo de radiación, vida media radiactiva, vida media biológica, órgano crítico, vía de ingestión y tipo de paciente. El factor tiempo es decisivo para la efectividad del tratamiento seleccionado en la etapa de bloqueo (antes del accidente) o desincorporación (después del accidente); este factor está relacionado con las vidas medias radiactiva y biológica. Es por ello que para lograr eficiencias de desincorporación mayores al 70%, el tratamiento clínico del paciente deberá iniciarse antes del primer tercio de la vida media biológica del radionúclido que generó la contaminación interna.

**Palabras clave:** Desincorporación radiactiva, accidentes radiológicos, quelantes.

## 1.- INTRODUCCIÓN

En los accidentes que producen una contaminación interna, los radionúclidos son ingresados al organismo a través de diferentes vías, como son la inhalación, la ingestión y la absorción a través de la piel [Jiménez-Figueroa EA 2014; Paredes-Gutiérrez L, *et al.* 2013; Astudillo AJ, *et al.* 2011]. La incorporación de radionúclidos en el cuerpo comprende cuatro etapas sucesivas.

La primera es la deposición en la puerta de entrada, cuando el material radiactivo se queda en la vía de ingreso que pueden ser: la piel sana, heridas, en las mucosas, en el tubo digestivo o en el aparato respiratorio. La segunda comprende la transferencia del contaminante desde el punto de deposición a la sangre o en forma genérica, al líquido extracelular. La tercera es la deposición en el órgano blanco, por razones fisiológicas o físico químicas donde el factor determinante es la concentración del radionúclido. La cuarta es la eliminación del organismo, que puede ser directa o indirecta (por la recirculación a partir de los tejidos y la sangre) [Jiménez-Figueroa EA 2014; US Department of Health & Human Services 2013; The Radiation Emergency Assistance Center 2009; Di Trano JL, *et al.* 1999].

La comprensión de los modelos biocinéticos que representan la ingesta, transferencia y excreción del material radiactivo en el cuerpo, son esenciales para en la determinación de la cantidad de los contaminantes, la vida media biológica, órgano blanco, la actividad, la dosis absorbida, etc.

En la Figura 1 se resumen las vías de ingesta, transferencias internas y vías de excreción. El tracto respiratorio, el tracto gastrointestinal, la piel intacta y las heridas son las principales vías de entrada al organismo. Una proporción de la actividad es absorbida por la sangre (compartimento de transferencia). La actividad entonces experimenta varias y complejas transferencias que determinan su distribución dentro del cuerpo y su ruta y velocidad de eliminación. La eliminación del material radiactivo incorporado en el cuerpo

se produce principalmente por la excreción urinaria y fecal. La mayor ruta de ingesta de material radiactivo se presenta en las vías de inhalación e ingestión [Jiménez-Figueroa EA 2014; ICRP 78; NCRP 2008].

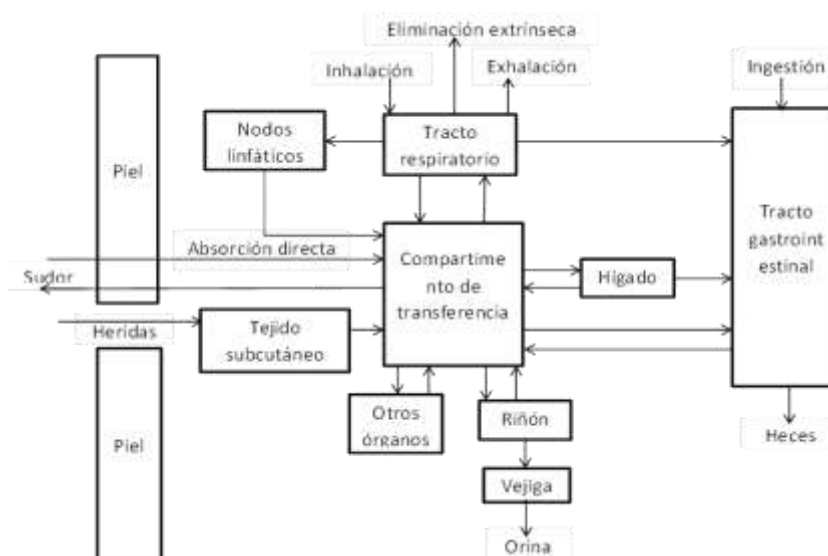


Figura 1. Este modelo representa las vías de ingestión, la transferencia y excreción de materiales radiactivos.

