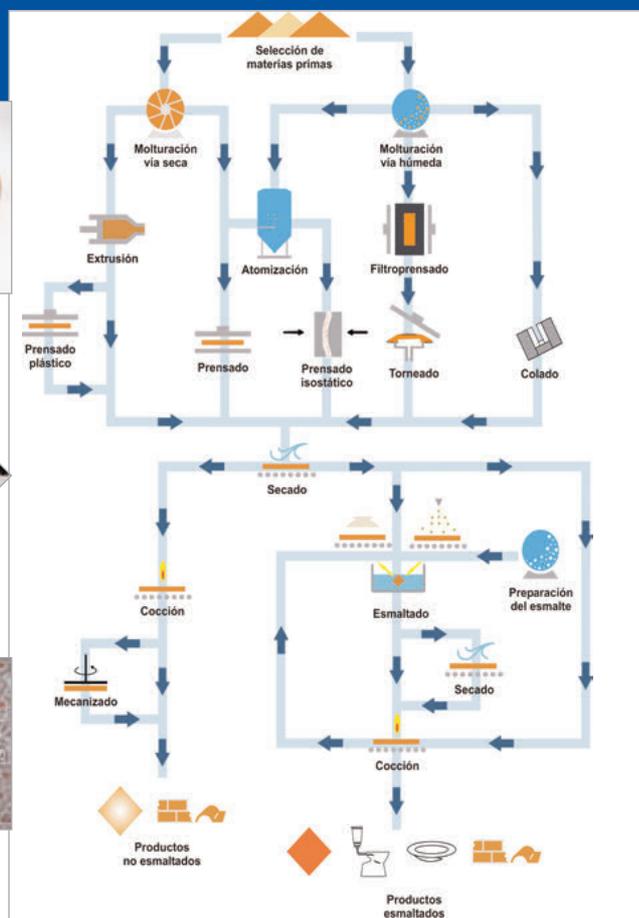


Estudio radiológico de la industria cerámica y auxiliares

CSN



Estudio radiológico de la
industria cerámica y auxiliares

Estudio radiológico de la industria cerámica y auxiliares

Autores: Universitat Politècnica de
Valencia

Vicente Serradell García
(director)

Josefina Ortiz Moragón

Isidoro Zarza Pérez

Luisa Ballesteros Pascual

Margarita López Marín

Instituto de Tecnología
Cerámica

Eliseo Monfort Gimeno

M^a Jesús Ibáñez García

Colección
Informes Técnicos
40.2013



Colección Informes Técnicos
Referencia INT-04-33

© Copyright 2013, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 - Madrid-España
www.csn.es
peticiones@csn.es

Maquetación: Pilar Guzmán

Depósito legal: M-9451-2013

En mayo de 1996, la Unión Europea publicó la Directiva 96/29 Euratom [1] relativa a la protección frente a los peligros de las radiaciones ionizantes de los trabajadores y del público. Esta directiva se transpuso a la normativa española con la publicación, en julio de 2001, del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI) [2].

En ella se introduce, como una de las principales novedades, en el capítulo VII, la necesidad de realizar los estudios que se estimen oportunos para conocer el posible riesgo radiológico de las industrias no nucleares que utilicen materiales con un contenido elevado de radionucleidos naturales o aquellas en las que sus procesos originen un aumento significativo de los mismos. Este tipo de industrias se conocen como industrias NORM (acrónimo de *Naturally Occurring Radioactive Material*).

En el año 1997, la Comisión de la Unión Europea a través de la Dirección General de Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil, publicó unas directrices contenidas en la publicación *Radiation Protection 88* [3], con el ánimo de servir de guía para la implementación del mencionado título, y en el que se señalaban ejemplos de industrias que como consecuencia de su actividad podrían ver incrementada la exposición a la radiación de los trabajadores o del público. Entre estas se citaba la *industria cerámica*, fundamentalmente por el uso de minerales de circonio. Con posterioridad publicaron otros documentos, como *Radiation Protección 95* [4] y *Radiation Protección 107* [5] en los que se menciona a la *industria del circonio* como industria NORM objeto de estudio, y que englobaría a todas aquellas actividades industriales que utilizaran los minerales de circonio en todo o parte de sus procesos de producción.

La falta de desarrollo del RPSRI en lo relativo a la protección frente a la exposición a la radiación natural hizo necesario que el CSN definiera un plan de actuación para dar cumplimiento a la Directiva 96/29/Euratom. Este plan de actuación fue aprobado por el Pleno del CSN, en su reunión de 17 de octubre de 2001.

Dentro de este plan se incluía la realización de estudios de actividades laborales que, de acuerdo con la información disponible, podrían representar un riesgo radiológico significativo para los trabajadores, el público y el medio ambiente.

El objetivo final de los estudios era elaborar unos protocolos de actuación y orientación para la estimación de dosis en la actividad laboral correspondiente, que, una vez publicados, sirvieran de guía para la realización de los estudios requeridos en actividades similares.

Para la elaboración de los estudios se firmaron en 2003 acuerdos específicos de colaboración con diversas universidades y se concedieron subvenciones en 2004 y 2005. En total se abordaron 13 proyectos entre los que se encuentra el estudio sobre la industria cerámica y auxiliares que se describe en este documento.

Los minerales de circonio utilizados en la industria cerámica son fundamentalmente el silicato de circonio o circón ($ZrSiO_4$), que se importa en España en forma de arena, y el óxido de circonio (ZrO_2), que existe en la naturaleza en la forma del mineral baddeleyita, aunque al tratarse de un mineral muy poco abundante, existen en el mercado óxidos de circonio obtenidos por síntesis a partir de circón, denominados genéricamente circona, que suplen la ausencia de baddeleyita en el mercado.

El silicato de circonio contiene uranio y torio en su estructura cristalina, sustituyendo a los átomos de circonio. Dependiendo principalmente de su procedencia, la concentración de actividad de uranio-238 y torio-232, puede variar. Así, el contenido de uranio-238 en las arenas de uso mayoritario puede oscilar entre 1.000 y 5.000 Bq/kg, mientras que para el torio-232 esta concentración se sitúa entre 500 y 1.000 Bq/kg [6]. Respecto al óxido de circonio, si se utiliza como baddeleyita el contenido radiactivo puede ser incluso mayor, mientras que las circonas comerciales tienen valores de concentración de actividad para uranio-238 y torio-232 variables, dependiendo del proceso de síntesis al que se ha sometido al circón. Todas estas concentraciones son notablemente superiores a los valores promedio de los suelos, que de acuerdo al informe del

UNSCEAR [7] y a nivel mundial son de 35 Bq/kg para uranio-238 y 30 Bq/kg para torio-232, lo que convierte a las industrias que utilizan silicato de circonio en actividades industriales en las que se deben realizar los estudios indicados en el mencionado título VII.

Sin embargo, mientras que la circona se utiliza como materia prima por la industria cerámica, el circón, mayoritariamente, pasa por una serie de empresas intermedias, que denominaremos auxiliares, que efectúan una reducción del tamaño de su partícula, debido a que en el sector cerámico el circón se utiliza en forma de harina (con un tamaño de partícula inferior a $45 \mu m$) o de micronizados (los más comunes comercialmente presentan un diámetro medio entre 1 y $3 \mu m$). Estos molturados se utilizan en la industria cerámica para conferir a los productos cerámicos opacidad y blancura.

Con objeto de poder identificar aquellas actividades industriales en el ámbito de la cerámica, con un potencial riesgo radiológico, el Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) elaboró un documento [8] en el que se describen los distintos subsectores de la industria cerámica, las materias primas que se utilizan y los diferentes procesos de fabricación. Este documento también incluye información acerca de aquellas industrias que, sin pertenecer al sector cerámico, son las suministradoras del silicato de circonio molturado. En base a la información contenida en el mismo se consideró conveniente realizar el estudio radiológico de tres tipos de industrias: una industria molturadora de arena de circonio, una industria que produce fritas y una de fabricación de baldosas cerámicas de gres porcelánico. En todas ellas se utiliza como materia prima el silicato de circonio. Sin embargo, solo en la molturadora se trabaja con silicato de circonio en todo el proceso de producción, constituyendo, por tanto, la actividad industrial con un mayor riesgo radiológico. En las otras dos industrias y ya en la fase inicial, el silicato se mezcla con otras materias primas de forma que la mezcla resultante presenta un contenido en radiactividad relativamente bajo en función de la proporción de silicato añadido.

Para realizar el estudio radiológico en cada una de las industrias se ha evaluado el contenido radiactivo natural de la materia prima, la de los productos intermedios y finales, así como la de los residuos generados en los distintos procesos de producción, realizando los

estudios pertinentes para valorar si existe un aumento significativo de la exposición de los trabajadores o del público. Estos estudios se han realizado siguiendo una metodología definida que constituye una de las partes del proyecto.

Sumario

Introducción	5
Resumen del proyecto	11
Descripción del sector industrial.	13
Caracterización radiológica de los materiales utilizados en la industria cerámica.	15
Metodología para la realización del estudio radiológico	33
Estudio radiológico de una planta molturadora de arenas de circonio.	41
Estudio radiológico de una empresa de fabricación de fritas.	63
Estudio radiológico de una industria de fabricación de baldosas de gres porcelánico	77
Conclusiones	95
Referencias bibliográficas	97

RESUMEN DEL PROYECTO



1

Para poder hacer efectivo el desarrollo del título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, el CSN subvenció distintos proyectos relacionados con las actividades incluidas en los estudios realizados por la Unión Europea, con objeto de editar un protocolo de actuación para todas las industrias NORM. Entre estos proyectos se encuentra el *Estudio radiológico de la industria cerámica y auxiliares* realizado por el Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LRA) de la Universidad Politécnica de Valencia, que ha contado con la colaboración del Instituto de Tecnología Cerámica (ITC).

Como parte inicial del proyecto, y tomando como base el informe realizado por el ITC sobre el sector cerámico [8], se consideró conveniente realizar un estudio de la radiactividad natural existente en los materiales más representativos de esta industria, tanto a nivel de materias primas, como de productos intermedios (susceptibles de constituir la materia prima para otras industrias), así como de los productos finales o acabados que son los que llegan al público. Para ello se contó con la colaboración del ITC, que suministró las muestras, tras realizar una selección de los distintos materiales que utiliza la industria cerámica, atendiendo

principalmente al uso mayoritario de los mismos. Esta fase confirmó que, efectivamente, el potencial riesgo radiológico estaba asociado al uso del silicato de circo, por lo que aquellas industrias cerámicas que no lo utilizaran quedaban fuera de la necesidad de realizar cualquier estudio radiológico.

La fase inicial sirvió para decidir el tipo de industria en las que se debía hacer el estudio y que constituirían la fase central del proyecto. Así, y siempre a través del ITC, se contactó con las tres empresas en cuyas instalaciones se han realizado las medidas que se incluyen en este documento y que, por expreso deseo de las mismas, se van a mantener en el anonimato. Las tres empresas estudiadas facilitaron al LRA tanto la toma de muestras dentro de sus instalaciones, como la información relativa a sus actividades industriales, por lo que desde el LRA se les agradece públicamente su colaboración.

En este proyecto se presentan los resultados obtenidos y se detalla cómo se ha realizado el estudio de cada una de las industrias, de forma que puedan constituir un estudio piloto que sirva de referencia para posteriores evaluaciones de industrias de similares características.

DESCRIPCIÓN DEL
SECTOR INDUSTRIAL



2

El sector industrial de productos cerámicos y afines es muy importante en España. El subsector más importante en relación a la producción lo constituye la fabricación de baldosas cerámicas, seguido por el de fabricación de fritas y esmaltes. Le sigue en importancia el subsector constituido por los fabricantes de cerámica estructural (ladrillos y tejas).

Una de las características básicas del sector español de baldosas cerámicas es el elevado grado de concentración existente en una determinada área geográfica. Concretamente en un área de 500 km² de la provincia de Castellón (municipios de L'Alcora, Nules, Onda, Vilafamés y Villarreal) se sitúan el 75% de las empresas existentes, que generan alrededor del 95% de la producción nacional. Además, el sector español de fabricantes de fritas, esmaltes y colores cerámicos, también se encuentra principalmente en esta provincia, al igual que las empresas molturadoras de silicato de circonio.

En España, la producción de cerámica estructural se distribuye por todo el país, aunque se concentra en las provincias de Toledo, Jaén, Alicante, Valencia y Barcelona, donde se ubica casi el 50% de la producción nacional.

La producción de porcelana sanitaria en España depende de cuatro empresas que operan en ocho factorías. La principal compañía dispone de cinco fábricas en España localizadas en Madrid, Sevilla, Barcelona y Burgos; las de los otros productores están ubicadas en Valencia y Zaragoza.

El sector de la vajilla es bastante difuso en cuanto a localización geográfica. Las principales industrias se encuentran en Chiva (Valencia), Gijón (Asturias) e Irún (Guipúzcoa). Las restantes se localizan en Barcelona, Madrid, La Coruña, Lugo, Navarra, Asturias y Cáceres; pero son pequeñas en comparación con las anteriormente indicadas.

En cuanto a la cerámica artística, la factoría más importante se encuentra en Tavernes Blanques (Valen-

cia), mientras que en Galicia se localiza la planta del segundo productor nacional. Manises (Valencia) y sus alrededores es la zona de producción de cerámica decorativa más importante de España. La otra zona destacada de producción de este tipo de cerámica es La Rambla en Córdoba, con varias empresas algo menores que las de Manises.

Otra actividad industrial muy importante, relacionada sobre todo con la fabricación de baldosas cerámicas, es la producción de fritas, esmaltes y pigmentos cerámicos. Las industrias de fabricación de fritas y esmaltes cerámicos se consideran, desde el punto de vista de la normativa medioambiental, incluidas dentro del sector del vidrio, aunque a lo largo del presente trabajo, y por su relación con el sector cerámico, se les considera como un subsector de dicha actividad industrial, ya que producen materias primas semielaboradas a utilizar casi exclusivamente en las industrias cerámicas. Precisamente, debido a los vínculos de este subsector con el de fabricación de baldosas cerámicas (su principal cliente), las instalaciones para la fabricación de fritas, esmaltes y pigmentos cerámicos están situadas, principalmente, en la Comunidad Valenciana y más concretamente en la provincia de Castellón, donde se localizan casi la totalidad de las empresas.

Las empresas españolas de procesado (molturación, micronización y envasado) de minerales de circonio también se localizan en la región industrial indicada y se han considerado igualmente industrias auxiliares del sector industrial estudiado.

Por otra parte, aunque en menor proporción, existen productos no esmaltados que utilizan minerales de circonio directamente como materia prima, como pueden ser los fabricantes de baldosas de gres porcelánico o de refractarios. Generalmente, los centros de producción de la industria del refractario están situados en la proximidad de las industrias del acero, con un 75% de las plantas en Asturias, País Vasco, Navarra y Cantabria.

CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA
DE LOS MATERIALES UTILIZADOS
EN LA INDUSTRIA CERÁMICA



3

Como ya se comentó en la introducción, las actividades de la industria cerámica, desde un punto de vista radiológico, están ligadas a la existencia de radiactividad natural en las materias primas que utilizan. En este punto se va a realizar una breve exposición sobre la naturaleza de este tipo de radiación y su medida, para, posteriormente, detallar la concentración de actividad de los radionucleidos naturales existentes en la selección de los materiales más utilizados por la industria cerámica.

1. Radiactividad natural

Existen elementos radiactivos en el medio ambiente desde la formación de la Tierra. Al hablar de radionucleidos naturales se hace referencia, por lo general a diversos isótopos de uranio, torio y potasio que están incluidos entre los componentes de la Tierra desde su misma formación, pudiendo encontrarlos en todas las formaciones de la corteza terrestre. Los tres radionucleidos conocidos como primordiales, el uranio-238 con un

período de semidesintegración de $4,468 \cdot 10^9$ años, el torio-232 con un período de $1,405 \cdot 10^9$ años, y el potasio-40 con $1,277 \cdot 10^{10}$ años, existen de forma natural hoy en día ya que tienen un período del orden o superior a la edad estimada de la Tierra de $4,65 \cdot 10^9$ años. El uranio-235 también presenta un período de $7,023 \cdot 10^8$ años, del orden de la vida de la Tierra, pero su importancia desde el punto de vista de la actividad específica en el medio es mucho menor, ya que su abundancia relativa respecto al uranio natural es del 0,72% en masa.

El origen principal de los elementos radiactivos naturales es la existencia de las series naturales de decaimiento radiactivo a partir de algunos de los radionucleidos citados como son el uranio-238 y el torio-232, conocidas como las series del uranio y del torio. También el uranio-235 da lugar a una serie radiactiva pero menos importante debido a su baja concentración. Las series radiactivas consideradas en el estudio, es decir la del uranio y la del torio, se presentan en las figuras 3.1 y 3.2.

Figura 3.1. Esquema de desintegración del U-238

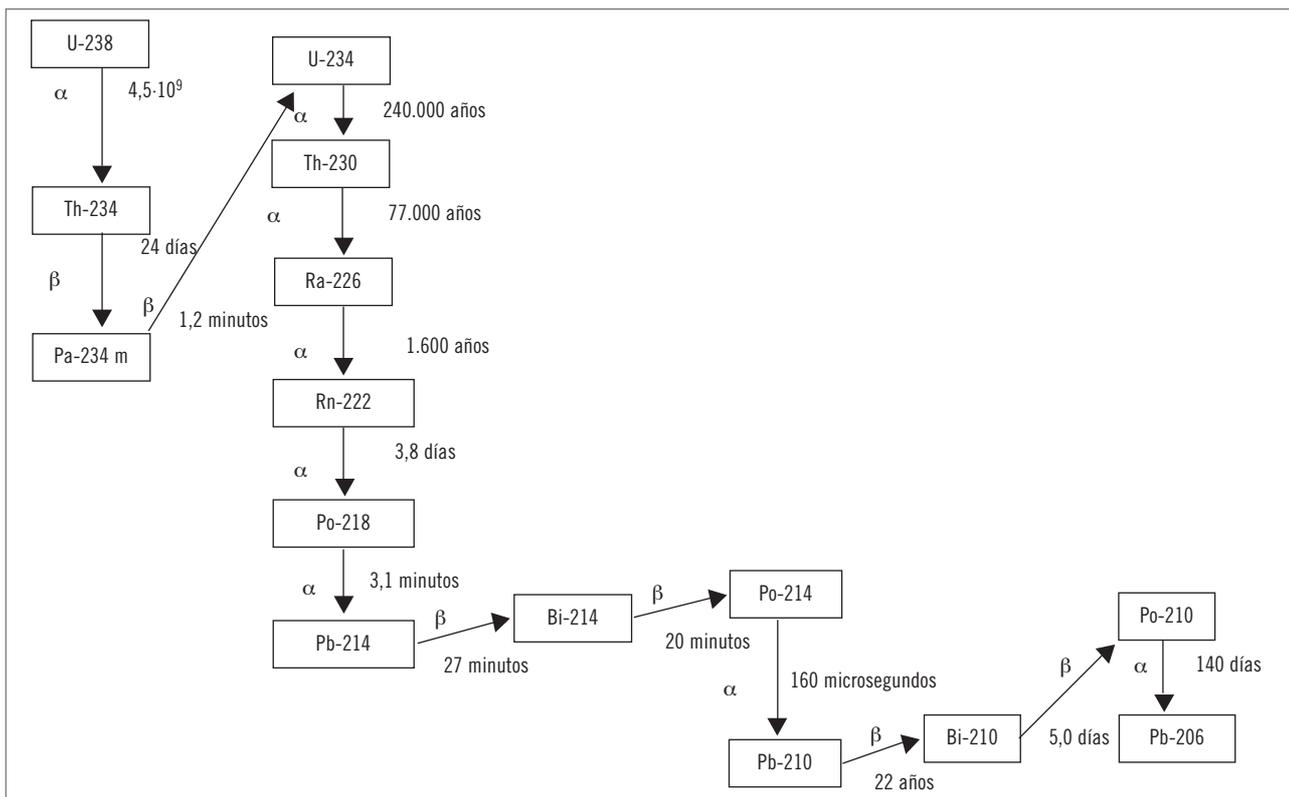
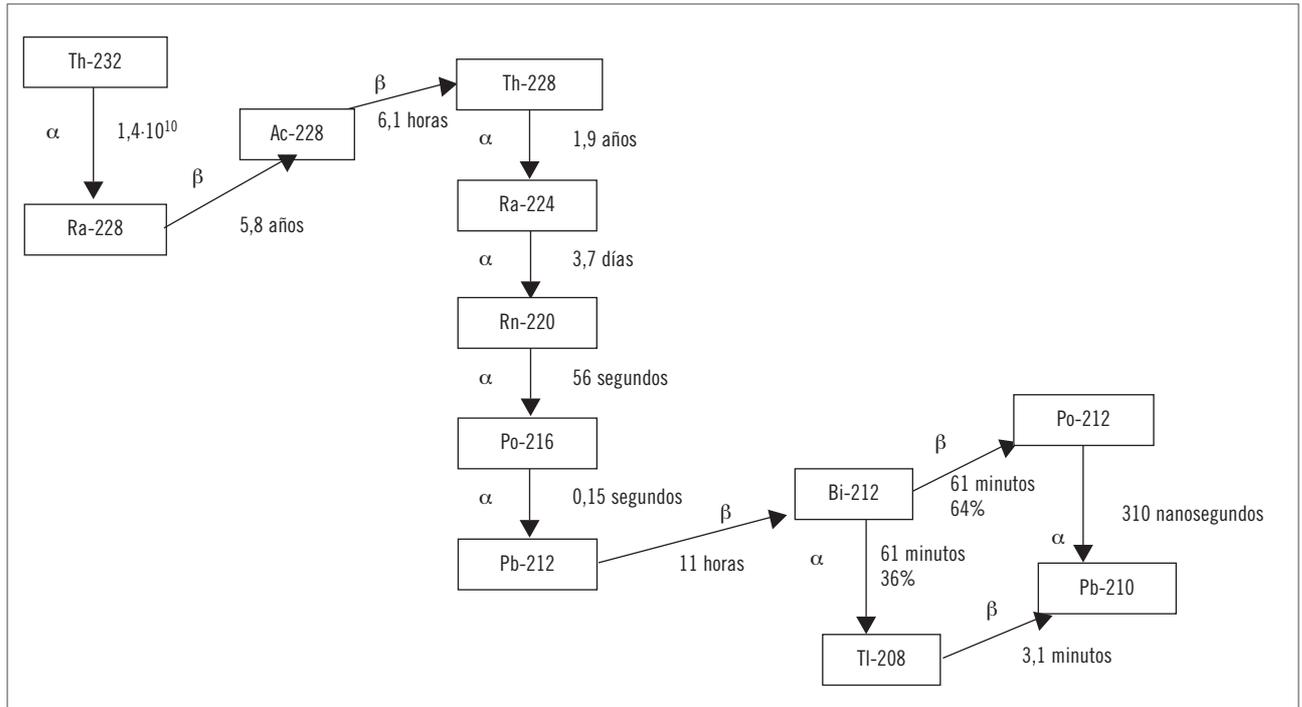


Figura 3.2 Esquema de desintegración del Th-232



Las series radiactivas se generan al desintegrarse un núcleo en otro núcleo que resulta ser también radiactivo. Esto se puede repetir hasta alcanzarse un núcleo estable o fin de la serie. Así, y en el caso de las series naturales, el resto de elementos, es decir los descendientes del uranio-238, o del torio-232, también pueden encontrarse en el medio ambiente independientemente de su período de desintegración una vez alcanzado el denominado equilibrio secular. En esta situación todos los miembros de la cadena tienen la misma actividad y su variación temporal viene gobernada por el período de semidesintegración del padre de la misma.

La serie del uranio-238 viene marcada por una cadena de radionucleidos de período largo, cuya existencia en el medio seguiría siendo importante aunque pasaran a estar aislados de sus progenitores, como son el uranio-234, el torio-230, el radio-226 y el plomo-210. Respecto a la serie del torio-232, podríamos considerar al radio-228 y al torio-228. En ambas series existen dos isótopos del radón, elemento químico gaseoso perteneciente a la familia de los gases nobles: el radón-222 (conocido genéricamente como radón) y el radón-220 (conocido como torón).

De acuerdo con los esquemas de desintegración del uranio-238 y del torio-232, los radionucleidos que forman la series radiactivas son, en general, emisores alfa o beta. Las emisiones gamma, que tienen muchos de ellos, están asociadas a la reorganización interna del núcleo generado cuando no está en su estado fundamental de energía.

La cuantificación de un radionucleido emisor alfa o beta, mediante la medida de la emisión correspondiente, requiere la separación química de dicho radionucleido y su medida, en general, por espectrometría alfa o uso de discos de sulfuro de zinc, activados con plata, $SZn(Ag)$, en el caso de la emisión alfa, y utilizando un contador proporcional en el caso de la emisión beta, si bien en la actualidad ambos tipos de emisión también se están midiendo haciendo uso de espectrómetros de centelleo líquido.

Existe, sin embargo, la posibilidad de realizar la cuantificación de estos radionucleidos mediante la medida de las emisiones gamma asociadas a cada uno de ellos. Así, la técnica de espectrometría gamma, en la que no es necesario realizar ningún análisis destructivo, es una

herramienta muy útil para realizar la cuantificación de muchos de los radionucleidos naturales y es la que hemos elegido para caracterizar la radiactividad natural en los materiales analizados.

En la tabla 3.1, se dan las emisiones gamma para los radionucleidos de la serie del uranio-238, así como, su intensidad, es decir el número de fotones gamma emitidos por desintegración (G/D), en tantos por ciento. Como puede observarse, algunos isótopos no presentan emisiones gamma, como son el uranio-238,

Tabla 3.1. Energías gamma (keV) e intensidades (G/D) asociadas a la serie del U-238

Isótopo	Energía	Intensidad (G/D) (%)	Isótopo	Energía	Intensidad (G/D) (%)
U-238	-		Bi-214	609,3	46,1
				768,4	4,89
				934,1	3,6
				1.120,3	15,0
				1.238,0	5,92
				1.377,7	4,02
				1.408,0	2,48
				150,2	2,19
1.764,5	15,9				
Th-234	63,3	4,47	99,98%		
	92,38	2,60	Po-214	799	0,014
	92,80	2,56			
Pa-234m	765	0,207	Pb-210	46,5	4,05
	1.001	0,59			
U-234	53,2	0,123	Bi-210	-	-
Th-230	67,7	0,373	Po-210	803	0,0011
Ra-226	186,2	3,50	Pb-206	-	-
Pc-218	-				
Rn-222	510	0,076			
99,98%	53,2	1,1			
Pb-214	242,0	7,46			
	295,2	19,2			
	351,9	37,1			
	785,9	1,09			

polonio-218, y el bismuto-210, emisores alfa los dos primeros y beta el tercero. También, y para algunos de ellos, las emisiones gamma son tan débiles, con porcentajes inferiores al 0,1%, que su medida por espectrometría gamma se hace prácticamente inviable, como para uranio-234, radón-222, polonio-218 y polonio-210. Por el contrario, las emisiones gamma más intensas se corresponden con el plomo-214 y el bismuto-214. El bismuto-214 presenta un esquema de desintegración complejo, con un número elevado de emisiones gamma.

Tabla 3.2. Energías gamma (keV) e intensidades (G/D) asociadas a la serie del Th-232

Isótopo	Energía	Intensidad (G/D) (%)	Isótopo	Energía	Intensidad (G/D) (%)	
Th-232	63,8	0,27	Po-216	-	-	
Ra-228	-	-	Pb-212	238,6	43,6	
				300,0	3,34	
Ac-228	209,3	3,88	Bi-212	39,9	1,1	
	270,2	3,43		727,3	6,65	
	328,0	2,95	64,06%			
	338,3	11,8				
	409,5	1,94		Po-212	-	
	463,0	4,44				
772	1,50	35,94%	277,4	6,31		
794,9	4,36	Tl-208	510,77	22,6		
835,7	1,61		583,2	84,5		
911,2	26,6		763,1	1,81		
964,8	5,11		860,6	12,4		
969,0	16,2					
1.588,2	3,27					
Th-228	84,4	1,22	Pb-208	-	-	
Ra-224	241,0	3,97				
Rn-220	550	0,07				

En la tabla 3.2, se dan las energías e intensidades asociadas a los radionucleidos correspondientes a la serie del torio-232. En ella observamos que existen radionucleidos que no tienen emisión gamma como el radio-228, el polonio-212 y el polonio-216, todos ellos emisores alfa, así como algunos con emisiones muy débiles como el torio-232 y el torio-228, correspondiendo las líneas más intensas al actinio-228, plomo-212 y talio-208.

Por último, en la tabla 3.3, se dan las energías e intensidades de las emisiones gamma para el uranio-235 y el potasio-40. Como ya se ha comentado el uranio-235 es uno de los isótopos que forman parte del uranio natural, la relación entre la actividad del uranio-235 y el uranio-238 es de 0,04605. Este radionucleido suele cuantificarse haciendo uso de ambas líneas de emisión. Respecto al potasio-40 es un radionucleido que se desintegra emitiendo un positrón y mediante captura electrónica. Es esta última vía la que da lugar a la emisión de fotones gamma de 1.460 keV.

Tabla 3.3 Energías gamma (keV) e intensidades (G/D) para el U-235 y el K-40

Isótopo	Energía	Intensidad (G/D) (%)
U-235	185,71	57,2
	143,76	10,96
K-40	1.460,73	11

A pesar de que existen radionucleidos naturales correspondientes a las series del uranio-238 y torio-232, que como ya hemos visto no se pueden cuantificar mediante sus propias emisiones gamma, siempre que se pueda razonablemente suponer la existencia de un equilibrio secular en estas, se puede conocer la actividad de cada uno de los miembros de la serie haciendo uso de las emisiones gamma más intensas de cada una de ellas. Así, podremos cuantificar el uranio-238 y todos sus descendientes calculando, mediante espectrometría gamma, la actividad del bismuto-214. De la misma forma, la cuantificación del torio-232 y sus descendientes, se podrá realizar mediante las emisiones gamma del actinio-228.

Si existiera, por causas químicas o físicas, una ruptura de este equilibrio en alguna parte de la serie, y analizando

los diferentes períodos de los radionucleidos que componen la serie del uranio-238, esta puede suponerse dividida en cinco subseries, encabezadas por el uranio-238, el uranio-234, el torio-230, el radio-226 y el plomo-210, en las que estos radionucleidos pueden considerarse en equilibrio con sus descendientes, si los tienen, debido a sus cortos períodos de semidesintegración si se los compara con el del cabeza de la subserie. De acuerdo con esto tendríamos los siguientes segmentos o subseries:

U-238 +: U-238, Th-234, Pa-234m

U-234: U-344

Th-230: Th-230

Ra-226 +: Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214

Pb-210 +: Pb-210, Bi-210, Po-210

Por su parte en la serie del torio-232, se podría hablar de la existencia de tres segmentos, aunque debido a la relación entre períodos, los miembros de la misma suelen encontrarse en equilibrio secular.

Th-232: Th-232

Ra-228+: Ra-228, Ac-228

Th-228 +: Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)

Estos equilibrios parciales posibilitan la cuantificación de sus miembros haciendo uso de las emisiones gamma más intensas existentes en cada una de ellas.

Considerando todo lo comentado anteriormente, en la tabla 3.4 se señalan las energías de las líneas gamma utilizadas para cuantificar los radionucleidos naturales de interés, utilizadas en este proyecto.

El espectrómetro utilizado consta de un detector de Ge (Hp), de tipo coaxial de ORTEC, modelo GMX que opera a 2.500 V, con una eficiencia relativa para una energía de 1.332 keV del 19% y una resolución de 1,88 keV. El blindaje que lo rodea es de 10 cm de

plomo. El programa utilizado para realizar la adquisición y análisis de los espectros es el GammaVisión (v. 5.1), de ORTEC [9].

