

Impacto radiológico asociado al transporte por carretera de residuos radiactivos de alta actividad en España.

José Antonio Calleja Rubio¹
Fernando Gutiérrez Martín²
Cristóbal Colón Hernández³

¹ Servicio de Prevención, Tecnatom, jacalleja@tecnatom.es; Avenida Montes de Oca 1, 28703 San Sebastián de los Reyes (Madrid) teléfono 916598600.

Dpto. Ingeniería Eléctrica (EUITI), Universidad Politécnica de Madrid, joseantonio.calleja@upm.es

² Dpto. Química Industrial y Polímeros (EUITI), Universidad Politécnica de Madrid, fernando.gutierrez@upm.es

³ Dpto. Física Aplicada (EUITI), Universidad Politécnica de Madrid, cristobal.colon@upm.es

Palabras clave:

Residuos radiactivos de alta actividad, Almacén temporal centralizado, Impacto radiológico, Protección radiológica, Detrimento de la salud.

1. Introducción

Las cuestiones relacionadas con el transporte de residuos radiactivos de alta actividad, en adelante (RAA), al previsto almacén centralizado (ATC) constituyen un objeto de renovada actualidad, por la movilidad que se espera de estos materiales en un futuro próximo, por el compromiso creciente de estas actividades con el medio ambiente, por la seguridad y protección de las personas, así como por el actual marco legal [1].

Cabe preguntarse: ¿Cuáles serán las rutas más activas? ¿Qué impacto radiológico se generará en el medio ambiente o en individuos tipo, como los ocupantes de un vehículo particular o industrial que puedan coincidir con el transporte, en las poblaciones y el público en general ... ?

En España se prevé una larga “ruta radiactiva” de más de 2.000 kilómetros, por la que el combustible nuclear gastado se transportará presumiblemente por carretera desde las centrales nucleares hasta el ATC, así como los residuos vitrificados procedentes del reprocesado del combustible de la central nuclear Vandellós I, que en la actualidad están en Francia.

2. Reglamentación del transporte de RAA por carretera

El transporte de los RAA (principalmente combustible gastado) está regulado por una serie de documentos de aplicación internacional, basados en la norma de seguridad de la OIEA “Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos” TS-R-1 y por el acuerdo europeo para el transporte de mercancías peligrosas por carretera (ADR) [2]; en todos ellos, la seguridad del transporte descansa sobre todo en el embalaje, estipulándose principalmente los tipos B(U), B(M), y se establecen criterios para el diseño, aprobados por la autoridad competente en concordancia con la actividad y forma física del material radiactivo que contengan. También se detallan las precauciones que deben tomarse en cuanto a la rotulación y etiquetado, así como los requisitos durante el tránsito.

El aseguramiento de la protección radiológica y la prevención de riesgos ambientales se logra con la aplicación de límites para la intensidad de radiación y contaminación en la superficie de los embalajes y en vehículos, así como con la limitación de las actividades

transportadas. Otro requisito fundamental es la formación de los conductores, además de la supervisión y control por parte de los consejeros de seguridad [3].

3. Presentación del sector

La metodología utilizada en este trabajo se basa en el método 'descriptivo-explicativo', que permite la observación y recogida de datos con enfoque de 'estudio de caso' [4,5], y pretende describir sistemáticamente la logística para el transporte por carretera de RAA así como el impacto radiológico asociado, mediante uso de fuentes directas e indirectas; para las primeras, se ha contado con la colaboración de empresas del sector (centrales nucleares, transportes radiactivos, Enresa, etc.). Asimismo, se han consultado centros oficiales para identificar las regulaciones en cuanto a los permisos y trámites para las expediciones por carretera.

Se ha elegido el trasiego del combustible nuclear gastado por ser el más complejo en el caso de los transportes radiactivos, por el control de las autoridades competentes, por la base normativa tan importante que los regula, además de la atención del público y su candente actualidad para el desarrollo energético nacional.

En España hay seis centrales nucleares en explotación: Cofrentes, Garoña, Vandellos II, Trillo, Almaraz y Ascó [6], contando en total con ocho reactores, y una central que ha sido declarada en cese definitivo de explotación (José Cabrera); de todas ellas partirán los residuos hacia el Almacén Temporal Centralizado.