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un análisis detallado de diferentes vías de incorporación radiactiva; ingestión, inhalación y absorción por piel y heridas, así como las diferentes etapas de ingestión, transferencia, absorción y excreción de los radionúclidos. Se revisaron los modelos biocinéticos aplicables y se seleccionaron las siguientes metodologías de desincorporación de radionúclidos [Jiménez-Figueroa EA 2014; Di Trano JL, *et al.* 1999; ICRP 78; NCRP 2008]:

- *Reducción y/o inhibición de absorción* del radionúclido en el tracto gastrointestinal.
- *Bloqueo de la absorción del órgano de interés.* Ejemplo: Administración de pastillas de yoduro de potasio para bloqueo de la glándula tiroideas.

- *Dilución isotópica.* Ejemplo: Administrar suero vía intravenosa para aumentar el líquido de hidratación, en el caso de contaminación interna con H-3.
- *Alteración química de la substancia.* Ejemplo: Prevenir la formación de iones uranio en los riñones, empleando el bicarbonato de sodio.
- *Desplazando el Radionúclido del receptor.* Ejemplo: Administrando oralmente yodo estable para desplazar al Tc-99m.
- *Técnicas de quelación tradicional.* Ejemplo: Administrando el quelante DTPA para desincorporación interna del plutonio.
- *Descontaminación rápida de radionúclidos en el caso de heridas,* con el propósito de minimizar la absorción.
- *Lavado broncoalveolar* para los casos graves de contaminación con partículas radiactivas insolubles inhaladas.

En la contaminación interna la dosis no se entrega en el momento del accidente sino posteriormente, durante el tiempo de presencia del radionúclido en el organismo. La eficiencia del tratamiento de diferentes radionúclidos depende de su forma química y la manera de entrada al organismo. Los objetivos prioritarios del tratamiento ante una contaminación interna son: el impedir la absorción, impedir la incorporación y disminuir la vida media efectiva (cuando sea posible).

Los métodos de tratamiento aplicados varían según la vía de entrada del contaminante [Jiménez-Figueroa EA 2014; US Department of Health & Human Services 2013; The Radiation Emergency Assistance Center 2009; Di Trano JL, *et al.* 1999]. Deben ser consideradas diferentes posibilidades:

***Contaminación de la piel:*** Debe impedirse la diseminación del contaminante en el organismo y no debe hacerse nada que pueda favorecerla. La regla es evitar toda escoriación de la piel, por más pequeña que sea, y el uso de productos que puedan facilitar el pasaje a través de la misma. El radionúclido es removido por lavados, solubilización, etc. Hay indicaciones especiales para cada tipo de radionúclido.

***Herida contaminada:*** Una vez que un compuesto franquea la barrera cutánea puede ser directamente transferido hacia el líquido extra celular o ser retenido localmente en los tejidos subcutáneos y en los ganglios linfáticos regionales. Si el contaminante es un elemento transferible, debe hacerse insoluble en el sitio de la herida, para evitar su difusión.

Si el contaminante es un elemento no transferible y hay solamente una pequeña extensión local de la contaminación, puede ser tratado como un agente terapéutico de aplicación local (ejemplo un agente quelante). En determinados casos es necesario considerar el tratamiento quirúrgico de la lesión.

***Contaminación a través del aparato digestivo:*** En la contaminación del aparato digestivo una parte del radionúclido es transferido hacia el líquido extracelular y el resto es directamente excretado por heces. En el caso de un elemento no transferible, insoluble al nivel del tracto gastrointestinal, la pequeña fracción absorbida no justifica generalmente un tratamiento.