Tabla 3.4. Cuantificación de radionucleidos naturales mediante espectrometría gamma

Isótopo	Energía gamma (keV)	Intensidad (G/D) (%)	Para cálculo de
Th-234	63,3	4,47	U-238
Ra-226	186,2	3,50	Ra-226
Pb-214	351,9	37,1	Rn-222
	295,2	19,2	Ra-226
	609,3	46,1	Rn-222
Bi-214	1.120,3	15,0	Ra-226
	1.764,5	15,9	
Pb-210	46,5	4,05	Pb-210
Ac-228	911,2	26,6	Th-232
	969,0	16,2	Ra-228
Pb-212	238,6	43,6	Th-228
			Ra-224
Bi-212	727,3	6,65	Th-228, Ra-224
Tl-210	583,2	84,5	Th-228, Ra-224
U-235	185,71	57,2	U-235
	143,76	10,96	
K-40	1.460,73	11	K-40

2. Materiales cerámicos

Se presentan a continuación los materiales cerámicos objeto de la caracterización radiológica, atendiendo a su clasificación como:

- Materia prima.
- Producto intermedio.
- Producto final.

Esta clasificación no es rígida, ya que el producto final para una empresa puede ser la materia prima de otra.

En este apartado también se detallan las muestras analizadas.

2.1. Materias primas

Las materias primas se pueden separar en tres grandes grupos:

- Materias primas para la fabricación de pasta cerámica.
- Materias primas para la fabricación de fritas y esmaltes.
- Materias primas para la fabricación de colores o pigmentos cerámicos.

2.1.1. Pasta cerámica o pasta base

Se entiende por pasta base, la mezcla de materias primas, arcilla básicamente junto con otros componentes, que sirve como soporte en la fabricación de productos cerámicos conformados tradicionales: baldosas cerámicas (pavimentos y revestimientos), cerámica estructural (ladrillos y tejas), porcelanas y lozas (cerámica artística, vajilla, y sanitarios). Las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 indican los consumos relativos de materias primas en la fabricación de baldosas, sanitarios y porcelana de mesa, respectivamente.

Figura 3.3. Consumo relativo de materias primas en la fabricación de baldosas cerámicas

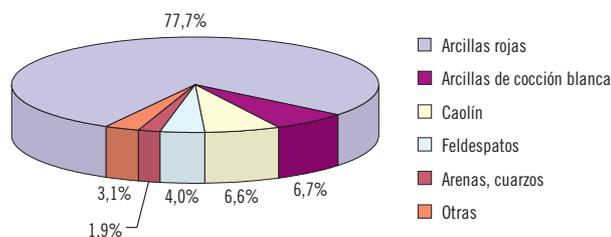


Figura 3.4. Consumo relativo de materias primas en la fabricación de sanitarios

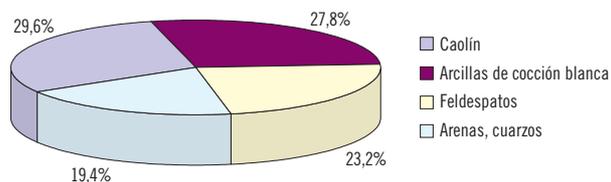
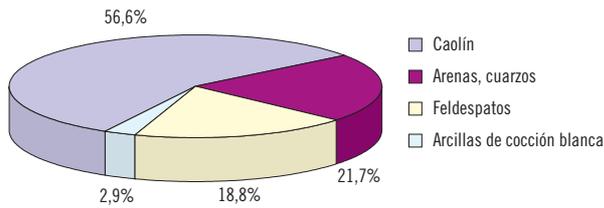


Figura 3.5. Consumo relativo de materias primas en la fabricación de porcelana de mesa



En este trabajo se han analizado las siguientes muestras:

- Arcilla de cocción blanca de Teruel.
- Arcilla de cocción blanca de Ucrania.
- Arcilla de cocción roja de Moró.
- Arcilla de cocción roja de Villar.
- Arcilla de cocción roja de Chulilla.
- Arcilla de cocción roja de Más Vell.
- Feldespato potásico de Segovia.
- Feldespato sódico de Turquía.
- Caolín español.
- Caolín inglés.

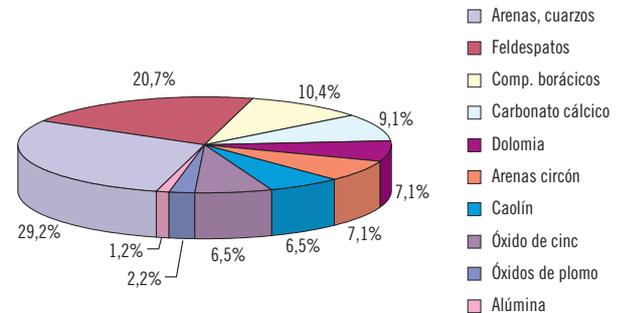
2.1.2. Fritas y esmaltes

En la formulación de las fritas y esmaltes, en cuya base está la sílice que se utiliza en forma de harina, intervienen un número importante de compuestos, cuya identidad y proporción, viene determinada por el tipo de frita fabricada. En la figura 3.6 se detallan los compuestos más utilizados.

De entre todos ellos, se han elegido para su análisis los siguientes:

- Sílice.
- Feldespato sódico.

Figura 3.6. Consumo relativo de materias primas en la fabricación de fritas y esmaltes



- Ácido bórico.
- Bórax.
- Colemanita C32.
- Colemanita C42.
- Fosfato bicálcico.
- Litargirio (óxido de plomo).
- Silicato de circonio (micronizado).
- Dolomita (carbonato cálcico-magnésico).
- Ulexita.
- Talco.

2.1.3. Pigmentos o colores cerámicos

Para la elaboración de pigmentos cerámicos se utilizan distintos productos químicos (óxidos, carbonatos, sulfatos...), que se mezclan en distintas proporciones para la obtención de los distintos colores. Algunos de ellos también se utilizan en la fabricación de fritas.

Se han analizado:

- Óxido de circonio (circona sintética).
- Óxido de cerio.
- Nitrato potásico.

2.2. Productos intermedios

Bajo esta denominación se agrupan todos aquellos materiales que se utilizan en las etapas intermedias de los procesos de fabricación de los productos cerámicos: baldosas, ladrillos, sanitarios...

Se pueden clasificar en:

- Atomizados.
- Fritas y esmaltes.
- Pigmentos.

2.2.1. Atomizados

Es el material resultante de la mezcla, molturación por vía húmeda, y secado de las materias primas que forman la pasta cerámica. Se han analizado los siguientes atomizados:

- Atomizado de pasta blanca para gres.
- Atomizado de pasta blanca para porosa.
- Atomizado de pasta roja para gres.
- Atomizado de gres porcelánico coloreado.
- Atomizado de gres porcelánico superblanco.

2.2.2. Fritas y esmaltes

Las fritas y esmaltes, constituyen los productos finales para las industrias que los fabrican, y forman parte del recubrimiento de la mayoría de productos cerámicos no estructurales. Para la fabricación de las denominadas fritas opacas se utiliza el silicato de circonio en forma de harina o micronizado, debido a las buenas propiedades opacificantes del mismo. Se han analizado los siguientes tipos de fritas:

- Frita transparente sin plomo.
- Frita opaca o blanca de circonio.
- Frita mate de bario.

- Frita mate de cal.
- Frita mate de cinc.

2.2.3. Pigmentos

Al igual que en el caso de las fritas, los pigmentos son los productos finales de las empresas que los fabrican, y generalmente se utilizan como parte de la composición de los esmaltes. Algunos pigmentos llevan en su composición óxido de circonio, generalmente sintético y obtenido químicamente a partir del silicato de circonio, aunque también pueden llevar silicato de circonio.

Los pigmentos se pueden clasificar en función del color que desarrollan (azul, negro...) y, de acuerdo al estudio del ITC, se han analizado los más frecuentemente utilizados en la industria cerámica:

- Pigmento coral (Zr).
- Pigmento amarillo (Pr, Zr, Si).
- Pigmento azul turquesa (V, Zr, Si).
- Pigmento azul cobalto (Co, Zn).
- Pigmento rosa (Cr, Sn, Si, Ca).
- Pigmento verde victoria (Cr, Si, Ca).
- Pigmento marrón (Ti, Cr, W).
- Pigmento negro (Fe, Cr).

2.3. Productos finales

Los productos finales analizados, abarcan prácticamente la totalidad de los tipos de productos cerámicos existentes en el mercado, de acuerdo al informe elaborado por el ITC. Los materiales analizados han sido:

- Revestimiento de pasta roja esmaltado con blanco de circonio.
- Revestimiento de pasta roja esmaltado.
- Pavimento de pasta roja esmaltado.

- Gres porcelánico estándar.
- Gres porcelánico superblanco.
- Gres porcelánico coloreado.
- Ladrillo.
- Teja.
- Sanitario.
- Vajilla.
- Tiesto.

3. Caracterización radiológica

Las muestras fueron tomadas y molidas por el personal del ITC. Una vez en el laboratorio, se secaron a 110 °C hasta peso seco constante, se tamizaron con un tamiz de 500 micras y se midieron en el detector de Ge (Hp), durante un tiempo de 60.000 segundos.

3.1. Materias primas

3.1.1. Serie del uranio-238 y uranio-235

La tabla 3.5 muestra las concentraciones de actividad e incertidumbre expandida ($k = 2$), obtenidas para las materias primas estudiadas de la serie del uranio-238, y en la que también se ha incluido el uranio-235. En el caso de no existir actividad, los resultados se presentan como menores al valor de la Actividad Mínima Detectable (AMD) correspondiente.

Las actividades de las materias primas que componen la *pasta cerámica*:

- Presentan valores para los isótopos naturales detectados correspondientes a la serie del uranio-238, estadísticamente iguales, considerando lógicamente en la comparación el valor de la incertidumbre, lo que supone la confirmación del equilibrio secular en esta.
- Todas las arcillas presentan valores para el uranio-238 superiores al promedio mundial de 35 Bq/kg, aunque del mismo orden. Las arcillas rojas, de uso

mayoritario, tienen valores de actividad por debajo de las arcillas blancas.

- Las muestras de feldespatos analizadas presentan muy poca actividad, menor en el caso del feldespato español que en el turco. Esta diferencia también se presenta en el caso de las muestras de caolín, siendo el inglés cinco veces más activo que el español.

Respecto a las actividades medidas en las materias primas que forman parte de las *fritas y esmaltes*, podemos decir que:

- Presentan valores de actividad inferiores a los componentes de la pasta cerámica, excepto para la muestra de micronizado de silicato de circonio, dos órdenes de magnitud por encima de esta, confirmando lo que se conocía al iniciar el proyecto.
- Algunas de las materias primas estudiadas (bórax, ácido bórico, colemanita C42 y ulexita), presentan un desequilibrio en la serie, puesto de manifiesto en la identificación y cuantificación del torio-234 y no de los radionucleidos de la subserie radio-226+. Todas ellas son sales de boro y tienen un origen común, ya que se encuentran en yacimientos sedimentarios de origen evaporítico continental, con un valor de actividad para el uranio-238 ligeramente inferior al promedio mundial. En todas ellas se ha identificado uranio-235.

En relación a las actividades medidas en las materias primas de los *pigmentos o colores cerámicos*, podemos decir que:

- De los tres estudiados, dos de ellos tienen valores de actividad por debajo del fondo. La circona u óxido de circonio es el único que tiene actividad.
- Aunque el óxido de circonio natural o baddeleyita, presenta actividades para los miembros de la serie del uranio-238 altos, el tratamiento químico para la obtención de esta circona sintética, a partir del silicato de circonio, rompe el equilibrio existente en el silicato, eliminando gran parte del contenido de radio del mismo, y consecuentemente de todos sus descendientes.

Tabla 3.5. Actividad e incertidumbre ($k = 2$) en Bq/kg para las muestras de materia prima. Serie U-238 y U-235

Muestra	Th-234	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-235
<i>Pasta cerámica</i>						
Arcilla de cocción blanca de Teruel	74 ± 30	83 ± 20	65 ± 5	68 ± 4	80 ± 18	3,6 ± 0,8
Arcilla de cocción blanca ucraniana	61 ± 18	75 ± 16	47 ± 3	50 ± 3	35 ± 20	2,6 ± 0,8
Arcilla de cocción roja Moró	54 ± 23	56 ± 19	47 ± 4	48 ± 3	43 ± 18	3,5 ± 0,9
Arcilla de cocción roja Vilar	80 ± 33	72 ± 20	58 ± 4	58 ± 4	74 ± 14	3,8 ± 0,9
Arcilla de cocción roja Chulilla	44 ± 19	40 ± 15	36 ± 3	39 ± 3	46 ± 19	2,6 ± 0,7
Arcilla de cocción roja Más Vell	42 ± 18	39 ± 14	31 ± 3	30 ± 2	31 ± 19	2,0 ± 0,7
Feldespato potásico de Segovia	< 14	< 20	3,4 ± 1,7	3,5 ± 1,6	< 20	< 1,0
Feldespato sódico de Turquía	30 ± 17	26 ± 12	28 ± 2	30 ± 2	< 16	1,4 ± 0,6
Caolín español	18 ± 13	27 ± 18	19 ± 2	16 ± 2	22 ± 19	< 1,6
Caolín inglés	111 ± 46	135 ± 37	107 ± 8	108 ± 7	130 ± 37	6,1 ± 1,5
<i>Fritas y esmaltes</i>						
Sílice	13 ± 11	< 17	10,1 ± 1,5	12,2 ± 1,6	12 ± 10	1,0 ± 0,6
Feldespato sódico	22 ± 12	18 ± 11	15,3 ± 1,7	16,2 ± 1,7	< 19	1,5 ± 0,6
Ácido bórico	26 ± 12	< 19	< 2,1	< 2,6	< 12,6	1,2 ± 0,6
Bórax	20 ± 11	< 16	< 1,9	< 2,4	< 12	1,3 ± 0,6
Colemanita C32	38 ± 16	25 ± 13	14 ± 2	11,5 ± 1,8	16 ± 9	1,9 ± 0,7
Colemanita C42	31 ± 15	< 19	< 2,2	< 2,7	< 13	1,3 ± 0,6
Fosfato bicálcico	< 10	< 16	< 1,8	< 2,2	< 23	< 1,7
Litargirio	< 4,8	< 6	< 0,6	< 0,8	19 ± 8	< 0,3
Silicato de circonio (micronizado)	1.464 ± 324	3.004 ± 355	3.948 ± 180	4.128 ± 132	609 ± 138	140 ± 24
Dolomita	31 ± 14	20 ± 10	22 ± 2	22 ± 2	29 ± 14	1,8 ± 0,5
Ulexita	10 ± 7	< 15	3,7 ± 1,4	2,1 ± 1,34	< 12	< 0,9
Talco	17 ± 11	< 20	11,2 ± 1,7	10,3 ± 1,8	18 ± 9	1,1 ± 0,8
<i>Pigmentos</i>						
Óxido de Zr (circona)	609 ± 138	< 140	64 ± 12	43 ± 6	< 47	154 ± 25
Nitrato potásico	< 24	< 25	< 2,6	< 3,4	< 33	< 1,4
Óxido de cerio	< 7,3	< 11	< 1,5	< 1,7	< 12	< 0,6

Tabla 3.6. Actividad específica medida (Bq/kg) y calculada a partir del Th-234, para el U-235

Valor medido	3,6	2,6	3,8	3,8	2,6	2,0	1,4	6,1	1,0
Valor calculado	3,4	2,8	2,5	3,7	2,0	1,9	1,4	5,1	0,6
	1,5	1,2	1,3	1,9	1,3	140	1,8	1,1	154
	1,0	1,2	0,9	1,7	1,4	67	1,4	0,8	28

Respecto al uranio-235, que se ha detectado en la mayoría de las muestras de materia prima analizadas, está presente en el uranio natural y la relación de actividades entre el uranio-235 y el uranio-238 es de 0,046. Si aceptamos que el uranio-238 se puede calcular sin ningún tipo de supuesto mediante la cuantificación del torio-234, y multiplicamos este valor por 0,046, la actividad calculada para el uranio-235 debería coincidir con el valor medido. En la tabla 3.6 se presenta el valor medido de uranio-235 y el calculado a partir del valor de actividad del torio-234, para las muestras analizadas en la tabla 3.5.

En esta tabla, se observa que los valores medidos son comparables a los calculados en la casi totalidad de las muestras analizadas, excepto en el caso de la muestra de silicato de circonio y de circona, con valores de 140 frente a 67 y 154 frente a 28, respectivamente. Las muestras de silicato y óxido, contienen circonio, elemento con un mayor número atómico que los elementos que componen las matrices de calibración utilizadas, que aumenta la autoabsorción de la muestra y cuyo efecto se pone de manifiesto sobre todo a energías bajas. Esto también podría explicar, en el caso del silicato de circonio, la diferencia entre las actividades encontradas para el radio-226 y sus descendientes el plomo-214 y el bismuto-214, estadísticamente no comparables y con valores de 3.000 ± 325 Bq/kg, 3.900 y 4.000, respectivamente. De igual modo explicaría las bajas actividades encontradas para el torio-234 y el plomo-210, y la aparente falta de equilibrio secular, equilibrio que es esperable en la mayor parte de los silicatos de circonio, debido a que los átomos de uranio y torio forman parte de una estructura cristalina que es difícilmente destructible [5,10].

3.1.2. Serie del torio-232 y potasio-40

En la tabla 3.7 se muestran las actividades e incertidumbres expandidas ($k = 2$), obtenidas para las materias primas estudiadas de la serie del torio-232, y para el potasio-40. En el caso de no existir actividad los resultados se presentan como menores al valor de la Actividad Mínima Detectable (AMD) correspondiente.

Las actividades encontradas en las muestras analizadas, y para todos los radionucleidos detectados de la serie del torio-232, son estadísticamente iguales, lo que supone la existencia de equilibrio secular entre todos los miembros de la serie. Respecto al valor de la actividad del talio-208, y considerando que el coeficiente de ramificación para este isótopo es del 36%, la actividad medida debía corresponderse con la de multiplicar el valor de la actividad del actinio-228 por 0,36. En la práctica totalidad de las muestras analizadas esto se cumple.

Los valores de actividad para el torio-232 en las materias primas de la pasta cerámica presentan, en su mayoría, valores por encima del promedio mundial calculado en 30 Bq/kg, con la excepción del feldespato potásico de Segovia con un valor de 9 ± 5 Bq/kg. El rango se sitúa entre los 88 Bq/kg de la arcilla de Teruel y los 39 Bq/kg correspondientes el caolín español. Respecto a las materias primas para fritas, la mayoría de las estudiadas tienen valores comparables al fondo ambiental, a excepción de las muestras de micronizado de silicato de circonio y circona, con valores alrededor de 20 veces el valor promedio mundial. A diferencia de lo que ocurría en la serie del uranio-238, los valores encontrados para los radionucleidos de la serie del torio-232 son del mismo orden en ambos compuestos, ya que el tratamiento químico al que se somete al silicato no ha eliminado los torios.

Tabla 3.7. Actividad e incertidumbre ($k = 2$) en Bq/kg para las muestras de materia prima. Serie Th-232 y K-40

Muestra	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208	K-40
<i>Pasta cerámica</i>					
Arcilla de cocción blanca de Teruel	88 ± 7	89 ± 5	89 ± 11	31 ± 2	457 ± 25
Arcilla de cocción blanca ucraniana	71 ± 5	73 ± 3	64 ± 10	27 ± 2	653 ± 31
Arcilla de cocción roja Moró	82 ± 7	84 ± 5	78 ± 13	30 ± 3	977 ± 46
Arcilla de cocción roja Vilar	70 ± 6	70 ± 4	70 ± 12	24 ± 2	1.227 ± 52
Arcilla de cocción roja Chulilla	58 ± 5	59 ± 4	59 ± 10	20 ± 2	992 ± 43
Arcilla de cocción roja Más Vell	43 ± 4	43 ± 3	43 ± 10	14 ± 2	808 ± 38
Feldespató potásico de Segovia	9 ± 5	6 ± 1	11 ± 10	3 ± 2	2.893 ± 92
Feldespató sódico de Turquía	31 ± 5	32 ± 2	30 ± 8	11 ± 1	86 ± 16
Caolín español	39 ± 4	33 ± 2	41 ± 10	11 ± 2	192 ± 25
Caolín inglés	81 ± 9	90 ± 6	87 ± 20	32 ± 3	482 ± 40
<i>Fritas y esmaltes</i>					
Sílice	9 ± 3	9 ± 1	14 ± 7	3,0 ± 1,3	99 ± 16
Feldespató sódico	24 ± 4	24 ± 2	27 ± 8	8,4 ± 1,3	< 28
Ácido bórico	< 3,7	< 1,4	< 12	< 1,3	< 32
Bórax	< 3,8	< 1,4	< 11	< 1,1	< 30
Colemanita C32	12 ± 3	10,8 ± 1,2	12 ± 8	3,2 ± 1,1	157 ± 20
Colemanita C42	< 4,3	< 1,5	< 13,4	< 1,4	< 34
Fosfato bicálcico	< 3,8	3,4 ± 0,8	< 11	1,5 ± 0,9	< 27
Litargirio	< 1,3	< 0,3	< 3,7	< 0,4	< 9,2
Silicato de circonio (micronizado)	702 ± 30	656 ± 24	669 ± 40	248 ± 10	< 47
Dolomita	< 3,7	< 1	< 8,7	< 1,1	< 23
Ulexita	< 4,3	1,3 ± 0,8	< 11	1,3 ± 1,2	< 28
Talco	< 4,1	< 1,5	< 13	< 1,5	< 33
<i>Pigmentos</i>					
Óxido de Zr (Circona)	599 ± 30	506 ± 21	507 ± 46	192 ± 12	74 ± 38
Nitrato potásico	< 9,1	< 2,1	< 24	< 1,8	12.285 ± 350
Óxido de cerio	< 2,7	< 0,8	< 7,4	< 0,9	< 20

Respecto a los valores de actividad encontrados para el potasio-40, los máximos se corresponden lógicamente con el nitrato potásico con 12.285 Bq/kg y el felde-

pato potásico con 2.893 Bq/kg, siendo el mínimo el de la circonia con 74 Bq/kg, no habiéndose encontrado valor superior a la AMD en el micronizado de silicato de

circonio. También encontramos valores altos en las materias primas para la fabricación de pastas cerámicas, superiores para las arcillas rojas (808-1.227 Bq/kg) que para las arcillas blancas (457-653 Bq/kg), mientras que en la mayor parte de las materias primas que se usan en la fabricación de fritas no se ha detectado.

En relación a la comparación con los valores encontrados en la bibliografía para las materias primas analizadas, existen abundantes referencias con respecto a las actividades para el silicato de circonio, y la muestra analizada presenta un valor incluido en el rango esperado para los mismos (1.000-5.000 Bq/kg de uranio-238 y 500-1.000 Bq/kg de torio-232) [6]. Sin embargo, existen pocos datos para el resto de materias primas. En la referencia [11], se analizaron 19 muestras de arcilla: se han encontrado para el radio-226 va-

lores entre 8,6 y 90,9 Bq/kg; para el torio-232 entre 5,2 y 113,4 Bq/kg y para el potasio-40 entre 316 y 1.104 Bq/kg; la mayor parte de las muestras analizadas están dentro de este rango. En la misma referencia se analizan tres muestras de caolín con valores similares a los encontrados para la muestra de caolín inglés.

3.2. Productos intermedios

3.2.1. Serie del uranio-238 y uranio-235

La tabla 3.8 muestra los valores de actividad obtenidos en los productos intermedios analizados para los radionucleidos de la serie del uranio-238 considerados y el uranio-235. En el caso de no existir actividad, los resultados se presentan como menores al valor de la Actividad Mínima Detectable (AMD) correspondiente.

Tabla 3.8. Actividad e incertidumbre ($k = 2$) en Bq/kg para los productos intermedios. Serie U-238 y U-235

Muestra	Th-234	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-235
<i>Atomizados</i>						
Gres pasta blanca	75 ± 31	74 ± 20	64 ± 5	64 ± 4	90 ± 15	4,7 ± 0,9
Porosa pasta blanca	53 ± 22	62 ± 17	42 ± 3	41 ± 3	62 ± 22	2,3 ± 0,8
Gres pasta roja	48 ± 21	74 ± 16	43 ± 3	46 ± 3	21 ± 22	2,8 ± 0,7
Gres porcelánico coloreado	45 ± 19	37 ± 13	32 ± 3	32 ± 2	49 ± 17	2,4 ± 0,6
Gres porcelánico superblanco	198 ± 76	225 ± 45	181 ± 13	197 ± 15	165 ± 23	13 ± 6
<i>Fritas</i>						
Cristalina o transparente sin plomo	25 ± 19	29 ± 10	21,5 ± 1,7	20,3 ± 1,8	< 16	0,7 ± 0,5
Opaca o blanco de circonio	338 ± 129	504 ± 95	465 ± 32	499 ± 32	229 ± 27	29 ± 8
Mate de bario	10 ± 7	18 ± 9	23 ± 2	22 ± 2	< 12	0,7 ± 0,5
Mate de cal	14 ± 7	9 ± 8	12,3 ± 1,4	13,5 ± 1,4	< 12	1,2 ± 0,4
Mate de zinc	12 ± 7	11 ± 7	12,7 ± 1,3	12,3 ± 1,2	< 11	0,5 ± 0,4
<i>Pigmentos</i>						
Coral circonio	649 ± 248	846 ± 159	743 ± 50	749 ± 45	36 ± 18	92 ± 12
Amarillo (Pr, Zr, Si)	555 ± 212	837 ± 157	759 ± 51	783 ± 43	38 ± 19	105 ± 10
Turquesa (Zr, Si, V)	634 ± 146	825 ± 95	849 ± 38	833 ± 29	47 ± 17	113 ± 13
Azul (Co, Zn)	36 ± 16	< 29	< 3,2	< 3,8	< 18	2,7 ± 0,9
Negro (Fe, Cr)	22 ± 11					1,3 ± 0,8
Rosa esfena (Cr, Sn, Si, Ca)	27 ± 11	< 16	8,9 ± 1,8	9,0 ± 1,4	16 ± 7	1,9 ± 0,5
Verde victoria (Cr, Si, Ca)	< 10	< 15	7,8 ± 1,6	7,6 ± 1,5	< 17	< 0,9
Marrón (Ti, Cr, W)	< 9,3	< 13	5,0 ± 1,0	5,2 ± 1,1	< 11,5	< 0,8

Todas las muestras de atomizados tienen actividades para los radionucleidos analizados que pueden considerarse estadísticamente iguales, es decir podemos suponer que la serie está en equilibrio. La actividad del uranio-235 corrobora la cuantificación del uranio-238 a partir del torio-234 y nos permite comparar este valor, tanto con el radio-226 como con el plomo-214 y el bismuto-214. Todas las muestras presentan valores, en el rango 32-64 Bq/kg, del orden del promedio mundial, a excepción del gres superblanco con un valor de 197 ± 15 Bq/kg. Estos valores significativamente mayores que el resto de los atomizados analizados son debidos a la incorporación de silicato de circonio a su pasta base.

En relación con las fritas y como era de esperar, la actividad de la que tiene en su composición silicato de circonio es un orden de magnitud superior al resto de las fritas analizadas, cuyos valores están por debajo del promedio mundial, presentando valores de actividad muy pequeños (rango 12-22 Bq/kg), como era de esperar considerando las actividades de las materias primas que las forman. Todas ellas, a excepción de la frita opaca o blanco de circonio, tienen valores de actividad para cada uno de los miembros de la serie estadísticamente iguales, es decir están en equilibrio secular.

En el caso de la frita opaca y de acuerdo con los resultados obtenidos, las actividades del radio-226, plomo-214 y bismuto-214 son estadísticamente iguales, lo que nos permite suponer el equilibrio en la subserie del radio-226 (radio-226 +). Sin embargo los valores para el torio-234 y el plomo-210 son significativamente inferiores a estos, lo que podría ser atribuible a una falta de corrección por composición, importante en este orden de energías.

De los ocho pigmentos analizados, hay tres que llevan en su composición óxido o silicato de circonio y que tal y como era de esperar presentan valores superiores a los otros, dos de ellos con valores similares al fondo (verde victoria y marrón), mientras que el resto, con un desequilibrio uranio/radio, tiene valores para el uranio-238 inferiores al promedio mundial. Los pigmentos que utilizan circonio en su composición, lo pueden hacer utilizando micronizado de silicato de circonio u óxido de circonio. Los tres estudiados presentan actividades similares de torio-234, radio-226, plomo-214 y bismuto-214, mientras que la actividad correspondiente al plomo-210 es mucho menor, lo que

parecería indicar una fuerte ruptura de equilibrio en la serie del uranio-238, en el último tramo de la misma.

3.2.2. Serie del torio-232 y potasio-40

En la tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos de los emisores gamma correspondientes a la serie del torio-232 y del potasio-40, para los productos intermedios analizados. En el caso de no existir actividad, los resultados se presentan como menores al valor de la Actividad Mínima Detectable (AMD) correspondiente.

Todas las muestras analizadas, a excepción de los pigmentos que no llevan circonio en su composición, tienen torio-232. También en este caso las actividades de los miembros de la serie analizados son estadísticamente iguales, incluidas las correspondientes al talio-208 corregidas por su coeficiente de ramificación.

De forma análoga a lo que ocurría para la serie del uranio-238, las actividades encontradas en los atomizados (rango 44-73 Bq/kg) son superiores a los de las fritas (rango 5-10 Bq/kg) con la excepción de la frita mate con un valor de 90 Bq/kg. La situación es también similar en el caso de los pigmentos, con cinco pigmentos comparables al fondo y los tres en cuya composición existe circonio, con valores similares para el pigmento coral y turquesa, de 250 Bq/kg y un poco superiores, de 314 Bq/kg para el amarillo. En este tipo de muestras se observa una proporción uranio/torio inferior a la que existe en el circonio micronizado y el óxido de circonio, pasando de 5,7 a 3, lo que podría indicar o bien el uso de un compuesto de circonio con una cantidad de monazita superior a la usual, o bien el uso de otro compuesto en la formulación que aportara el exceso de torio encontrado.

Respecto a los resultados obtenidos para el potasio-40, nos encontramos para los atomizados actividades inferiores a las de las materias primas que se encuentran en distinta proporción en su formulación, con valores que van desde los 385 Bq/kg del gres porcelánico coloreado a los 528 Bq/kg del gres de pasta blanca. Sin embargo, en el caso de las fritas estos valores son superiores y atribuibles a la presencia de algunos componentes con cantidades apreciables de potasio y consecuentemente de potasio-40. En cuanto a los pigmentos, todos a excepción del turquesa, con un valor de 709 Bq/kg, tienen valores del orden del fondo ambiental.