4. Efectos de las radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes, i.e. gamma y neutrónica, producen ionización al atravesar los tejidos de los organismos vivos. Dicha ionización altera el comportamiento químico de los constituyentes celulares afectados, algunos de los cuales pueden autorregenerarse mientras que otros resultan dañados.

Las dosis recibidas por las personas deben alcanzar cierto valor para provocar lesiones agudas, pero no para causar cáncer o efectos hereditarios. Al mismo tiempo, la persona expuesta a una determinada dosis de radiación no está destinada a padecer cáncer o lesiones genéticas, solo que incurre en un riesgo mayor que otro individuo no irradiado, y el riesgo aumenta a medida que lo hace la dosis [7].

Para mayor claridad de conceptos en el estudio de los efectos biológicos de la radiación, conviene distinguir los términos daño y detrimento: el primero representa algún grado de cambio negativo, por ejemplo en las células, pero no apunta necesariamente a un efecto nocivo en el individuo expuesto; el segundo es un concepto que combina la probabilidad de que se produzca un efecto perjudicial para la salud a dosis bajas y una valoración de la gravedad de dicho efecto.

Para poder realizar estimaciones de aplicación general, la Comisión Internacional de Protección Radiológica recomienda unos valores de riesgo, obtenidos con la población de distintos países y continentes [8]; el promedio de dichos valores para probabilidad de muerte por cáncer es del 5% por cada *Sievert* en una población de todas las edades, siempre que se trate de dosis y tasas de dosis bajas.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los sistemas biológicos no dependen sólo de las dosis absorbidas, sino que también de otros factores como el tipo de radiación, su energía, etc [9].

Para evaluar cuantitativamente el daño biológico se utiliza la **dosis equivalente** [10], magnitud que mide los *efectos biológicos que producen las radiaciones ionizantes en los seres vivos*. En nuestro caso se trata de emisiones gamma y neutrónicas.

5. Impacto radiológico del transporte de RAA por carretera en España

El impacto negativo asociado a este tipo de transportes se refiere al medio ambiente, sobre todo a los organismos vivos expuestos, y en especial a la salud de las personas.

Comenzamos fijando el número de transportes que se pretenden realizar en un año [11], adecuando la información recibida con la ayuda de procesos informáticos, mediante la composición de tablas con parámetros referentes al trasiego de residuos radiactivos y definiendo las “rutas radiactivas” (entre las más importantes están los residuos de las siete centrales nucleares españolas con destino al Almacén Temporal Centralizado).

En total consideramos **“8 rutas para el transporte de los residuos de alta actividad”**. Por ellas se deberán realizar **“48 transportes”** en el año analizado, identificándose las provincias expuestas al paso, las distancias recorridas, el tiempo invertido, así como la población por ruta y la población nacional a estudio; en este último caso, solo se tiene en cuenta las poblaciones de paso en todas las rutas, quedando al margen la comunidad gallega, cántabra, el País Vasco, Navarra, la región de Murcia, la comunidad andaluza y gran parte de la comunidad castellano-manchega, ya que no se realiza ningún trasiego por las vías de circulación de las mismas.

El impacto global previsible a causa de las radiaciones ionizantes en el medio ambiente, como suma del número de transportes por las horas de desplazamiento y por el nivel de radiación a un metro del transporte es de $34,55 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ (Tabla 1), inferior al límite legal anual permitido para un trabajador profesionalmente expuesto a radiaciones ionizantes en España ($50,00 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$) y del mismo orden que el transporte de materiales radiactivos no asociados al combustible gastado ($46,64 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$) [12].

Sin embargo, en la emisión de radiaciones ionizantes hay un proceso de atenuación en función de la distancia, es decir, a medida que nos alejamos del foco emisor el nivel de radiación decrece en una proporción inversa al cuadrado de la distancia [10]. Dicha atenuación se confunde con el fondo radiactivo natural del ambiente en una zona que, para el caso más desfavorable, se estima en una decena de metros (i.e. o se está “cerca” del transporte o la dosis recibida será prácticamente despreciable).

La dosis que puede recibir un individuo -conductor o pasajero de un vehículo cualquiera que coincide con el transporte de material radiactivo- es de $0,97 \text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$.