Si se trata de un elemento transferible, absorbible a nivel del tracto digestivo, se debe realizar un intento de insolubilizarlo, usando fármacos como el azul de Prusia en el caso del cesio, alginato de calcio para el estroncio, etc.

***Contaminación a través del aparato respiratorio:*** En este caso es difícil realizar una evaluación del grado de contaminación. Primeramente el aerosol inhalado se deposita a nivel de las diversas regiones del árbol respiratorio. Varios mecanismos son puestos en práctica para asegurar la eliminación de las partículas depositadas en el árbol respiratorio: la transferencia directa hacia el líquido extracelular, la transferencia hacia los ganglios linfáticos pulmonares y la transferencia hacia el tracto digestivo. Por lo tanto, después de un accidente en el que se sospeche una importante contaminación pulmonar por radionúclidos altamente absorbibles en el tracto digestivo, se debe tratar de hacerlos insolubles a nivel gastrointestinal. En el caso de emisores  $\beta$ , la exposición de la mucosa puede ser reducida mediante la administración de un laxante.

Los métodos de desincorporación pueden clasificarse [Jiménez-Figueroa EA 2014; Di Trano JL, *et al.* 1999] en:

- Procedimientos destinados a reducir el pasaje del radionúclido desde el sitio de entrada.
- Procedimientos destinados a aumentar la excreción del radionúclido contaminante.

## **2.1.- Procedimientos destinados a reducir el pasaje del radionúclido desde el sitio de entrada**

***Piel sana:*** Se efectúa un lavado no traumatizante con soluciones acuosas. A veces la eficacia de este tratamiento puede ser reforzada por la utilización de productos destinados a solubilizar el contaminante en el líquido utilizado para lavar. (DTPA para los transuránicos y tierras raras, bicarbonato para el uranio).

***Heridas:*** Las acciones inmediatas frente a una herida contaminada comprenden: la irrigación con agua estéril o salina, el libre sangrado y la disminución del retorno venoso. Y si se requiere tratamiento quirúrgico.

### ***Tracto respiratorio:***

- ***Inhalación de DTPA:*** La quelación de estos elementos por el DTPA conduce a la formación de complejos rápidamente eliminados por vía urinaria. (transuránicos y especialmente plutonio o de tierras raras).
- ***Lavado pulmonar:*** se utiliza para remover del pulmón partículas relativamente insolubles. el lavado pulmonar es un tratamiento relativamente seguro que debe ser realizado por un especialista.

***Tracto digestivo:*** La acción terapéutica consiste en insolubilizar el contaminante para evitar la absorción hacia el líquido extracelular y acelerar el tránsito intestinal para limitar la irradiación del tubo digestivo. Compuestos tales como absorbentes, antiácidos, laxantes, etc. Son administrados como primera medida para reducir la incorporación del radionúclido. El lavado gástrico puede considerarse solo frente a una incorporación

importante y muy reciente. Los eméticos actúan por estimulación central o gástrica del vómito, no recomendándose su uso en caso de ingesta de productos corrosivos o en individuos con alteraciones de la conciencia.

## **2.2.- Procedimientos destinados a aumentar la excreción del radionúclido contaminante**

Una vez que el material radiactivo ha pasado a la sangre, la aplicación de un tratamiento lo más pronto posible puede prevenir su deposición en los tejidos y reducir la retención de radiactividad en diferentes órganos. Estos procedimientos pueden clasificarse de acuerdo a su mecanismo de acción [Jiménez-Figueroa EA 2014; Di Trano JL, *et al.* 1999]:

- **Tratamiento quelante:** Los quelantes son compuestos con capacidad de formar complejos con radionúclidos que pueden ser posteriormente excretados por vía renal o intestinal. El agente complejante puesto en circulación en el líquido extracelular actúa sobre el elemento que ya está presente o que está en vías de absorción. El elemento es así desviado de los órganos o tejidos hacia los cuales lo conducirá su metabolismo normal. Diferentes agentes quelantes son utilizados para diferentes elementos, Ácidos Poliaminopolicarbónicos, DTPA (Ácido Dietilentriamino-pentaacético, sales de calcio o zinc), EDTA (Ácido Etilendiaminotetraacético, sal cálcica), Tioles (Son agentes que en su estructura química presentan grupos sulfhídricos), BAL (3,4 dimercaprol), DMPS (Dimercaptopropansulfonato), PA (penicilamina).