Tabla 3.9. Actividad e incertidumbre ($k = 2$) en Bq/kg para los productos intermedios. Serie Th-232 y K-40

Muestra	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208	K-40
<i>Atomizados</i>					
Gres pasta blanca	73 ± 6	74 ± 4	66 ± 11	26 ± 2	528 ± 30
Porosa pasta blanca	51 ± 5	53 ± 3	49 ± 10	18,9 ± 1,7	451 ± 28
Gres pasta roja	64 ± 5	64 ± 4	67 ± 10	22,3 ± 1,7	1.008 ± 48
Gres porcelánico coloreado	48 ± 4	47 ± 3	67 ± 10	22,5 ± 1,3	385 ± 24
Gres porcelánico superblanco	80 ± 6	78 ± 5	78 ± 11	28 ± 2	460 ± 27
<i>Fritas</i>					
Cristalina o transparente sin plomo	10 ± 3	8,5 ± 0,9	8 ± 7	3,4 ± 0,7	1.529 ± 54
Opaca o blanco de circonio	90 ± 7	92 ± 6	96 ± 14	34 ± 2	1.149 ± 53
Mate de bario	9 ± 3	7,0 ± 0,8	7 ± 6	2,8 ± 0,9	753 ± 37
Mate de cal	5 ± 2	5,2 ± 0,7	7 ± 6	1,7 ± 0,7	266 ± 19
Mate de zinc	6,1 ± 1,6	6,7 ± 0,7	8 ± 4	2,1 ± 0,6	373 ± 9
<i>Pigmentos</i>					
Coral circonio	252 ± 18	237 ± 14	231 ± 25	82 ± 6	42 ± 29
Amarillo (Pr, Zr, Si)	314 ± 21	281 ± 16	281 ± 24	102 ± 6	< 34
Turquesa (Zr, Si, V)	246 ± 13	242 ± 10	257 ± 21	94 ± 4	709 ± 36
Azul (Co, Zn)	< 6,9	< 2	< 1,8	< 1,9	< 46
Negro (Fe, Cr)					
Rosa esfena (Cr, Sn, Si, Ca)	< 4	2,2/0,7	< 9,8	< 1	< 25
Verde victoria (Cr, Si, Ca)	< 4	2,2/0,7	< 9,8	< 1	29 ± 16
Marrón (Ti, Cr, W)	5 ± 2	2,4 ± 0,7	< 9,4	< 3	< 22

En la bibliografía prácticamente no existen datos de actividad. En un documento publicado por la Agencia Internacional de Energía Atómica, OIEA, en 2007 [12], se indica, en relación con la actividad de las fritas, que dependiendo de su contenido en circón, tendrían un actividad para el uranio-238 entre 200 y 800 Bq/kg, mientras que para el torio-232, el rango esperado estaría entre 50 y 200 Bq/kg.

3.3. Productos finales

En las tablas 3.10 y 3.11, se muestran los resultados obtenidos para todos los emisores gamma considerados, correspondientes a los productos finales analizados. En el caso de no existir actividad, los resultados

se presentan como menores al valor de la Actividad Mínima Detectable (AMD) correspondiente.

Al igual que en las muestras anteriores se puede hablar de la existencia de equilibrio secular en ambas series, con concentraciones estadísticamente iguales.

En relación con el contenido de uranio-238 de los productos finales analizados, se observa, por una parte, un grupo con valores de actividad entorno a los 50 Bq/kg (tiesto, vajilla, teja y gres porcelánico estándar), otro correspondiente al grupo de productos finales esmaltados, con valores de actividad entorno a los 70 Bq/kg (pavimentos, revestimientos y sanitarios), un gres porcelánico coloreado con un valor ligeramente

superior y una muestra de gres porcelánico superblanco, con un contenido mayor de silicato de circonio, con un valor cercano a los 200 Bq/kg.

Los valores de actividad encontrados para los isótopos de la serie del torio-232 son más homogéneos. El 82% de las muestras analizadas se encuentran entre 55 y 69 Bq/kg; el valor máximo corresponde al gres porcelánico superblanco, con 80 Bq/kg; y el mínimo a la muestra de vajilla con 38 Bq/kg.

Respecto a los valores encontrados para el potasio-40, las muestras con más contenido en este isótopo son las

correspondientes a las baldosas de pasta roja, ladrillo, teja y tiesto, todas ellas fabricadas a partir de pasta roja, con valores similares a los encontrados para los atomizados del mismo tipo, y que se encuentran entre los 805 Bq/kg, correspondiente a la muestra de tiesto, y los 1.190 Bq/kg de la muestra de revestimiento esmaltado con blanco de circonio, valores que duplican el promedio mundial de 400 Bq/kg. El valor más pequeño se corresponde con la muestra de vajilla de 311 Bq/kg. Los valores del resto de las muestras de gres y el sanitario están comprendidos en el rango 450-562 Bq/kg y fabricados de acuerdo a estos valores con pasta base blanca.

Tabla 3.10. Actividad e incertidumbre ($k = 2$) en Bq/kg para los productos finales. Serie U-238 y U-235

Muestra	Th-234	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-235
Revestimiento de pasta roja esmaltado con blanco de Zr	89 ± 21	122 ± 21	85 ± 4	87 ± 3	48 ± 10	3,4 ± 0,8
Revestimiento de pasta roja esmaltado	84 ± 34	97 ± 24	78 ± 6	79 ± 4	73 ± 23	4,1 ± 0,9
Pavimento de pasta roja esmaltado	75 ± 30	72 ± 19	67 ± 5	66 ± 4	72 ± 22	3,9 ± 0,8
Gres porcelánico estándar	51 ± 21	77 ± 18	45 ± 3	47 ± 3	46 ± 18	1,8 ± 0,7
Gres porcelánico superblanco	186 ± 72	216 ± 43	195 ± 12	197 ± 9	172 ± 20	9,4 ± 1,1
Gres porcelánico coloreado	105 ± 42	106 ± 24	92 ± 7	92 ± 5	109 ± 22	4,9 ± 0,8
Ladrillo	57 ± 23	54 ± 15	44 ± 3	46 ± 3	38 ± 9	3,2 ± 0,7
Teja	70 ± 28	63 ± 17	52 ± 4	51 ± 3	54 ± 15	3,1 ± 0,7
Sanitario	96 ± 38	63 ± 18	70 ± 5	70 ± 4	78 ± 12	5,8 ± 0,8
Vajilla	54 ± 22	63 ± 16	50 ± 4	52 ± 3	60 ± 16	2,7 ± 0,7
Tiesto, chamota	93 ± 38	65 ± 19	53 ± 5	50 ± 4	55 ± 17	4,5 ± 0,9

En cuanto a los valores referenciados en la bibliografía, nos encontramos con numerosos trabajos en los que se dan valores de actividad específica para las muestras de baldosas y ladrillos, en relación a su uso como materiales de construcción, ya que tanto con anterioridad a la publicación de la directiva europea del año 1996, como con posterioridad, se publicaron por parte de organismos internacionales documentos que consideraban el impacto radiológico de estos materiales sobre el público [13, 14].

Los valores encontrados en la muestra de ladrillo, se hallan dentro del rango observado al analizar distintas muestras de ladrillo en la referencia [15] con valores de 12-60 Bq/kg para el radio-226; 8-73 Bq/kg para el torio-232 y 160-773 Bq/kg para el potasio-40. De forma análoga y, en la misma referencia, nos encontramos para las baldosas los rangos: 40-230 Bq/kg, 10-130 Bq/kg y 80-600 Bq/kg, respectivamente, sin indicar el tipo de baldosa que se ha analizado. Sí se observan diferencias entre las baldosas esmaltadas y no,

en la referencia [16], con valores para el radio-226 superiores a 100 Bq/kg. También, y de forma clara, se observan [17] diferencias entre las baldosas fabricadas con atomizados tradicionales y aquellas que lo hacen con gres porcelánico, y que pueden incluir silicato de circonio en su formulación, tal y como ocurre en nuestro estudio. Así, en la referencia anteriormente men-

cionada, para los atomizados porosos, los rangos encontrados son: 36-87 Bq/kg para el radio-226, 36-86 Bq/kg para el torio-232 y 411-996 Bq/kg para el potasio-40. En el caso de los porcelánicos los rangos encontrados fueron: 20-708 Bq/kg, 33-145 Bq/kg y 158-850 Bq/kg, respectivamente. Rangos en los que están incluidas las muestras de baldosas analizadas.

Tabla 3.11. Actividad e incertidumbre ($k = 2$) en Bq/kg para los productos finales. Serie Th-232 y K-40

Muestra	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208	K-40
Revestimiento de pasta roja esmaltado con blanco de Zr	67 ± 6	67 ± 3	67 ± 9	$23,9 \pm 1,7$	1.190 ± 41
Revestimiento de pasta roja esmaltado	66 ± 6	67 ± 3	67 ± 11	24 ± 2	937 ± 42
Pavimento de pasta roja esmaltado	67 ± 5	70 ± 4	63 ± 10	24 ± 2	952 ± 41
Gres porcelánico estándar	55 ± 5	57 ± 3	50 ± 9	$19,7 \pm 1,5$	450 ± 24
Gres porcelánico superblanco	80 ± 6	81 ± 5	78 ± 11	28 ± 2	461 ± 27
Gres porcelánico coloreado	68 ± 5	67 ± 4	63 ± 10	23 ± 2	488 ± 28
Ladrillo	57 ± 5	54 ± 3	57 ± 9	$19,3 \pm 1,6$	1.012 ± 42
Teja	62 ± 6	63 ± 4	64 ± 11	23 ± 2	1.181 ± 48
Sanitario	65 ± 6	68 ± 4	68 ± 10	24 ± 2	562 ± 29
Vajilla	38 ± 4	40 ± 3	38 ± 8	$13,9 \pm 1,4$	311 ± 20
Tiesto, chamota	69 ± 6	71 ± 4	72 ± 12	23 ± 2	805 ± 40

METODOLOGÍA PARA
LA REALIZACIÓN DEL
ESTUDIO RADIOLÓGICO



4

La realización del estudio radiológico puede definirse como la consecución de una serie de etapas. A continuación se van a detallar las que se han considerado en este proyecto y que se van a aplicar a las tres empresas estudiadas.

1. Etapa 1. Descripción de la actividad industrial

El titular de la empresa deberá abordar el estudio, realizando, en primer lugar, una descripción de la actividad industrial que realiza indicando la naturaleza de las materias primas con las que trabaja y la cantidad anual que consume.

2. Etapa 2. Descripción de los procesos de producción

En esta etapa se describirán con detalle todos los procesos industriales que se realizan en la planta, detallando cada una de las etapas de las que conste y señalando la existencia de productos intermedios, si los hubiera, y los residuos originados en cada etapa.

3. Etapa 3. Caracterización radiológica del término fuente

Se entiende por término fuente todo material que pueda suponer un riesgo radiológico externo o interno, tanto para los trabajadores de la empresa como para los miembros del público que vive en los alrededores de la misma. Desde este punto de vista, se deberá conocer el contenido radiológico de:

- Materias primas.
- Productos intermedios, si los hubiera.
- Productos finales.
- Residuos.
- Material en suspensión.

Esta caracterización radiológica, dadas las particularidades de las actividades industriales y tal y como se ha puesto de manifiesto en el punto 3, consiste en la cuantificación de radionucleidos naturales de la serie

del uranio-238 y del torio-232, junto con el potasio-40. De acuerdo con esto, en la práctica totalidad de materiales cerámicos utilizados en las empresas estudiadas, se puede suponer que las series están en equilibrio secular, por lo que la cuantificación de los progenitores de las mismas puede realizarse mediante un análisis isotópico gamma, utilizando un detector de germanio hiperpuro Ge (HP), y a través de las emisiones de bismuto-214 y plomo-214 en el caso del uranio-238, y de las emisiones de actinio-228 para el torio-232. También se cuantificará el contenido de potasio-40, a través del fotón gamma de 1.460,75 keV.

Puede ser interesante para algunos tipos de muestras, como los filtros de partículas utilizados para evaluar la concentración de material en suspensión, realizar una medida de la actividad alfa total y beta total. La actividad alfa total, cuantifica la totalidad de emisores alfa existentes en la muestra, como si fueran americio-241 (Am-241), mientras que la actividad beta total lo hace con los emisores beta de la misma, pero el radionucleido respecto al que se cuantifican es el estroncio-90 en equilibrio con itrio-90.

4. Etapa 4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo

Teniendo en cuenta las etapas de las que se compone el proceso de producción, convenientemente detalladas en la etapa 2, se pueden definir distintos espacios de trabajo, que puedan ser considerados como radiológicamente homogéneos en función del término fuente y que van a definir las distintas zonas de exposición.

En cada zona de exposición se detallará que tipo de vía de exposición ha de ser evaluada. Las vías de exposición para estimar la dosis impartida a los trabajadores se clasifican en:

- Irradiación externa.
- Irradiación interna:
 - Inhalación de polvo.

- Ingestión.
- Inhalación de radón.
- Contaminación de la piel.

También y en esta etapa se deben definir los puestos de trabajo que existen en la fábrica y las tareas que desarrollan, así como, aproximadamente, los tiempos de permanencia o factores de ocupación, en cada una de las zonas de exposición consideradas.

5. Etapa 5. Evaluación de dosis al trabajador

La dosis efectiva anual debida a cada radionucleido se calculará para cada una de las vías de exposición, sumándose posteriormente los valores encontrados para cada uno de los radionucleidos considerados.

Así, y de acuerdo con el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI) [2], el cálculo de la dosis efectiva anual (E) recibida por los trabajadores de la fábrica se realizará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E = E_{externa} + \sum_j b(g)_{j,ing} \cdot J_{j,ing} + \sum_j b(g)_{j,inb} \cdot J_{j,inb}$$

donde:

$E_{externa}$ es la dosis efectiva debida a la exposición externa recibida durante un año.

$\sum_j b(g)_{j,ing} \cdot J_{j,ing}$ es la dosis efectiva comprometida por ingestión incorporada durante un año.

$\sum_j b(g)_{j,inb} \cdot J_{j,inb}$ es la dosis efectiva comprometida por inhalación incorporada durante un año.

siendo:

$b(g)_{j,inb,ing}$ las dosis efectivas comprometidas por unidad de incorporación por inhalación e ingestión para el radionucleido j , ($Sv \cdot Bq^{-1}$) para un individuo adulto, tomadas del RPSRI.

$J_{j,inb,ing}$ las actividades (Bq) incorporadas al organismo durante un año vía inhalación o ingestión para el radionucleido j .

Los dos últimos sumandos de la ecuación anterior constituyen lo que se conoce como dosis interna.

El sumatorio estará extendido a todos los radionucleidos de las series naturales del uranio-238 y del torio-232, además del potasio-40.

5.1. Evaluación de la dosis externa

La dosis externa es la que recibe un trabajador por el hecho de situarse en un campo de radiación, es decir en las inmediaciones de una fuente radiactiva, y está asociada fundamentalmente a las emisiones gamma de la fuente.

Existen códigos de cálculo que se utilizan para estimar la dosis externa producida por fuentes volumétricas que son las existentes en las actividades industriales, basados en la teoría del “kernel puntual” entre los que pueden citarse el Microshield y el QAD [18, 19]. Estos programas permiten realizar los cálculos para las geometrías más frecuentes: cilindros, conos, etc., a los que se pueden aproximar las fuentes volumétricas de la fábrica.

También, y de forma alternativa al cálculo mediante códigos numéricos, las dosis externas pueden ser medidas de forma relativamente simple, si se dispone de los equipos adecuados para hacerlo.

La tasa de dosis (dosis/unidad de tiempo) puede medirse con un monitor de radiación adecuado al tipo de partículas y energía de las mismas, emitidas por la fuente. Esta medida es puntual y se debe hacer un número adecuado de ellas para poder cuantificarla adecuadamente.

Es probablemente más conveniente el uso de dispositivos que midan la dosis suministrada en un determinado lugar, o a un determinado trabajador, durante un tiempo determinado, es decir conocer la dosis integrada. Esto puede realizarse de diversa maneras, siendo una de las más usuales la realizada mediante dosímetros de termoluminiscencia (dosímetros TLD). Así, para una fábrica

con un proceso de fabricación estable, como son las consideradas en este proyecto, puede ser conveniente realizar medidas integradas mensuales, en las distintas zonas que por sus características físicas permitan esperar valores y dosis diferentes. Puede ser también conveniente, en función de los datos obtenidos, considerar la posibilidad de suministrar dosímetros a los trabajadores.

De esta manera, podrán caracterizarse desde el punto de vista radiológico tanto las distintas zonas de trabajo como los puestos de trabajo. Sería conveniente realizar estas medidas al menos durante tres meses con el fin de verificar que se han caracterizado convenientemente lugares y puestos de trabajo.

Se realizará una estimación de dosis externa por zona de exposición y puesto de trabajo.

5.2. Evaluación de la dosis interna

Se entiende como dosis interna, la dosis producida por la incorporación al organismo (inhalación o ingestión, fundamentalmente) de un determinado radionucleido.

Así la dosis interna se calculará mediante la expresión:

$$E_{\text{int}} = \sum_j b(g)_{j,\text{ing}} \cdot J_{j,\text{ing}} + \sum_j b(g)_{j,\text{inh}} \cdot J_{j,\text{inh}}$$

donde los coeficientes de dosis $b(g)_{j,\text{inh,ing}}$ (Sv/Bq) son los existentes en el RPSRI para cada uno de los radionucleidos considerados.

De todas las vías de incorporación señaladas en la etapa 4, y debido a las características de los procesos de fabricación del sector industrial estudiado, solo se va a considerar la vía de incorporación por inhalación. Para evaluar la dosis se ha utilizado el coeficiente de dosis correspondiente a la clase "S", es decir de "tasa de absorción lenta en pulmón". Si esta no estuviera disponible, se utilizaría la "M" (tasa de absorción moderada en pulmón).

El cálculo de la actividad anual incorporada por inhalación (Bq/año) para cada radionucleido se realizará mediante la siguiente expresión, tal y como se indica en el documento de la Unión Europea, *Radiation Protection*, 107 [5]:

$$J_{j,\text{inh}} = A_j \cdot c_{\text{polvo}} \cdot r_{\text{inh}} \cdot t_{\text{inh}} \cdot p_{\text{inh}}$$

donde:

A_j : concentración del radionucleido j (Bq/g).

c_{polvo} : concentración de polvo en aire (g/m^3).

r_{inh} : tasa de inhalación (m^3/h).

t_{inh} : tiempo que está el trabajador expuesto a estas condiciones ($\text{h}/\text{año}$).

p_{inh} : factor de reducción de dosis, relativo al uso de cualquier protección respiratoria (igual a 1 en el caso más desfavorable).

La concentración del radionucleido puede medirse directamente, realizando un análisis isotópico sobre el filtro de partículas de polvo muestreado, o trabajar para su cálculo con la concentración del radionucleido que existe en el material presente en la zona. Este segundo supuesto es el que se ha considerado en las tres empresas estudiadas.

La exposición al polvo en los ambientes laborales está regulada por la normativa de higiene industrial. La medida de polvo inhalable o respirable es una magnitud controlada por todas las empresas a través de las mutuas laborales. Esta medida suele estar asociada con puestos de trabajo y en ocasiones con secciones de la empresa. Esta información puede ser de utilidad para realizar el cálculo de la dosis interna y, de acuerdo con la bibliografía [20], su evaluación ha de realizarse con la información de la concentración de polvo ambiental o inhalable. Sin embargo, no todas las empresas tienen información de concentraciones inhalables por puestos de trabajo o sección. Así pues es conveniente que se realicen muestreos ambientales en distintas condiciones para caracterizar las diferentes zonas de exposición en las que se ha dividido la planta. La concentración de polvo ambiental en todos los casos se ha obtenido mediante el uso de una bomba de aspiración situada en un determinado punto de cada una de las zonas estudiadas, siendo el tiempo de muestreo el adecuado para que el filtro no se colmatara.

La tasa de inhalación considerada es de 1,25 m³/h (ICRP, persona referencia).

El tiempo de exposición considerado es de 2.000 h/año y no se han considerado factores de reducción de dosis individuales, como puedan ser las mascarillas.

Se realizará una estimación de dosis interna por zona de exposición y puesto de trabajo.

5.3. Evaluación de la dosis total

Para conocer la dosis efectiva anual, se procederá a la suma de la dosis interna anual y la dosis externa anual. Si el valor obtenido supera el valor de 1 mSv, dosis límite de acuerdo al RPSRI para los miembros del público, se revisarán los supuestos enunciados y de acuerdo con el regulador se decidirán las acciones a realizar.

6. Etapa 6. Evaluación de dosis al público

Las actividades industriales consideradas producen efluentes gaseosos (gases y partículas de polvo) que se emiten en mayor o menor proporción a la atmósfera, y efluentes líquidos que pueden ser evacuados al medio hídrico.

A causa de las progresivas exigencias restrictivas, con carácter general a las emisiones ambientales de las industrias, las emisiones atmosféricas son moderadas y prácticamente inexistentes en las fábricas modernas. Por otra parte, la mayoría de las empresas del sector reciclan los líquidos, de forma que estas emisiones son prácticamente nulas.

Así, considerando que, prácticamente, no existen emisiones al medio y el orden de concentración de actividad de los materiales utilizados, es poco probable que exista riesgo radiológico para el público.

Sin embargo, en orden a confirmar esta suposición, se ha utilizado el programa de evaluación de impacto radiológico ambiental PC CREAM [21], que fue desarrollado por la Unión Europea y es una implementación al ordenador personal, del programa

CREAM (*Consequences of Releases to the Environment: Assessment Methodology*) [22]. Este programa, en su versión de 1998, ha sido utilizado en un documento publicado por la Unión Europea [23], relativo al control de efluentes de industrias NORM.

El PC CREAM realiza una estimación de dosis individual y colectiva, haciendo uso de una serie de modelos matemáticos para simular la transferencia de radionucleidos al ambiente. Considera emisiones a la atmósfera y al medio hídrico (ríos y mar). Incorpora ficheros de población, meteorológicos y de hábitos de consumo para una serie de poblaciones de Europa, y tiene la opción de modificarlas y adaptarlas al punto de emisión que se quiera evaluar. El programa está diseñado para la evaluación de descargas continuas. Los valores de dosis que calcula el programa están en $\mu\text{Sv/año}$.

Debido a la naturaleza de las emisiones de las empresas objeto de estudio, solo se va a considerar la emisión de efluentes a la atmósfera. Esta emisión contempla las siguientes vías de exposición:

- Inhalación.
- Exposición externa debida a la nube (gamma y beta).
- Exposición externa debida al suelo (gamma y beta).
- Resuspensión.
- Ingestión de alimentos:
 - Carne de vaca.
 - Leche de vaca y productos lácteos.
 - Carne de cordero.
 - Fruta.
 - Cereales.
 - Vegetales verdes.
 - Vegetales cuya raíz sea comestible.

No está contemplada la vía de ingestión debida al agua potable potencialmente contaminada como consecuencia de la emisión atmosférica, ni al consumo de peces. Sin embargo, y de acuerdo con el apéndice F del documento *Radiation Protection*, 135 (RP 135), estas vías no contribuyen de forma significativa a la dosis final calculada.

Los factores de transferencia suelo-planta y de retención del suelo, para cada radionucleido considerado, son los que aparecen por defecto en las bases de datos del programa.

El cálculo de la dosis se extiende a todos los miembros de las series del uranio-238 y del torio-232. Respecto a la dosis debida al potasio-40, no se van a considerar las distintas vías de ingestión a través de los alimentos ya que la concentración de potasio (y consiguientemente de potasio-40) en el cuerpo está controlada metabólicamente por el organismo y permanece constante. De hecho, el PC CREAM no tiene valores para este radionucleido relacionados con la deposición vía atmosférica del mismo en el suelo y de transferencia a suelo-plantas.

Para poder ejecutar el programa tenemos que:

1. Conocer las emisiones a la atmósfera (Bq/año).

Para su cálculo es necesario:

- Realizar estudios isocinéticos para conocer la concentración (mg/m^3) y el caudal de emisión (m^3/s) de los efluentes a la atmósfera. Estos estudios presentan dificultades importantes para su realización por parte de un laboratorio de radiactividad ambiental. Sin embargo, la concentración de emisión de partículas al medio ambiente está regulado y las industrias suelen disponer de estos valores.
- Conocer la actividad del término fuente, es decir la concentración de actividad para cada uno de los radionucleidos (Bq/mg) emitidos al ambiente. Esto puede realizarse bien por la medida del residuo existente en los filtros de retención o, de forma más sencilla, suponiendo que las emisiones desde el punto de vista radiológico se corresponden con los materiales que generan di-

chos residuos, siempre que el proceso que los genere no altere la composición de dicho material desde un punto de vista radiológico.

El cálculo de las emisiones a la atmósfera realizado en este proyecto, hace uso de los datos de emisión suministrados por las empresas y las actividades específicas de los materiales que generan dichas emisiones.

2. Conocer la altura de la emisión. Este dato es muy importante, por el efecto estela de la nube radiactiva, y es suministrado por la empresa.
3. Introducir, si se conoce, la composición de la rosa de los vientos en el punto de emisión considerado. En caso de que no se disponga de ella, se utilizará una de las que están en el programa por defecto.
4. Valorar la ubicación del terreno en el que tiene lugar la emisión, en relación al número de obstáculos que encuentra la nube en su dispersión. El PC CREAM permite realizar la estimación para áreas abiertas o entornos urbanos. Así, se valoran de forma distinta las empresas ubicadas en polígonos industriales cercanos a viviendas o aislados.
5. Introducir hábitos de consumo de alimentos. El consumo puede ser medio o crítico. Hay valores por defecto pero el usuario puede cambiarlos en función de los hábitos de la zona. También está la posibilidad de elegir qué parte del consumo es de productos locales o traídos desde otra zona. Esto es muy importante y, de acuerdo al documento RP 135, en este trabajo se ha considerado que la fracción local es del 50%. También para este proyecto se ha supuesto que los valores de consumo para las vías de ingestión consideradas va a ser el promedio de los existentes por defecto, excepto para los dos tipos de alimentos más consumidos que se seleccionarán como críticos.
6. Elegir el tipo de individuo sobre el que se va a realizar la estimación. El PC CREAM diferencia entre tres: "infant" (bebés), "child" (niños) y adultos. De acuerdo con el RPSRI [3] cada grupo tiene distintos coeficientes de dosis por inhalación e ingestión.

En el presente trabajo se ha valorado las dosis para un bebé (grupo crítico) y un adulto.

7. Elegir la distancia a la que se evaluará la dosis (*receptor points*). Esta variable tiene una limitación en el programa ya que la distancia de cálculo mínima es de 100 m. En este trabajo se considerarán las distancias de 100, 500 y 1.000 m.
8. Introducir índices de ocupación en relación al tiempo que pasa en cada uno de los puntos de recepción considerados, diferenciando entre dentro y fuera de la vivienda. En los cálculos realizados tomaremos como tiempo de permanencia (horas) en los puntos de recepción considerados, para el bebé el 100% de horas y para el adulto el 50%; es decir, se ha asumido que el adulto no trabaja donde vive. Respecto a la fracción de tiempo que pasan dentro de la vivienda, para ambos se ha supuesto el 90%.

9. Introducir los factores de transferencia suelo-planta y de retención del suelo, para cada radionucleido. El programa tiene unos por defecto realizados para una determinada zona y determinados radionucleidos. Aquí de nuevo el usuario tiene la posibilidad de adecuarlo a su problema, si dispone de estos parámetros en su zona de estudio. En este trabajo se tomaron los factores por defecto.

Debido a la parte de datos que se van a tomar por defecto y al uso de modelos de transferencia conservadores, las dosis calculadas se pueden considerar mayorantes, por lo que su valor nos puede indicar si realmente existe o no impacto al obtener los valores de dosis. Si ese está alejado del límite (por ejemplo, 1 o 2 órdenes de magnitud inferiores) no se considerará necesario mejorar el modelo. Si por el contrario el valor obtenido es del orden del límite de dosis será necesario adecuar de la forma más realista posible el modelo, introduciendo todas aquellas variables locales de importancia.

ESTUDIO RADIOLÓGICO
DE UNA PLANTA MOLTURADORA
DE ARENAS DE CIRCONIO



5

1. Actividad industrial

Industria que se dedica exclusivamente a la molienda de arena de circonio (silicato de circonio) o circón para reducir el tamaño de sus partículas y que obtiene como productos finales harina y micronizado de circonio, prácticamente en la misma proporción. Lleva a cabo esta actividad molturando la arena de circonio por dos procesos distintos: molturación por vía seca y molturación por vía húmeda.

La empresa procesa grandes cantidades de circón que convierte en su totalidad en productos finales, y no existen residuos sólidos. Sus principales clientes son la industria cerámica, esencialmente las industrias de fritas y esmaltes, así como los fabricantes de atomizados de gres porcelánico.

Consta de una gran nave en la que están claramente separadas las zonas de: almacenamiento de materia prima, molienda seca, molienda húmeda y expedición del producto acabado.

Muchos de los procesos están automatizados por lo que se requiere un pequeño número de empleados [20] que trabajan en tres turnos/día de forma continua, excepto en paradas programadas por vacaciones.

2. Procesos

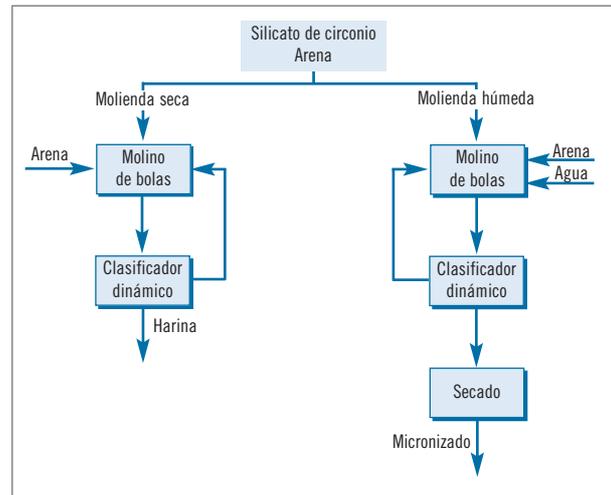
Se detallan a continuación las distintas etapas del proceso de fabricación.

2.1. Recepción y almacenamiento de la materia prima

Las arenas llegan a la empresa por carretera, en camiones, y se descargan mediante cintas transportadoras en los silos de almacenamiento, donde permanecen hasta su uso. La empresa utiliza como materia prima arenas de circonio de procedencia mayoritariamente australiana, aunque también de Sudáfrica. Durante el año 2005 se procesaron 40.500 toneladas. La arena utilizada era un 70% de origen australiano (arena 1 y 2) y un 30% de origen surafricano.

Durante el almacenamiento y su uso en los distintos procesos no se diferencia entre un tipo u otro de arena.

Figura 5.1. Esquema de los procesos de fabricación



2.2. Transporte de la materia prima a la zona de molienda

El transporte de la materia prima a los molinos se realiza mediante el uso de una pala mecánica de cabina abierta conducida por un operario que la va depositando en las tolvas de alimentación de los molinos. En esta operación se libera una cantidad considerable de polvo.

2.3. Molienda seca

La zona de molienda seca consta de dos molinos de bolas de alúmina que van convirtiendo la arena en partículas más finas. El funcionamiento de uno de ellos o de los dos simultáneamente está relacionado con la demanda de este tipo de producto. Debido a las características del proceso, como producto final se obtiene “harina de circonio”, un silicato de circonio compuesto por partículas de diámetro inferior a 70 micras y de 13 micras de diámetro como media.

Junto a la molienda también se realiza el ensacado manual de la harina en sacos de 25 kg y el semiautomático en sacos o *big bag* de 1.000 kg. La parte principal de la producción de harina se deposita en un silo y posteriormente se envasa a granel, mediante carga automática, en camiones. Esta carga libera polvo en el exterior de la planta.

En esta zona se observan partículas de polvo en suspensión cuando los molinos están en marcha, que se incrementa en el momento de la carga de las tolvas de alimentación de los mismos.

2.4. Molienda húmeda

El proceso de molienda húmeda se utiliza en la fábrica para obtener silicato de circonio muy fino (< 5 micras), llamado también micronizado. Este proceso consta de varias etapas que se describen brevemente a continuación.

2.4.1. Molturación de la arena de circonio

La fábrica tiene 10 molinos húmedos que molturan el silicato de circonio mediante la mezcla de la arena con agua en presencia de piedras de sílice. Este proceso da lugar a una suspensión acuosa o “lechada”, con un elevado contenido en agua y silicato de circonio.

