

APROXIMACIONES Y HERRAMIENTAS EMPLEADAS PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL MEDIOAMBIENTE: OBJETIVO OPTIMIZAR RECURSOS

A nivel internacional se acepta de forma generalizada que el esfuerzo y los recursos a utilizar para proteger el medioambiente sean proporcionales al riesgo real existente para la biota. Para poder optimizar los recursos a emplear en la protección radiológica del medioambiente, es necesario disponer de aproximaciones y herramientas que permitan evaluar y poner en contexto los riesgos para la biota derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.

El presente trabajo describe las aproximaciones y herramientas disponibles en la actualidad para, en caso necesario, poder demostrar de forma explícita la protección radiológica del medioambiente.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de una aproximación para la protección radiológica del medioambiente puede considerarse un esfuerzo considerable, e incluso innecesario, si se tiene en cuenta que las descargas reales al medioambiente de las operaciones rutinarias de las centrales nucleares son bajas y existe el compromiso de reducirlas aún más. Sin embargo, las descargas rutinarias nunca serán cero y, en todo caso, éste no es el único aspecto a considerar. También es necesario tener en cuenta posibles accidentes, emergencias y otros eventos imprevistos, así como el hecho de que existen zonas en todo el mundo que ya están contaminadas en diverso grado. Otro aspecto a tener en cuenta es el almacenamiento de los residuos radiactivos, ya que la mayoría de los residuos aún no se han almacenado y los modelos empleados para determinar las posibles opciones para el almacenamiento de estos residuos no contemplan la protección del medioambiente.

A nivel internacional y de forma generalizada se acepta que incluso para los actuales vertidos rutinarios, sería adecuado poder demostrar de manera explícita, independiente y transparente que la protección del medioambiente se ha tenido en cuenta. Esta postura ha venido promovida por diversas causas, entre ellas la cada vez mayor conciencia social de la importancia del medioambiente en el bienestar del hombre en la actualidad y en el futuro o la necesidad de algunas autoridades nacionales de demostrar, directa y explícitamente, que el medioambiente está siendo protegido dentro de sus propios marcos legislativos.

Así pues, diferentes organizaciones internacionales y nacionales llevan años trabajando en el desarrollo de una aproximación que permita demostrar de forma explícita que el medioambiente está adecuadamente protegido frente a los potenciales efectos perjudiciales de las radiaciones ionizantes.



ALMUDENA REAL GALLEGO

Responsable de la Unidad de Protección Radiológica del Público y del Medio Ambiente del CIEMAT y vicepresidenta del Comité 5 de la ICRP.

Doctora en Ciencias Biológicas.

APPROACHES AND TOOLS USED FOR THE RADIOLOGICAL PROTECTION OF THE ENVIRONMENT: OBJECTIVE, TO OPTIMIZE RESOURCES

It is widely accepted internationally that the effort and resources to be used to protect the environment might be proportional to the level of risk to wildlife. In order to optimize the resources to be used for the radiological protection of the environment, it is necessary to have approaches and tools to do the impact assessments and to put into context the risks to wildlife arising from exposure to ionizing radiation.

The present work describes the approaches and tools available to explicitly demonstrate, if necessary, that the environment is protected against ionising radiations.



La Comisión Internacional de Protección Radiológica (más conocida por sus siglas en inglés ICRP de *International Commission on Radiological Protection*) en sus últimas recomendaciones para un sistema de protección radiológica, publicadas en 2007 [1], consideró necesario y apropiado ampliar su ámbito de actuación, incluyendo la protección del medioambiente. Esta decisión está sustentada por el trabajo realizado por el Comité 5 de la ICRP, qué desde su creación en 2005, trabaja para desarrollar una aproximación para la protección del medioambiente que sea coherente con la aproximación utilizada para la protección radiológica de las personas.

El Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), el sus Normas Básicas de Seguridad publicadas en 2014 [2], también recoge de forma explícita el tema de la protección radiológica del medioambiente. Las Normas Básicas se basan en los Principios Fundamentales de Seguridad, y entre ellos está el Principio 7 sobre la "Protección de las generaciones presentes y futuras", en el que se establece que "las personas y el medioambiente, tanto en el presente como en el futuro, deben estar protegidos contra los riesgos de la radiación".