Son útiles para aquellos radionúclidos que están firmemente ligados al calcio, tales como tierras raras o actínidos. Estos agentes también remueven algunos biometales (hierro, magnesio y zinc). En el tratamiento de la sobreexposición ocupacional a sustancias radioactivas como plutonio, torio, uranio e itrio se utiliza el ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA) [Jiménez-Figueroa EA 2014; Di Trano JL, *et al.* 1999]. Son útiles para el tratamiento de intoxicaciones con metales pesados o radionúclidos como: antimonio, arsénico, bismuto, cadmio, cobre, oro, mercurio, polonio, etc.

- ***Dilución isotópica:*** Consiste en la administración de grandes cantidades de un elemento estable análogo. Se acelera el ciclo metabólico del radionúclido y de este modo se acelera su excreción
- ***Bloqueo metabólico:*** Un agente bloqueante satura el proceso metabólico en un tejido específico mediante un elemento estable, reduciendo así la captación del radionúclido.
- ***Administración de agentes movilizadores:*** Son compuestos que aumentan el proceso natural “entrega”, acelerando la eliminación del radioelemento.
- ***Técnicas de eliminación extracorpóreas:*** Se trata de un método usado en toxicología convencional que puede ser aplicado para la remoción de radionúclidos durante su tiempo de tránsito en el torrente circulatorio.

### **3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se identificaron, clasificaron y seleccionaron las metodologías de tratamiento clínico para acelerar la desincorporación radiactiva de personas [Jiménez-Figueroa EA 2014; US Department of Health & Human Services 2013; The Radiation Emergency Assistance Center 2009; Di Trano JL, *et al.* 1999], con presencia de contaminación interna derivada de accidentes nucleares o radiológicos. La metodología seleccionada tiene por objetivo:

- Impedir la absorción
- Impedir la incorporación
- Disminuir la vida media biológica efectiva
- Disminuir la dosis absorbida al paciente
- Disminuir en lo posible los efectos biológicos de la radiación (estocásticos y determinísticos)

La efectividad de estas metodologías es directamente proporcional a su aplicación preventiva de bloqueo antes del accidente, o bien de desincorporación posterior al accidente, lo más rápido posible. Sin embargo, el diagnóstico clínico oportuno y



especializado, es uno de los factores más importantes para lograr altos porcentajes de desincorporación radiactiva en pacientes. Es por ello que para lograr eficiencias de desincorporación mayores al 70%, el tratamiento clínico del paciente deberá iniciarse antes del primer tercio de la vida media biológica del radionúclido que generó la contaminación interna. En el caso de la eficiencia de bloqueo previo a un accidente radiológico, la recomendación es un mínimo de 2 h antes del accidente para que se concentre el isótopo estable en el órgano blanco, con el propósito de saturarlo y minimizar la captación del isótopo radiactivo, este es un ejemplo típico del método de bloqueo de tiroides para I-131 con pastillas de yoduro de potasio [ICRP 78; NCRP 2008].

Es por ello que es indispensable contar con un grupo interdisciplinario [Jiménez-Figueroa EA 2014] que aborde el problema en forma integral e inmediata considerando los siguientes aspectos:

- Reconstruir el accidente y la dosis absorbida por el paciente
- Determinar clínicamente el grado del daño, de acuerdo al historial clínico y a los efectos biológicos que presente el paciente (Síndrome agudo por radiación)
- Definir la estrategia terapéutica personalizada

Las decisiones acerca de la conducta terapéutica frente a la incorporación accidental de un radionúclido deben ser analizadas en el marco de un adecuado balance riesgo/beneficio. Existe un riesgo de daño asociado a la exposición a la radiación, que las metodologías de desincorporación pretenden disminuir, pero no debe olvidarse que este tratamiento en sí mismo implica ciertos riesgos.