2.4.2. Clasificación y decantación

La lechada pasa a un depósito para su clasificación. En esta etapa se separan las partículas finas (partículas de tamaño inferior a 5 micras), que continúan el proceso, de las gruesas, que tienen todavía un tamaño excesivo y por tanto vuelven a la etapa de molturación.

En la etapa de decantación, se elimina la mayor parte del agua, para favorecer el proceso de secado.

La decantación se realiza de dos formas:

- Decantación química. Se lleva a cabo en una decantadora. Se añaden sulfato de aluminio y un polielectrólito (floculantes) a la lechada de finos para favorecer la decantación.
- Centrifugación. A la lechada de finos, se le añade sulfato de aluminio (para favorecer la floculación) y carbonato sódico (para evitar que las partículas se “peguen” a la centrifugadora).

Tras eliminar la mayor cantidad de agua posible, la lechada está ya lista para pasar a la siguiente etapa de secado.

En esta etapa se genera un residuo líquido, parte del cual vuelve al molino como agua de proceso y el resto se vierte al alcantarillado público.

2.4.3. Secado

Se realiza mediante unos rodillos que eliminan el resto de agua, hasta obtener el “micronizado” completamente seco. En esta etapa existe una salida de vapor de agua junto con materia particulada que se emite al exterior por chimenea.

2.4.4. Ensacado

Después del secado, el producto se ensaca manualmente en sacas de 25 kg y semiautomáticamente en sacas de 1.000 kg. También existe la posibilidad de envasado a granel, aunque esta última opción es en este caso minoritaria. Durante el ensacado manual se liberan cantidades importantes de polvo al medio.

2.5. Almacenamiento del producto acabado

Después del ensacado, y mediante unas palas transportadoras, los productos acabados se almacenan en palets de 1 m³ de volumen, en un gran espacio, hasta su expedición.

3. Caracterización radiológica del término fuente

De acuerdo a los procesos descritos en el apartado 2, se han identificado los siguientes materiales para informar sobre su forma física y química y realizar el estudio radiológico:

- Materias primas: arenas de circonio de distinta procedencia.
- Producto intermedio: lechadas (suspensión acuosa en depósitos).
- Productos finales: harina y micronizado de silicato de circonio.
- Material en suspensión.
- Radón.

- Agua de decantación.
- Filtros de salida de los secaderos.

Para poder llevar a cabo el estudio radiológico de estos materiales debe realizarse una adecuada toma de muestras. La toma de muestras se realizó a lo largo de seis meses. Parte de las muestras fueron suministradas por el personal de la empresa como las materias primas, los productos intermedios y finales; mientras que el laboratorio realizó la toma de material en suspensión y de radón.

3.1. Materias primas

La arena de silicato de circonio está clasificada como arena de mineral pesado con una densidad aparente de 3,5 g/cc. En la tabla 5.1. se muestran los resultados obtenidos para los distintos tipos de arena que compra la empresa.

Tabla 5.1. Actividad específica (Bq · kg⁻¹) en muestras de materia prima

Material	U-238	Th-232	K-40
Arena sudafricana	3.615 ± 124	604 ± 33	< 74
Arena australiana-1	2.681 ± 93	597 ± 5	< 69
Arena australiana-2	3.159 ± 108	714 ± 37	< 71

Tabla 5.2. Características físicas y actividad específica (Bq · kg⁻¹) de las lechadas

	Densidad (g/cm ³)	Composición (% peso)		Actividad (Bq · kg ⁻¹)		
		ZrSiO ₄	H ₂ O	U-238	Th-232	K-40
Mezcla 1	2,1	68,1	31,9	1.855 ± 74	456 ± 27	< 76
Mezcla 2	1,22	24,9	75,1	567 ± 27	168 ± 19	< 53

Tabla 5.3. Actividad específica (Bq · kg⁻¹) en muestras de producto acabado

Material	U-238	Th-232	K-40
Micronizado	3.134 ± 104	592 ± 37	< 110
Harina	2.908 ± 101	607 ± 34	< 99

3.2. Productos intermedios

Los únicos productos intermedios del proceso de molienda son los que resultan de la molturación húmeda de la arena. Así, se realizaron medidas de dos muestras de la suspensión acuosa (lechadas) que se encuentra en los depósitos. Los resultados se muestran en la tabla 5.2.

Ambas suspensiones, con diferente contenido en agua, tienen, como era de esperar, actividades inferiores al silicato de circonio y son mayores en la mezcla con menor contenido de agua; existe una correlación entre el porcentaje de silicato y las actividades de uranio y torio.

3.3. Productos finales

Los productos finales, resultado de la actividad industrial, son harina de silicato de circonio y micronizado de silicato de circonio. Ambos tienen el aspecto físico de polvo blanco. Se analizaron ambos, y sus resultados se muestran en la tabla 5.3.

Si se comparan las actividades de la materia prima y de los productos finales, considerando que la arena australiana-2 es la de consumo mayoritario, podríamos confirmar que el proceso de molienda no altera el equilibrio secular existente entre el uranio-238 y sus descendientes, ni el del torio-232 con los suyos.

3.4. Material en suspensión

Con el objeto de medir la concentración de polvo ambiental se utilizó un muestreador portátil de aire de tipo jirafa marca F&J, modelo DF-14ME, que nos indica tanto el número de horas muestreadas como el volumen de aire (litros) que ha pasado por el filtro. La

empresa suele disponer de medidas de datos de concentración de polvo inhalable, que son realizados por las mutuas laborales. Los datos obtenidos en este muestreo se cotejaron con los suministrados por la empresa y eran similares, aunque el muestreo realizado por las empresas se hizo con un equipo de muestreo personal (PAS), que es lo que se propone como adecuado en el proyecto SMOPIE [20].

Los filtros que se utilizaron son de nitrato de celulosa de 0,8 micras de tamaño medio de poro.

El tiempo de muestreo osciló entre 3 y 24 horas, a un caudal aproximado de 30 litros/min, excepto en el almacén de producto acabado, donde el muestreador permaneció dos días.

Se muestrearon los siguientes puntos:

- En la nave de molienda seca se situó el muestreador portátil en dos puntos: uno cercano a la tolva de alimentación del molino 2 (P1) y otro cercano al molino 1 (P2). Se tomaron tres muestras por punto.
- En la nave de molienda húmeda, el punto de muestreo seleccionado estaba entre los molinos 3 y 4 (P3). Se tomaron dos muestras.
- En la zona de secado, también se muestrearon dos puntos: uno situado en el entorno del ensacado manual (P4), en el que se recogieron dos muestras, y otro en el entorno del ensacado semiautomático, que se muestreo una sola vez (P5).
- En el almacén de producto acabado, se situó junto al taller de mantenimiento (P6), muestreándose una sola vez.

Siempre se intentó que el equipo de toma de muestras interrumpiera lo menos posible el trabajo de la empresa. Por problemas de ubicación, y al no existir cantidades visibles de polvo en ambiente, no se muestrearon aerosoles en las inmediaciones de los depósitos de lechada ni en los almacenes de materia prima.

La tabla 5.4 recoge los datos relativos a zona, fecha y horas de muestreo, así como la concentración de polvo obtenido en los filtros analizados.

Las medidas de la concentración de polvo inhalable en ambiente realizadas, ponen de manifiesto que:

- A excepción de los 8,11 mg/m³ medidos durante las tareas de limpieza del molino 2, los valores de concentración más altos se miden en el punto situado junto a la carga de la tolva del molino 2 en la nave de molienda seca, probablemente causado por el incremento de polvo en suspensión al realizar la labor de carga. Esto explicaría que el otro punto muestreado alejado de la zona de carga tenga una menor concentración (1,24 y 2,27 mg/m³). Los filtros correspondientes al punto P1 se tomaron cuando solo funcionaba el molino 2 y durante el muestreo del filtro P2-2, solo funcionaba el molino 1.
- Tal y como era de esperar y relacionado con los procesos de secado y ensacado, es en la zona de secaderos donde también se encuentran valores relativamente altos de concentración de polvo (2,54 y 3,11 mg/m³).
- Lógicamente la zona con menor concentración se corresponde con el almacén de producto acabado (0,56 mg/m³).

Sobre cada uno de los filtros recogidos, se realizó una determinación de actividad alfa total y una de actividad beta total, utilizando un contador proporcional de flujo de gas modelo Berthold LB 770-2.

En la tabla 5.5 se muestran los resultados obtenidos para ambas determinaciones en milibecquerelios por metro cúbico (mBq/m³).

Los valores de actividad alfa y beta total más altos se corresponden con el punto de muestreo P1-1, mientras que los menores están en el P6-1; el rango para la actividad alfa total está comprendido entre 89 y 12,8 mBq/m³. Estos valores están de acuerdo con los encontrados en la bibliografía [24] y son bastante más altos que el promedio hallado en los filtros de medida de la radiactivi-

dad ambiental en el entorno de la Universidad Politécnica (0,06 mBq/m³). Los valores beta analizados están

entre 5,8 y 56 mBq/m³, y también son muy superiores a los valores promedio ambientales (0,49 mBq/m³).

Tabla 5.4. Medidas de concentración de polvo ambiental

Zona	Muestra	Fecha de toma	Horas	mg/m ³
Molienda seca	PP1-1	8 de noviembre de 2005	22,57	4,64
	PP1-2	9 de noviembre de 2005	6,92	4,07
	PP1-3	9 de noviembre de 2005	17,22	4,72
	PP2-1	18 de enero de 2006	3,33	8,11 (*)
	PP2-2	3 de febrero de 2006	3,92	1,24
	PP2-3	14 de febrero de 2006	24,5	2,27
Molienda húmeda	PP3-1	6 de febrero de 2006	23,83	1,89
	PP3-2	16 de febrero de 2006	23,67	1,35
Secaderos	PP4-1	13 de febrero de 2006	15,92	2,54
	PP4-2	15 de febrero de 2006	23,92	2,58
	PP5-1	13 de febrero de 2006	4,87	3,11
Almacén	PP6-1	8 de febrero de 2006	42,03	0,56

(*) Cuando se inició la toma de muestras había una apreciable mayor cantidad de polvo debido a tareas de limpieza en el molino 2.

Tabla 5.5. Medidas de actividad alfa total y beta total e incertidumbre (k = 2) en filtros de partículas de polvo (mBq/m³)

Zona	Muestra	Alfa total	Beta total
Molienda Seca	P1-1	89 ± 5	56 ± 2
	P1-2	40 ± 4	17 ± 2
	P1-3	69 ± 3	31 ± 1
	P2-1	62 ± 3	26 ± 1
	P2-2	40 ± 4	17 ± 2
	P2-3	69 ± 3	31 ± 1
Molienda húmeda	P3-1	62 ± 3	25 ± 1
	P3-2	38 ± 2	16,8 ± 0,8
Secado	P4-1	69 ± 5	30 ± 1
	P4-2	77 ± 3	38 ± 1
Almacén	P6-1	12,8 ± 0,8	5,8 ± 0,4

Tabla 5.6. Actividad específica e incertidumbre (k = 2) en polvo ambiental (mBq · m⁻³)

Nucleido	Actividad	Nucleido	Actividad
Be-7	3,4 ± 0,9	Th-234	4,9 ± 1,2
Ac-228	1,2 ± 0,3	Pb-214	5,0 ± 0,3
Pb-212	1,4 ± 0,1	Bi-214	4,7 ± 0,2
Bi-212	1,2 ± 0,8	Pb-210	6,7 ± 1,3

Con objeto de cuantificar los emisores gamma existentes en el ambiente, los filtros recogidos se agruparon y se realizó sobre ellos un análisis isotópico gamma. En la tabla 5.6. se muestra la actividad específica en milibecquerelios por metro cúbico, para cada uno ellos.

Los emisores gamma encontrados se corresponden con miembros de la serie del uranio-238 (torio-234, plomo-214, bismuto-214 y plomo-210) y con la del torio-232 (actinio-228, plomo-212, bismuto-212); también existe presencia de berilio-7, radionucleido natural de origen cosmogónico y presente siempre en las muestras de aerosoles ambientales. Las concentraciones medidas de los distintos miembros tanto de la serie del uranio-238 como del torio-232, ponen de manifiesto el equilibrio en ambas.

Con el fin de determinar la actividad específica por cantidad de muestra, es decir la actividad en Bq/kg para comparar los valores obtenidos con los encontrados tanto en la materia prima como en el producto acabado, se multiplicó la actividad obtenida por la cantidad de mg/m³ analizada, obteniendo para el plomo-214 (serie uranio-238) una actividad de 3.116 Bq/kg y para el actinio-228 (serie torio-232) una de 697 Bq/kg. Estos valores están completamente de acuerdo con los medidos para ambos tipos de muestra, lo que apoya la hipótesis de no alteración del equilibrio cuando se somete la arena de circonio a un proceso mecánico, como es el de molturación.

3.5. Radón

Formando parte de las series naturales se encuentran dos isótopos del gas noble radon: el radón-222 (serie del uranio-238) y el radón-220 (serie del torio-234). Debido a su naturaleza gaseosa ambos nucleidos pueden escapar de la matriz que los contiene e incorporarse al aire ambiente, donde darán lugar a sus descendientes, la mayoría de los cuales forman parte de la materia particulada o polvo existente en el mismo.

Debido a la mayor importancia, desde el punto de vista de evaluación de las dosis, solo se evaluó la concentración de radón-222 en aire. La medida se llevó a cabo utilizando un canister de carbón activo. Este dis-

positivo “atrapa” al gas, que se cuantifica a través de sus descendientes mediante espectrometría gamma utilizando un detector de germanio hiperpuro.

Se tomaron muestras en 10 puntos y se realizaron dos campañas de muestreo: la primera del 8 al 11 de noviembre de 2005 y la segunda del 3 al 6 de febrero de 2006.

La tabla 5.7 relaciona la zona de muestro, los puntos y los valores obtenidos en bequerelios por metro cúbico (Bq/m³).

Tabla 5.7. Medidas concentración de radon por zonas (Bq/m³)

Zona	Punto de muestreo	Media
Almacén de arenas	Almacén 3	23 ± 11
Molienda seca	Molino 1	18 ± 9
Molienda húmeda	Centro molinos 3 y 4	15 ± 5
Depósitos lechada	Decantación-abajo	6 ± 3
	Decantación-arriba	17 ± 3
Secado	Ensacado manual micronizado	20 ± 8
	Ensacado semiautomático	23 ± 7
Almacén de producto acabado	Centro	26 ± 9
Laboratorio	Laboratorio	34 ± 7
Oficina	Oficina	33 ± 17

El rango de valores encontrados va de 6 a 34 Bq/m³. Estos valores, cuyos máximos se encuentran en los recintos cerrados estudiados, son inferiores o próximos al valor medio encontrado en las viviendas de la Comunidad Valenciana [25]. Además, y de acuerdo a la bibliografía [24, 26], se confirma la resistencia del silicato de circonio y la poca emanación de radón.

3.6. Residuos

De acuerdo a la descripción de los procesos que se realizan en la fábrica, los únicos residuos generados se corresponden con la molturación por vía húmeda y son:

Tabla 5.8. Actividad en muestras de agua residual (kBq · m⁻³)

Muestra	Alfa total	Beta total	Pb-212	Bi-212	Pb-214	Bi-214	Pb-210
Agua-1	2,4 ± 0,2	1,18 ± 0,05	0,21 ± 0,07	0,6 ± 0,5	0,32 ± 0,11	0,30 ± 0,11	1,11 ± 0,99
Agua-2	1,8 ± 0,3	1,21 ± 0,07	0,23 ± 0,03	0,3 ± 0,2	0,43 ± 0,05	0,49 ± 0,05	0,50 ± 0,40

- Agua de decantación que no se recircula a molinos, y se vierte a la red de alcantarillado público.
- Vapor de agua con partículas que se emite a la atmósfera como consecuencia de la etapa de secado del producto húmedo.

Las muestras de agua analizada tienen una cantidad de sólidos en suspensión de 4,69 g/l. En la tabla 5.8, se dan los valores obtenidos de actividad alfa total, beta total y los emisores gamma naturales encontrados al realizar el análisis isotópico gamma.

No se han caracterizado las partículas retenidas en el filtro. Se ha asumido que tenían una actividad similar al micronizado que estaba siendo secado.

4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo

4.1. Zonas de exposición

En esta parte del estudio, y de acuerdo con lo expuesto en los puntos anteriores, se pretende identificar aquellas zonas en las que exista un potencial riesgo de exposición a las radiaciones ionizantes en sus dos aspectos: la exposición debida a la radiación externa, relacionada fundamentalmente con la existencia de materiales radiactivos ubicados en distintas partes de la fábrica, y la contaminación interna relacionada con la inhalación de polvo. De acuerdo a ello, se han identificado las siguientes zonas de riesgo potencial que se describen a continuación y que coinciden con los procesos descritos en el punto 2.

4.1.1. Almacenes de arena

Existen en la fábrica cuatro almacenes donde se deposita la materia prima. Se trata de dos grandes salas rec-

tangulares contiguas, separadas por un muro de hormigón. La sala que incluye los almacenes 3 y 4, tiene una pared contigua a un despacho de oficinas, que en la actualidad no está ocupado. El resto de las paredes da a la calle y a salas en las que no hay, de forma permanente, trabajadores.

La arena se deposita en los almacenes, desde donde es transportada a las tolvas de alimentación de los molinos. Esta arena tiene un diámetro medio de partícula de 200 micras (220 la australiana y 130 la surafricana). En los almacenes existe ventilación natural y el proceso de carga puede liberar polvo al ambiente, pero debido al tamaño de las partículas queda poco en suspensión, depositándose nuevamente en el suelo. El riesgo de exposición se deberá únicamente a la exposición externa por estar situado en las inmediaciones de los montones de arena.

4.1.2. Nave de molienda seca

Zona ubicada en una sala donde hay dos molinos, y en la que también se encuentran las dos tolvas de alimentación de materia prima. La operación de llenado de tolvas conlleva una nube de polvo disperso en el entorno cercano de la tolva. También está dentro de la sala el ensacado manual, el semiautomático y el transporte cerrado de harina hasta los silos de carga, para su envasado a granel. Estos silos se encuentran al aire libre y anejos a la nave.

En esta zona, se observa de forma visible la existencia de polvo en suspensión, que podría dar lugar a una contaminación interna, y de polvo en el suelo. Los molinos se llenan de materia prima por lo que también podría existir un riesgo de irradiación externa en sus alrededores.

4.1.3. Nave de molienda húmeda

La molienda húmeda se realiza en una gran sala en la que se pueden diferenciar tantas zonas como partes del proceso. Así, distinguiremos la zona de molinos húmedos, la de depósitos de lechada, y la de secado y envasado de producto final, tanto manual (sacos) como semiautomático (sacos) y a granel.

Esta sala dispone de ventilación natural y, debido al tipo de molienda, existe una menor cantidad de polvo en suspensión, que se concentra básicamente en las zonas de secado y ensacado, en las que existirá tanto riesgo de contaminación como de exposición externa. Sin embargo, en el entorno de los molinos y en las inmediaciones de los depósitos de lechada el riesgo radiológico será el de exposición externa. Por este motivo, y dentro de esta nave, se diferenciarán las siguientes zonas:

- Zona de molinos húmedos.
- Zona de depósitos o decantadores.
- Zona de secaderos: secado y ensacado de micronizado.

4.1.4. Almacén de producto terminado

Se trata de una sala grande donde se almacenan los productos acabados. En ella no se observa polvo en el ambiente, por lo que el riesgo de contaminación interna será prácticamente inexistente.

El riesgo de exposición será externo y, debido a la fluctuación de la demanda, el índice de ocupación del mismo varía desde casi vacío a lleno en su totalidad, por lo que también variará la dosis externa existente en la zona.

4.2. Identificación de puestos de trabajo

En la empresa existen tres tipos de trabajadores relacionados con los tipos de actividades que realizan:

- Producción.
- Mantenimiento.
- Laboratorio.

4.2.1. Producción

En la producción intervienen tres personas por turno: dos operarios y un jefe de turno. Se describen a continuación las tareas asociadas a cada uno de ellos.

- Operario. Desarrolla su trabajo en todas las zonas consideradas en el apartado anterior. El puesto de trabajo conlleva la realización de las siguientes tareas, que realiza a lo largo de una jornada laboral de ocho horas:
 - Descarga de la materia prima en la tolva.
 - Ensacado manual y semiautomático.
 - Limpieza de la planta.
 - Limpieza y parte del mantenimiento de molinos y secadoras.
 - Transporte del producto acabado.
- Jefe de turno. Su trabajo se desarrolla en todas las zonas descritas con anterioridad, si bien no realiza labores de limpieza ni de ensacado. Le corresponden las siguientes tareas:
 - Descarga de la materia prima en tolvas.
 - Tareas de supervisión en la zona de molienda.
 - Tareas de supervisión en la zona de depósitos de lechada.
 - Tareas de supervisión en las inmediaciones de la zona de secado y ensacado.
 - Parte del mantenimiento de molinos y secadoras.

4.2.2. Mantenimiento

La arena de circonio es un material abrasivo, por lo que la empresa lleva a cabo una serie de rutinas de mantenimiento tanto preventivo como correctivo, así como de limpieza de los sistemas de molienda, que pueden suponer una exposición a radiaciones ionizantes.

Tabla 5.9. Distribución de tiempos de permanencia por tipo de trabajo y zona (horas)

Zona	Personal laboratorio	Jefe planta	Jefe turno	Operario	Mantenimiento
Almacenes de arena			1	0,5	
Nave de molienda seca	0,25	0,25	1	2	1
Silos de carga del producto vía seca				0,5	
Nave de molienda húmeda	0,5	1,5	2	1	3
Depósitos de lechada o lechadas	1	0,25	3	0,25	0,5
Zona de secaderos (secado y ensacado micronizado)	0,25		0,5	3	0,25
Silos de carga del producto vía húmeda				0,25	
Almacén de producto terminado		0,5		0,5	
Taller de mantenimiento		0,5			3
Laboratorio	6	4	0,5		
Exterior de las naves de fábrica (zona de tráfico)		1			0,25
Exterior del recinto de la fábrica					
Total	8	8	8	8	8

En la empresa, cuatro trabajadores realizan el mantenimiento mecánico y eléctrico en horario de jornada partida. Este conlleva la realización de operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo de todas las máquinas implicadas en el proceso de producción, en cualquiera de las zonas descritas con anterioridad.

4.2.3. Laboratorio

Dos personas realizan los ensayos de laboratorio y prácticamente permanecen la totalidad de su jornada laboral en esta sala.

La tabla 5.9 relaciona el tiempo aproximado de permanencia por tipo de trabajo en cada una de las zonas identificadas (valores suministrados por la empresa). Estos tiempos son aproximados porque, de acuerdo a lo indicado por la empresa, es difícil concretar el tiempo que pasa cada trabajador en una zona determinada.

5. Evaluación de dosis al trabajador

5.1. Dosis externa

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 4, la medida de la dosis externa se ha realizado utilizando dos técnicas de medidas distintas y complementarias. En una, se utilizó el monitor de radiación Berthold LB 133, que mide tasa de dosis en microSievert/hora ($\mu\text{Sv/h}$) y nos indica de forma puntual, es decir en el momento de la medida, la tasa de radiación que existe en la zona. La otra técnica es la medida integrada de la dosis durante un tiempo determinado, haciendo uso de dosímetros de termoluminescencia (TLD), colocados en las zonas de estudio.

El muestreo se realizó durante los meses de noviembre de 2005, y marzo, mayo y julio de 2006.

Las dosis integradas se corresponden con un mes de muestreo, mientras que las tasas de dosis medidas

con el monitor de radiación se han realizado cuando se ha ido a la fábrica a colocar y retirar los dosímetros TLD.

Los puntos de muestreo considerados se describen a continuación:

- En la zona de almacenamiento de las arenas, y debido a la dificultad de colocar dosímetros TLD, las medidas se hicieron únicamente con el LB 133, a distancias de 10 cm y 1 m de la materia prima.
- Dentro de la nave de molienda seca se eligieron dos puntos de muestreo cercanos a los molinos y se colocaron dosímetros TLD.
- En la nave húmeda se colocó un dosímetro en el centro de los molinos 3 y 4.
- La zona de depósitos de decantación se muestreó mediante la colocación de dos dosímetros, uno en la parte de abajo, entre los depósitos 11 y 16, y el segundo arriba entre los depósitos 15 y 16.

- Respecto a la zona de secado, se consideró conveniente colocar un dosímetro en la posición de ensacado manual de producto fino o micronizado, mientras que el segundo se situó junto a la saca del ensacado semiautomático del mismo producto.
- El dosímetro del almacén de producto acabado se colocó en una de las columnas metálicas existentes en el centro de la nave.
- Se colocaron también dos dosímetros en zonas no expuestas: uno en el laboratorio y otro en la oficina.

La tabla 5.10 muestra el rango de valores de tasa de dosis externa ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) medidos con el monitor de radiación Berthold LB 133, así como la tasa de dosis media, para cada una de las zonas y puntos de muestreo considerados. Se han utilizado los valores de tasa de dosis existentes en el “laboratorio” de la fábrica como valor de dosis externa de zona no expuesta, que se ha restado a los valores brutos medidos.

Tabla 5.10. Medidas de tasa de dosis externa con el monitor de radiación Berthold LB 133 ($\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$)

Zona	Punto de muestreo	Media	Rango
Almacén de arenas	10 cm	2,12	1,86 - 2,38
	100 cm	1,66	
Molienda seca	Molino 1	$0,19 \pm 0,06$	0,12 - 0,23
	Molino 2	$0,12 \pm 0,04$	0,08 - 0,16
Molienda húmeda	Centro molinos 3 y 4	$0,15 \pm 0,07$	0,07 - 0,21
Depósitos de lechada	Decantación-abajo	$0,52 \pm 0,09$	0,42 - 0,58
	Decantación-arriba	$0,25 \pm 0,09$	0,18 - 0,36
Secaderos	Ensacado manual micronizado	$0,19 \pm 0,11$	0,07 - 0,28
	Ensacado semiautomático	$0,30 \pm 0,05$	0,16 - 0,36
Almacén de producto acabado	Centro	$0,03 \pm 0,02$	0 - 0,05
Laboratorio	Laboratorio	0	
Oficina 1 ^{er} piso	Oficina	$0,017 \pm 0,015$	0 - 0,03

Tabla 5.11. Medidas de tasa de dosis externa con dosímetros TLD ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)

Zona	Punto de muestreo	Media	Rango
Molienda seca	Molino 1	$0,14 \pm 0,11$	0,08 - 0,35
	Molino 2	$0,16 \pm 0,05$	0,09 - 0,20
Molienda húmeda	Centro molinos 3 y 4	$0,09 \pm 0,06$	0 - 0,12
Depósitos de lechada	Decantación-abajo	$0,51 \pm 0,15$	0,40 - 0,73
	Decantación- arriba	$0,31 \pm 0,15$	0,14 - 0,50
Secaderos	Ensacado manual micronizado	$0,16 \pm 0,05$	0,13 - 0,23
	Ensacado semiautomático	$0,29 \pm 0,07$	0,23 - 0,39
Almacén de producto acabado	Centro	$0,20 \pm 0,18$	0 - 0,42
Laboratorio	Laboratorio	$0,02 \pm 0,01$	0 - 0,04
Oficina	Oficina	$0,01 \pm 0,02$	0 - 0,04

Al igual que en la tabla anterior, la tabla 5.11 muestra los valores de tasa de dosis calculados a partir de la medida de exposición con los dosímetros de termoluminiscencia (TLD). Estos valores se han obtenido dividiendo la dosis recibida, calculada restando la contribución de los dosímetros de fondo ambiental entre el número de horas de exposición o muestreo.

A la vista de los resultados mostrados en ambas tablas podemos hacer las siguientes consideraciones:

- Los valores medios obtenidos con ambos métodos de medida son estadísticamente iguales, siendo el valor más discrepante el medido en la zona de los molinos húmedos. También se observa una buena concordancia entre los rangos de las medidas realizadas. Sin embargo, y puesto que la medida integrada promedia la dosis recibida a lo largo de un mes, consideramos que este valor de tasa de exposición será más representativo de la exposición externa en las zonas de estudio y le consideraremos para efectuar la estimación de la dosis externa anual por zonas.
- Aunque la fábrica trabaja en continuo, en el proceso de fabricación existen condiciones de trabajo que pueden explicar la variabilidad de los datos obtenidos, reflejados tanto en el rango de valores como en la desviación típica.
- Las medidas en la zona de molienda seca se han realizado estando un molino o los dos en marcha. Esto se refleja en el rango de valores, tanto en el valor del mínimo correspondiente a las situaciones de molino vacío para cada uno de ellos, como en la dispersión de los mismos. Análogo comentario sirve para los valores obtenidos en la zona de molienda húmeda.
- Los puntos de muestreo colocados en la zona de depósitos presentan una menor dispersión que los anteriores, encontrándose que el punto de muestreo colocado en la parte baja de los mismos tiene una mayor tasa de dosis que el situado en la parte superior. Podemos justificar la variabilidad en los valores considerando la distinta cantidad de lechada en los mismos.
- Respecto al muestreo en la zona de secaderos, también se observa esta variabilidad. Uno de los puntos colocado cerca del ensacado semiautomático del micronizado estará, lógicamente, sujeto al número de sacas que se llenen.
- El almacén de producto acabado, como ya se ha comentado, puede permanecer más o menos lleno,

lo que modificará la dosis externa en el punto seleccionado y explicaría el valor medio obtenido $0,20 \pm 0,18 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ y el intervalo que va desde 0 a $0,42 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Este hecho también explicaría el valor obtenido con el monitor, ya que las veces que se midió con él el almacén estaba más vacío.

- Como era de esperar, las tasas de dosis correspondientes al laboratorio y a la oficina son prácticamente iguales a la radiación de fondo ambiental.
- La mayor tasa de dosis externa se da junto a las arenas de circonio y a los sacos de producto acabado, con un valor de hasta $2,38 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 10 cm de la materia prima. Los siguientes puntos con más dosis se corresponden con aquellos situados en las inmediaciones de los depósitos de decantación, concretamente a la medida realizada en la parte inferior de los mismos con $0,86 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$, mientras que el máximo en la zona superior es de $0,35 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$.
- En la zona de molienda seca se han medido tasas de dosis mayores que las correspondientes a la de molienda húmeda. Dos posibles explicaciones podrían ser una mayor distancia del dosímetro al molino húmedo y que los molinos en la nave de molienda húmeda tienen un menor contenido en silicato de circonio, al estar este mezclado con agua.
- Las tasas de dosis cerca del ensacado semiautomático del micronizado, registradas por el dosímetro colocado junto a la saca, son prácticamente el doble que las existentes cerca del ensacado manual del mismo, siendo los valores medios de 0,42 y $0,20 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente, debido a la proximidad del dosímetro a la saca.

Los valores medidos en la planta objeto de estudio son del orden de los encontrados en la bibliografía [12].

Una vez conocidas las tasas de exposición existentes en cada una de las zonas identificadas como de potencial riesgo radiológico, se puede calcular la dosis externa anual por zona multiplicando esta tasa por el número medio de horas de trabajo al año (2.000 horas). Se han considerado los valores de tasas mínima y máxima correspondientes a la medida de

dosis integrada, a excepción del valor para el almacén de arenas, para el que se han utilizado las medidas con el monitor de radiación.

En la tabla 5.12 se muestran los valores mínimo y máximo de dosis externa anual por zonas en miliSievert (mSv).

