

XX Reunión anual SNE
Córdoba, Octubre 1994

25.04 ESTIMACIÓN DE LA RETENCIÓN PULMONAR, DE LA TASA DE EXCRECIÓN URINARIA Y FECAL PARA UNA INCORPORACIÓN NO PUNTUAL DE AEROSOL DE URANIO

Autor: J. Guillermo Sánchez León

ENUSA (Fábrica de Juzbado)

Apdo 328

37080 Salamanca

SINOPSIS.- Los modelos metabólicos se suelen elaborar siguiendo las directrices de la ICRP 30. En el NUREG /CR-4884(1987) se ha aplicado dicho modelo y se han calculado, para un gran número de radisótopos, las retenciones pulmonares y las excreciones urinaria y fecal para incorporaciones puntuales. En esta ponencia se describe el método de calculo aplicado y los resultados obtenidos para el caso de incorporaciones no puntuales, partiendo de los datos de las incorporaciones puntuales. El método se aplica para los isótopos del uranio pero es igualmente utilizable para cualquier otro tipo de isótopo. El método anterior se ha utilizado para determinar a partir de que momento sería detectable, con los LIDs de la ICRP 54, el uranio en pulmones o en orina al personal profesionalmente expuesto de la Fabrica de Juzbado. La conclusión es que suponiendo una persona expuesta de forma permanente al límite de incorporación anual aplicado al personal profesionalmente expuesto de la Fabrica de Juzbado (1/5 del LIA para aerosoles clase Y) virtualmente es indetectable la presencia de uranio en pulmones en toda su vida profesional. El uranio en orina sería detectable con los equipos disponibles en la Fabrica, no obstante las concentraciones serían tan pequeñas que serían indistinguibles del uranio presente en los individuos procedente del fondo radiológico ambiental. .

INTRODUCCION

Las radiaciones ionizantes son motivo cada vez de mayor interés, especialmente en lo que se refiere a sus efectos sobre las personas. La fuente principal de exposición de los seres humanos a las radiaciones originadas por las actividades industriales del hombre son las procedentes del uso de la Energía Nuclear. Para la producción de energía por los reactores nucleares a partir del uranio es necesario someter a éste previamente a diversos procesos, que se inician en la mina y acaban en la fábricas donde se montan los elementos combustibles. Estas operaciones se conocen como "Primera parte del Ciclo del Combustible". Las personas que trabajan en ellas están sometidas al riesgo de inhalación de aerosoles de uranio natural y/o enriquecido. Las

actividades incorporadas por las personas profesionalmente expuestas a la inhalación de este tipo de aerosoles se suelen estimar por medio de tomamuestras ambientales, que se complementan con programas de bioensayos (mediciones de los aerosoles retenidos en los pulmonar con un contador de radiactividad corporal, determinaciones de uranio en orina, etc). Una de las dificultades que se presentan es la estimación de las actividades inhaladas a partir de los resultados de los bioensayos. Para ello se utilizan modelos metabólicos que simulan el proceso que el uranio sigue en el organismo. Los modelos metabólicos generalmente se elaboraran siguiendo las directrices de la *ICRP 30*. En el *NUREG/CR-4884* se ha aplicado dicho modelo y se han calculado, para un gran número de radisótopos, las retenciones pulmonares y las excreciones urinaria y fecal para **incorporaciones puntuales**. En nuestro caso hemos extendido dicho método para el caso de **incorporaciones no puntuales**. El método se aplica para los isótopos del uranio pero es igualmente utilizable para cualquier otro tipo de isótopo. Se pretende que los resultados del modelo metabólico sirva a su vez definir que programa de bioensayos es el mas adecuado a aplicar al grupo profesinalmente expuesto que se desea controlar.

BASES DE PARTIDA

Para elaborar el modelo metabólico se han tenido en cuenta los siguientes factores:

- a) Características de los radionucleidos a controlar.- El tipo de aerosoles a los que esta potencialmente expuesto las personas que trabajan en atmosferas donde existan aerosoles de uranio son los típicos del uranio natural (en minas y fabricas de concentrados) y enriquecido (instalaciones de enriquecimiento, conversión y fábricas de combustibles). En la **Tabla 1** se indican las composiciones isotópicas para los enriquecimientos más representativos de los procesos reales de producción en instalaciones del ciclo del combustible donde se manipule uranio enriquecido.
- b) Vías de entrada y secuencia temporal de las incorporaciones de radionucleidos al organismo.- El modelo supone que todo el uranio se incorpora por inhalación y que esta incorporación tiene lugar de forma continua, es decir que el personal inhala diariamente las mismas actividades. Realmente esta hipotesis no es rigurosamente cierta pero puede

utilizarse con buena aproximación. No obstante el método descrito permite su aplicación a casos de incorporaciones irregulares.

- c) Comportamiento metabólico de los distintos tipos de contaminantes.- Este está condicionado fundamentalmente por dos factores: i) La forma química de los aerosoles inhalados - D (compuestos muy solubles), W (compuestos poco solubles) e Y (compuestos insolubles) - y ii) el Diámetro Aerodinámico Medio del Aerosol (AMAD) que determina la distribución y el porcentaje del aerosol inhalado que se retiene en el sistema respiratorio.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO METABÓLICO APLICADO

El modelo aplicado es el de la ICRP 30. El sistema respiratorio (ver **figura 1**) se divide en tres regiones; la naso-faríngea (N-P), la traqueo-bronquial (T-B) y la pulmonar (P). Estas se suponen a su vez divididas en compartimentos: **a** y **b** la región nasofaríngea (NP), **c** y **d** la traqueobronquial (TB) y de **e** a **g**, la pulmonar (P). Dentro de este modelo pulmonar, los compartimentos **i** y **j**, representan los nódulos linfáticos.

Las fracciones iniciales, D_M (siendo $M = N-P, T-B, P$) en cada una de las regiones, son las indicadas en la **Tabla 2**, obtenida de la ICRP 30. En la **Tabla 3** se dan los valores de D_{N-P} y D_P correspondientes a las regiones nasofaríngea y pulmonar, para diferentes valores del AMAD; el valor de D_{T-B} correspondiente a la región traqueobronquial es constante e igual a 0.08. En el estudio se ha utilizado, salvo cuando se indique otra cosa, los valores de D_i correspondiente a un AMAD de 1 μm . Las fracciones iniciales D_M se consideran que se distribuyen, entre los compartimentos que integran cada región, en las proporciones F_K que se muestran en la **tabla 2**. Las proporciones iniciales presentes en cada compartimento serán el producto D_M por F_K .

Como hemos dicho las partículas presentes en cada compartimento se van transfiriendo hacia otros compartimentos. La velocidad de transferencia depende de la solubilidad de la partícula que a su vez es función de la composición química. Por razones de simplicidad se consideran tres clases de solubilidad: **D** (muy solubles), **W** (poco solubles) e **Y** (insolubles).

Las partículas inhaladas se asume que se depositan inicialmente en los compartimentos **a** a **g**.