El impacto sobre el “colectivo expuesto”, ubicado en las regiones de paso de este tipo de transportes (impacto nacional), aplicado a toda la población residente en las distintas provincias es de $1,92\cdot 10^{-3} \text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$ [13].

Como el vehículo está generalmente en movimiento (Fig. 1), la dosis D(P) producida por la fuente móvil a lo largo de toda la trayectoria se obtendrá integrando la expresión:

$$\int dD(P) = \int (IT / v^2 \cdot t^2 + b^2) dt = 1 / b \cdot v (\arctg v \cdot t / b) \quad (1)$$

$$\text{y como resultado se obtiene:} \quad D(P) = \pi \cdot IT / b \cdot v \quad (2)$$

IT= índice de transporte (nivel de radiación a un metro de la unidad de transporte)

v = velocidad del vehículo

b = distancia al vehículo

Con esta expresión podremos conocer con una cierta exactitud la dosis de radiación que recibiría el público en general, situado a una distancia conocida del transporte que se desplaza a una velocidad prefijada.

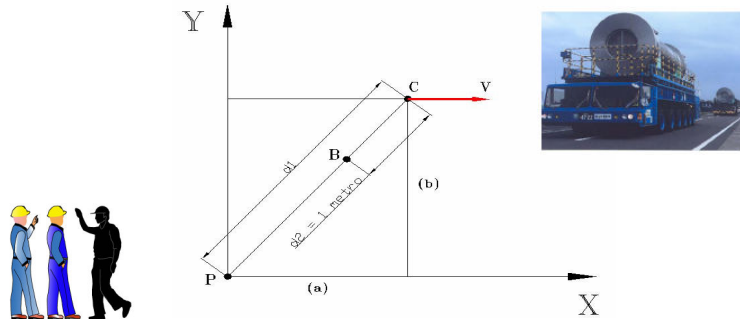


Fig. 1: Dosis producida en un punto por un vehículo en movimiento con material radiactivo

Aunque apostamos por una solución generalizada, sin tener en cuenta de forma precisa la proximidad al transporte de todo el colectivo expuesto, así como la velocidad variable del vehículo, nos interesa conocer el margen de error en dicho estudio, comparado con el resultado que se obtendría por la solución propuesta más científica.

Ciñéndonos al impacto generado en el público nacional y teniendo en cuenta la dosis global obtenida de $34550 \mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$, calculada en función del nivel de radiación a 1 m del transporte, para una velocidad de 40 km./h (que es afín a las directrices de seguridad vial para este tipo de transportes), y una distancia aproximada de impacto de 1000 m (dentro de cuyo radio puede hallarse el grueso de la población de una gran urbe como Madrid o Barcelona, y que será el colectivo mas significativo), obtendremos:

$$D(P) = 3,1416 \times 34550 / 1000 \times 40000 = 2,71 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1} \quad (3)$$

que es muy similar a la dosis que ya habíamos acordado ($1,92 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$).

La probabilidad de padecer enfermedad grave (cáncer), al recibir la radiación ionizante por el individuo mas expuesto es de $2,58 \cdot 10^{-7}$ y si consideramos el entorno nacional esta probabilidad es de $9,86 \cdot 10^{-11}$.

En el reciente estudio epidemiológico del efecto de las radiaciones ionizantes derivadas del funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear, sobre la salud de la población española que reside en sus proximidades [14], se propone como indicador de exposición la “dosis efectiva”, debido a que este parámetro aporta claros beneficios en un estudio de amplio alcance y espectro, además de que las radiaciones ionizantes se identifican por varias vías de exposición externa y otras como efluentes líquidos y gases que pueden ser incorporadas al organismo humano.

En nuestro trabajo y al tratarse solo de exposición externa a las radiaciones ionizantes, proponemos “la distancia” como indicador principal en base a la atenuación conseguida en el proceso de emisión, que nos parece el más acertado para este caso.