Tabla 5.12. Dosis externa por zonas (mSv/año)

Zona	Mínima	Máxima
Almacén de arenas	3,32	4,76
Molienda seca	0,18	0,7
Molienda húmeda	0	0,24
Depósitos de lechada	0,28	1,46
Secado	0,26	0,78
Almacén de producto acabado	0	0,84
Laboratorio	0	0,08
Oficina 1 ^{er} piso	0	0,08

Estos valores suponen la dosis externa anual que recibiría un trabajador que permaneciera en la zona durante toda la jornada laboral. Además, pone de manifiesto que la zona con mayor riesgo de exposición externa, si exceptuamos el almacén de materias primas, es la zona de depósitos de lechada.

Conocidas estas dosis, se puede hacer una primera aproximación a la dosis externa anual recibida por los trabajadores de la fábrica haciendo uso de la tabla de tiempos aproximada (tabla 5.9), que relaciona el tiempo medio que pasa cada trabajador en cada una de las zonas consideradas. La tabla 5.13 muestra los valores de dosis externa anual, mínimo y máximo, para cada uno de los puestos de trabajo.

De acuerdo con los valores de dosis anual estimada con el muestreo realizado, los trabajadores con un mayor riesgo radiológico en cuanto a dosis externa serían los trabajadores de producción, y más concretamente el jefe de turno con un valor máximo superior a 1 mSv/año.

Tabla 5.13. Dosis externa anual por puesto de trabajo (mSv)

Zona	Personal laboratorio		Jefe planta		Jefe turno		Operarios		Mantenimiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Almacén de arenas	0	0	0	0	0,415	0,595	0,208	0,298	0	0
Molienda seca	0,006	0,022	0,006	0,022	0,022	0,088	0,045	0,175	0,022	0,088
Molienda húmeda	0	0,015	0	0,045	0	0,06	0	0,03	0	0,09
Depósitos de lechada	0,035	0,182	0,009	0,046	0,105	0,548	0,009	0,046	0,018	0,091
Secaderos	0	0	0	0	0,016	0,049	0,10	0,292	0,009	0,024
Almacén de producto acabado	0	0	0	0,052	0	0	0	0,052	0	0
Laboratorio	0	0,06	0	0,04	0	0	0	0	0	0
Dosis anual (mSv)	0,041	0,279	0,014	0,205	0,558	1,339	0,359	0,893	0,048	0,293

Así, atendiendo a la variabilidad de las dosis medidas en las distintas zonas, se consideró conveniente realizar una dosimetría personal a los tres trabajadores de producción y a un trabajador del laboratorio como ejemplo de persona no expuesta. Los dosímetros personales se colocaron a la altura del pecho y el trabajador lo llevó durante su jornada laboral. Esta dosis representa adecuadamente la dosis recibida por el trabajador, al desplazarse por la fábrica en su jornada de trabajo.

La tabla 5.14 muestra las dosis superficial y profunda para los tres muestreos realizados. La primera nos indica el valor de la dosis que recibiría en la piel, Hp (0,07) y la segunda la dosis recibida en todo el cuerpo y en los órganos más profundos, Hp (10).

De los tres muestreos mensuales realizados, en dos de ellos se observó dosis superficial en cinco de los seis operarios muestreados, y profunda en dos. En el último muestreo no hubo ninguna dosis por encima de 0,1 mSv, que es el nivel de registro considerado por el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear) y se perdió el dosímetro de uno de los operarios. Se desconoce cuál de los operarios de producción realizaba labores de jefe de turno. Los datos parecen indicar que podrían ser los operarios 1 y 6. Durante el último muestreo la actividad laboral de la fábrica disminuyó, ya que permaneció cerrada durante las tres primeras semanas de agosto.

Tabla 5.14. Dosis externa mensual medidas con TLD en trabajadores (mSv)

Muestreo 1: 3 de febrero a 9 de marzo		
Trabajador	Dosis profunda	Dosis superficial
Operario 1	0,11	0,25
Operario 2	0	0,19
Operario 3	0	0
Laboratorio	0	0
Muestreo 2: 5 de mayo a 5 de junio		
Trabajador	Dosis profunda	Dosis superficial
Operario 4	0	0,13
Operario 5	0	0,14
Operario 6	0,22	0,18
Laboratorio	0	0
Muestreo 3: de junio a 28 de julio		
Trabajador	Dosis profunda	Dosis superficial
Operario 7	0	0
Operario 8	0	0
Operario 9	-	-
Laboratorio	0	0

5.2. Dosis interna

El cálculo se realiza según lo expuesto en el capítulo 4. Considerada despreciable la dosis debida a la incorporación de radón (radón-222) y puesta de manifiesto la existencia de radiactividad en el aire ambiente, debida a la serie del uranio-238 y a la del torio-232, obtendremos la actividad anual incorporada para un determinado radionucleido de cada una de las series (Bq) por zona, teniendo en cuenta:

- Los datos relativos a la concentración de polvo (mg/m^3), eligiendo para el cálculo, cuando existan, los valores mínimos y máximos de cada zona.
- Una exposición anual de 2.000 horas.
- Una tasa de inhalación de $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Una fracción de polvo inhalable igual a 1, que supone la no existencia de medidas de reducción.
- Una actividad de uranio-238, torio-232 correspondiente a la mezcla proporcional de materias primas utilizadas:
 - Uranio-238: $3.284 \text{ Bq}/\text{kg}$.
 - Torio-232: $681 \text{ Bq}/\text{kg}$.

La tabla 5.15 muestra los valores de dosis efectiva comprometida o dosis interna por zona, es decir la

dosis interna que recibiría un trabajador si permaneciera las ocho horas de su jornada laboral en esa zona.

Tabla 5.15. Dosis interna por zonas ($\text{mSv}/\text{año}$)

Zona	Mínima	Máxima
Molienda seca	0,54	2,04
Molienda húmeda	0,59	0,83
Secaderos	1,11	1,36
Almacén	0,26	0,26

Para obtener la dosis interna asociada a cada uno de los puestos de trabajo, y al igual que se ha hecho con la dosis externa, multiplicaremos la dosis anual por la fracción de tiempo de permanencia aproximada en cada zona suministrada por la empresa y que figura en la tabla 5.9. En la tabla 5.16 se muestran los resultados obtenidos.

En relación con las dosis internas, es el puesto de trabajo de operario el que podría recibir una mayor dosis, debido a una mayor concentración de polvo en las zonas en las que desarrolla sus tareas. Estos valores de dosis son del orden de los encontrados en la bibliografía [12].

5.3. Cálculo de la dosis total

Puesto que la dosis total es la suma de la interna y de la externa, a continuación, en las tablas 5.17 y 5.18 se detallan las dosis totales mínima y máxima por zona y puesto de trabajo.

Tabla 5.16. Dosis interna por puesto de trabajo ($\text{mSv}/\text{año}$)

Zona	Personal laboratorio		Jefe planta		Jefe turno		Operarios		Mantenimiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Molienda seca	0,017	0,064	0,017	0,064	0,068	0,255	0,135	0,51	0,068	0,255
Molienda húmeda	0,037	0,052	0,111	0,156	0,1475	0,207	0,074	0,104	0,221	0,311
Secado	0	0	0	0	0,069	0,085	0,416	0,51	0,035	0,042
Almacén de producto acabado	0	0	0,016	0,016	0	0	0,016	0,016	0	0
Dosis anual (mSv)	0,054	0,116	0,144	0,236	0,284	0,547	0,641	1,14	0,323	0,609

Tabla 5.17. Dosis total por zona (mSv/año)

Zona	Externa		Interna		Total	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Almacén de arenas	3,32	4,76	–	–	3,32	4,76
Molienda seca	0,18	0,7	0,54	2,04	0,72	2,74
Molienda húmeda	0	0,24	0,59	0,83	0,59	1,07
Depósitos de lechada	0,28	1,46	–	–	0,28	1,46
Secaderos	0,26	0,78	1,11	1,36	1,37	2,14
Almacén de producto acabado	0	0,84	0,26	0,26	0,26	1,1
Laboratorio	0	0,08	–	–	0	0,08
Oficina	0	0,08	–	–	0	0,08

Tabla 5.18. Dosis total por puesto de trabajo (mSv/año)

Zona	Personal laboratorio		Jefe planta		Jefe turno		Operarios		Mantenimiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Almacén de arenas	0	0	0	0	0,415	0,595	0,208	0,298	0	0
Molienda seca	0,022	0,086	0,022	0,086	0,09	0,342	0,18	0,685	0,09	0,342
Molienda húmeda	0,037	0,067	0,111	0,201	0,148	0,268	0,074	0,134	0,221	0,401
Depósitos de lechada	0,035	0,182	0,009	0,046	0,105	0,548	0,009	0,046	0,018	0,091
Secaderos	0	0	0	0	0,086	0,134	0,514	0,802	0,043	0,067
Almacén de producto acabado	0	0	0,016	0,069	0	0	0,016	0,069	0	0
Laboratorio	0	0,06	0	0,04	0	0	0	0	0	0
Oficina 1 ^{er} piso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0,09	0,395	0,158	0,441	0,843	1,88	1	2,033	0,371	0,902

Los resultados mostrados en ambas tablas ponen de manifiesto:

- Las zonas de dosis total máxima son de mayor a menor: almacén de arenas, molienda seca, secaderos y depósitos de lechada.
- Mientras que la dosis total en el almacén de arenas se debe a dosis externa, es en los secaderos donde se encuentran los mayores valores de dosis interna.
- Los puestos de trabajo con valores de dosis anuales superiores a 1 mSv se corresponden con los

trabajadores de producción. La dosis asociada al puesto de trabajo de jefe de turno es mayoritariamente externa (71% del total), mientras que en los operarios los dos tipos de dosis están más igualadas (44% externa, 56% interna). Estos valores se encuentran dentro de los referenciados en la bibliografía [12, 17, 24, 26] y de acuerdo a la documentación elaborada por la UE [4, 5] se encontrarían entre 1 y 6 mSv, lo que podría suponer un cierto nivel de regulación.

- El resto de trabajadores no presenta dosis por encima del límite, aunque el operario de mantenimiento podría estar en un valor cercano, en condiciones muy desfavorables.

Es necesario recordar que, el cálculo de las dosis externas se ha realizado bajo los siguientes supuestos:

- Permanencia a 1 m y 10 cm de los montones de arena.
- Permanencia casi en contacto con los depósitos de lechada.
- Permanencia en las proximidades de los molinos secos.

Sin embargo, también es conveniente no olvidar las medidas realizadas con los dosímetros de TLD a los operarios de producción, que dieron dosis profundas superiores a 0,1 mSv/mes, lo que podría suponer un valor solo en dosis externa superior a 1 mSv/año.

Por otra parte y en relación a las dosis internas, se ha realizado el siguiente supuesto:

- No utilización de elementos de protección como mascarillas. Este uso puede hacer que la dosis sea inferior a 1 mSv/año [12].

6. Evaluación de dosis al público

De acuerdo con el capítulo 4 solo se van a evaluar las dosis recibidas por el público debido a las emisiones atmosféricas de contaminantes. Se van a evaluar a 100, 500 y 1.000 m del foco emisor.

Así pues y para la fábrica objeto de estudio solo se considerarán las partículas que se emiten al medio ambiente por la chimenea de los secaderos. Los datos relevantes de la emisión, suministrados por la empresa son:

- Cantidad de partículas: 48,8 mg/m³.
- Caudal de emisión: 4,021 m³/s.
- Altura de la chimenea: 13 m.
- Viento predominante: dirección norte.
- Entorno: polígono industrial con casas cerca (factor PC CREAM: 0,4 (suburbios abiertos)).

Suponiendo que la concentración de actividad de las partículas que se emiten se corresponde con las del producto final (micronizado, tabla 5.3), es decir:

- Uranio-238 (y miembros de la serie): 3.134 Bq/kg.
- Torio-232 (y miembros de la serie): 592 Bq/kg.

La tasa de emisión sería de:

- Uranio-238 (y miembros de la serie): 1,93E+07 Bq/año.
- Torio-232 (y miembros de la serie): 3,66E+06 Bq/año.

Conocidos los datos anteriores y haciendo uso de los supuestos enumerados en el contenido de la etapa 6 del capítulo 4, la ejecución del programa PC CREAM nos proporciona entre otros los siguientes datos:

Dosis efectiva anual para la serie del uranio-238, por vías de exposición para los dos grupos de edad considerados.

Los valores para estas dosis pueden verse en la tabla 5.19, cuando el punto de recepción esta a 500 m del foco emisor.

En las figuras 5.2 y 5.3 se puede ver gráficamente la contribución para cada vía.

Tabla 5.19. Dosis efectiva serie U-238 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	7,62E-01	5,67E-01
Dosis externa nube gamma	1,04E-08	5,22E-09
Dosis externa nube beta	1,81E-10	9,07E-11
Dosis externa suelo gamma	1,18E-04	5,9E-05
Dosis externa suelo beta	8,76E-05	4,38E-05
Resuspensión	5,7E-04	4,24E-05
Ingestión de hígado de vaca	2,00E-02	1,5E-02
Ingestión de carne de vaca	5,13E-03	3,72E-03
Ingestión de leche de vaca	5,10E-02	7,08E-03
Ingestión de productos lácteos	7,87E-02	6,48E-03
Ingestión de frutas	2,76E-03	1,15E-03
Ingestión de cereales	4,95E-03	3,76E-03
Ingestión de vegetales verdes	1,82E-02	2,25E-02
Ingestión de vegetales de raíz comestible	1,02E-04	5,34E-05
Ingestión de hígado de cordero	3,05E-02	2,32E-02
Ingestión de carne de cordero	4,05E-03	5,72E-03
Total	9,78E-01	6,56E-01

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

Figura 5.2. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. Serie U-238

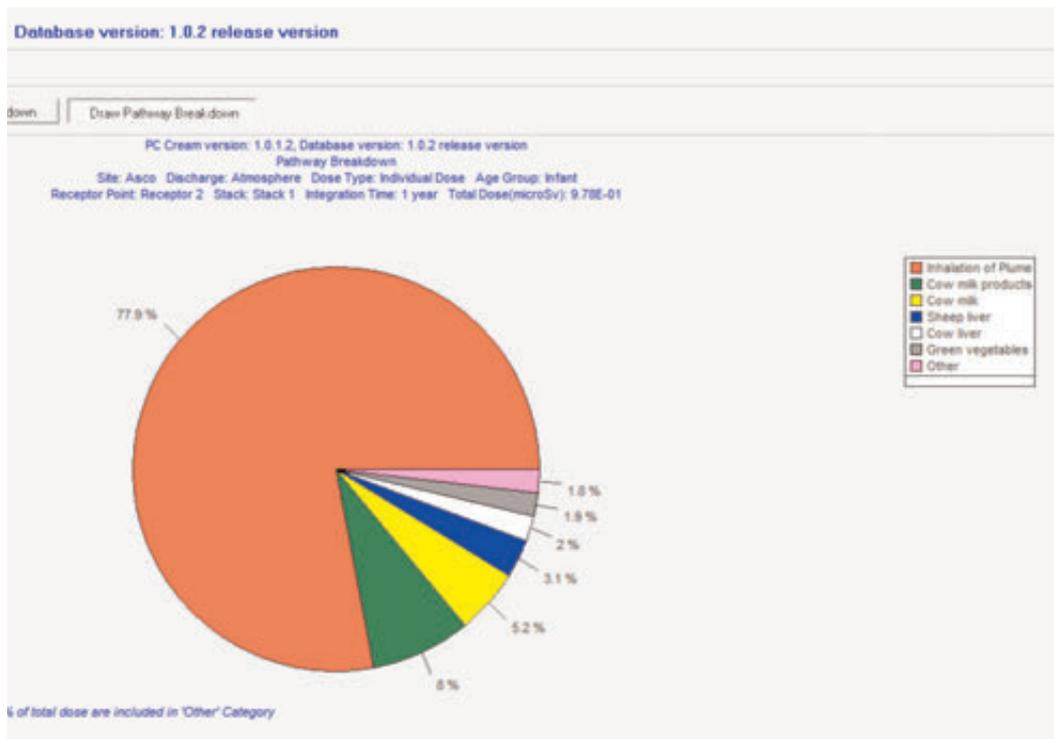
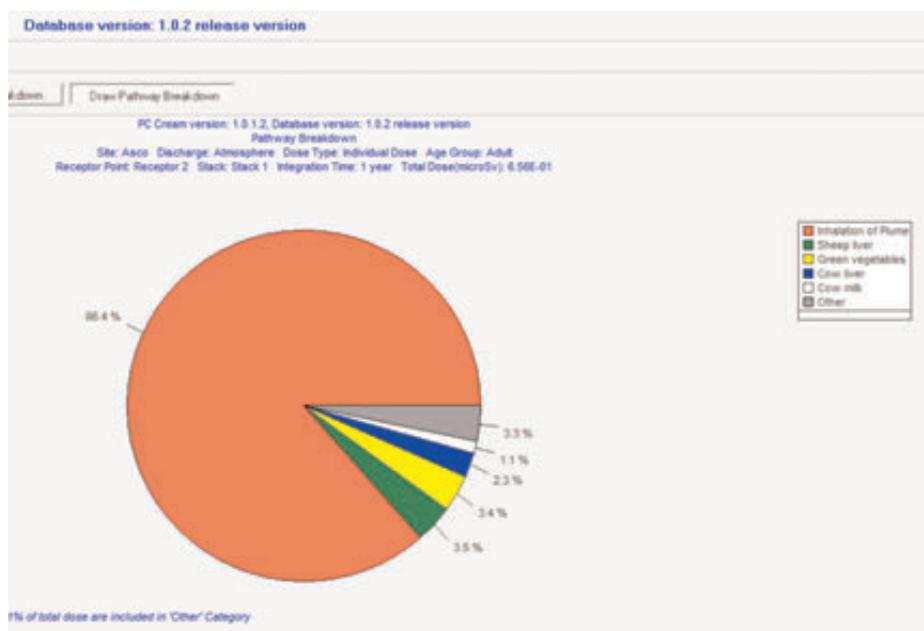


Figura 5.3. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el "adulto". Serie U-238



Dosis efectiva anual para la serie del torio-238, por vías de exposición para los dos grupos de edad considerados.

Los valores para estas dosis pueden verse en la tabla 5.20, cuando el punto de recepción está a 500 m del foco emisor.

Tabla 5.20. Dosis efectiva serie Th-232 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	3,39E-01	2,57E-01
Dosis externa nube gamma	6,74E-10	3,37E-10
Dosis externa nube beta	2,29E-11	1,14E-11
Dosis externa suelo gamma	1,63E-05	8,15E-06
Dosis externa suelo beta	6,55E-06	3,27E-06
Resuspensión	2,53E-04	1,92E-04
Ingestión de hígado de vaca	2,11E-05	1,60E-05
Ingestión de carne de vaca	1,18E-04	7,30E-05
Ingestión de leche de vaca	1,89E-03	1,73E-04
Ingestión de productos lácteos	2,82E-03	1,54E-04
Ingestión de frutas	5,68E-04	1,67E-04
Ingestión de cereales	2,69E-03	1,12E-03
Ingestión de vegetales verdes	1,70E-03	1,78E-03
Ingestión de vegetales de raíz	2,35E-05	8,35E-06
Ingestión de hígado de cordero	4,05E-05	3,00E-05
Ingestión de carne de cordero	6,14E-05	7,56E-05
Total	3,49E-01	2,61E-01

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

En las figuras 5.4 y 5.5 se pueden ver gráficamente la contribución para cada vía.

Figura 5.4. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. Serie Th-232

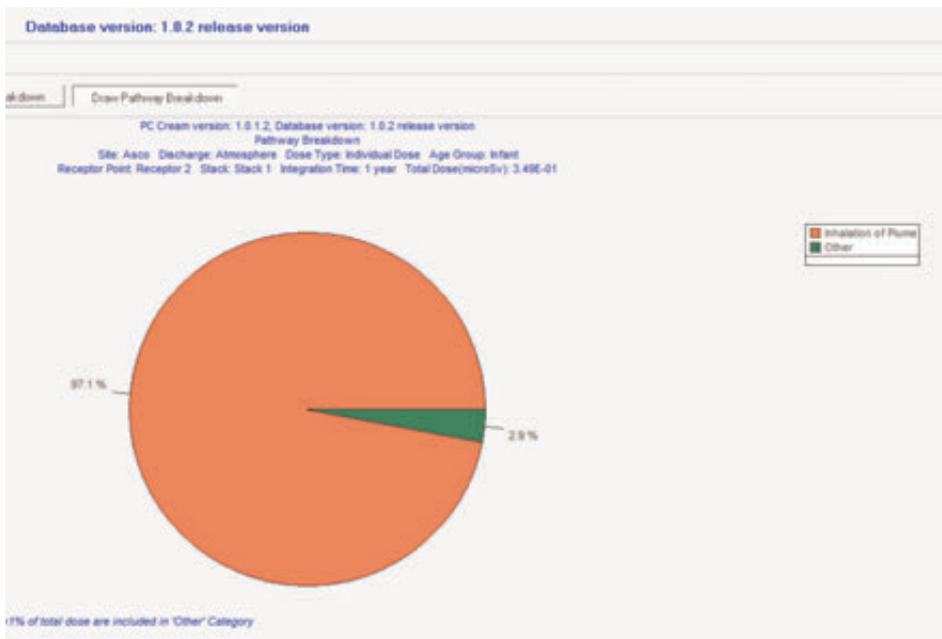
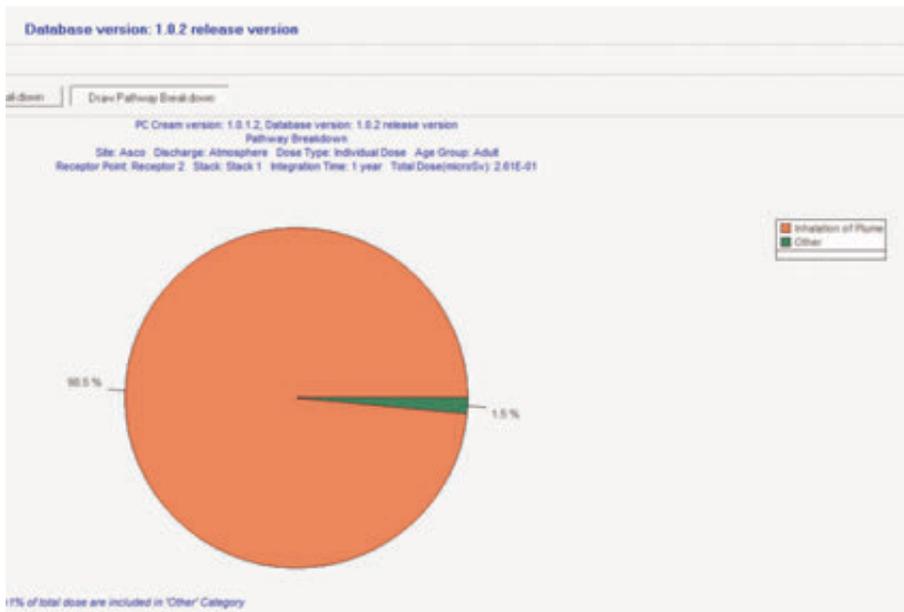


Figura 5.5. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. Serie Th-232



Dosis efectiva anual total para los dos grupos de edad y las tres distancias evaluadas.

Los valores de la dosis efectiva total se presentan en la tabla 5.21.

Tabla 5.21. Dosis efectiva total ($\mu\text{Sv/año}$)

Distancia (m)	Serie U-238		Serie Th-232		Total	
	Bebé	Adulto	Bebé	Adulto	Bebé	Adulto
100	0,218	0,146	0,078	0,058	0,296	0,204
500	0,978	0,656	0,349	0,261	1,327	0,917
1.000	0,328	0,220	0,117	0,088	0,445	0,308

Los resultados obtenidos, reflejados en las tablas 5.19, 5.20 y 5.21, indican que:

- Las dosis implicadas tanto para el adulto como para el grupo de mayor riesgo (bebé) son del orden o inferiores al microSievert, es decir 1.000 veces por debajo del límite al público, tal y como era de esperar de acuerdo a lo comentado en el capítulo 4, lo que corrobora el nulo impacto radiológico para los miembros del público debido a este tipo de actividad industrial.
- La dosis debida a la emisión de uranio-238 en equilibrio con sus descendientes, contribuye más a la dosis total que la emisión de torio-232, en una proporción porcentual de 70/30 respectivamente, que se mantiene con la distancia al foco emisor.
- De las tres distancias estudiadas el máximo de dosis se halla a una distancia del foco emisor de 500 m.
- La principal vía de contribución a la dosis es la inhalación de aerosoles en ambas series, debido fundamentalmente a la incorporación de torio-230 (serie uranio-238) y torio-228 (serie torio-232). Sin embargo, mientras que para la serie del torio-232 esta contribución es prácticamente del 100%, para los dos tipos de individuos estudiados, en la serie del uranio-238, también tienen una importancia relativa el consumo de alimentos, leche y productos lácteos para el bebé, seguida de la ingesta de hígado de cordero y vegetales de hoja verde, debido fundamentalmente a la incorporación de plomo-210 y polonio-210. Esta distribución se conserva para todas las distancias evaluadas.

ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA
EMPRESA DE FABRICACIÓN
DE FRITAS



6

1. Actividad industrial

Empresa cuya actividad industrial está centrada en la fabricación de fritas cerámicas, que se utilizan en la fabricación de esmaltes cerámicos.

Las fritas son una mezcla de sustancias químicas inorgánicas obtenidas por enfriamiento rápido de un fundido, que es una mezcla compleja de materiales. Las sustancias químicas así elaboradas se convierten en compuestos vítreos insolubles que se presentan en forma de escamas o gránulos.

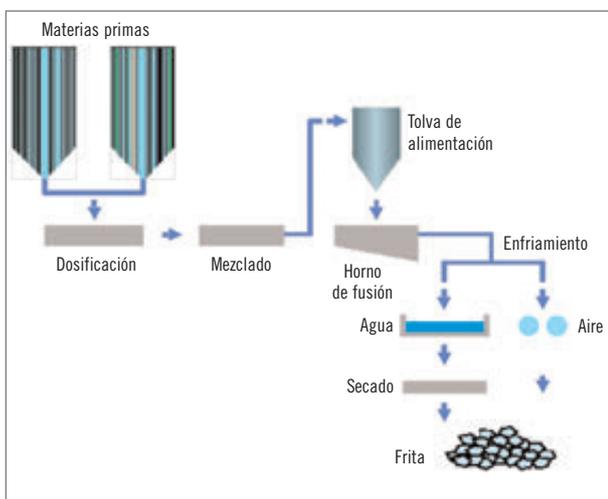
La fábrica consta de dos naves con ventilación natural: la nave de producción de fritas en la que se ubican los hornos de fritado y otra nave en la que se almacenan, dosifican y mezclan las materias primas. El almacenamiento del producto acabado se realiza fundamentalmente al aire libre.

La planta opera en continuo y, debido al alto grado de automatización, con un número pequeño de trabajadores (25).

2. Procesos

Se detallan a continuación las etapas consideradas en el proceso de fabricación.

Fig. 6.1. Esquema del proceso de fabricación



2.1. Recepción y almacenamiento de la materia prima. Silos

La materia prima llega a la planta en camión y a granel. El transportista la introduce mediante transporte neumático en los silos de almacenamiento. Toda la materia prima que utilizan en la producción se almacena en silos cerrados numerados y que contienen siempre el mismo producto; existen dos silos para el almacenamiento de harina de silicato de circonio.

Las materias primas con las que se elaboran las fritas pueden ser productos naturales o sintéticos como óxidos, carbonatos, aluminosilicatos, etc. Así, en la empresa estudiada se utilizaban las siguientes aparte del silicato de circonio: dolomita, cuarzo, feldespatos, ácido bórico, bórax, alúmina, anatasa, carbonato sódico, carbonato de litio y carbonato potásico.

2.2. Dosificación y mezclado de materias primas y aditivos

La dosificación de una determinada fórmula es un proceso automático. El transporte del material se realiza mediante tuberías y su mezcla se lleva a cabo de forma automática en una cuba de mezclado.

En las inmediaciones de la cuba, y a pesar de ser un recipiente cerrado, sí se observan cantidades apreciables de polvo, no tanto en suspensión como depositado en su entorno. Este polvo puede ser susceptible de resuspensión y posterior inhalación.

2.3. Distribución de la mezcla

La mezcla pasa mediante un propulsor a un distribuidor, que la direcciona hacia el silo de almacenamiento ubicado a la entrada de cada horno.

La cantidad de polvo es similar a la existente en el mezclador.

2.4. Fusión. Obtención de fritas

La fábrica tiene 16 hornos de fusión que trabajan en función de la demanda y en los que se alcanzan temperaturas de 1.400 °C. En nuestras visitas a la planta el

índice de ocupación de los hornos osciló entre 5 y 10. El fundido cae en forma líquida sobre un receptáculo de agua que enfría la mezcla, solidificándola en pequeños trozos de vidrio y se obtiene el material vítreo denominado frita.

El agua que está en contacto con la frita se recoge y recircula después de pasar por unas torres de refrigeración. Esta agua, que lleva en suspensión partículas sólidas, se deja decantar; no existen vertidos líquidos al alcantarillado.

En esta etapa y como consecuencia de la fusión, se generan gases y partículas que se recogen en filtros de mangas, para posteriormente ser evacuadas a la atmósfera, mediante una chimenea. Cada dos unidades de producción va a un filtro. Por cada dos filtros hay una chimenea que libera a la atmósfera los efluentes correspondientes a la emisión de cuatro hornos.

2.5. Pesado y envasado del producto final

El pesaje y envasado de la frita, es un proceso también automático, que se realiza en sacas o *big bag* de 1.000 kg, y que se realiza inmediatamente después del enfriamiento.

2.6. Almacenamiento del producto acabado

Las sacas con el producto acabado se almacenan temporalmente en la nave de producción, enfrente del horno que las ha fritado, hasta que un análisis de las mismas confirma que cumplen con las especificaciones del producto formulado. Si el análisis es positivo se envía al almacén definitivo hasta su expedición, situado en el exterior de la planta. El almacén está ordenado por tipo de producto, pero no tiene una ubicación definida. Si es negativo y se puede, se recupera introduciéndola de nuevo en el horno de fritado. En caso de que no fuera posible se desecha y se trata como residuo sólido, en cumplimiento con la reglamentación vigente.

3. Caracterización radiológica del término fuente

De acuerdo a las etapas del proceso de producción comentadas en el apartado anterior, los materiales para caracterizar radiológicamente son:

- Materias primas.
- Productos finales.
- Material en suspensión.
- Radón.
- Residuos:
 - Agua de la recuperación de fritas.
 - Partículas que se emiten al exterior en los hornos de fritado.

3.1. Materias primas y producto final

La mayoría de las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación de fritas se han analizado en el laboratorio como parte del proyecto sobre el estudio radiológico de materias primas utilizadas por la industria cerámica de forma general, tal y como se muestra en el capítulo 3 de este documento. Aunque algunas de ellas no conservaban el equilibrio secular, y dado el orden de actividades, este desequilibrio va a contribuir poco a aumentar los valores de la subserie del uranio-238+ de la frita que contenga en su composición silicato de circonio.

Debido a ello, y a la inexistencia de productos intermedios como tales, se decidió caracterizar únicamente los productos finales, haciendo la suposición de que la mezcla que alimenta el horno tiene la misma radiactividad que la frita resultante, ya que de acuerdo con la bibliografía [27] es a más altas temperaturas cuando se puede esperar la ruptura cristalina del silicato de circonio, con la consiguiente ruptura del equilibrio secular.