Los compartimentos **a, c, e** están asociados con procesos de absorción, y el **b,d,f,y g** con procesos de transferencia. El sistema linfático (L) además sirve para remover las partículas procedentes de los pulmones. Este a su vez está asociado con el compartimento **h** en la región **P** de los pulmones. El material en el compartimento **i** es transferido hacia un compartimento de transferencia (T) representativo de los fluidos corporales, pero hay una fracción que es retenida en el compartimento **h** donde se supone que permanece indefinidamente. Este compartimento es solo aplicable para aerosoles de clase **Y**, para las clases **W** y **D** se supone que la fracción en el compartimento **j** procedente de **h** es cero. Por otra parte desde los compartimentos **b** y **d** hay una transferencia hacia el tracto gastro-intestinal (GI).

La velocidad de eliminación ó constante de decaimiento biológico desde cada uno de los compartimentos vendrá dada por $\lambda_i = \ln 2/T_{1/2}$, donde $T_{1/2}$ es el período biológico correspondiente (Tabla 2). Esta eliminación puede realizarse directamente hacia el compartimento de transferencia (fluidos corporales), o indirectamente a través del esófago hacia el tubo digestivo que forma parte del tracto gastro intestinal representado en la Figura 1. por GI. Se supone la absorción, a través de la pared intestinal, de una fracción f_1 de la contaminación presente hacia los fluidos corporales. El valor de esta fracción, también según la ICRP-30, sería 0.02 para la Clase Y y 0.05 para la Clases W y D. Una descripción detallada sobre las estimaciones que se han realizado de f_1 puede encontrarse en *Wreenn y otros*

Desde el compartimento de transferencia la contaminación se distribuye hacia los huesos, los riñones, y a un compartimento representativo de los restantes tejidos blandos. El resto se excreta a través de la orina. La eliminación directa desde el compartimento de transferencia, está gobernada por una cinética de primer orden, con un período de 0.25 días.

Las funciones de retención en estos tres órganos de depósito vienen representadas, según la ICRP 30, por:

$$R_{\text{huesos}}(t) = 0.2 e^{-0.693 t/20} + 0.023 e^{-0.693 t/5000} \quad (1)$$

$$R_{\text{riñones}}(t) = 0.12 e^{-0.693 t/6} + 0.00052 e^{-0.693 t/1500} \quad (2)$$

$$R_{\text{t.blandos}}(t) = 0.12 e^{-0.693 t/6} + 0.00052 e^{-0.693 t/1500} \quad (3)$$

Es decir, del uranio que se pasa al compartimento de transferencia, T, dos fracciones (0.2 y 0.23)

TABLA 1

Composiciones isotópicas típicas de los aerosoles según sus enriquecimientos

TIPO	U-234		U-235		U-236		U-238		TOTAL KBq/g(U)
	% wt	Bq/g(U)	% wt	Bq/g(U)	% wt	Bq/g(U)	% wt	Bq/g(U)	
1	0.006	12718	0.72	576	0.0086	206	99.28	12351	25,8
2	0.024	55496	3.01	2408	0.0049	117	96.99	12066	70,1
3	0.032	74134	3.61	2888	0.0036	87	96.37	11989	89,1
4	0.036	82897	4.11	3289	0.0034	82	95.87	11927	98,2
5	0.040	92494	5	3999	0.0034	0	94.96	11814	108,3

TABLA 2

Factores de transferencia y periodos de decaimiento biológico utilizados en el modelo metabólico

REGION (N _i) Fac. deposición (D _i)	COMPARTI- MENTO	CLASE					
		D		W		Y	
		T Días	F	T Días	F	T Días	F
N-P (D _{N,P} = 0.30)	a	0.01	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
	b	0.01	0.5	0.40	0.9	0.40	0.99
T-B 0.08 (D _{T,B} = 0.80)	c	0.01	0.95	0.01	0.5	0.01	0.01
	d	0.20	0.05	0.20	0.5	0.20	0.99
P (D _P = 0.25)	e	0.5	0.8	50.0	0.15	500.0	0.05
	f	n.a.	n.a.	1.0	0.40	1.0	0.40
	g	n.a.	n.a.	50.0	0.40	500.0	0.40
	h	0.5	0.2	50.0	0.05	500.0	0.15
L	i	0.5	1.0	50	1.0	1000	0.9
	j	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	∞	0.1

Nota: En el modelo utilizado se supone 1 µm de AMAD. Para obtener valores de D_{T,B} y D_P para otros valores del AMAD utilizar Tabla 3.
n.a. = no aplica.

TABLA 3

Fracción, D_i, de la incorporación que se deposita inicialmente en las regiones nasofaríngeas y pulmonar para diferentes tamaños de partículas.

AMAD(µm)	0,3	1,0	3,0	8,0	10,0
D _{NP}	.075	.30	.57	.825	.87
D _P	.450	.25	.14	.065	.05

Incorporación puntual

El modelo anterior, representado en la **figura 1**, puede describirse (vease *Schieferdecker*) para el caso de una **incorporación puntual**, por el sistema de ecuaciones diferenciales lineales siguientes:

$$\frac{d}{dt} q_a(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{N-P} \cdot F_a - \lambda_a q_a(t) - \lambda_R q_a(t) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} q_b(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{N-P} \cdot F_b - \lambda_b q_b(t) - \lambda_R q_b(t) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} q_c(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{T-B} \cdot F_c - \lambda_c q_c(t) - \lambda_R q_c(t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} q_d(t) = \dot{I}(t) \cdot D_{T-B} \cdot F_d + \lambda_f q_f(t) + \lambda_g q_g(t) - \\ - \lambda_d q_d(t) - \lambda_R q_d(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} q_e(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_e - \lambda_e q_e(t) - \lambda_R q_e(t) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} q_f = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_f - \lambda_f q_f(t) - \lambda_R q_f(t) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} q_g(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_g - \lambda_g q_g(t) - \lambda_R q_g(t) \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} q_h(t) = \dot{I}(t) \cdot D_P \cdot F_h - \lambda_h q_h(t) - \lambda_R q_h(t) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} q_i(t) = F_i \lambda_h q_h(t) - \lambda_i q_i(t) - \lambda_R q_i(t) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} q_j(t) = F_j \lambda_h q_h(t) - \lambda_R q_j(t) \quad (13)$$

donde:

$q_k(t)$ = actividades presentes de un determinado radionucleido R en compartimentos $k = a, b, \dots, j$, en el tiempo t :

$\dot{I}(t)$ = tasa de actividad inhalada del radionucleido R

λ_a, λ_i = son las constantes de decaimiento biológico de los compartimentos "a" a "i". Estos valores se obtienen de la **tabla 2** eligiendo la columna correspondiente al grado de solubilidad elegido (D, W ó Y). Esta tabla proporciona los valores de los semiperiodos de decaimiento biológico T, que están relacionados con λ por la ec. siguiente donde T está dado en días y λ en s^{-1} .

$$\lambda = \frac{\ln 2}{86400 \cdot T}$$

λ_R = es la constante de decaimiento radiactivo del radionucleido R. (Para todos los radionucleidos del uranio estudiados estos valores son mucho menor que las constantes de decaimiento biológico por lo que los factores que contienen λ_R pueden desprejarse frente a $\lambda_a \dots \lambda_i$).