Tabla 1: Impactos radiológicos anuales asociados al transporte por carretera de residuos radiactivos de alta actividad en España.

| IMPACTO RADIOLÓGICO ANUAL PREVISIBLE, ASOCIADO AL TRANSPORTE DE (RAA) POR CARRETERA EN ESPAÑA | | | | | | | |
|--|---|---|---|--|--|--|--|
| RUTAS | Dosis Impacto Global ($\mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$) | Dosis individuo MAS expuesto ($\mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$) | Dosis al Público (impacto en trayecto) ($\mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$) | Dosis al Público (impacto nacional) ($\mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$) | Detrimiento de la salud (individuo MAS expuesto) | Detrimiento de la salud (público ruta) | Detrimiento de la salud (impacto nacional) |
| DE CENTRALES NUCLEARES AL ALMACEN TEMPORAL CENTRALIZADO | 28050 | 0,97 | 3,80E-03 | 1,59E-03 | 2,41E-07 | 1,90 E-10 | 8, 19 E-11 |
| DE FRANCIA, POR LA JUNQUERA (VITRIFICADO DE COMBUSTIBLE) AL ALMACEN TEMPORAL CENTRALIZADO | 6500 | 0,55 | 9,37E-04 | 3,33E-04 | 2,75E-07 | 4,68E-11 | 1,67E-11 |
| GLOBAL | 34550 | 0,76 | N/A | 1,92 E-03 | 2,58 E-07 | N/A | 9,86 E-11 |

Dosis impacto global: Valor obtenido por aportación de todos los transportes realizados y en todas las rutas.

Dosis individuo “MAS” expuesto (adelantamiento): 5 segundos x 7 adelantamientos en la ruta: El transporte circula a 40 Km/h y el vehículo particular, camión o automóvil, a 90 Km/h en la ruta más larga. Consideramos que el conductor del vehículo trasiega por la ruta a la vez que se realiza el transporte de material radiactivo.

Dosis al público, impacto en trayecto: Se considera la población de todas las edades, residente en las provincias por las que circula el transporte.

Dosis al público, impacto nacional: Población de todas las edades del entorno nacional, sometido a impacto.

Detrimiento de la salud (muerte por cáncer): el valor promedio para la probabilidad de muerte por cáncer es del 5% por cada Sievert en una población de todas las edades.

Aunque las unidades para caracterizar el impacto global se proponen en dosis equivalente (μSv), es más correcto referirlas a unidades de exposición o dosis absorbida (μGy), ya que esa dosis puede ser o no adquirida por los humanos (según si están o no en la zona de exposición), en todo caso, para emisión gamma la exposición es similar a la dosis adsorbida e igual a la dosis equivalente. Por tanto, como los valores de medida del nivel de radiación a un metro del transporte se proponen en unidades de dosis equivalente, los obtenidos en este estudio los referiremos siempre a estas unidades.

6. Programa de cálculo del impacto radiológico

Como aportación final, proponemos una aplicación informática para el tratamiento de los datos estudiados y una hoja resumen del “Impacto Radiológico Asociado al Transporte por Carretera de Residuos de Alta Actividad en España”.

Pensamos que esta es quizá la parte más interesante del trabajo y que con ella se avanza en el estudio de estos impactos, pudiendo complementar la documentación legal estipulada para este tipo de transportes.

Así, sin más que introducir el nivel de radiación a un metro del transporte y elegir la ruta, (Fig. 2), que son datos que suministra el expedidor, obtendremos los impactos radiológicos asociados (fig. 3).

A modo de ejemplo y en tanto se decida la ubicación final del ATC en España, se propone una localización tentativa (e.g. el municipio de Ascó en Tarragona)



tecnotom

IMPACTO RADIOLÓGICO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO POR CARRETERA EN ESPAÑA

INTRODUZCA EL NIVEL DE RADIACIÓN A 1 METRO DEL VEHÍCULO (uSv/h)

SELECCIONE LA RUTA DESEADA

JOSE CABRERA-ATC ASCO

ALMARAZ-ATC ASCO

ASCO-ATC ASCO

VANDELLOS-ATC ASCO

COFRENTES-ATC ASCO

GAROÑA-ATC ASCO

TRILLO-ATC ASCO

JUNQUERTA-ATC ASCO



Fig. 2: Página de introducción de datos



IMPACTO RADIOLÓGICO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO POR CARRETERA EN ESPAÑA

| | |
|-------------------------------------|---|
| RUTA: | TRILLO-ATC ASCO |
| TIEMPO EN RUTA: | 8,5 Horas |
| POBLACIONES EXPUESTAS: | Guadalajara-Soria-Zaragoza-Huesca-Tarragona |
| IMPACTO RADIOLÓGICO GLOBAL (uSv): | 680 |
| DOSIS INDIVIDUO MAS EXPUESTO (uSv): | 2,76 |
| DETRIMENTO DE SU SALUD: | 1,38E-07 |
| APORTACIÓN POBLAC. TRAYECTO (uSv): | 1,58E-03 |
| DOSIS APORTACIÓN NACIONAL (uSv): | 1,74E-04 |
| DETRIMENTO DE LA SALUD: | 8,71E-12 |