El beneficio de la terapia descontaminante se evalúa en base a la reducción de la dosis absorbida. La carga incorporada y la consecuente dosis comprometida constituyen un parámetro decisivo, que junto a ciertas consideraciones tales como la edad del paciente y su estado de salud, permiten ajustar la decisión a las características particulares de cada caso [Jiménez-Figueroa EA 2014].

En términos generales pueden considerarse 4 situaciones [ICRP 78; NCRP 2008]:

- a. Incorporación de menos de 1 ALI (Límite Anual de Incorporación): No está indicado tratamiento alguno.
- b. Incorporación de 1-5 ALI: Sin probable tratamiento, o bien, tratamiento a criterio del médico.
- c. Incorporación de 5-10 ALI: No se esperan consecuencias clínicas pero podría considerarse el tratamiento con el objeto de disminuir la probabilidad de efectos estocásticos. En esas consideraciones son apropiados los tratamientos de dosis únicas o a corto plazo. Particularmente se indica el tratamiento en el caso de la incorporación de actínidos, especialmente plutonio.
- d. Incorporación mayor a 10 ALI: Está indicado el tratamiento descontaminante más prolongado. La intensidad y duración del tratamiento se decidirá en base a la potencia de reducción de las dosis comprometidas.

En la Tabla 1 se listan los principales radionúclidos con mayor probabilidad de producir contaminación interna en casos de accidentes radiológicos y nucleares. Se indican el tipo de decaimiento radiactivo, la vida media radiactiva y biológica, las vías de incorporación más probable y los órganos blancos de concentración del mismo, así como los tratamientos de desincorporación radiactiva recomendados, de acuerdo al radionúclido, el tipo de accidente y la condición de salud del paciente.

La vía de incorporación es un factor importante para la definición de la metodología clínica de desincorporación [Jiménez-Figueroa EA 2014], por consiguiente los resultados de la biometría hemática y los ensayos biológicos de las muestras del paciente (saliva, mucosa, orina y excretas) son de vital importancia para la estimación de la dosis absorbida, la sección del tratamiento y la urgencia del inicio de la atención clínica a seguir.

## **4.- CONCLUSIONES**

Se identificaron las metodologías de desincorporación para los radionúclidos más importantes en caso de accidentes radiactivos y nucleares. La correcta identificación del método de tratamiento y su rapidez de aplicación, son factores decisivos en el incremento de la eficiencia de bloqueo o de desincorporación del radionúclido, la disminución de la dosis absorbida y en consecuencia los efectos biológicos estocásticos y determinísticos en el paciente.

## **REFERENCIAS**

- Astudillo AJ; Paredes-Gutiérrez L; Ambriz JJ (2011). *Guía de recomendaciones en accidentes radiológicos para primeros respondedores: personal paramédico*. e-Proceeding of the XII Internacional Symposium, XXII National Congress on Solid State Dosimetry, ISSSD. Mexico. 5-9 September. Pp: 25-28.
- Di Trano JL; Pérez M del R; Gisone PA (1999). *Guía para el tratamiento de personas accidentalmente sobre expuestas a las radiaciones ionizantes: contaminación interna*. Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina.
- ICRP 78. *Individual monitoring for internal exposure of workers*. International Commission on Radiological Protection: Annals of the ICRP. Pergamon. **Publication 78**.
- Jiménez-Figueroa EA (2014). *Metodología de desincorporación de radionúclidos en personas relacionadas con accidentes nucleares y radiológicos*. Tesis de Maestría en Ciencias en Física Médica, Facultad de Medicina, UAEM, México.
- NCRP (2008). *Management of persons contaminated with radionuclides: Handbook*. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda. **MD Report 1(161)**.
- Paredes-Gutiérrez L; Galicia-Alarcón JF; González-Rodríguez VJ (2013). *Tendencia mundial e impacto de los accidentes nucleares y radiológicos*, Proceeding of the IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA, Rio de Janeiro, Brasil, 15-19 Abril.
- The Radiation Emergency Assistance Center (2009). *The medical aspects of radiation incidents*. Training site.
- U.S. Department of Health & Human Services (2013). *Radiation emergency medical management*. <http://www.remm.nlm.gov>