D_M = Fracción depositable de I en la región M, siendo M las regiones N-P, T-B y P estos valores se muestran en la **Tabla 2**. Se ha utilizado el valor correspondiente a un AMAD de $1 \mu m$.

F_a a F_i = Fracción de excreción vía compartimento K.

Estas ecuaciones pueden resolverse, para conocer $q_n(t)$, en el n-esimo compartimento en cualquier instante según el procedimiento general de resolución de ecs lineales de primer orden descrito por *Skrafle* y el algoritmo de cálculo descrito por *Birchall*. El problema se simplifica si se supone que la cantidad depositada en cualquier compartimento es "0" en cualquier tiempo distinto de $t=0$. En este caso la solución para un sistema de n compartimentos es de la forma de la ec(14) donde:

q_n^0 es la cantidad inicial de átomos, o de masa en el compartimento n-esimo en $t = 0$ y λ_i es la constante de decaimiento desde el compartimento i al $i + 1$ (Nota: No confundir los subíndices

$$Q_n(t) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^{n-1} \lambda_e \right) \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_i^0 e^{-\lambda_j^T t}}{\prod_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^n (\lambda_p^T - \lambda_j^T)} \right) \right] \quad (14)$$

i y j incluidos en esta fórmula, con los igualmente denominados en las ecs. anteriores).

Esta misma ec. puede integrarse con respecto a t y multiplicarse por la constante de desintegración radiactiva del contaminante, para obtener el número total de desintegraciones producidas. Asimismo nos permite calcular el factor de retención FR_p que se define como

$$FR_p = \frac{Q_p(0)}{Q_p(t)} \quad (15)$$

El sistema de ecuaciones se ha resuelto, sustituyendo los valores apropiados de D_M , F_k y λ_i en la tabla 2 y 3. De esta forma se ha calculado los valores de FR_p para la retención pulmonar y para y para las distintas clases de solubilidad (D, W e Y). De la misma forma se han calculado los FR_p para las excreciones urinaria y fecal. Los valores obtenidos son muy próximos a los dados por el NUREG/CR-4884 que son los que se muestran en las **tablas 4, 5 y 6**.

Incorporación no puntuales

El cálculo en caso de incorporación continua e incluso incorporación continua seguida de períodos sin incorporación pueden calcularse con muy buena aproximación a partir de los datos de incorporación puntual. De hecho una incorporación continua realmente puede considerarse como múltiples incorporaciones puntuales.

En la práctica un modelo de incorporación puntual se aplica a aquellos casos en los que las incorporaciones están separadas no menos de tres o cuatro semiperíodos de decaimiento efectivo. En el caso de los trabajadores que habitualmente trabajan en áreas con presencia de aerosoles lo más normal es que las incorporaciones ocurran con mayor o menor medida de forma continua. En este caso se aplica un modelo de incorporación continua donde la cantidad de masa (μg) o actividad (Bq), $q_k(t)$, del radionucleido en cuestión para un determinado compartimento, ó para todo el cuerpo, en función del tiempo transcurrido desde el accidente, de acuerdo

al NUREG/CR 4884 (3) la ec. (14) esta dado por

$$\langle q_k(t) \rangle = \frac{A}{T} \int_0^t FR(u) du \text{ para } t < T \quad (16)$$

$$\langle q_k(t) \rangle = \frac{A}{T} \int_{t-T}^t FR(u) du \text{ para } t \geq T \quad (17)$$

donde,

u = Variable del tiempo entre los límites de integración.

FR(u) = Fracción retenida de la cantidad incorporada en un compartimento determinado, o en todo el cuerpo, para una incorporación puntual de un determinado radionucleido. Se utilizan los valores indicados en las tablas 4, 5, y 6, según la clase de solubilidad sea respectivamente D, W ó Y.

A = Cantidad total de actividad o de masa incorporada durante el período T.

Las ecuaciones anteriores pueden aplicarse para estimaciones basadas en medidas "in vitro" substituyendo la fracción de incorporación para excreción urinaria o fecal durante 24 horas en lugar de las fracciones de retención compartimentales o de todo el cuerpo.

Las fracciones de retención para una incorporación puntual puede ser expresada por la suma de términos exponenciales de coeficientes constantes:

$$FR_c(u) = \sum_{j=1}^n C_j e^{-k_j t} \quad (18)$$

donde,

$k_j = K_j + \lambda$: tasa total de eliminación del compartimento j, que se considera constante.

Cuando esta expresión para FR(u) es substituida en el lado derecho de las ecuaciones (16) y (17) se obtiene respectivamente:

$$\langle q(t) \rangle = \frac{A}{T} \sum_{j=1}^n C_j \frac{(1 - e^{-k_j t})}{k_j} \text{ para } t < T \quad (19)$$

$$\langle q(t) \rangle = \frac{A}{T} \sum_{j=1}^n C_j \frac{(1 - e^{-k_j t})}{k_j} e^{-k_j(t-T)} \text{ para } t \geq T \quad (20)$$

Estas expresiones pueden ser utilizadas para definir una función de retención para una incorporación continua $p(t)$ que de la fracción de la incorporación total que se espera este presente un tiempo t desde el inicio de la incorporación.

$$P(t) = \frac{\langle q(t) \rangle}{A} \quad (21)$$

La función de retención $p(t)$ puede ser obtenida a partir del resultado de la función de retención puntual por simplificación y reemplazamiento de $e^{-k_j t}$ en la ec. (14) por

$$\frac{(1 - e^{-k_j T})}{k_j T} e^{k_j(t-T)}, \text{ para } t \geq T \text{ o por} \quad (22)$$

$$\frac{1 - e^{-k_j t}}{k_j t}, \text{ para } t < T$$

En este último caso $p(t) = \langle q(t) \rangle / (A/T)$ para la fracción de la incorporación total presente al final del intervalo de incorporación t .