CONSIDERACIONES:

Los datos son reflejo de un trabajo de investigación (DOCTORADO) considerando los transportes a realizar en un año natural en España, en el estudio global se ha supuesto el proceso mas desfavorable.

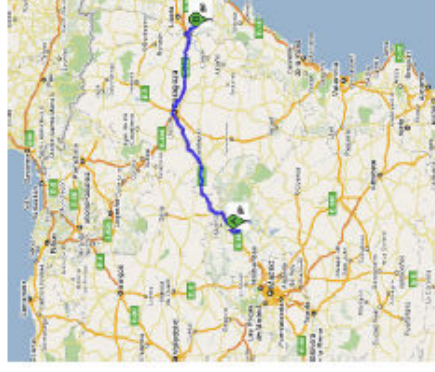


Fig. 3: Página de resultados

7. Conclusiones

Como primera conclusión, se demuestra que la emisión de radiaciones ionizantes prevista, en condiciones normales de los transportes de residuos de alta actividad en España, no es significativa a la hora de generar efectos adversos en la salud, además, el impacto radiológico global anual es muy reducido y con una incidencia de efectos adversos para su salud despreciable.

En segundo lugar, creemos que la parte más interesante del trabajo es el aprovechamiento y tratamiento de los datos recabados mediante una aplicación informática, permitiendo calcular el impacto radiológico asociado al transporte y así avanzar en el estudio de este tipo de impactos, con ello se complementa, si se considera conveniente por parte de expedidor, la documentación legal estipulada para este tipo de transportes.

8. Agradecimientos

Al personal de la organización de protección radiológica de las centrales nucleares.

Referencias.

- [1] Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/95) de 8 de diciembre. *Boletín Oficial del Estado* n° 269 de 10 de noviembre. Páginas 33408 – 33434.
- [2] Acuerdo Europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR 2009) *Boletín Oficial del Estado*, número 182 de 29 de julio de 2009, núm. 19, p. 33564.
- [3] Real Decreto 1566/1999, sobre los consejeros de seguridad para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable. *Boletín Oficial del Estado*, de 20 de octubre de 1999. p. 36825-36914.
- [4] YIN, R. *Case study research: Design and métodos*. Sage Publishing. Beberly hills. 1994.
- [5] CHETTY, S. *The case Study Method for Research in Small and Medium – sized Firms*. International Small Business Journal. Vol 15. pp. 73 – 85.
- [6] www.csn.es. Las centrales nucleares españolas.
- [7] ORTEGA X. y JORBA B. *Radiaciones Ionizantes*. Editorial Universidad Politécnica de Cataluña. 1988. p 56-65.
- [8] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1999 (ICRP) Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991). Traducción al español por la Sociedad Española de Protección Radiológica. Madrid (1995).
- [9] COLL BUTÍ, Pedro. Fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica. Editorial Junta de Energía Nuclear. Año 1990. p. 56-59.
- [10] TANARRO SANZ, Agustín. *Radiaciones ionizantes: Instalaciones radiactivas y de Rayos X*. Editorial Junta de Energía Nuclear, año 1986. p. 85-135.
- [11] El transporte a la instalación ATC, www.enresa.es
- [12] CALLEJA, J. y GUTIERREZ, F. Impacto radiológico asociado al transporte de material radiactivo por carretera en España. Ponencia presentada en la 35° reunión anual de la Sociedad Nuclear Española, Sevilla, España. Publicación en la revista Radioprotección, enero de 2010.
- [13] www.ine.es
- [14] www.csn.es. Estudio epidemiológico. Posible impacto radiológico de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear sobre la salud de las personas (Consejo de Seguridad Nuclear e Instituto de Salud Carlos III).