La industria fabrica alrededor de 100 fritas distintas. Entre ellas se encuentran las fritas opacas, que son las que llevan en su composición silicato de circonio, en un contenido que oscila entre el 3 y el 12% en peso. Se decidió analizar tres tipos distintos de fritas: la de producción mayoritaria sin silicato de circonio (frita 1), una de contenido mínimo (frita 2) y otra de contenido máximo (frita 3). Los resultados obtenidos se relacionan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Actividad específica (Bq · kg⁻¹) en muestras de producto final (fritas)

Material	U-238	Th-232	K-40
Frita 1	11,6 ± 2,7	10,4 ± 7,7	1.090 ± 63
Frita 2	275 ± 12	53,6 ± 8,9	1.973 ± 93
Frita 3	901 ± 32	230 ± 17	339 ± 51

3.2. Material en suspensión

Con el objeto de medir la concentración de polvo ambiental se utilizó un muestreador portátil de aire de tipo jirafa marca F&J, modelo DF-14ME, que nos indica tanto el número de horas muestreadas como el volumen de aire (litros) que ha pasado por el filtro. La empresa suele disponer de medidas de datos de concentración de polvo inhalable que son realizados por las mutuas laborales.

Los filtros que se utilizaron son de nitrato de celulosa de 0,8 micras de tamaño medio de poro

El tiempo de muestreo, puesto que en la fábrica no se apreciaban cantidades importantes de polvo en el ambiente, se decidió que fuera similar al de los programas de vigilancia radiológica ambiental, es decir de una semana, excepto el primer filtro. Se tomaron dos muestras por punto.

Se colocó el muestreador en los siguientes puntos:

- Silo de silicato de circonio (P1).
- Mezclador (P2).
- Distribuidor (P3).
- Nave de producción (P4).

La tabla 6.2. recoge los datos relativos a zona y fecha, así como la concentración de polvo obtenido en los filtros analizados.

Las medidas de la concentración de polvo ambiental realizadas, ponen de manifiesto que las dos zonas con

Tabla 6.2. Medidas de concentración de polvo ambiental

Zona	Muestra	Fecha de toma	mg/m ³
Silos materia prima	PP1-1	11-12-2006/14-12-2006	0,13
	PP1-2	7-03-2007/13-03-2007	0,14
Mezclador	PP2-1	14-12-2006/21-12-2006	0,23
	PP2-2	28-02-2007/7-03-2007	0,18
Distribuidor	PP3-1	30-01-2007/6-02-2007	0,17
	PP3-2	21-02-2007/28-02-2007	0,16
Producción	PP4-1	6-02-2007/14-02-2007	0,19 (*)
	PP4-2	14-02-2007/21-02-2007	0,08

(*) Durante el muestreo se rompió una tubería y se originó polvo.

mayor contenido en polvo se corresponden con los muestreos realizados en las inmediaciones del mezclador y del distribuidor. Una cantidad más importante de polvo se midió durante una avería en la zona de producción. Todos los valores encontrados son inferiores a 1 mg/m³.

Sobre cada uno de los filtros recogidos, se realizó una determinación de actividad alfa total y una de actividad beta total, utilizando un contador proporcional de flujo de gas modelo Berthold LB 770-2.

Tabla 6.3. Medidas de actividad alfa total y beta total (mBq/m³)

Zona	Muestra	Alfa total	Beta total
Silos de materia prima	PP1-1	2,2 ± 0,08	0,23 ± 0,03
	PP1-2	0,60 ± 0,03	0,23 ± 0,02
Mezclador	PP2-1	1,1 ± 0,04	0,75 ± 0,02
	PP2-2	0,87 ± 0,03	0,47 ± 0,02
Distribuidor	PP3-1	1,2 ± 0,04	0,80 ± 0,02
	PP3-2	0,89 ± 0,03	0,39 ± 0,02
Producción	PP4-1(*)	4,6 ± 0,08	0,53 ± 0,02
	PP4-2	2,5 ± 0,06	0,19 ± 0,02

(*) Durante el muestreo se rompió una tubería y se originó polvo.

En la tabla 6.3 se muestran los resultados obtenidos para ambas determinaciones en milibecquerelios por metro cúbico (mBq/m³).

De acuerdo con los valores obtenidos, la medida de la actividad beta total es del orden del promedio ambiental (0,49 Bq/m³) y los valores están comprendidos entre 0,19 y 0,80 Bq/m³; mientras que la medida de alfa total está comprendida entre 0,6 y 4,6 Bq/m³ y es muy superior al promedio ambiental (0,06 Bq/m³).

Los valores de actividad alfa total más elevados se encuentran en la nave de producción, tanto en la muestra de filtro con mayor cantidad de residuo, como en la que tiene menos.

3.3. Radón

La medida se llevó a cabo utilizando un *canister* de carbón activo. Este dispositivo “atrapa” al gas, que se cuantifica a través de sus descendientes mediante espectrometría gamma utilizando un detector de germanio hiperpuro.

Se colocaron tres *canisters* en los silos: uno cerca de un silo en el que se almacena una materia prima distinta a la harina de silicato de circonio (Rn-1) y dos cerca de cada uno de los silos de silicato de circonio (Rn-2 y Rn-3). Uno en el mezclador (Rn-4), tres en la nave de producción (Rn-5, Rn-6 y Rn-7) y, por último, uno en la oficina (Rn-8). La tabla 6.4 relaciona los valores obtenidos en bequerelios por metro cúbico (Bq/m³).

Los valores encontrados están en el rango de 18 a 43 Bq/m³. Los mayores valores corresponden a los puntos de la nave de producción y los silos de silicato de circonio. Estos valores se encuentran dentro del rango encontrado para el radón en el interior de viviendas de la Comunidad Valenciana [24]. Las dos naves poseen ventilación natural.

3.4. Residuos

La empresa recicla la mayoría de residuos que genera y, de acuerdo al proceso de fabricación, se generan los siguientes:

Tabla 6.4. Medidas de concentración de radon por zonas (Bq/m³)

Zona	Muestra	Actividad
Silos de materia prima	Rn-1	26 ± 7
	Rn-2	31 ± 7
	Rn-3	36 ± 7
Mezclador	Rn-4	18 ± 7
Nave de producción	Rn-5	20 ± 9
	Rn-6	43 ± 9
	Rn-7	39 ± 8
Oficina	Rn-8	22 ± 7

- Filtros de salida de los hornos de frito.
- Agua de recuperación del enfriamiento de fundido.
- Fritas no recuperadas.

La empresa nos suministró información acerca de la emisión realizada por la chimenea. La concentración de partículas es inferior al valor de referencia pactado entre la Consellería de Industria y Anffecc (Asociación de Fabricantes de Fritas y Esmaltes) (40 mg/Nm³) y al estatal (150). También suministró un análisis del agua del circuito de refrigeración, tomada en la balsa, y que presenta una concentración de sólidos en suspensión de 13 mg/l.

4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo

4.1. Zonas de exposición

En esta parte del estudio, y de acuerdo a lo expuesto en los puntos anteriores, se van a identificar aquellas zonas en las que exista un potencial riesgo de exposición a las radiaciones ionizantes en sus dos aspectos: la exposición debida a la radiación externa, relacionada fundamentalmente con la existencia de materiales radiactivos ubicados en distintas partes de la fábrica, y la contaminación interna relacionada con la inhalación de polvo y de radón.

Se han identificado las zonas de riesgo potencial que se describen a continuación y que coinciden con los procesos descritos en el punto 2 de este capítulo.

4.1.1. Almacén de materia prima

El almacenamiento de la materia prima en silos cerrados puede implicar una exposición externa debido a la permanencia en las proximidades de los silos de silicato de circonio, ya que el resto de materias primas tienen, de acuerdo a lo comentado en el capítulo 3 concentraciones de uranio-238 y torio-232 muy por debajo del silicato. En esta parte de la nave, no se observa una cantidad importante de polvo en suspensión. Se podría identificar el riesgo radiológico como externo si nos situáramos en las inmediaciones del silo.

4.1.2. Mezclador y distribuidor

En la cuba de mezclado o mezcladora, ya no hay silicato de circonio puro, sino mezclado con otras materias primas sin apenas actividad. En el caso de la mezcla con el contenido máximo de silicato podría existir riesgo de exposición externa en las inmediaciones del mismo. También se podría pensar en una contaminación interna ya que se observa polvo depositado alrededor de la misma.

En el caso del distribuidor se podrían aplicar las mismas consideraciones que en el caso de la cuba de mezclado.

4.1.3. Nave de producción

La medida de tasa de dosis en el silo de alimentación del horno en el que se fabrica la frita opaca da valores superiores al fondo ambiental. Es de esperar pues que aquí también pueda existir cierto riesgo de irradiación externa. En la nave apenas se observa polvo.

Puesto que se realiza un prealmacenamiento de la frita en la nave, la permanencia junto a las sacas de fritas, si son opacas, puede dar lugar a un riesgo potencial de exposición externa

4.1.4. Almacén de producto acabado

El almacenamiento del producto acabado, al aire, puede dar lugar a una exposición externa.

4.2. Identificación de puestos de trabajo

En la empresa existen cuatro tipos de trabajadores relacionados con las diferentes actividades que realizan: operador o jefe de turno, hornero, almacén y mantenimiento.

Las tareas asignadas al operador o jefe de turno son:

- Recepcionar las cubas de la materia prima.
- Hacer las formulas: dosificar las materias primas.
- Controlar el funcionamiento de los hornos.

Las asignadas al hornero:

- Vigilar el funcionamiento de los hornos.
- Retirar los *big bag* de la salida de los hornos de frito con una carretilla elevadora.
- Transportar los *big bag* hasta su lugar de prealmacenamiento.

Las tareas para el puesto de trabajo de almacén son:

- Carga y descarga de producto acabado.

Los trabajadores de mantenimiento se mueven por toda la planta. En esta categoría están los mecánicos y los albañiles.

La empresa no tenía disponible una tabla de asignación de tiempos por zonas. Sin embargo, y dada la automatización de las zonas más críticas, que son los silos y el mezclador, el tiempo de permanencia en las mismas asignado al puesto de trabajo de operador se nos informó de que suponía como máximo un tiempo promedio de 30 minutos en una jornada laboral de ocho horas.

5. Evaluación de dosis al trabajador

5.1. Dosis externa

La dosis externa es la que recibe un trabajador por el hecho de situarse en un campo de radiación, es decir,

en las inmediaciones de una fuente radiactiva. La medida de la dosis externa se realizó de forma puntual con un monitor de radiación Berthold LB 133, que mide tasa de dosis en microSievert/hora ($\mu\text{Sv/h}$). Esta medida dió valores de fondo en todos los puntos muestreados, que coinciden con los de muestreo de radón, excepto en la proximidad del silo de silicato de circonio y en los silos de almacenamiento de las mezclas con silicato.

La medida de la dosis integrada, es decir de la dosis durante un tiempo determinado, se realizó haciendo uso de dosímetros de termoluminiscencia (TLD), colocados en las zonas de estudio. Se colocaron tres dosímetros en los silos (D1 y D3 en los de silicato de circonio, y D2 en otro distinto a ellos), dos en el mezclador, dos en el distribuidor, uno junto a cada uno de los silos de alimentación de los hornos, uno entre cada dos hornos y uno en la oficina. El muestreo se realizó durante los meses de enero, febrero y marzo de 2007.

La tabla 6.5 muestra el rango de valores de tasa de dosis externa ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) medidos con el monitor de radiación Berthold LB 133 y el de los medidos con los dosímetros de TLD. Se han utilizado los valores de tasa de dosis existentes en la oficina de la fábrica como valor de dosis externa de la zona no expuesta, que se ha restado a los valores totales medidos.

Tabla 6.5. Medidas de tasa de dosis externa ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) por zona

Zona	Muestra	LB 133	TDL 100
Silos de materias primas	D1	0,7-0,8	0,3-0,5
	D2	0,02	-
	D3	0,6-0,7	0,2-0,4
Mezclador	D4-D5		0-0,15
Distribuidor	D6-D7	0-0,02	-
Silos de alimentación de hornos	D8-D23	0,1-0,2	0,2-0,3
Producción	D24-D32	-	-
Oficina	D33	-	-

Los resultados ponen de manifiesto, que efectivamente la existencia de silicato de circonio, como materia prima o como mezcla para alimentar los hornos de fritado, puede dar lugar a una exposición externa si el trabajador permanece mucho tiempo en las inmediaciones de estos depósitos. Las discrepancias existentes entre los valores del monitor portátil y la dosis integrada TLD deben relacionarse tanto con el distinto grado de llenado de los silos, como con la discontinuidad en la fabricación de frita opaca, ya que la planta no formula las mismas fritas todas las semanas. Debido a ello, se decidió tomar para realizar el cálculo de dosis anual por zonas los valores más altos de las medidas realizadas.

En la tabla 6.6 se dan los datos correspondientes a la dosis externa anual, suponiendo que el trabajador permanece 2.000 horas/año en cada una de las zonas.

Tabla 6.6. Dosis externa por zona (mSv/año)

Zona	Dosis
Silos de silicato de circonio	1,6
Mezclador	0,3
Distribuidor	0,04
Silos de alimentación de hornos	0,6
Producción	-

5.2. Dosis interna

El cálculo se realiza según lo expuesto en el capítulo 4. Considerada despreciable la dosis debida a la incorporación de radón (radón-222), obtendremos la actividad anual incorporada para un determinado radionucleido por zona, teniendo en cuenta:

- Los datos relativos a la concentración de polvo (mg/m^3) (tabla 6.2).
- Una exposición anual de 2.000 horas.
- Una tasa de inhalación de $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$.

- Una fracción de polvo inhalable igual a 1, que supone la no existencia de medidas de reducción.
- Una concentración de uranio-238, torio-232 y potasio-40 en el ambiente que es la analizada en los materiales ubicados en ellas. Es decir, la actividad del silicato de circonio en los silos y la de la frita opaca con más contenido en silicato de circonio en el resto de ellas.

La tabla 6.7 muestra los valores de dosis efectiva comprometida o dosis interna por zona; es decir, la dosis interna que recibiría un trabajador si permaneciera las ocho horas de su jornada laboral en esa zona en la que no se ha incluido la zona de producción por tener un valor de concentración de polvo cercana a cero.

Tabla 6.7. Dosis interna por zonas (mSv/año)

Zona	Dosis (mSv)
Silo de silicato de circonio	0,05
Mezcladora	0,03
Distribuidor	0,02

5.3. Cálculo de la dosis total

Puesto que la dosis total es la suma de la interna y de la externa, en la tabla 6.8 se dan las dosis totales mínima y máxima por zona.

Tabla 6.8. Dosis total anual por zona (mSv)

Zona	Externa	Interna	Total
Silos de silicato de circonio	1,6	0,05	1,65
Mezclador	0,3	0,03	0,33
Distribuidor	0,04	0,02	0,06
Silos de alimentación de hornos	0,6	–	0,6
Producción	–	–	–

Los resultados confirman, debido a la práctica ausencia de polvo ambiental, que el riesgo radiológico aso-

ciado a este tipo de plantas sería fundamentalmente el correspondiente a la exposición externa.

Respecto a la dosis total por puesto de trabajo, considerando que el tiempo de permanencia en la zona con mayor riesgo es de 30 minutos durante la jornada laboral, de acuerdo con los datos suministrados por la empresa, la dosis impartida sería de 0,10 mSv/año, es decir muy inferior a 1 mSv.

6. Evaluación de dosis al público

De acuerdo con los tipos de residuos que se generan en la fábrica, considerando que el agua de recuperación se recircula a la fábrica, solo se va a considerar el impacto radiológico exterior de las partículas que se emiten al no ser retenidas por los filtros de los hornos de fritado.

Los datos relevantes de la emisión, de acuerdo con la información disponible son:

- Cantidad de partículas: 20,04 mg/m³.
- Caudal de emisión: 2,82 m³/s.
- Altura de la chimenea: 20 m.

Suponiendo que la concentración de actividad de las partículas que se emiten se corresponde con las de la frita que tiene el mayor contenido, es decir:

- Uranio-238 (y miembros de la serie): 901 Bq/kg.
- Torio-232 (y miembros de la serie): 230 Bq/kg.

La tasa de emisión sería de:

- Uranio-238 (y miembros de la serie): 1,61E+06 Bq/año.
- Torio-232 (y miembros de la serie): 4,10E+05 Bq/año.
- Potasio-40: 6,04E+06 Bq/año.

Conocidos los datos anteriores y haciendo uso de los supuestos enumerados en el contenido de la etapa 6 del capítulo 4, la ejecución del programa PC CREAM nos proporciona entre otros los siguientes datos:

Dosis efectiva anual para la serie del uranio-238, por vías de exposición para los dos grupos de edad considerados.

Los valores para estas dosis pueden verse en la tabla 6.9, cuando el punto de recepción esta a 500 m del foco emisor.

Tabla 6.9. Dosis efectiva serie U-238 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	9,67E-03	9,2E-03
Dosis externa nube gamma	2,16E-10	1,08E-10
Dosis externa nube beta	2,31E-12	1,16E-12
Dosis externa suelo gamma	2,00E-06	1,00E-06
Dosis externa suelo beta	1,48E-07	7,40E-06
Resuspensión	9,62E-06	7,16E-06
Ingestión de hígado de vaca	3,37E-04	2,54E-04
Ingestión de carne de vaca	8,61E-04	6,28E-05
Ingestión de leche de vaca	1,09E-04	1,20E-04
Ingestión de productos lácteos	1,33E-03	1,09E-04
Ingestión de frutas	4,66E-05	1,95E-05
Ingestión de cereales	8,36E-05	6,36E-05
Ingestión de vegetales verdes	3,08E-04	3,81E-04
Ingestión de vegetales de raíz comestible	1,73E-06	9,02E-07
Ingestión de hígado de cordero	5,14E-04	3,92E-04
Ingestión de carne de cordero	6,83E-05	9,66E-05
Total	1,33E-02	8,70E-03

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

En las figuras 6.2 y 6.3 se puede ver gráficamente la contribución para cada vía.

Dosis efectiva anual para la serie del torio-232, por vías de exposición para los dos grupos de edad considerado.

Los valores para estas dosis pueden verse en la tabla 6.10, cuando el punto de recepción esta a 500 m del foco emisor.

Tabla 6.10. Dosis efectiva serie Th-232 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	5,77E-03	4,38E-03
Dosis externa nube gamma	2,99E-11	1,14E-11
Dosis externa nube beta	4,47E-13	2,23E-13
Dosis externa suelo gamma	3,69E-07	1,85E-07
Dosis externa suelo beta	1,48E-07	7,43E-08
Resuspensión	5,75E-06	4,36E-06
Ingestión de hígado de vaca	4,78E-07	3,64E-07
Ingestión de carne de vaca	2,67E-06	1,66E-06
Ingestión de leche de vaca	4,28E-05	3,92E-06
Ingestión de productos lácteos	6,39E-05	3,50E-06
Ingestión de frutas	1,29E-05	3,78E-06
Ingestión de cereales	6,11E-05	2,53E-05
Ingestión de vegetales verdes	3,85E-05	4,05E-05
Ingestión de vegetales de raíz comestible	5,32E-07	1,89E-07
Ingestión de hígado de cordero	9,20E-07	6,81E-07
Ingestión de carne de cordero	1,39E-06	1,71E-06
Total	6,00E-03	4,46E-03

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

En las figuras 6.4 y 6.5 se puede ver gráficamente la contribución para cada vía.

Figura 6.2. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. Serie U-238

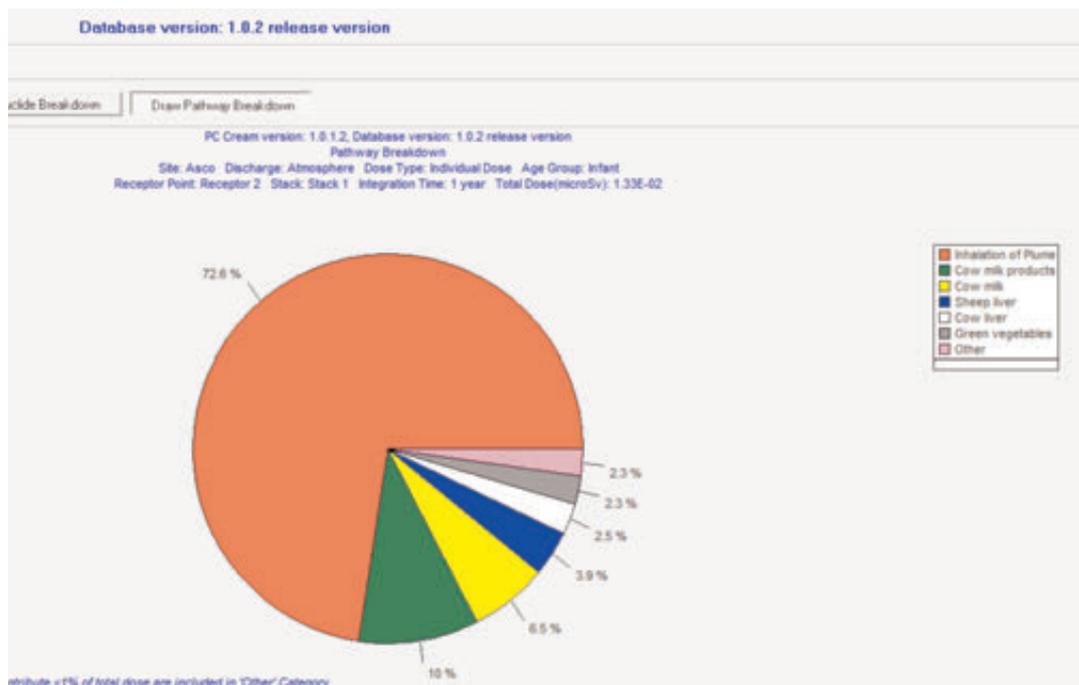


Figura 6.3. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. Serie U-238

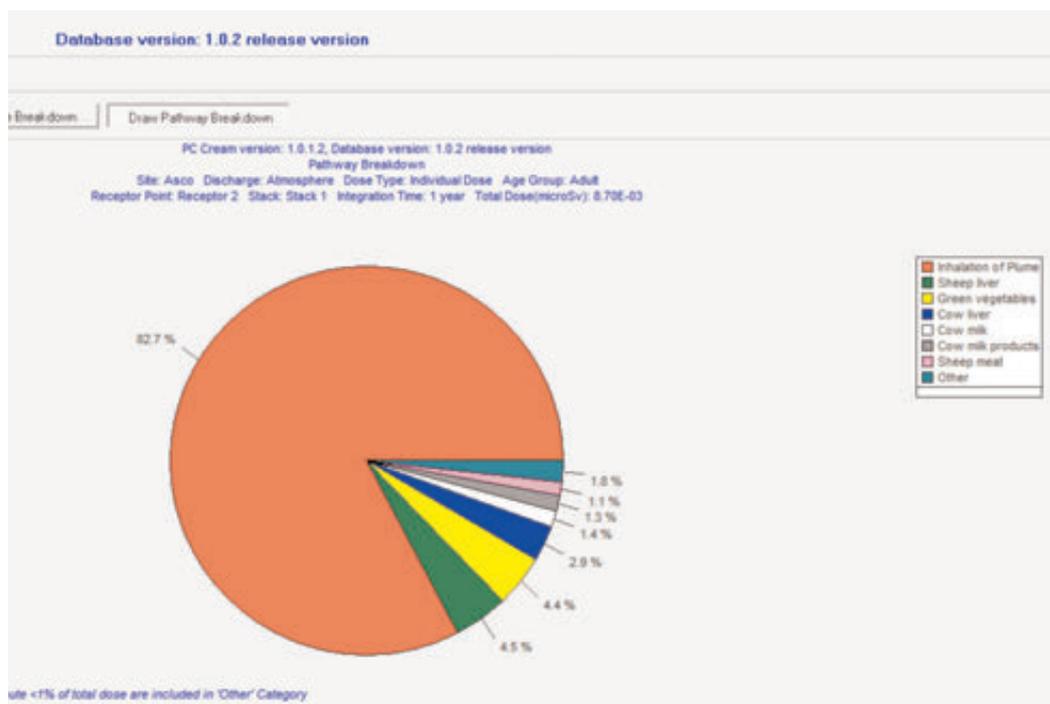


Figura 6.4. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. Serie Th-232

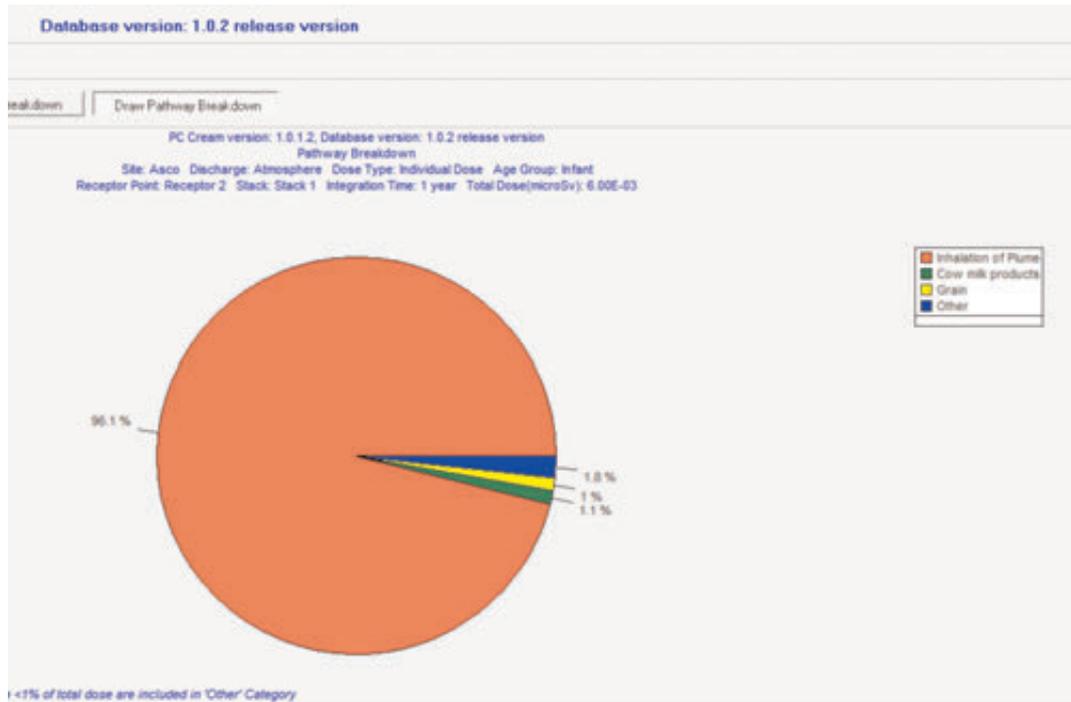


Figura 6.5. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. Serie Th-232



Dosis efectiva anual para el potasio-40 por vías de exposición para los dos grupos de edad considerados.

De acuerdo con lo comentado en el capítulo 4, no se va a considerar la vía de incorporación a través de la ingestión de alimentos. Los valores pueden verse en la tabla 6.11 para una distancia del foco emisor de 500 m.

Tabla 6.11. Dosis efectiva K-40 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	7,60E-06	2,00E-07
Dosis externa nube gamma	7,74E-10	3,87E-10
Dosis externa nube beta	2,09E-10	1,04E-10
Dosis externa suelo gamma	5,98E-08	2,99E-08
Dosis externa suelo beta	2,88E-07	1,44E-07
Resuspensión	7,57E-10	1,99E-10
Total	1,11E-06	3,57E-06

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

En las figuras 6.6 y 6.7 se puede ver gráficamente la contribución para cada vía.

Dosis efectiva anual total para los dos grupos de edad y las tres distancias evaluadas.

Los valores de la dosis efectiva total se presentan en la tabla 6.12.

Los resultados obtenidos, reflejados en las tablas 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12 indican que:

- Las dosis implicadas tanto para el adulto como para el grupo de mayor riesgo (bebé) son del orden de 10^{-2} microSievert, es decir prácticamente cero, lo que corrobora el nulo impacto radiológico para los miembros del público debido a este tipo de actividad industrial.
- Las dosis debidas al uranio-238 contribuyen más al total que la del torio-232 para todas las distancias. Sin embargo, mientras que en el caso del “bebé” esta contribución en porcentaje es del 69/31%, respectivamente, para el “adulto” es más simétrica, siendo la proporción de 57 y 43%. La contribución del potasio-40 puede considerarse despreciable.
- Las dosis más altas se corresponden con la distancia al foco emisor de 500 metros.
- Al estudiar la vía de evacuación atmosférica, la principal vía de contribución a la dosis es la inhalación de aerosoles en ambas series y también en el potasio-40. Sin embargo, mientras que para la serie del torio-232 esta contribución es prácticamente del 100% para el “adulto” y tiene una pequeña contribución la ingesta de productos lácteos y cereales, en el caso del “bebé”, en la serie del uranio-238 también tienen una importancia relativa el consumo de alimentos, leche y productos lácteos para el bebé, hígado y vegetales de hoja verde, debido fundamentalmente a la ingesta de plomo-210 y polonio-210. En el caso del potasio-40 también contribuye a la dosis la irradiación externa beta y gamma debida al suelo. Esta distribución se conserva para todas las distancias evaluadas.

Tabla 6.12. Dosis efectiva total ($\mu\text{Sv/año}$)

	100 m		500 m		1.000 m	
	Bebé	Adulto	Bebé	Adulto	Bebé	Adulto
Serie U-238	1,20E-02	6,89E-03	1,33E-02	8,70E-03	6,66E-03	4,35E-03
Serie Th-232	3,86E-03	4,98E-03	6,00E-03	6,54E-03	3,00E-03	4,12E-03
K-40	1,05E-06	4,19E-07	1,11E-06	3,75E-07	5,55E-07	1,87E-07
Total	1,59E-02	1,19E-02	1,93E-02	1,52E-02	9,66E-03	8,47E-03

Figura 6.6. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. K-40

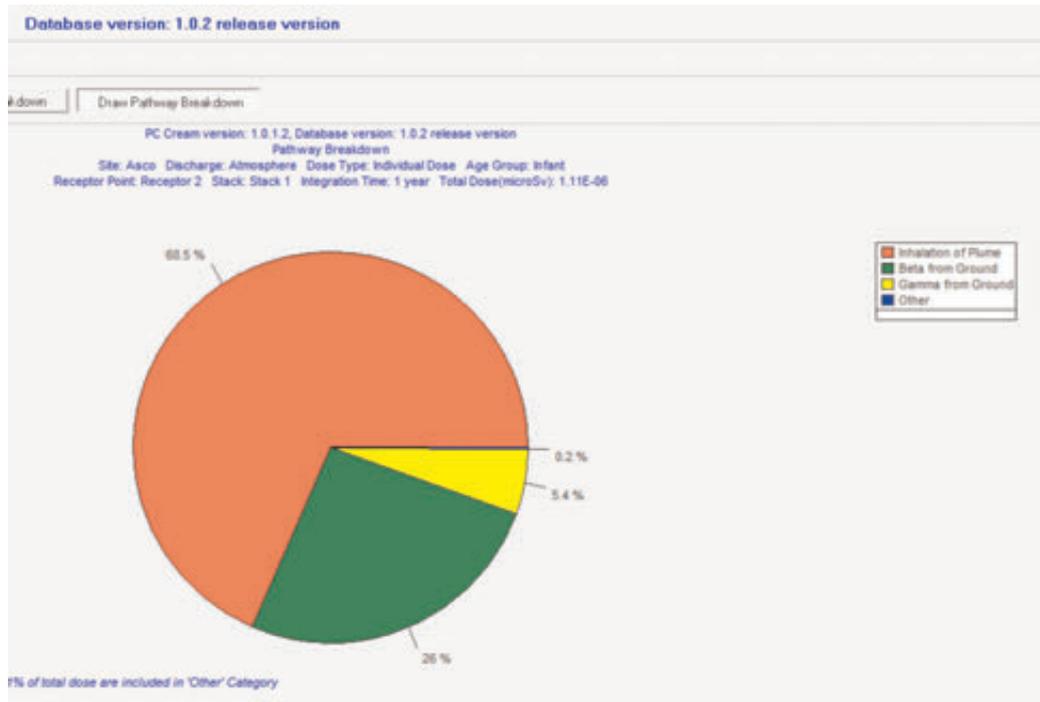
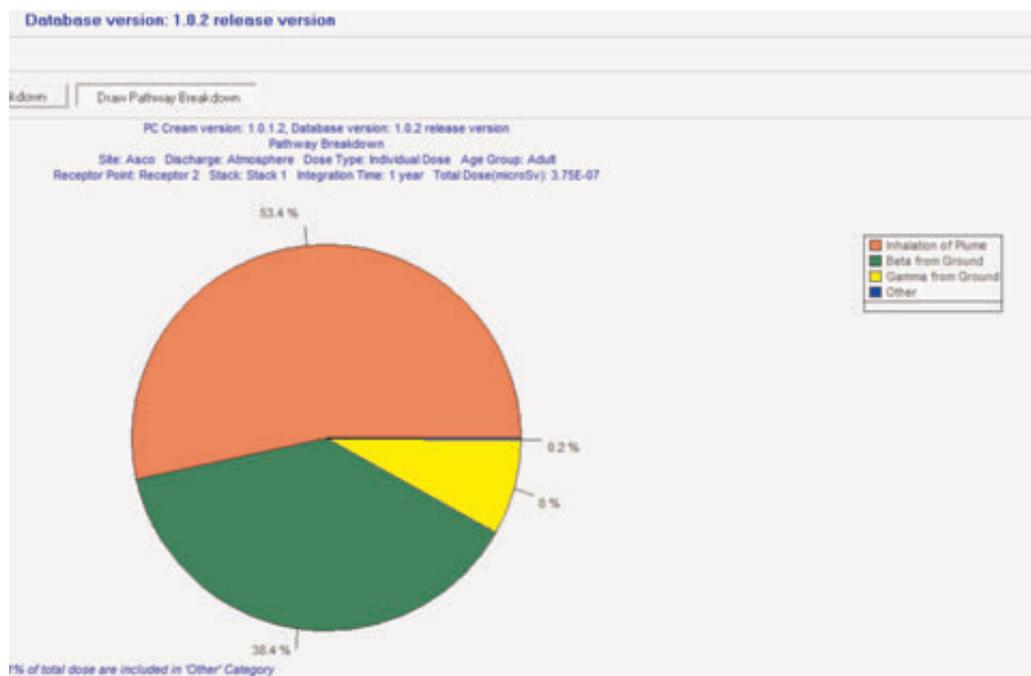


Figura 6.7. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. K-40



ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA INDUSTRIA
DE FABRICACIÓN DE BALDOSAS
DE GRES PORCELÁNICO



1. Actividad industrial

La actividad industrial está centrada en la fabricación de baldosas de gres porcelánico de tres tipos:

- Gres porcelánico natural.
- Gres porcelánico pulido.
- Gres porcelánico esmaltado.