La Directiva 2013/59/Euratom del consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes considera que la contaminación del medioambiente puede constituir un peligro para la salud de las personas a largo plazo. Por ello, reconoce que es necesaria una política que proteja el medioambiente contra los efectos dañinos de las radiaciones ionizantes. La Directiva sólo considera la contaminación del medioambiente como una vía de exposición para los miembros del público directamente afectados por los efluentes radiactivos vertidos al medioambiente [3].

Todas las organizaciones coinciden en la necesidad de que el esfuerzo y los recursos a utilizar en la protección del medioambiente sean proporcionales al riesgo real existente para la biota. Para poder optimizar los recursos a emplear en la protección radiológica del medioambiente, es nece-

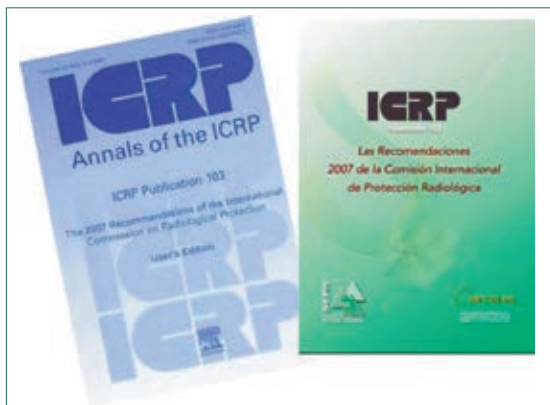


Figura 1. Últimas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) para un sistema de protección radiológica, publicadas en 2007 en inglés y que fueron traducidas al español por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) y la Asociación de Profesionales de la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Actividad Nuclear (APCNEAN), con la autorización de la ICRP.

sario disponer de aproximaciones y herramientas que permitan evaluar y poner en contexto los riesgos para la biota derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.

APROXIMACIONES DESARROLLADAS PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL MEDIOAMBIENTE

No hay una definición sencilla y universalmente aceptada de lo que es la "protección del medioambiente", existiendo diferencias entre países y en distintas circunstancias. Esto hace necesario que se defina el objetivo de la protección del medioambiente, el cual puede definirse a diferentes niveles, reflejando distintos puntos de vista filosóficos, políticos y pragmáticos. El enfoque más comúnmente utilizado es el de proteger a nivel de todas las poblaciones. En este caso, podría ser aceptable que los individuos se vean gravemente afectados siempre y cuando esto no amenace la viabilidad de la población. En el caso de especies protegidas, se pueden adoptar medidas reglamentarias para garantizar su protección a nivel de individuo, aunque el objetivo de protección siga siendo las poblaciones.

Dado que el objetivo de la protección son generalmente las poblaciones, los efectos biológicos más relevantes para la protección del medioambiente son aquellos que podrían llevar a cambios en el tamaño o la estructura de éstas (efectos en la

capacidad reproductiva o en la supervivencia).

Debido a la inmensa variedad de especies de animales y plantas existentes y su posible respuesta a la exposición a radiación, es crucial definir algunos puntos de referencia clave que permitan hacer un seguimiento de que la protección está siendo la adecuada. Así pues, todas las aproximaciones desarrolladas para proteger el medioambiente, han definido un grupo de organismos de referencia (aquellos que son re-

presentativos de los ecosistemas o que por sus hábitos de vida podrían estar más expuestos a las radiaciones ionizantes). Por ejemplo, la ICRP ha seleccionado un grupo de 12 animales y plantas de referencia, los cuales representan animales y plantas típicas que se encuentran en los ecosistemas terrestre, de agua dulce y marino [4].

Es imprescindible establecer, a partir del conocimiento científico existente, una correlación entre la exposición y la dosis y entre la dosis y los efectos biológicos para los organismos de referencia, ya que ello permitirá establecer algún tipo de "recomendación numérica".

Pero, ¿cuál debería ser la naturaleza de esta recomendación? Es evidente que no resultaría apropiado establecer límites de dosis para el medioambiente, pero es obvio que es necesario algún tipo de recomendación numérica para ayudar a la toma de decisiones en la gestión de las diferentes situaciones de exposición a radiación que pudieran acontecer. Esto es especialmente importante para evitar esfuerzos innecesarios, como en el caso de la mayoría de las situaciones normales de exposición, o para garantizar que los recursos, normalmente limitados, se usen mejor en situaciones de emergencia o en situaciones de exposición existentes. Existe la necesidad de disponer de un conjunto de "valores de (tasa de dosis de) referencia" para optimizar el nivel de esfuerzo dedicado a proteger el medioambiente, el cual deber ser proporcional al nivel de riesgo de cualquier daño que se pueda producir, al resultado que se desee obtener de cualquier acción realizada y de los recursos que puedan estar disponibles.