Excepto para el caso donde $t < T$, estas mismas funciones son aplicables convirtiendo la función de retención puntual hacía una función de incorporación continua. Para ello se reemplaza $e^{-k_j t}$ en la función de eliminación puntual por

$$\frac{(1 - e^{-k_j T})}{k_j T} e^{-k_j t}, \text{ para } t \geq T + \Delta t \quad (23)$$

o reemplazando $e^{-k_j t}$ en la función de eliminación en el caso de una incorporación puntual por

$$\frac{-e^{-\lambda \Delta t} (1 - e^{-k_j T}) e^{-k_j(t - \Delta t - T)} (1 - e^{-(k_j - \lambda) \Delta t})}{k_j T} \quad (24)$$

para $t \geq T + \Delta t$

La integración de las ecuaciones anteriores puede ser obtenida por integración numérica como sigue:

donde

$$\int_a^b f(x) dx = h \left[\frac{f(x_0) + f(x_n)}{2} + f(x_1) + \dots + f(x_{n-1}) \right] \quad (25)$$

$$h = (b - a) / n$$

$$x_0 = a$$

$$x_n = b$$

$$x_i = a + ih, \text{ donde } i \text{ es el } i\text{ésimo incremento y } n \text{ el número de incremento.}$$

El resultado de la integral será tanto mas aproximado cuanto mayor sea el nuevo incrementos considerados. Naturalmente se trata de elegir un numero de intervalos suficientes como para que el cálculo este dentro de una aproximación aceptable (p. ej. el 5%) y el numero de incrementos considerados no sea exageradamente elevado. Como las fracciones de retención suelen variar pueden al principio para presentar variaciones menores con el paso del tiempo, el número de incrementos a considerar puede reducirse eligiendo intervalos pequeños al principio e intervalos mayores con el paso del tiempo.

Las variaciones en la cantidad retenida o excretada son mayores al inicio de la incorporación y se van reduciendo con el paso del tiempo. Por ello, el número de incrementos a considerar en la (25) puede reducirse eligiendo intervalos pequeños al principio e intervalos mayores con el paso del tiempo. En este caso la ec (25) se transforma en (26) donde h_1, h_2, \dots, h_m , son los distintos intervalos incrementales elegidos

$$\int_a^b f(t) dx = h_1 \left[\frac{f(t_0) + f(t_j)}{2} + f(t_1) + \dots + f(t_{j-1}) \right] + h_2 \left[\frac{f(t_j) + f(t_k)}{2} + f(t_{j+1}) + \dots + f(t_{k-1}) \right] + \dots + h_m \left[\frac{f(t_e) + f(t_n)}{2} + f(t_{e+1}) + \dots + f(t_{n-1}) \right] \quad (26)$$

El procedimiento es aplicable tanto para la retención pulmonar como para la excreción urinaria y fecal. Los resultados obtenidos se muestran en la **tablas 4, 5, y 6** y se representan en la **figura 2**.

Tabla 4.
Fracción de retención y/o eliminación puntual y
continua para compuestos de uranio clase D.

DIAS	URINARIA		FECAL		PULMONAR	
	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA
1	1.87×10^{-1}	1.87×10^{-1}	4.24×10^{-2}	4.24×10^{-2}	7.97×10^{-2}	7.97×10^{-2}
2	7.27×10^{-2}	3.17×10^{-1}	5.92×10^{-2}	9.32×10^{-2}	1.42×10^{-2}	1.32×10^{-1}
3	3.21×10^{-2}	3.69×10^{-1}	2.98×10^{-2}	1.38×10^{-1}	7.13×10^{-3}	1.47×10^{-1}
4	1.82×10^{-2}	3.94×10^{-1}	1.22×10^{-2}	1.59×10^{-1}	2.05×10^{-3}	1.52×10^{-1}
5	1.31×10^{-2}	4.10×10^{-1}	4.70×10^{-3}	1.67×10^{-1}	5.81×10^{-4}	1.53×10^{-1}
6	1.09×10^{-2}	4.22×10^{-1}	1.76×10^{-3}	1.70×10^{-1}	1.62×10^{-4}	1.54×10^{-1}
7	9.64×10^{-3}	4.32×10^{-1}	6.52×10^{-4}	1.72×10^{-1}	4.47×10^{-5}	1.54×10^{-1}
8	8.71×10^{-3}	4.41×10^{-1}	2.41×10^{-4}	1.72×10^{-1}	1.22×10^{-5}	1.54×10^{-1}
9	7.94×10^{-3}	4.50×10^{-1}	8.87×10^{-5}	1.72×10^{-1}	3.32×10^{-6}	1.54×10^{-1}
10	7.26×10^{-3}	4.57×10^{-1}	3.26×10^{-5}	1.72×10^{-1}	8.96×10^{-7}	1.54×10^{-1}
20	3.26×10^{-3}	5.10×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
30	1.71×10^{-3}	5.35×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
40	1.03×10^{-3}	5.49×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
50	6.67×10^{-4}	5.57×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
60	4.54×10^{-4}	5.63×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
70	3.16×10^{-4}	5.67×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
80	2.22×10^{-4}	5.69×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
90	1.57×10^{-4}	5.71×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}
100	1.11×10^{-4}	5.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.72×10^{-1}	0.00×10^{-0}	1.54×10^{-1}

Tabla 4.

Fracción de retención y/o eliminación puntual y
continua para compuestos de uranio clase D.

DIAS	URINARIA		FECAL		PULMONAR	
	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA
200	5.15x10 ⁻⁶	5.78x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
300	1.80x10 ⁻⁶	5.79x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
400	1.67x10 ⁻⁶	5.79x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
500	1.64x10 ⁻⁶	5.79x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
600	1.61x10 ⁻⁶	5.79x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
700	1.58x10 ⁻⁶	5.79x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
800	1.56x10 ⁻⁶	5.79x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
900	1.53x10 ⁻⁶	5.80x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
1000	1.50x10 ⁻⁶	5.80x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
2000	1.27x10 ⁻⁶	5.81x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
3000	1.10x10 ⁻⁶	5.82x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
4000	9.35x10 ⁻⁷	5.83x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
5000	8.33x10 ⁻⁷	5.84x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
6000	7.31x10 ⁻⁷	5.85x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
7000	6.29x10 ⁻⁷	5.85x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
8000	5.27x10 ⁻⁷	5.86x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
9000	4.64x10 ⁻⁷	5.87x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
10000	4.01x10 ⁻⁷	5.87x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹
20000	1.17x10 ⁻⁷	5.90x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.72x10 ⁻¹	0.00x10 ⁺⁰	1.54x10 ⁻¹

Tabla 5

Fracción de retención y/o eliminación puntual y continua para compuestos de uranio clase W.