El gres porcelánico es un producto vitrificado en toda su masa, que presenta como característica esencial una muy baja porosidad. Una variedad importante es el gres que tiene, formando parte del soporte, cantidades apreciables de micronizado de silicato de circonio y que se conoce con el nombre de “superblanco”.

La empresa fabrica alrededor de 5.000.000 m²/año, lo que supone una media diaria de 14.000 m²/día. Alrededor del 30 % de esta producción es de superblanco.

La fábrica consta de dos naves separadas por un espacio abierto: una de producción y otra de almacenamiento. En la nave de producción existen varias dependencias, algunas separadas por muros y otras no. En esta nave podemos distinguir:

- Almacenamiento de materias primas.
- Molienda vía húmeda y atomización.
- Prensado.
- Secado.
- Esmaltado.
- Cocción.
- Pulido.
- Preparación y almacenamiento de muestras para comerciales.
- Almacenamiento de producto acabado.

En la fábrica se trabaja de forma continua en jornadas de ocho horas y tres turnos por día. La sección de hornos trabaja siete días a la semana y el resto entre cinco y seis.

2. Procesos

Se detallan a continuación las etapas consideradas en el proceso de fabricación.

2.1. Recepción y almacenamiento de la materia prima

En la fábrica se utilizan las siguientes materias primas:

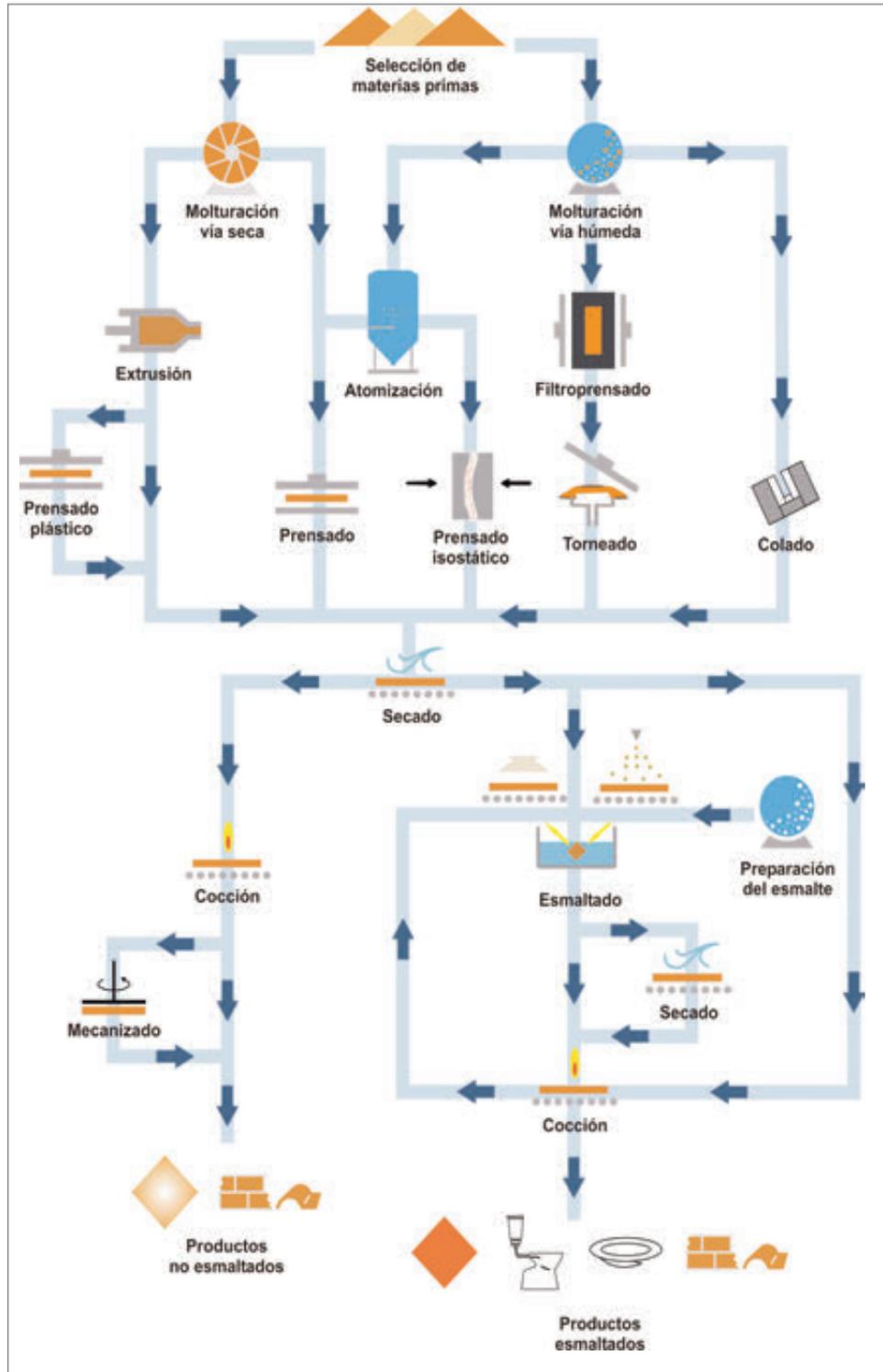
- Arcillas blancas de importación, de procedencia ucraniana mayoritariamente, inglesa y francesa.
- Caolín.
- Feldespato sódico y mixtos.
- Micronizado de silicato de circonio, de origen australiano y sudafricano.
- Arenas feldespáticas.

Las materias primas, llegan a la empresa por transporte de carretera, en camiones. Algunas (arcillas y caolín) se almacenan a granel, en espacios separados entre sí mediante muros, en lo que se denomina “granero”, mientras que el almacenamiento de la materia en forma de sólido polvoriento se realiza en silos de 50 toneladas de capacidad, cuya carga se efectúa mediante transporte neumático. Esta parte de la fábrica posee ventilación natural.

2.2. Dosificación de materias primas y aditivos

La dosificación de una determinada fórmula es un proceso en continuo y en automático. Para tal fin, a la salida de cada silo o tolva de almacenaje de la materia prima, hay una cinta extractora con célula de carga incorporada para extraer los distintos componentes de la fórmula simultáneamente, determinando y ajustando su caudal de salida automáticamente. La mezcla se recoge en una cinta colectora que la transporta a las distintas tolvas de precarga de los molinos.

Fig.7.1. Esquema del proceso de fabricación



2.3. Molienda

En la fábrica se realiza la molienda por vía húmeda con molinos de bolas. En la actualidad tienen trabajando un molino en continuo, con carga automática y una capacidad de 160 m³ y cinco molinos discontinuos con carga manual. El molino continuo no realiza la molturación de la mezcla para la pasta base de superblanco. Esta se lleva a cabo en los molinos discontinuos 3 y 4. Se realizan tres cargas/día y el vaciado de las materias primas al molino dura alrededor de 20 minutos, durante los cuales se dispersa material en polvo al ambiente (solo en la carga).

La suspensión resultante de la molienda se conoce como “barbotina” y es un líquido espeso de densidad superior al agua (1,6 g/cm³).

2.4. Atomización

La eliminación del agua que contiene la barbotina, hasta alcanzar el contenido en humedad necesario para cada proceso, se realiza mediante atomizadores. Esta suspensión, finamente nebulizada y dividida, se seca poniéndola en contacto con una corriente de gases calientes.

El granulado resultante, con una humedad alrededor del 6%, es descargado en una cinta transportadora y llevado a los silos para su posterior prensado.

La corriente de gases utilizada para secar la barbotina y obtener el polvo atomizado es eliminada por la parte inferior-media del atomizador. Este aire húmedo es depurado por medio de distintos equipos, de forma que se emite a la atmósfera un aire con un contenido en partículas inferior a 150 mg/Nm³.

2.5. Prensado de piezas

El procedimiento de conformación de las piezas es el prensado en seco mediante el uso de prensas hidráulicas. La fábrica dispone de nueve prensas.

2.6. Secado de piezas conformadas

La humedad de las piezas conformadas se reduce en secaderos rápidos verticales u horizontales. En esta operación los sólidos húmedos se exponen a la acción

de una corriente de aire caliente, de forma que se elimine parte del agua ligada físicamente.

2.7. Esmaltado

La fábrica también suministra gres porcelánico esmaltado, por lo que en este caso, después del secado, se pasan las baldosas por la línea de esmaltes. La aplicación del esmalte base se realiza principalmente mediante el denominado método de cortina, mientras que las técnicas de decoración utilizadas son las generales de este tipo de industrias: serigrafía, huecograbado, etc. La decoración de las baldosas dispersa en el medio ambiente materia particulada nebulizada que es aspirada y retenida por unos filtros antes de ser emitida a la atmósfera. El proceso de decoración también es automático.

2.8. Cocción

La fábrica dispone de cuatro hornos y solo realiza una cocción (monococción), tanto para la fabricación de gres porcelánico natural o técnico como esmaltado. Estos hornos son de tipo monoestrato de rodillos. Aquí las piezas se desplazan por encima de los rodillos y el calor para realizar la cocción lo suministran los quemadores de gas natural-aire situados en las paredes del horno.

Las piezas cocidas pasan bien a la línea de selección (cuando se trata de modelos sin tratamiento mecánico posterior) o bien a la sección de pulido (cuando requieren de ese tratamiento para obtener el acabado rectificado, pulido, semipulido, etc.).

2.9. Pulido

En el proceso de pulido las piezas son sometidas a la acción de diversos útiles de diamante en primer término y de cabezales con muelas de carburo de silicio después, a fin de alisar la superficie hasta conferirle la textura y el brillo deseados. Este proceso se realiza con una corriente continua de agua que arrastra los residuos producidos.

2.10. Selección y clasificación

La selección y clasificación del producto acabado consta de una parte manual y otras automáticas.

2.11. Embalaje

El embalaje, como paso previo al almacenamiento para su posterior expedición, es automático, excepto las muestras que se embalan como “muestrario” para distribuir a los comerciales.

2.12. Almacenamiento

El almacenamiento del producto terminado se realiza en una nave separada de la de producción, así como en el espacio al aire libre que existe entre ellas. El transporte hasta estos espacios lo realiza un operario que conduce una carretilla elevadora. Sin embargo, en la nave de fabricación se almacenan las piezas que se suministran como “muestras comerciales”.

3. Caracterización radiológica del término fuente

De acuerdo a los procesos descritos en el punto apartado 2 de este capítulo, se han identificado los siguientes materiales para informar sobre su forma física y química y para realizar el estudio radiológico:

- Materias primas: arenas de circonio, arcilla y feldespatos.
- Producto intermedio: atomizado.
- Productos acabados: baldosas de gres porcelánico técnico y gres porcelánico superblanco.
- Material en suspensión.
- Radón.
- Residuos:
 - Agua de recuperación de los molinos.
 - Agua de las pulidoras.
 - Filtros de las mangas de los atomizadores.
 - Filtros de aspiración del esmaltado.
 - Piezas cocidas desechadas.

3.1. Materias primas

La industria utiliza como materias primas arcillas blancas, sílice, feldespatos, caolín y silicato de circonio micronizado. De acuerdo con las medidas expuestas en el capítulo 3 de este documento, estos materiales, a excepción del silicato de circonio, tienen valores de uranio-238 y torio-232, cercanos a los valores medios encontrados para el suelo, de 50 Bq/kg. Por este motivo solo se analizó el silicato de circonio. En la tabla 7.1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7.1. Actividad específica (Bq · kg⁻¹) en muestras de materia prima

Material	U-238	Th-232	K-40
Micronizado Zr Si O ₄	3.346 ± 111	719 ± 43	< 117

3.2. Productos intermedios

Los únicos productos intermedios en el proceso de fabricación de las baldosas de gres porcelánico son los distintos tipos de atomizados. Puesto que su composición es la misma que la de los productos finales, excepto en el caso del gres esmaltado, no se tomaron muestras de estos y se analizaron directamente los productos finales.

3.3. Productos finales

Los productos finales resultado de la actividad industrial son, como ya se ha comentado, baldosas cerámicas de gres porcelánico técnico, con o sin silicato de circonio en su composición (superblanco), y gres porcelánico esmaltado.

Se tomaron dos muestras de gres porcelánico técnico: una sin silicato de circonio en su composición y la otra con silicato en una proporción del 3,6 %. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.2. para cuyo cálculo se ha considerado la existencia de equilibrio secular, soportada tanto por los resultados del capítulo 3 de este documento como por la bibliografía [10, 28].

Tabla 7.2. Actividad específica ($Bq \cdot kg^{-1}$) en muestras de producto acabado

Material	U-238	Th-232	K-40
Pavimento de gres porcelánico sin micronizado	75 ± 6	68 ± 12	507 ± 58
Pavimento de gres porcelánico superblanco	191 ± 11	76 ± 14	490 ± 6

Los valores encontrados están dentro del rango existente en la bibliografía [10, 28] y pueden modificarse en función del origen del micronizado de silicato de circonio utilizado por la empresa.

Las baldosas cerámicas se pueden considerar materiales de construcción, ya que forman parte de los materiales que mayoritariamente se utilizan para acabar los suelos de las casas. Así, estas baldosas también deberían cumplir con las recomendaciones dadas por la Unión Europea acerca del contenido en radiactividad de los materiales de construcción, contenidos en el documento *Radiation Protection, 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials*. De acuerdo con este documento, el producto final analizado cumpliría con los requisitos, ya que la suma de las concentraciones para el radio-226 (uranio-238), el torio-232 y el potasio-40 obtenidas, divididas por los límites máximos (300 Bq/kg para el radio-226, 200 para el torio-232 y 3.000 para el potasio-40) sería inferior a 1. Sin embargo, los valores analizados en el caso del superblanco podrían suponer ciertos problemas en el caso de su exportación a países como China, donde de acuerdo a la norma GB 6566-2001, se estaría en el límite para la contaminación interna dada por el cociente entre la actividad medida (190 Bq/kg) y el límite fijado por dicha norma que es de 200 Bq/kg [29].

3.4. Material en suspensión

Con el objeto de medir la concentración de polvo ambiental se utilizó un muestreador portátil de aire de

tipo jirafa marca F&J, modelo DF-14ME, que nos indica tanto el número de horas muestreadas como el volumen de aire (litros) que ha pasado por el filtro. La empresa suele disponer de medidas de datos de concentración de polvo inhalable, que son realizados por las mutuas laborales.

Los filtros que se utilizaron son de nitrato de celulosa de 0,8 micras de tamaño medio de poro.

El tiempo de muestreo, puesto que en la fábrica no se apreciaban cantidades importantes de polvo en el ambiente, se decidió que fuera similar al de los programas de vigilancia radiológica ambiental, es decir de una semana. Solo se tomó una muestra por punto.

Se muestrearon los siguientes puntos:

- Silo de silicato de circonio (P1).
- Molino discontinuo-3, que es el molino en el que se moltura la pasta base para el superblanco (P2).
- Atomizador-3 (P3).
- Almacén de producto acabado (P4).

La tabla 7.3 recoge los datos relativos a zona, fecha y horas de muestreo, así como la concentración de polvo obtenido en los filtros analizados.

Tabla 7.3. Medidas de concentración de polvo ambiental

Zona	Muestra	Fecha de toma	mg/m ³
Silo de silicato de circonio	PP1	5-mayo-2006/12-mayo 2006	0,71
Molino discontinuo-3	PP2	12-mayo-2006/19-mayo 2006	1,81
Atomizador-3	PP3	19-mayo-2006/26-mayo 2006	1,53
Almacén de producto acabado	PP4	26-mayo-2006/2-junio 2006	0,04

Las medidas de la concentración de polvo inhalable en ambiente realizadas, ponen de manifiesto que las dos

zonas con mayor contenido en polvo se corresponden con los muestreos efectuados en las cercanías del molino discontinuo y del atomizador.

Sobre cada uno de los filtros recogidos, se realizó una determinación de actividad alfa total y una de actividad beta total, utilizando un contador proporcional de flujo de gas modelo Berthold LB 770-2.

En la tabla 7.4 se muestra los resultados obtenidos para ambas determinaciones en milibecquerelios por metro cúbico (mBq /m³).

Tabla 7.4. Medidas de actividad alfa total y beta total (mBq /m³)

Zona	Muestra	Alfa total	Beta total
Silo de silicato de circonio	PP1	0,67 ± 0,05	0,95 ± 0,03
Molino discontinuo-3	PP2	5,8 ± 0,2	4,8 ± 0,7
Atomizador-3	PP3	1,4 ± 0,1	1,48 ± 0,04
Almacén de producto acabado	PP4	0,37 ± 0,02	0,14 ± 0,01

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 7.4, el muestreo realizado junto a la carga del molino 3, en el que como ya se comentó se realiza la molienda del porcelánico superblanco, tiene una actividad alfa total y beta total muy superior al resto de las zonas muestreadas, prueba que en el ambiente se dispersa polvo con mayor contaminación radiactiva como consecuencia de la composición de la pasta del superblanco. Los valores encontrados para la actividad beta total en el silo y en el almacén son del orden del promedio ambiental (0,49 mBq/m³).

3.5. Radón

Debido a la mayor importancia desde el punto de vista de evaluación de las dosis, solo se evaluará la concentración de radón-222 en aire. La medida se llevó a cabo utilizando un *canister* de carbón activo. Este dispositivo “atrapa” al gas, que se cuantifica a través de sus descendientes mediante espectrometría gamma, utilizando un detector de germanio hiperpuro.

Los *canisters* se colocaron en los mismos puntos que la toma de material en suspensión, al que se añadió uno en el molino continuo, otro en la línea de esmaltado y un tercero en la oficina. Se tomaron dos muestras por punto. La tabla 7.5 relaciona los valores obtenidos en bequerelios por metro cúbico (Bq/m³).

Tabla 7.5. Medidas de concentración de radón por zonas (Bq/m³)

Zona	Media
Silo de silicato de circonio	12 ± 8
Molino continuo	< 3,9
Molino discontinuo-3	< 3,9
Atomizador-3	12 ± 8
Línea de esmaltado	< 3,9
Almacén de producto acabado	< 3,9
Oficina	16 ± 8

Cuatro de los siete puntos muestreados presenta valores de radón por debajo del límite inferior de detección. Los valores encontrados están por debajo de 20 Bq/m³ y el máximo es el correspondiente a la oficina. Los valores son inferiores a los encontrados en el interior de viviendas para la Comunidad Valenciana [24].

3.6. Residuos

La empresa recicla la mayoría de los residuos que genera y, de acuerdo al proceso de fabricación, se generan los siguientes:

- Agua de recuperación de los molinos.
- Agua de las pulidoras.
- Filtros de las mangas de los atomizadores.
- Filtros de aspiración del esmaltado.
- Piezas cocidas desechadas.

Se realizó en todas las muestras un análisis isotópico gamma. Las muestras de agua también se analizaron para conocer su actividad alfa total y beta total. La empresa suministró además agua de pozo que utiliza para compensar las pérdidas de agua de proceso.

Los resultados obtenidos en el análisis isotópico gamma, en las muestras de agua analizadas, se pueden resumir en:

- El agua de pozo no tiene ninguno de los emisores gamma analizados (series naturales y algunos artificiales) por encima del LID.
- En el agua de la pulidora se encontró una actividad de potasio-40 de 2.550 ± 435 Bq/m³.
- Sí se encontraron radionucleidos naturales con valores superiores al LID en la muestra de agua de recuperación, que como era esperable contenía una gran proporción de sólidos en suspensión (54,8 g/l).

En cuanto a los residuos sólidos analizados (filtro de preparación de pasta, filtro de aspiración de la sección de esmaltado y piezas sólidas), todos ellos tienen en su espectro los radionucleidos emisores gamma de las series naturales.

La tabla 7.6 resume los valores encontrados.

Tabla 7.6. Actividad específica (Bq/kg) en muestras de residuos

Material	U-238	Th-232	K-40
Agua de recuperación de los molinos	66 ± 4	60 ± 6	5 ± 3
Filtros de las mangas de los atomizadores	49 ± 3	53 ± 7	440 ± 35
Filtros de aspiración del esmaltado	178 ± 8	59 ± 4	474 ± 38
Piezas cocidas desechadas	71 ± 3	57 ± 5	530 ± 28

Los órdenes de actividad encontrados son similares a las actividades de los productos acabados.

Respecto a la determinación alfa y beta en las muestras de agua, la tabla 7.7 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7.7. Actividad alfa total y beta total (kBq/m³)

Muestra	Alfa total	Beta total
Agua de pozo	< 0,1	0,06 ± 0,03
Agua de recuperación	64 ± 9	109 ± 4
Agua de las pulidoras	< 0,1	3,5 ± 0,4

La única muestra con actividad alfa total es el agua de recuperación, que como ya se comentó es un agua de proceso con cantidades elevadas de partículas sólidas en suspensión. Esta agua se recicla y, de acuerdo con la información facilitada por la empresa, no se vierte al alcantarillado público. En esta muestra también se midió una actividad beta total elevada.

4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo

4.1. Zonas de exposición

En esta parte del estudio, y de acuerdo a lo expuesto en los puntos anteriores, se van a identificar aquellas zonas en las que exista un potencial riesgo de exposición a las radiaciones ionizantes en sus dos aspectos: la exposición debida a la radiación externa, relacionada fundamentalmente con la existencia de materiales radiactivos ubicados en distintas partes de la fábrica, y la contaminación interna relacionada con la inhalación de polvo y de radón.

De acuerdo con esto, se han identificado las siguientes zonas de riesgo potencial que se describen a continuación y que coinciden con los procesos descritos en el apartado 2 de este capítulo.

4.1.1. Almacén de materia prima

De acuerdo con lo descrito en el apartado 2 de este capítulo, la salida del micronizado del silo se realiza prácticamente sin emisión de polvo al medio, ya que tiene a la salida lo que denominaron “máquina tran-

quilizadora”, por lo que el riesgo de exposición se deberá, principalmente, a la exposición externa por estar situado en las inmediaciones del silo.

4.1.2. Molinos

El único punto susceptible de evaluarse está en las inmediaciones de la tolva de precarga y del molino 3, que es en el que se realiza la molturación de la pasta base para el gres superblanco y que contiene en su composición silicato de circonio.

En esta zona, se observa de forma visible la existencia de polvo en suspensión, que podría dar lugar a una contaminación interna, así como en el suelo. Los molinos se llenan de materia prima que contiene micronizado de silicato de circonio, por lo que también podría existir un riesgo de irradiación externa en sus alrededores.

4.1.3. Atomizadores

Debido al diseño de los atomizadores, la irradiación externa puede ser descartada. Sin embargo, al existir cantidades de polvo apreciables en el ambiente, podría existir riesgo de contaminación interna.

4.1.4. Líneas de prensado y esmaltado

Esta zona de la fábrica está totalmente automatizada y trabaja en continuo. No se ve polvo en el ambiente (aspiración) y no existe, en principio, riesgo de exposición externa.

4.1.5. Pulido

En esta parte de la fábrica, apenas se observa polvo en el ambiente. El riesgo de exposición externa es análogo a la zona de esmaltado.

4.1.6. Embalaje

Las baldosas se embalan automáticamente. Solo existe una zona en la que se embalan a mano las muestras que se suministran a los comerciales, para la promoción de los distintos tipos de porcelánico. En este último caso podría existir un cierto riesgo de exposición externa, en función del tiempo de permanencia en la zona.

4.1.7. Almacén de producto acabado

Se trata de una gran nave, en la que no existe una ubicación especial para el porcelánico superblanco.

4.2. Identificación de puestos de trabajo

La empresa tiene más de 300 trabajadores. Los trabajadores identificados como potencialmente expuestos son:

- Operarios de los molinos, que realizan las siguientes tareas:
 - Control de dosificación de materias primas.
 - Llenado y vaciado de los molinos discontinuos.
 - Controles de la barbotina resultante, tanto de los molinos discontinuos como del continuo.
- Operarios de los atomizadores, que realizan las siguientes tareas:
 - Control de la humedad del polvo atomizado.
 - Ajuste y control de los distintos equipos que intervienen en el proceso de atomización: bombas, lanzas, tamices.
 - Limpieza.
- Operario de muestras, que prepara los paneles de piezas y las muestras comerciales.

De acuerdo con la información suministrada por la empresa, los trabajadores no se mueven de forma rutinaria por los alrededores del silo de silicato de circonio, permaneciendo como máximo un tiempo de 15 minutos cuando realizan alguna tarea de limpieza.

5. Evaluación de dosis al trabajador

5.1. Dosis externa

Se realizó una primera tanda de medidas mediante un monitor de radiación portátil Berthold LB 133, que mide tasa de dosis en microSievert/hora ($\mu\text{Sv/h}$). Esta, que es una medida puntual, dio valores de fondo en

todos los puntos muestreados, que coinciden con los de muestreo de radón, excepto en la proximidad del silo de silicato de circonio y junto al producto acabado.

La medida de la dosis integrada, es decir de la dosis durante un tiempo determinado, se realizó haciendo uso de dosímetros de termoluminiscencia (TLD), colocados en las zonas de estudio. El muestreo se realizó durante los meses de mayo y julio de 2006.

La tabla 7.8 muestra el rango de valores de tasa de dosis externa ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) medidos con el monitor de radiación Berthold LB 133, y el de los medidos con los dosímetros de TLD. Se han utilizado los valores de tasa de dosis existentes en la oficina de la fábrica como valor de dosis externa de zona no expuesta, que se ha restado a los valores brutos medidos.

Tabla 7.8. Medidas de tasa de dosis externa ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) por zona

Zona	LB 133	TLD 100
Silo de silicato de circonio	0,2-0,4	0,3-0,5
Molino continuo	–	–
Molino discontinuo-3	0-0,02	–
Atomizador	–	–
Esmaltado	–	–
Almacén de producto acabado	0,04-0,08	0,02-0,07
Oficina	–	–

Los resultados ponen de manifiesto que la única zona con riesgo de irradiación externa son las proximidades al silo de silicato de circonio y, con valores ligeramente por encima del valor del fondo ambiental, el almacén de producto acabado.

En la tabla 7.9 se dan los datos correspondientes a la dosis externa anual, suponiendo que el trabajador permanece 2.000 horas/año en cada una de las zonas.

Tabla 7.9. Dosis externa (mSv/año) por zona

Zona	LB 133	TLD 100
Silo de silicato de circonio	0,4-0,8	0,6-1
Molino continuo	–	–
Molino discontinuo-3	0-0,04	–
Atomizador	–	–
Esmaltado	–	–
Almacén de producto acabado	0,08-0,16	0,04-0,14
Oficina	–	–

Como puede observarse, en ninguna zona existe un riesgo de irradiación externa. La zona de almacenamiento del silicato de circonio tiene un valor medido máximo de 1 mSv.

Por otra parte, y de forma simultánea, considerando las características del proceso, se decidió colocar dosímetros personales a los operarios de molinos y a los de atomizadores, con objeto de conocer su exposición real. También a una persona de promoción y a otra del almacén de producto acabado. Por último, también se le suministró dosímetro a un administrativo.

La medida de la dosis personal en el mes de mayo dio como resultado valores por debajo de 0,1 mSv/mes. Solo la persona de promoción dio un valor de 0,11 mSv. Con objeto de confirmar este valor, se procedió a medir la dosis durante el mes de julio. Todos los resultados obtenidos dan por debajo del nivel de notificación de 0,1 mSv.

5.2. Dosis interna

Se ha asumido que la concentración de uranio-238, torio-232 y potasio-40 en los distintos ambientes o zonas es la analizada en los materiales ubicados en ellas, según lo expuesto en las tablas 7.1 y 7.2; es decir, la actividad del silicato de circonio en los silos y la del

porcelánico superblanco en el molino, el atomizador y el producto acabado. Este valor de actividad se supone el mismo para todos los miembros de la serie que encabezan el uranio-238 y el torio-232, modificados por la fracción de equilibrio correspondiente.

De acuerdo con el capítulo 4, se ha asumido una tasa de inhalación de 1,25 m³/h mientras que el tiempo de exposición considerado es de 2.000 h/año y no se han considerado factores de reducción de dosis individuales.

La tabla 7.10 muestra los valores de dosis efectiva comprometida o dosis interna por zona, es decir la dosis interna que recibiría un trabajador si permaneciera las ocho horas de su jornada laboral en esa zona.

Tabla 7.10. Dosis interna por zonas (mSv/año)

Zona	Dosis (mSv)
Silo de silicato de circonio	0,32
Molino discontinuo-3	0,08
Atomizador-3	0,07
Almacén de producto acabado	< 0,01

5.3. Dosis total

Puesto que la dosis total es la suma de la interna y de la externa, en la tabla 7.11 se dan las dosis totales mínima y máxima por zona.