Se han propuesto valores de referencia por varias organizaciones internacionales (OIEA, UNSCEAR, ICRP),



Figura 2. Grupo de 12 animales y plantas de referencia, utilizados por la ICRP en su aproximación para la protección del medio ambiente. En este grupo hay representantes de animales y plantas típicas de ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos.

países (Reino Unido, Estados Unidos, Canadá) y proyectos de investigación (Erica, Protect). Si bien se han utilizado distintas metodologías, datos y objetivos de protección para derivar estos valores, no existe una gran discrepancia entre ellos [5].

En algunos casos, como por ejemplo en la aproximación desarrollada en Europa los proyectos Erica y Protect, los valores de referencia se han utilizado como "valores de cribado", es decir valores de tasa e dosis por debajo de los cuales se puede asumir que el riesgo de efectos perjudiciales para la biota es despreciable [5,6].

En la aproximación de la ICRP, se han definido niveles de referencia de consideración derivados para cada animal y planta de referencia, los cuales pueden ser considerados como una banda de tasa de dosis, que abarca un orden de magnitud, dentro de la cual existe alguna posibilidad de que la radiación produzca efectos deletéreos en individuos de ese tipo de animal o planta [4]. En la publicación 124 (2014) la ICRP da recomendaciones detalladas de cómo utilizar los niveles de referencia de consideraciones derivadas en las situaciones de exposición planificadas, existentes y de emergencia [7].

HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO DE DOSIS Y LA ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS PARA ANIMALES Y PLANTAS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A RADIACIONES IONIZANTES

Se han desarrollado un gran número de herramientas para realizar evaluaciones del impacto radiológico en la biota, si bien la mayoría de ellas sólo

permiten evaluaciones parciales (por ejemplo, determinar los factores de transferencia o el cálculo de la dosis recibida) (Revisión en [8]).

Estas herramientas son de gran utilidad para industrias y reguladores que necesiten demostrar de forma explícita la protección del medioambiente debido a la legislación existente en sus países.

Las herramientas Erica y Resrad-Biota han mostrado ser las únicas que permiten realizar una evaluación completa del impacto radiológico en flora y fauna, siendo además ambas de libre acceso (www.project.facilia.se/erica/download.html y <http://www.evs.anl.gov/resrad>, respectivamente).

La herramienta Erica fue desarrollada con financiación de Euratom en el marco de los proyectos europeos Fasset y Eica [9]. Resrad-Biota implementa la aproximación gradual del Departamento de Energía de Estados Unidos [10].

Ambas herramientas cuentan con una metodología de evaluación gradual, partiendo de un "nivel de cribado" muy conservador y progresan, en aquellos casos que se considere necesario, hacia evaluaciones menos conservadoras en las que se utiliza información más específica del escenario que se está evaluando.

Las herramientas utilizan un grupo de organismos por defecto, para los cuales se proporcionan valores de parámetros y/o modelos de transferencia, geometrías y coeficientes dosimétricos asociados, asunciones de hábitos de vida, etc. En el nivel de cribado: Erica incluye en su herramienta un amplio listado de animales y plantas de referencia, mientras que Resrad-Biota sólo distingue entre animales y plantas terrestres o acuáti-

cos. En el nivel 2 de la evaluación de ambas herramientas, se permite que el usuario defina y añada animales y plantas concretos. La herramienta Erica incluye la información relativa a los animales y plantas de referencia propuestos por la ICRP.

Para estimar las concentraciones de actividad de radionucleidos en animales y plantas a partir de las concentraciones de actividad en el medio, ambas herramientas utilizan relaciones de concentración en equilibrio (CR). En ecosistemas acuáticos también se utilizan los coeficientes de distribución (K_d) para describir la concentración de actividad relativa en sedimento y agua.

La herramienta Erica cuenta con la base de datos de factores de transferencia más amplia, para una gran variedad de organismos, lo que sin duda constituye una mejor base para realizar evaluaciones prospectivas (cuando no se dispone de datos específicos del escenario a evaluar). También es la que considera un mayor número de radionucleidos, teniendo la capacidad de estimar valores de coeficientes de conversión de dosis para la mayoría de los radionucleidos incluidos en la ICRP 38 [11].