DIAS	URINARIA		FECAL		PULMONAR	
	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA
1	4.13×10^{-2}	4.13×10^{-2}	4.07×10^{-2}	4.07×10^{-2}	2.11×10^{-1}	2.11×10^{-1}
2	1.09×10^{-2}	6.74×10^{-2}	1.29×10^{-1}	1.26×10^{-1}	1.77×10^{-1}	4.05×10^{-1}
3	4.72×10^{-3}	7.52×10^{-2}	1.08×10^{-1}	2.44×10^{-1}	1.60×10^{-1}	5.74×10^{-1}
4	3.22×10^{-3}	7.92×10^{-2}	6.28×10^{-2}	3.29×10^{-1}	1.50×10^{-1}	7.29×10^{-1}
5	2.69×10^{-3}	8.21×10^{-2}	3.23×10^{-2}	3.77×10^{-1}	1.45×10^{-1}	8.76×10^{-1}
6	2.40×10^{-3}	8.47×10^{-2}	1.61×10^{-2}	4.01×10^{-1}	1.41×10^{-1}	$1.02 \times 10^{+0}$
7	2.19×10^{-3}	8.70×10^{-2}	8.29×10^{-3}	4.13×10^{-1}	1.38×10^{-1}	$1.16 \times 10^{+0}$
8	2.02×10^{-3}	8.91×10^{-2}	4.57×10^{-3}	4.20×10^{-1}	1.36×10^{-1}	$1.30 \times 10^{+0}$
9	1.88×10^{-3}	9.10×10^{-2}	2.81×10^{-3}	4.24×10^{-1}	1.34×10^{-1}	$1.43 \times 10^{+0}$
10	1.75×10^{-3}	9.28×10^{-2}	1.96×10^{-3}	4.26×10^{-1}	1.32×10^{-1}	$1.56 \times 10^{+0}$
20	1.03×10^{-3}	1.07×10^{-1}	1.03×10^{-3}	4.41×10^{-1}	1.16×10^{-1}	$2.80 \times 10^{+0}$
30	7.28×10^{-4}	1.16×10^{-1}	8.97×10^{-4}	4.50×10^{-1}	1.02×10^{-1}	$3.89 \times 10^{+0}$
40	5.75×10^{-4}	1.22×10^{-1}	7.81×10^{-4}	4.59×10^{-1}	9.01×10^{-2}	$4.85 \times 10^{+0}$
50	4.80×10^{-4}	1.27×10^{-1}	6.80×10^{-4}	4.66×10^{-1}	7.93×10^{-2}	$5.70 \times 10^{+0}$
60	4.11×10^{-4}	1.32×10^{-1}	5.92×10^{-4}	4.73×10^{-1}	6.98×10^{-2}	$6.45 \times 10^{+0}$
70	3.57×10^{-4}	1.36×10^{-1}	5.15×10^{-4}	4.78×10^{-1}	6.14×10^{-2}	$7.10 \times 10^{+0}$
80	3.12×10^{-4}	1.39×10^{-1}	4.48×10^{-4}	4.83×10^{-1}	5.40×10^{-2}	$7.68 \times 10^{+0}$
90	2.75×10^{-4}	1.42×10^{-1}	3.90×10^{-4}	4.87×10^{-1}	4.75×10^{-2}	$8.19 \times 10^{+0}$
100	2.43×10^{-4}	1.44×10^{-1}	3.40×10^{-4}	4.91×10^{-1}	4.18×10^{-2}	$8.63 \times 10^{+0}$

Tabla 5. (Cont.)

Fracción de retención y/o eliminación puntual y
continua para compuestos de uranio clase W.

DIAS	URINARIA		FECAL		PULMONAR	
	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA
200	7.49×10^{-5}	1.60×10^{-1}	8.50×10^{-5}	5.12×10^{-1}	1.15×10^{-2}	1.13×10^{-1}
300	2.33×10^{-5}	1.65×10^{-1}	2.12×10^{-5}	5.17×10^{-1}	3.15×10^{-3}	1.20×10^{-1}
400	7.28×10^{-6}	1.67×10^{-1}	5.31×10^{-6}	5.19×10^{-1}	8.55×10^{-4}	1.22×10^{-1}
500	2.46×10^{-6}	1.67×10^{-1}	1.33×10^{-6}	5.19×10^{-1}	2.31×10^{-4}	1.23×10^{-1}
600	1.05×10^{-6}	1.67×10^{-1}	3.32×10^{-7}	5.19×10^{-1}	6.19×10^{-5}	1.23×10^{-1}
700	6.35×10^{-7}	1.68×10^{-1}	8.30×10^{-8}	5.19×10^{-1}	1.65×10^{-5}	1.23×10^{-1}
800	5.13×10^{-7}	1.68×10^{-1}	2.07×10^{-8}	5.19×10^{-1}	4.40×10^{-6}	1.23×10^{-1}
900	4.74×10^{-7}	1.68×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	1.16×10^{-6}	1.23×10^{-1}
1000	4.58×10^{-7}	1.68×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	3.08×10^{-7}	1.23×10^{-1}
2000	3.93×10^{-7}	1.68×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	1.54×10^{-7}	1.23×10^{-1}
3000	3.28×10^{-7}	1.69×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
4000	2.85×10^{-7}	1.69×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
5000	2.42×10^{-7}	1.69×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
6000	2.12×10^{-7}	1.69×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
7000	1.81×10^{-7}	1.70×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
8000	1.59×10^{-7}	1.70×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
9000	1.36×10^{-7}	1.70×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}
10000	1.18×10^{-7}	1.70×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	5.19×10^{-1}	$0.00 \times 10^{+0}$	1.23×10^{-1}

Tabla 6

Fracción de retención y/o eliminación puntual y continua para compuestos de uranio clase Y.