Tabla 7.11. Dosis total anual por zona (mSv)

Zona	Externa		Interna	Total	
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
Silo de silicato de circonio	0,6	1	0,32	0,92	1,32
Molino discontinuo-3	–	0,04	0,08	0,08	0,12
Atomizador-3	–	–	0,07	0,07	0,07
Almacén de producto acabado	0,04	0,16	–	0,04	0,16

Así pues, la única zona con riesgo radiológico sería la de almacenamiento del micronizado en los silos y su transporte neumático para alimentar la tolva de mezclado. A partir de esta zona de la fábrica, debido principalmente a la drástica disminución de la actividad del material implicado producto de la mezcla del silicato de circonio con otros materiales, las dosis estimadas, incluso suponiendo una jornada laboral completa estarían muy alejadas de 1 mSv/año.

Por otra parte estos resultados se han obtenido bajo los supuestos de:

- Permanencia a 20 cm del silo de silicato de circonio durante toda la jornada laboral.
- No utilización de elementos de protección como mascarillas.

Si de acuerdo a lo expuesto en el apartado 4 de este capítulo, se supone que el trabajador pasa 15 minutos en el entorno del silo, la dosis máxima total recibida por el mismo sería de 0,04 mSv.

6. Evaluación de dosis al público

La empresa estudiada recicla los efluentes líquidos y de acuerdo con lo expuesto en el capítulo 4 solo se van a evaluar las emisiones atmosféricas. De todas ellas se ha elegido la emisión correspondiente a los atomizadores, en el caso más desfavorable cuando el atomizado sea de porcelánico superblanco. No se dispone de la rosa de los vientos de la zona por lo que se ha supuesto uniforme.

Los datos relevantes de la emisión suministrados por la empresa son:

- Cantidad de partículas: 11,83 mg/m³.
- Caudal de emisión: 17,97 m³/s.
- Altura de la chimenea: 18 m.
- Entorno: polígono industrial con casas lejos y huertos alrededor (factor PC CREAM: 0,3, áreas agrícolas).

Se va a suponer que la concentración de actividad de las partículas que se emiten se corresponde con las del atomizado de más actividad, que de acuerdo a lo expuesto en el apartado 3 de este capítulo, serán las del producto final “porcelánico superblanco” (tabla 7.2). Además, estas concentraciones son superiores a las medidas en los filtros de manga de los atomizadores en el momento de la toma, ya que se estaría fabricando un porcelánico distinto al superblanco (tabla 7.6). Así pues tendríamos:

- Uranio-238 (y miembros de la serie): 191 Bq/kg.
- Torio-232 (y miembros de la serie): 76 Bq/kg.
- Potasio-40: 490 Bq/kg.

La tasa de emisión sería de:

- Uranio-238 (y miembros de la serie): 1,28E+06 Bq/año.
- Torio-232 (y miembros de la serie): 5,09E+05 Bq/año.
- Potasio-40: 3,28E+06 Bq/año.

Conocidos los datos anteriores y haciendo uso de los supuestos enumerados en el contenido de la etapa 6 del capítulo 4, la ejecución del programa PC

CREAM proporciona, entre otros, los siguientes datos:

Dosis efectiva anual para la serie del uranio-238, por vías de exposición para los dos grupos de edad considerados.

Los valores para estas dosis pueden verse en la tabla 7.12, cuando el punto de recepción está a 500 m del foco emisor.

En las figuras 7.2 y 7.3 se puede ver gráficamente la contribución para cada vía.

Tabla 7.12. Dosis efectiva serie U-238 (μSv/año)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	9,8E-03	6,75E-03
Dosis externa nube gamma	1,83E-10	9,14E-11
Dosis externa nube beta	2,18E-12	1,09E-12
Dosis externa suelo gamma	1,82E-06	9,08E-07
Dosis externa suelo beta	1,34E-06	6,72E-07
Resuspensión	8,74E-06	6,50E-06
Ingestión de hígado de vaca	3,06E-04	2,31E-04
Ingestión de carne de vaca	7,87E-05	5,70E-05
Ingestión de leche de vaca	7,82E-04	1,09E-04
Ingestión de productos lácteos	1,23E-03	9,94E-05
Ingestión de frutas	4,23E-05	1,77E-05
Ingestión de cereales	7,95E-05	5,77E-05
Ingestión de vegetales verdes	2,79E-04	3,46E-04
Ingestión de vegetales de raíz comestible	1,57E-06	8,19E-07
Ingestión de hígado de cordero	4,67E-04	3,56E-04
Ingestión de carne de cordero	6,21E-05	8,78E-05
Total	1,24E-02	8,12E-03

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

Figura 7.2. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. Serie U-238

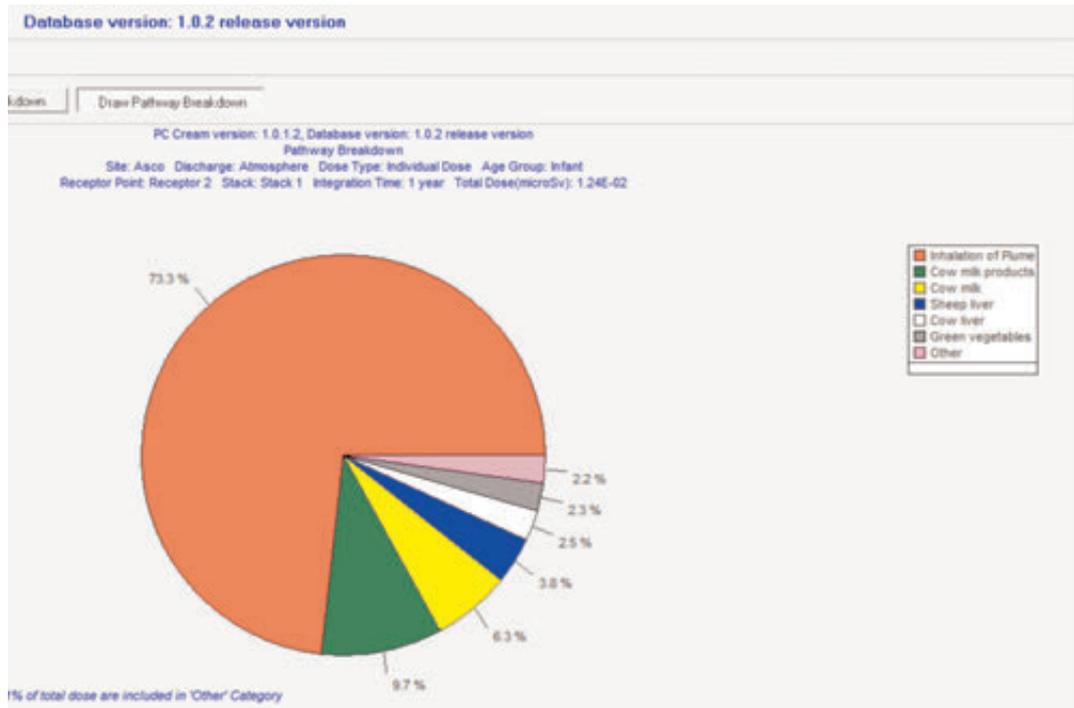
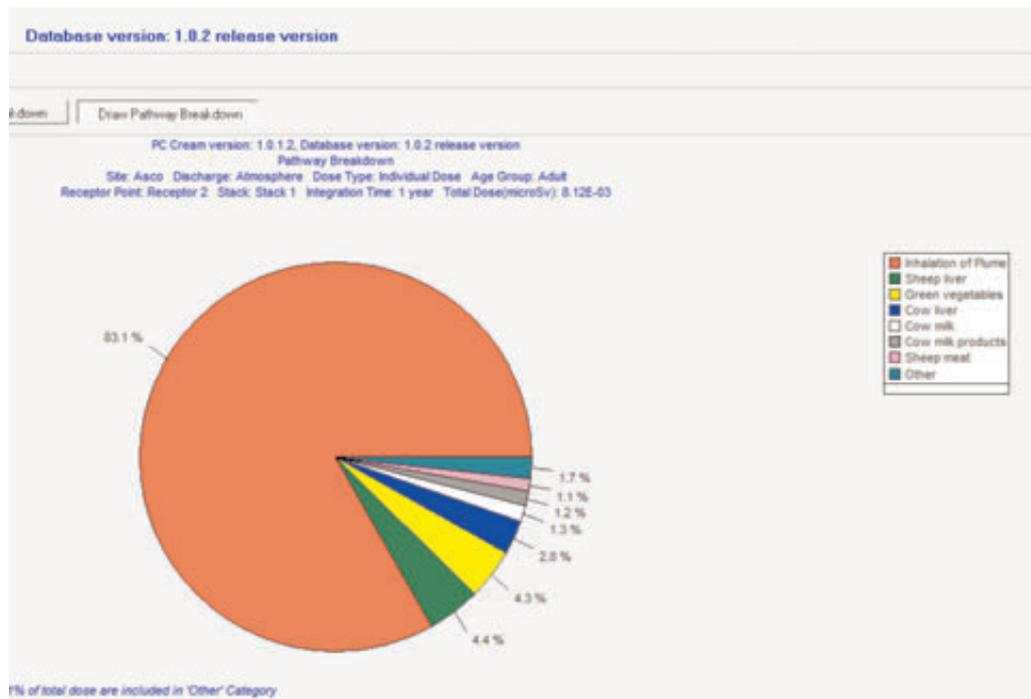


Figura 7.3. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. Serie U-238



Dosis efectiva anual para la serie del torio-238, por vías de exposición para los dos grupos de edad considerado.

Los valores para estas dosis pueden verse en la tabla 7.13, cuando el punto de recepción está a 500 m del foco emisor.

Tabla 7.13. Dosis efectiva serie Th-232 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	8,46E-03	6,41E-03
Dosis externa nube gamma	3,06E-11	1,53E-11
Dosis externa nube beta	6,82E-13	3,41E-13
Dosis externa suelo gamma	5,24E-07	2,62E-07
Dosis externa suelo beta	2,11E-07	1,05E-07
Resuspensión	8,15E-06	6,18E-06
Ingestión de hígado de vaca	6,78E-07	5,16E-07
Ingestión de carne de vaca	3,79E-06	2,35E-06
Ingestión de leche de vaca	6,06E-05	5,56E-06
Ingestión de productos lácteos	9,06E-05	4,96E-06
Ingestión de frutas	1,83E-05	5,36E-06
Ingestión de cereales	8,66E-05	3,59E-05
Ingestión de vegetales verdes	5,46E-05	5,74E-05
Ingestión de vegetales de raíz comestible	7,55E-07	2,68E-07
Ingestión de hígado de cordero	1,30E-06	9,66E-07
Ingestión de carne de cordero	1,97E-06	2,43E-06
Total	8,78E-03	6,54E-03

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

En las figuras 7.4 y 7.5 se pueden ver gráficamente la contribución para cada vía.

Dosis efectiva anual para el potasio-40 por vías de exposición para los dos grupos de edad considerado.

De acuerdo a lo comentado en el capítulo 4, no se va a considerar la vía de incorporación a través de la ingestión de alimentos. Los valores pueden verse en la tabla 7.14 para una distancia del foco emisor de 500 m.

En las figuras 7.6 y 7.7 se puede ver gráficamente la contribución para cada vía.

Tabla 7.14. Dosis efectiva K-40 ($\mu\text{Sv/año}$)*

Vía de exposición	Bebé	Adulto
Inhalación	5,31E-06	1,401E-06
Dosis externa nube gamma	4,51E-09	2,26E-09
Dosis externa nube beta	1,46E-09	7,28E-10
Dosis externa suelo gamma	4,76E-07	2,38E-07
Dosis externa suelo beta	1,92E-06	9,58E-07
Resuspensión	5,03E-09	1,33E-09
Total	7,71E-06	2,60E-06

(*) Distancia al foco emisor: 500 m.

Figura 7.4. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. Serie Th-232.

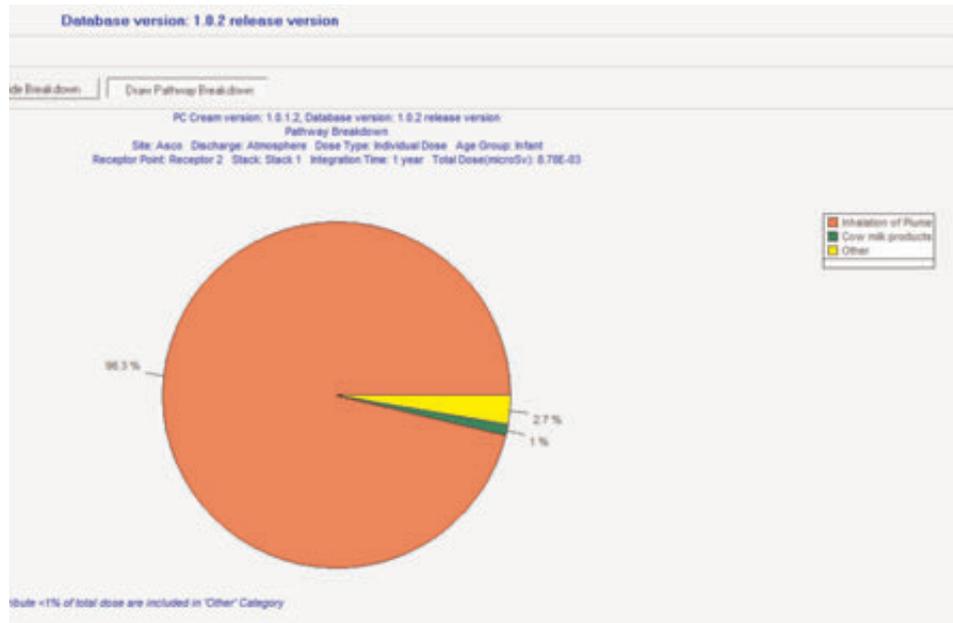


Figura 7.5. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. Serie Th-232

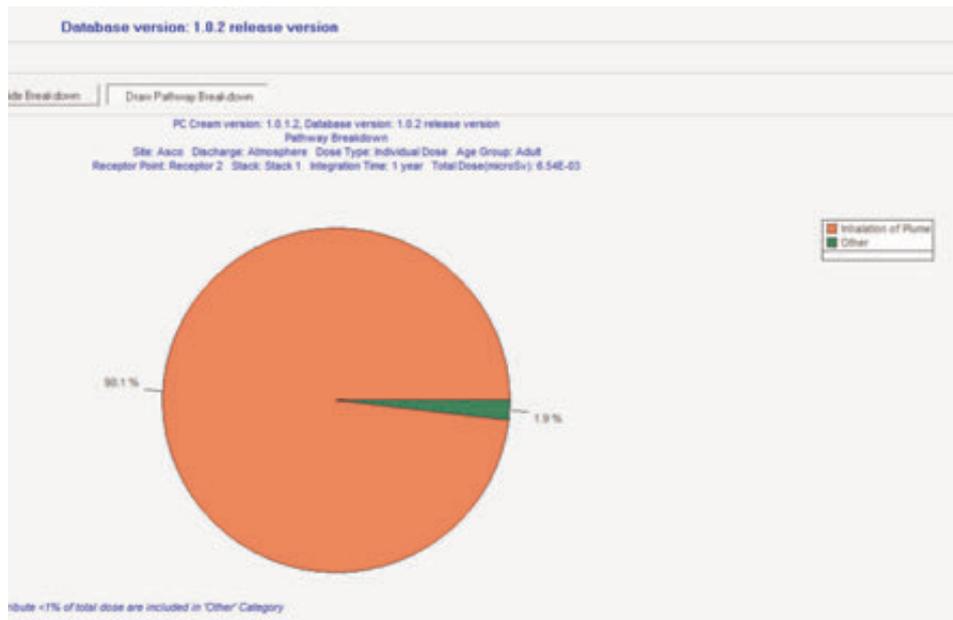


Figura 7.6. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “bebé”. K-40

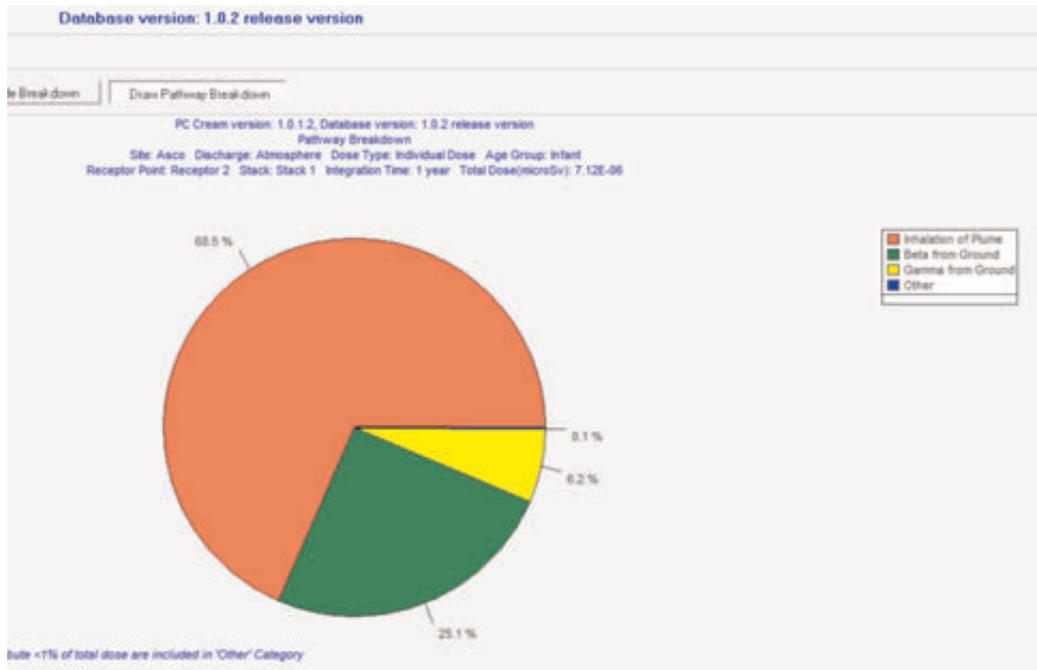
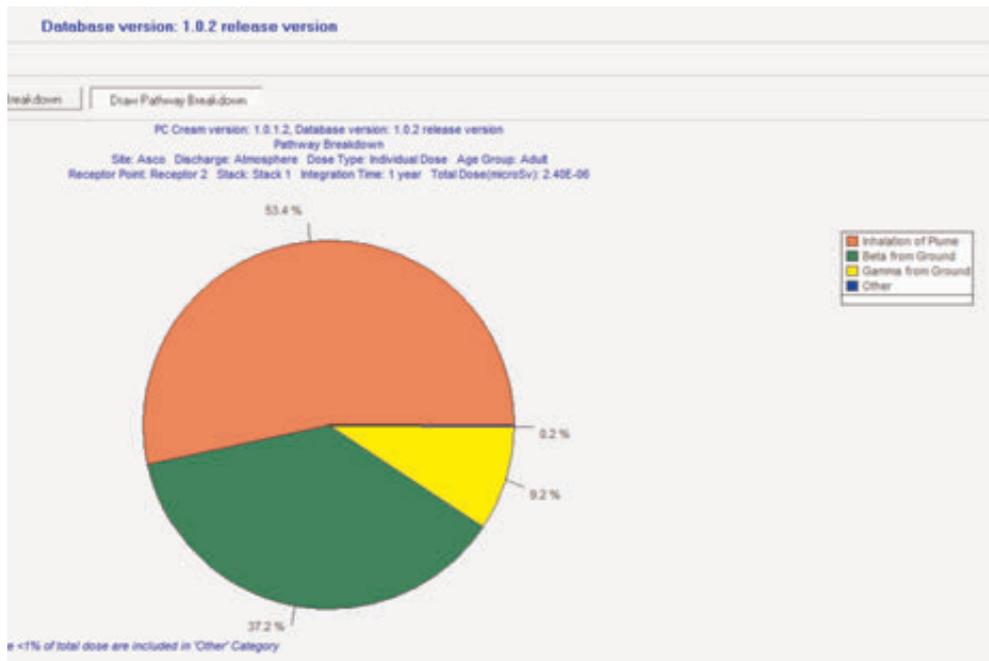


Figura 7.7. Contribución de las distintas vías a la dosis total para el “adulto”. K-40



Dosis efectiva anual total para los dos grupos de edad y las tres distancias evaluadas.

Los valores de la dosis efectiva total se presentan en la tabla 7.15.

Tabla 7.15. Dosis efectiva total ($\mu\text{Sv/año}$)

	100 m		500 m		1.000 m	
	Bebé	Adulto	Bebé	Adulto	Bebé	Adulto
Serie U-238	1,24E-02	7,36E-03	1,23E-02	8,12E-03	5,82E-03	3,81E-03
Serie Th-232	6,86E-03	4,98E-03	8,78E-03	6,54E-03	3,06E-03	4,12E-03
K-40	8,54E-06	1,19E-06	7,71E-06	2,60E-06	3,51E-03	3,24E-06
Total	1,93E-02	1,23E-02	2,11E-02	1,47E-02	1,24E-02	7,93E-03

Los resultados obtenidos, reflejados en las tablas 7.12, 7.13, 7.14 y 7.15 indican que:

- Las dosis implicadas, tanto para el adulto como para el grupo de mayor riesgo (bebé), son del orden de 10^{-2} microSievert, es decir prácticamente cero, lo que corrobora el nulo impacto radiológico para los miembros del público debido a este tipo de actividad industrial.
- Como era previsible, las dosis de la serie del uranio-238 contribuyen más al total que la del torio-232, siendo esta contribución mayor para el “bebé” que para el “adulto”, mientras que los valores para el potasio-40 no son significativos.
- El máximo de dosis se corresponde con una distancia al foco emisor de 500 metros.
- Al estudiar la vía de evacuación atmosférica, la principal vía de contribución a la dosis es la inhalación de aerosoles en ambas series y también en el potasio-40. Sin embargo, mientras que para la serie del torio-232 esta contribución es prácticamente del 100% para el “adulto” y con una ligera contribución de productos lácteos y cereales para el “bebé”, en la serie del uranio-238 también tienen una importancia relativa el consumo de alimentos, leche y productos lácteos para el bebé, hígado y vegetales de hoja verde, debido fundamentalmente a la ingesta de plomo-210 y polonio-210. En el caso del potasio-40 también contribuye a la dosis la irradiación externa beta y gamma debida al suelo. Esta distribución se conserva para todas las distancias evaluadas.

CONCLUSIONES



8

De acuerdo con lo expuesto en los puntos anteriores, las principales conclusiones obtenidas en el estudio radiológico de la industria cerámica y auxiliares son las que a continuación se relacionan:

- El riesgo radiológico está asociado al uso del silicato de circonio, tanto en forma de arena como molturado (harina y micronizado), por lo que las industrias cerámicas que no lo utilicen no están obligadas a la realización de un estudio radiológico.
- El impacto radiológico asociado a las actividades industriales de fabricación de fritas y de gres porcelánico es muy pequeño, y está relacionado con el riesgo potencial de irradiación externa en las zonas de almacenamiento del silicato de circonio. El incremento de dosis efectiva de los trabajadores que desarrollan su actividad laboral en las mismas es inferior a 1 mSv/año. Ambas industrias utilizan silicato de circonio molturado y desde la primera parte del proceso se produce su mezcla con otras materias primas, de forma que el producto obtenido presenta concentraciones de actividad inferiores al mismo en uno o dos ordenes de magnitud.
- El impacto radiológico asociado a la molturación del silicato de circonio en forma de arena, aunque pequeño, puede necesitar realizar un estudio radiológico con objeto de descartar cualquier incremento de dosis efectiva de sus trabajadores. En esta actividad industrial, el silicato de circonio mantiene su concentración de actividad a lo largo de todo el proceso industrial. De acuerdo con lo expuesto en este documento, el uso de mascarillas limitaría la dosis interna, pero el estudio con dosímetros personales pone de manifiesto que para aquellos puestos de trabajo con un tiempo de permanencia o índice de ocupación importante en las zonas con una exposición por irradiación externa elevada, podría existir un incremento de dosis efectiva superior a 1 mSv/año.
- El impacto radiológico en el público, producido por la molturación de la arena, es superior a la fabricación tanto de fritas como de gres porcelánico, siendo para las tres actividades industriales prácticamente nulo.

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS



- [1] Commission of the European Communities, Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996, "Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General Public Against the Dangers Arising from Ionizing Radiation", *Official Journal of EC*, Series L, No. 159, 1996.
- [2] Real Decreto 783/2001, Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes, BOE n° 178 de 26 de julio de 2001.
- [3] European Commission, "Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation source", *Radiation Protection* 88, 1997.
- [4] European Commission, "Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides", *Radiation Protection* 95, 1999.
- [5] European Commission, "Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally occurring radionuclides", *Radiation Protection* 107, 1999.
- [6] NRPB (National Radiation Protection Board), "Working with Zircon Sands", *NRPB Broadsheet Series*, 1993.
- [7] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources and Effects of Ionizing Radiation; Report to the General Assembly with Scientific Annexes*, Vol 1&2, UN. New York, 2000.
- [8] ITC (Instituto de Tecnología Cerámica), *Descripción de la industria cerámica y auxiliar en España*, Informe n° C050893, 2005.
- [9] ORTEC, Programa de Análisis GammaVisión (v. 5.1).
- [10] BRUZZI, L.; BARONI, M. *et al.* "Radioactivity in raw materials and end product in the Italian ceramics industry", *Journal of Environmental Radioactivity*, 47 (2000), 171-181.
- [11] TURHAN, S. Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in Turkish cement and raw materials, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (2008), 404-414.
- [12] Organización Internacional de Energía Atómica, OIEA, Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries, *Safety Reports Series*, No. 51, 2007.
- [13] OCDE, *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials*, 1979
- [14] European Commission, "Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials", *Radiation Protection* 112, 1999.
- [15] NOUR KHALIFA AHMED, "Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, UPer Egypt", *Journal of Environmental Radioactivity*, 83 (2005), 91-99.
- [16] XINWEI, L. "Radioactivity level in Chinese building ceramic tile", *Radiation Protection Dosimetry*, 112 (2004), 323-327.
- [17] RIGHI, S. *et al.* "Natural radioactivity in Italian ceramic tiles", *Radioprotection*, 44 (2009), 413-419.
- [18] *MicroShield. V5. User's Manual*, 1996. Rockville, Maryland, Grove Engineering Ed.
- [19] QADMOD-GP. Point Kernel Gamma-Ray Shielding Code with Geometric Progression Buildup Factors. RSICC Computer Code Collection. 1990. Oak Ridge National Laboratory.
- [20] SMOPIE (*Strategies and Methods for Optimisation of Protection against Internal Exposures of Workers from Industrial Natural Sources*). Final Report. Contract N° FIGM-CT2001-00176,UE.
- [21] European Comission, "Effluent and dose control from European Union NORM industries. Assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach". *Radiation Protection* 135, 2003.

- [22] SMITH J. G. *et al.* PC-CREAM 08, RPD-EA-9-2009, Health Protection Agency.
- [23] SIMMONDS, J. R.; LAWSON, G., y MAYALL, A. "Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment". *Radiation Protection* 72, EUR 15760, Luxemburg EC.
- [24] Italian National Group for Studying Radiological implications in the use of zircon sand. "Radiation protection aspects of the use of zircon sand", *The Science of the total Environment*, 45 (1985),135-142.
- [25] Consejo de Seguridad Nuclear, CSN, *Concentraciones de radón en viviendas españolas*, Informe Técnico, INT-04.09, 2004.
- [26] HARTLEY, B. M. "The measurement of radiation levels in Australian zircon milling plants". *Health Physics*, 80 (2001), 16-23.
- [27] DUNDERALE, J. "Research into the temperature release of polonium-210 from a sample of zircon". Rep. NRPB/MR/3/1996. *National Radiological Protection Board*, UK, 1996.
- [28] BRUZZI, L., y RIGHI, S. *Il recepimento della direttiva 96/29/Euratom nell'industria italiana delle piastrelle di ceramica*. Feria de cerámica. Bolonia (1999).
- [29] XINWEI, L. "Radioactivity level in Chinese building ceramic tile". *Radiation Protection Dosimetry* 112, 323-327 (2004).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	5
1. RESUMEN DEL PROYECTO	11
2. DESCRIPCIÓN DEL SECTOR INDUSTRIAL	13
3. CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA	15
1. Radiactividad natural	16
2. Materiales cerámicos	20
2.1. Materias primas	20
2.2. Productos intermedios	22
2.3. Productos finales	22
3. Caracterización radiológica	23
3.1. Materias primas	23
3.2. Productos intermedios	27
3.3. Productos finales	29
4. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO RADIOLÓGICO	33
1. Etapa 1. Descripción de la actividad industrial	34
2. Etapa 2. Descripción de los procesos de producción	34
3. Etapa 3. Caracterización radiológica del término fuente	34
4. Etapa 4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo	34
5. Etapa 5. Evaluación de dosis al trabajador	35
5.1. Evaluación de la dosis externa	35
5.2. Evaluación de la dosis interna	36
5.3. Evaluación de la dosis total	37
6. Etapa 6. Evaluación de dosis al público	37
5. ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA PLANTA MOLTURADORA DE ARENAS DE CIRCONIO	41
1. Actividad industrial	42
2. Procesos	42
2.1. Recepción y almacenamiento de la materia prima	42

2.2. Transporte de la materia prima a la zona de molienda	42
2.3. Molienda seca	42
2.4. Molienda húmeda	43
2.5. Almacenamiento del producto acabado	43
3. Caracterización radiológica del término fuente	43
3.1. Materias primas	44
3.2. Productos intermedios	44
3.3. Productos finales	44
3.4. Material en suspensión	44
3.5. Radón	47
3.6. Residuos	47
4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo	48
4.1. Zonas de exposición	48
4.2. Identificación de puestos de trabajo	49
5. Evaluación de dosis al trabajador	50
5.1. Dosis externa	50
5.2. Dosis interna	55
5.3. Cálculo de la dosis total	55
6. Evaluación de dosis al público	57
6. ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA EMPRESA DE FABRICACIÓN DE FRITAS	63
1. Actividad industrial	64
2. Procesos	64
2.1. Recepción y almacenamiento de la materia prima. Silos	64
2.2. Dosificación y mezclado de materias primas y aditivos	64
2.3. Distribución de la mezcla	64
2.4. Fusión. Obtención de fritas	64
2.5. Pesado y envasado del producto final	65
2.6. Almacenamiento del producto acabado	65
3. Caracterización radiológica del término fuente	65
3.1. Materias primas y producto final	65

3.2. Material en suspensión	66
3.3. Radón	67
3.4. Residuos	67
4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo	67
4.1. Zonas de exposición	67
4.2. Identificación de puestos de trabajo	68
5. Evaluación de dosis al trabajador	68
5.1. Dosis externa	68
5.2. Dosis interna	69
5.3. Cálculo de la dosis total	70
6. Evaluación de dosis al público	70
7. ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE BALDOSAS DE GRES PORCELÁNICO	77
1. Actividad industrial	78
2. Procesos	78
2.1. Recepción y almacenamiento de la materia prima	78
2.2. Dosificación de materias primas y aditivos	78
2.3. Molienda	80
2.4. Atomización	80
2.5. Prensado de piezas	80
2.6. Secado de piezas conformadas	80
2.7. Esmaltado	80
2.8. Cocción	80
2.9. Pulido	80
2.10. Selección y clasificación	80
2.11. Embalaje	81
2.12. Almacenamiento	81
3. Caracterización radiológica del término fuente	81
3.1. Materias primas	81
3.2. Productos intermedios	81

3.3. Productos finales.	81
3.4. Material en suspensión	82
3.5. Radón	83
3.6. Residuos	83
4. Identificación de zonas de exposición y puestos de trabajo.	84
4.1. Zonas de exposición	84
4.2. Identificación de puestos de trabajo	85
5. Evaluación de dosis al trabajador	85
5.1. Dosis externa	85
5.2. Dosis interna	86
5.3. Dosis total.	87
6. Evaluación de dosis al público.	87
8. CONCLUSIONES.	95
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

Estudio radiológico de la industria cerámica y auxiliares

Colección Informes Técnicos
40.2013