**Tabla 1. Tratamiento para la desincorporación radiactiva en casos de accidentes**

Isótopo	Radiación	Vida media radiactiva	Vida media biológica	Principales vías de exposición	Órgano blanco	Tratamiento de desincorporación
Cesio ( <sup>137</sup> Cs)	$\beta, \gamma$	30 años	70 días	Inhalación Ingestión	Sigue la vía del potasio. Excreción renal	Azul de Prusia, insoluble
Cobalto ( <sup>60</sup> Co)	$\beta, \gamma$	5.26 años	9.5 días	Inhalación Ingestión	Hígado	Succimer (DMSA), (medicamento diario), DTPA, EDTA, N-Acetil-L-cisteína
Estroncio ( <sup>90</sup> Sr)	$\beta$	28 años	18000 días	Inhalación Ingestión	Hueso	<b>Inhalación:</b> Gluconato de calcio Sulfato de bario <b>Ingestión:</b> Rx es el mismo que para el radio (véase <sup>226</sup> Ra). Rx adicional puede incluir compuestos de estroncio estables: lactato de estroncio Gluconato de estroncio
Fosforo ( <sup>32</sup> P)	$\beta$	14.3 días	1155 días	Inhalación Ingestión Piel	Hueso Medula ósea Células de rápida replicación	Medicamentos Hidratación + fosfato • Glicerofosfato de sodio • Fosfato sodio • Fosfato de potasio • Carbonato de calcio • Hidróxido de aluminio • Carbonato de aluminio • Sevelamer (medicamento diario)
Iridio ( <sup>192</sup> Ir)	$\beta, \gamma$	74 días	50 días	N/A	Bazo	DTPA EDTA
Yodo ( <sup>123</sup> I)	$e^{-}, x, \gamma$	13.3 horas	0.35 días/ 138 días(*)	Inhalación Ingestión Piel	Tiroides	<b>Dilución isotópica.</b> Inicial: administrar por vía oral 1 a 2 comprimidos x 130 mg de yoduro de potasio, sodio o magnesio (100 mg de yodo activo). Días posteriores: 1 comprimido por día.
Yodo ( <sup>125</sup> I)	$e^{-}, x$	60.2 días	(*): dependiente del estado de la función tiroidea			
Yodo ( <sup>131</sup> I)	$\beta, \gamma$	8.1 días	138 días			
<b>Lantánidos (tierras raras: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)</b>	<sup>140</sup> La $\beta, \gamma$	40.2 horas			Gastrointestinal.	<b>En todos los casos:</b> Inyectar 0.5 g de DTPA-Ca (½ ampolla) / 250 ml de solución fisiológica o glucosada por vía IV lenta. <b>a. Herida contaminada:</b> Lavar la herida con solución concentrada de DTPA-Ca (25% = 1 ampolla de 1 g). <b>b. Contaminación del aparato respiratorio:</b> nebulizar con aerosol de DTPA-Ca (1 ampolla) en un generador convencional o utilizar 1 cápsula de DTPA micronizado en un generador turboinhalador. <b>c. Contaminación digestiva:</b> débil absorción por esta vía. Eventualmente se puede administrar por vía oral 10 g de sulfato de magnesio en 100-200 ml de agua para acelerar el pasaje a través del tracto digestivo.
	<sup>144</sup> Ce $\beta, \gamma$	285 días	1500 días		Hueso	
	Hijos <sup>144</sup> Pm $\beta, \gamma$	17.3 minutos				
	<sup>147</sup> Pm $\beta, \gamma$	2.62 años	1500 días		Hueso	
	<sup>169</sup> Yb $x, \gamma$	31.8 días	1000 días		Hueso	
	<sup>177</sup> Lu $\beta, \gamma$	6.74 días			Gastrointestinal	