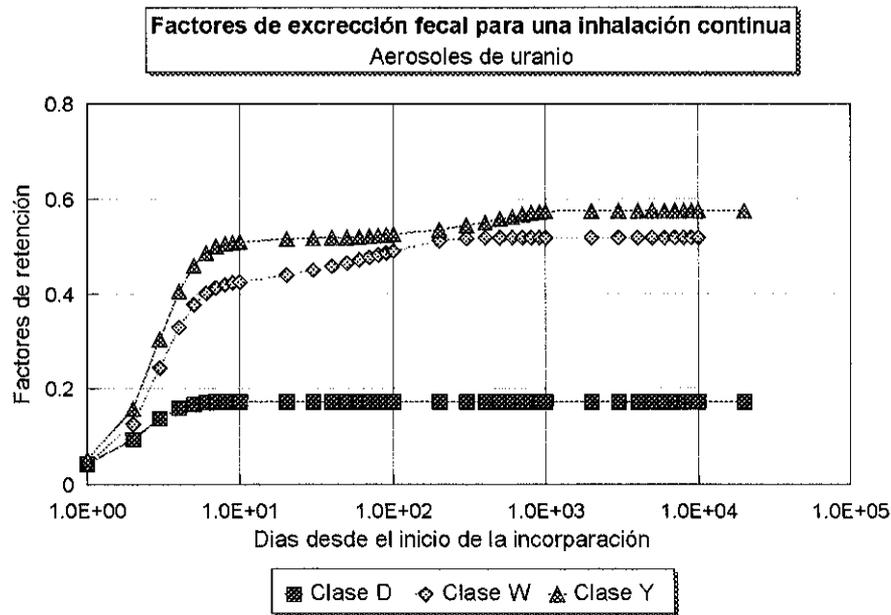
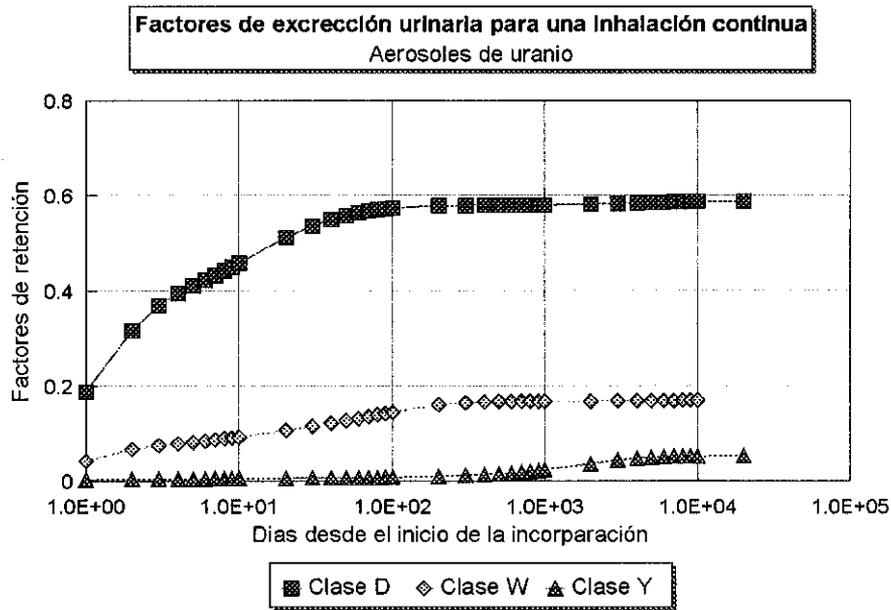
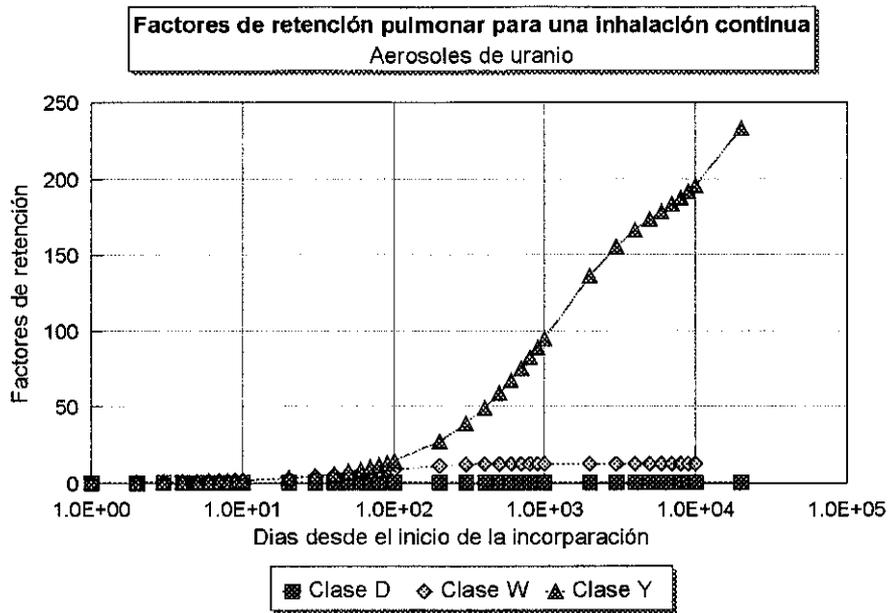
DIAS	URINARIA		FECAL		PULMONAR	
	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA
1	2.23×10^{-3}	2.23×10^{-3}	5.20×10^{-2}	5.20×10^{-2}	2.13×10^{-1}	2.13×10^{-1}
2	5.49×10^{-4}	3.62×10^{-3}	1.60×10^{-1}	1.58×10^{-1}	1.80×10^{-1}	4.10×10^{-1}
3	2.30×10^{-4}	4.01×10^{-3}	1.31×10^{-1}	3.04×10^{-1}	1.65×10^{-1}	5.82×10^{-1}
4	1.57×10^{-4}	4.20×10^{-3}	7.35×10^{-2}	4.06×10^{-1}	1.57×10^{-1}	7.43×10^{-1}
5	1.31×10^{-4}	4.35×10^{-3}	3.63×10^{-2}	4.61×10^{-1}	1.53×10^{-1}	8.98×10^{-1}
6	1.17×10^{-4}	4.47×10^{-3}	1.72×10^{-2}	4.87×10^{-1}	1.51×10^{-1}	1.05×10^0
7	1.07×10^{-4}	4.58×10^{-3}	8.11×10^{-3}	5.00×10^{-1}	1.49×10^{-1}	1.20×10^0
8	9.81×10^{-5}	4.69×10^{-3}	3.88×10^{-3}	5.06×10^{-1}	1.49×10^{-1}	1.35×10^0
9	9.07×10^{-5}	4.78×10^{-3}	1.91×10^{-3}	5.09×10^{-1}	1.48×10^{-1}	1.50×10^0
10	8.42×10^{-5}	4.87×10^{-3}	9.83×10^{-4}	5.10×10^{-1}	1.48×10^{-1}	1.65×10^0
20	4.69×10^{-5}	5.52×10^{-3}	1.35×10^{-4}	5.16×10^{-1}	1.46×10^{-1}	3.12×10^0
30	3.27×10^{-5}	5.92×10^{-3}	1.33×10^{-4}	5.17×10^{-1}	1.45×10^{-1}	4.57×10^0
40	2.65×10^{-5}	6.22×10^{-3}	1.31×10^{-4}	5.19×10^{-1}	1.43×10^{-1}	6.01×10^0
50	2.34×10^{-5}	6.47×10^{-3}	1.29×10^{-4}	5.20×10^{-1}	1.42×10^{-1}	7.44×10^0
60	2.19×10^{-5}	6.69×10^{-3}	1.26×10^{-4}	5.21×10^{-1}	1.41×10^{-1}	8.85×10^0
70	2.04×10^{-5}	6.90×10^{-3}	1.24×10^{-4}	5.22×10^{-1}	1.39×10^{-1}	1.03×10^1
80	1.96×10^{-5}	7.10×10^{-3}	1.22×10^{-4}	5.24×10^{-1}	1.38×10^{-1}	1.16×10^1
90	1.91×10^{-5}	7.30×10^{-3}	1.20×10^{-4}	5.25×10^{-1}	1.36×10^{-1}	1.30×10^1
100	1.87×10^{-5}	7.49×10^{-3}	1.05×10^{-4}	5.26×10^{-1}	1.35×10^{-1}	1.44×10^1

Tabla 6. (Cont.)

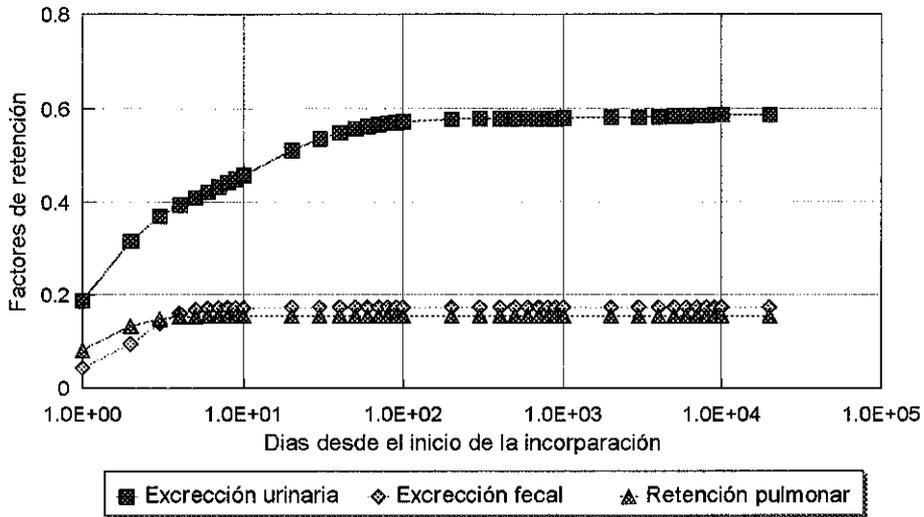
Fracción de retención y/o eliminación puntual y
continua para compuestos de uranio clase Y.

DIAS	URINARIA		FECAL		PULMONAR	
	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA	PUNTUAL	CONTINUA
200	1.81×10^{-5}	9.33×10^{-3}	9.13×10^{-4}	5.36×10^{-1}	1.22×10^{-1}	2.72×10^{-1}
300	1.83×10^{-5}	1.11×10^{-2}	7.95×10^{-5}	5.44×10^{-1}	1.10×10^{-1}	3.88×10^{-1}
400	1.82×10^{-5}	1.30×10^{-2}	6.92×10^{-5}	5.52×10^{-1}	9.98×10^{-2}	4.93×10^{-1}
500	1.81×10^{-5}	1.48×10^{-2}	5.24×10^{-5}	5.58×10^{-1}	9.06×10^{-2}	5.58×10^{-1}
600	1.78×10^{-5}	1.66×10^{-2}	4.56×10^{-5}	5.63×10^{-1}	8.23×10^{-2}	6.75×10^{-1}
700	1.74×10^{-5}	1.83×10^{-2}	6.97×10^{-5}	5.67×10^{-1}	7.49×10^{-2}	7.53×10^{-1}
800	1.69×10^{-5}	2.01×10^{-2}	3.46×10^{-5}	5.71×10^{-1}	6.83×10^{-2}	8.25×10^{-1}
900	1.64×10^{-5}	2.17×10^{-2}	8.65×10^{-6}	5.73×10^{-1}	6.23×10^{-2}	8.90×10^{-1}
1000	1.58×10^{-5}	2.33×10^{-2}	2.16×10^{-6}	5.73×10^{-1}	5.70×10^{-2}	9.50×10^{-1}
2000	9.79×10^{-6}	3.61×10^{-2}	5.40×10^{-7}	5.75×10^{-1}	2.55×10^{-2}	1.36×10^{-2}
3000	5.39×10^{-6}	4.37×10^{-2}	1.35×10^{-7}	5.75×10^{-1}	1.34×10^{-2}	1.56×10^{-2}
4000	2.86×10^{-6}	4.78×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	8.25×10^{-3}	1.67×10^{-2}
5000	1.50×10^{-6}	5.00×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	5.92×10^{-3}	1.74×10^{-2}
6000	9.68×10^{-7}	5.10×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	5.10×10^{-3}	1.79×10^{-2}
7000	4.36×10^{-7}	5.20×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	4.27×10^{-3}	1.84×10^{-2}
8000	2.48×10^{-7}	5.23×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	4.00×10^{-3}	1.88×10^{-2}
9000	1.50×10^{-7}	5.25×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	3.87×10^{-3}	1.92×10^{-2}
10000	9.75×10^{-8}	5.26×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	3.80×10^{-3}	1.96×10^{-2}
20000	1.31×10^{-8}	5.32×10^{-2}	0.00×10^{-0}	5.75×10^{-1}	3.74×10^{-3}	2.33×10^{-2}

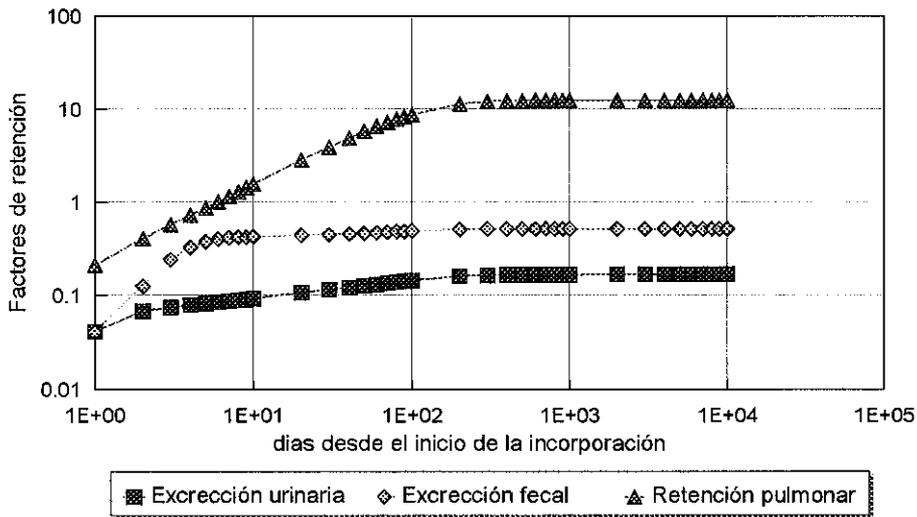
Figura 2



Factores de retención para una inhalación continua
Aerosoles de uranio, clase D



Factores de retención para una inhalación continua
Aerosoles de uranio, clase W



Factores de retención por inhalación continua
Aerosoles de uranio, clase Y

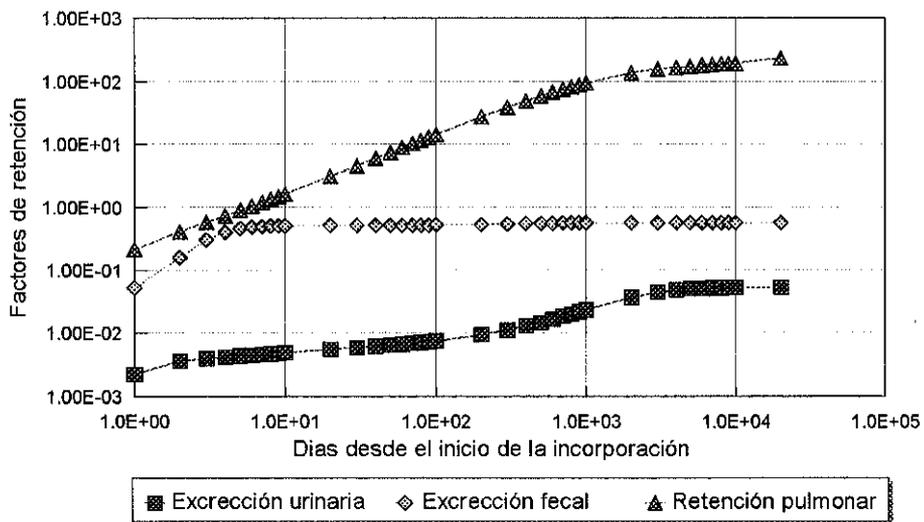


Tabla 7
 Excreción urinaria y fecal para un período de exposición de 1 Bq/día durante 20 años
 para compuesto de uranio Clase W y clase Y

CLASE	URINARIA		FECAL		R. PULMON	
	µg U/día	Bq U/día	µg U/día	Bq U/día	Bq ²³⁸ U	mg U
W	1,90	0,17	5,83	0,519	1,65	0,13
Y	0,58	0,052	6,46	0,575	24,73	1,99

CONCLUSIONES

Uno de los métodos de control de las incorporaciones por inhalación individuos profesionalmente expuestos es la realización de bioensayos (medidas con un contador corporal de la retención pulmonar, tasas de excreción urinaria y fecal). Para ello es necesario disponer de un modelo dosimétrico que permita estimar las cantidades incorporadas a partir de los resultados de los bioensayos.

La bibliografía da habitualmente los valores de las retenciones pulmonares y de las tasas de excreción para el caso de incorporaciones puntuales. A partir de estos valores se ha descrito un método que permite calcular los mismos datos para casos de incorporaciones continuas, e incluso variables. El método se ha aplicado al caso particular de la inhalación de aerosoles de uranio clase D, W e Y, los resultados se muestran en forma de gráficos. El análisis de los mismos nos llevan a las siguientes conclusiones: a) La retención pulmonar es importante en el caso de aerosoles clase W e Y, y es despreciable para clase D, b) La tasa de excreción urinaria es elevada para aerosoles clase D, baja para clase W y muy pequeña para clase Y, c) La tasa de excreción fecal es elevada para aerosoles clase W e Y y muy baja para clase D

Con el fin de aclarar el método descrito vamos a aplicarlo a dos casos:

Ejemplo 1.- Se trata de calcular la excreción urinaria correspondiente a una incorporación continua diaria media de 2 Bq/día durante 100 días de aerosoles de clase Y.

Para ello se aplica la ec.(2) utilizando los valores de $f(t_i)$ (fracción de eliminación urinaria correspondiente a una incorporación puntual) dados en el NUREG/CR-4884 (por simplicidad se han redondeado a una cifra decimal).

$$\int_0^{100} r(v) d(v) = \frac{2.2 \times 10^{-3} + 2.2 \times 10^{-3}}{2} + 1 \left[\frac{2.2 \times 10^{-3} + 8.4 \times 10^{-5}}{2} + \right. \\ \left. 5.5 \times 10^{-4} + 2.3 \times 10^{-4} + 1.6 \times 10^{-4} + 1.3 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-4} + \right. \\ \left. 1.1 \times 10^{-4} + 9.8 \times 10^{-5} + 9.1 \times 10^{-5} \right] + 10 \left[\frac{8.4 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-5}}{2} + \right. \\ \left. 4.7 \times 10^{-5} + 3.3 \times 10^{-5} + 2.6 \times 10^{-5} + 2.3 \times 10^{-5} + \right. \\ \left. 2.2 \times 10^{-5} + 2.0 \times 10^{-5} + 2 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-5} \right] = 7.5 \times 10^{-3}$$

La interpretación de este resultado es el que sigue: Por cada μg ó Bq inhalado, suponiendo una inhalación continua de $1 \mu\text{gU/día}$ (ó 1 Bq/día) durante 100 días la excreción urinaria diaria será $7.5 \times 10^{-3} \mu\text{gU/día}$ (o $7.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/día}$). Por tanto como hemos supuesto 2 Bq/día el resultado será $0.15 \mu\text{gU/día}$ (ó 0.15 Bq/día).

Ejemplo 2.-El mismo procedimiento lo vamos a aplicar para estimar la incorporación total de una persona que ha estado sometida a una incorporación continua desconocida, M , durante 100 días a la que se le mide una concentración en orina de $0.3 \mu\text{g/día}$. En este caso la cantidad incorporada sería:

$$0.3 \mu\text{g/día} = \frac{A}{100} \int_0^{100} r(v) d(v) = \frac{M}{100} \times 7.5 \times 10^{-3}$$

donde la cantidad total, M , incorporada en μg será (7.5×10^{-3} es el valor obtenido en el ejemplo anterior).

$$M = \frac{0.3 \mu\text{gU/día} \times 100 \text{ días}}{7.5 \times 10^{-3}} \times 10^3 \text{ mg}/\mu\text{g} = 4 \text{ mgU}$$

Es decir la persona a la que se ha analizado la orina habrá incorporado 4 mg U . Si se conoce a que enriquecimiento medio corresponde ese uranio puede estimarse su equivalente en Bq .

El método anterior se ha utilizado para determinar a partir de que momento sería detectable, con los LIDs de la ICRP 54, el uranio en pulmones o en orina al personal profesionalmente expuesto de la Fabrica de Juzbado. La conclusión es que suponiendo una persona expuesta de forma permanente al límite de incorporación anual aplicado al personal profesionalmente expuesto de la Fabrica de Juzbado ($1/5$ del LIA, que equivale aproximadamente a 1 Bq/día^{-1} para aerosoles clase Y) virtualmente es indetectable la presencia de uranio en pulmones en toda su vida profesional (véase **tabla 7**). El uranio en orina sería detectable con los equipos disponibles en la Fabrica, no obstante las concentraciones serían tan pequeñas que serían indistinguibles del uranio presente en los individuos procedente del fondo radiológico ambiental (véase *ponencia 25.03 Estudio de la concentración de uranio en orina aplicando un equipo de fosforescencia por*

excitación láser, XX Reunión anual SNE).

REFERENCIAS

International Commission on Radiological Protection. "Limits for intakes of radionuclides by workers". ICRP publication 30, part 1, Oxford, Pergamon Press, 1979.

Schieferdecker, H.; Dilger, H.; Doerfel, H.; Rudolph, W.; Anton, R. "Inhalation of uranium aerosols from UO₂ fuel element fabrication" . Health Physics vol. 48 N° 1. pp 29-48. 1985.

Birchall, A. "A microcomputer algorithm for solving compartmental models involving radionuclide transformations". Health Physics vol. 50. N° 3. pp 389-397. 1986.

Skrable, K.W.; Chabot, G.E.; French, C.S.; Wrenn, M.E.; Lipsztein, J.; Lo Sasso, T.; Durbin, P.W. "Blood-organ transfer kinetics". Health Physics vol. 39. pp 193-209. 1979.

NUREG/CR-3884 "Interpretation of Bioassay Measurements" July 1987.

ICRP 54 "Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers Design and Interpretation" 1988.