Resrad-Biota incorpora en la herramienta aproximaciones alométricas, las cuales permiten relacionar la masa del organismo con la transferencia de radionucleidos desde la dieta, o la vida media biológica del radionucleido. Estas aproximaciones permiten al usuario estimar los factores de transferencia para las especies de interés (incluyendo la creación de cadenas alimenticias sencillas). En la herramienta Erica, cuando no se dispone de valores de CR, se proporciona información sobre metodologías que podrían utilizarse para estimar valores de CR por defecto. Estas metodologías van desde el uso de modelos alométricos hasta el uso de valores de CR para radionucleidos similares desde el punto de vista biogeoquímico (ej. aplicar un valor de CR derivado para Am como un CR para Pu) o para organismos similares (ej. utilizar valores de CR de mamíferos terrestres para estimar la concentración de actividad en pájaros terrestres). Ambas herramientas permiten al usuario utilizar sus propios valores de CR o medidas de concentraciones de actividad en biota (aunque no en el primer nivel de evaluación).

Para la evaluación dosimétrica, ambas herramientas recurren a una

simplificación, representando los organismos como formas sencillas (principalmente elipsoides). Las tasas de dosis absorbidas (Gy por unidad de tiempo) se estiman utilizando coeficientes de conversión de dosis (DCC), que relacionan la tasa de dosis absorbida no ponderada con la concentración de actividad en un organismo o en el medio. La herramienta Erica, además de tener geometrías por defecto y bases de datos de DCC asociadas, también permite a los usuarios definir su propio organismo, aunque con algunas limitaciones de tamaño. Ambas herramientas utilizan factores de ponderación de la radiación para derivar las tasas de dosis equivalentes para emisores alfa y beta. Los valores de estos factores de ponderación son diferentes en ambas herramientas, siendo para emisores alfa de 10 y 20 y para emisores beta de baja energía de 3 y 1 en Erica y Resrad-Biota, respectivamente.

Ninguna de las herramientas cuenta con la utilidad de realizar evaluaciones temporales o espaciales, algo que podría implementarse en el futuro.

La herramienta Erica, o elementos de ella, han sido y están siendo utilizados en evaluaciones realizadas en una serie de países, incluyendo: Finlandia (Repositorio de Olkiluto [12]; Suecia (utilizada por reguladores e industrias); Reino Unido (repositorio de residuos de baja [13]; en apoyo a evaluaciones Natura 2000 [14, 15]; Noruega [16].

En el caso de Resrad-Biota, hay un requerimiento del Departamento de Energía de Estados Unidos de incluir, en todos los emplazamientos, una evaluación de dosis en biota en sus informes anuales de monitorización medio ambiental [17, 18]; habiéndose utilizado esta herramienta en muchos emplazamientos para realizar estas evaluaciones. Resrad-Biota también se utiliza en otras Agencias Federales de EE.UU.

FUTUROS DESARROLLOS PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL MEDIOAMBIENTE

La aproximación seguida para la protección del medioambiente y la utilizada en protección radiológica de las personas tienen muchos puntos en común, lo que permite tener un único sistema de protección radiológica que integre ambas aproximaciones.

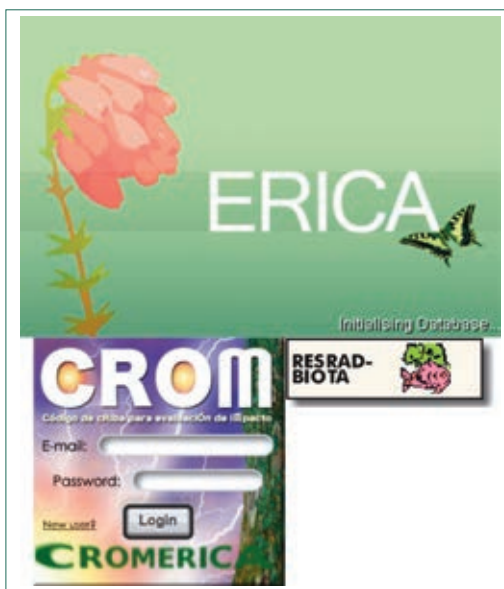


Figura 3. Herramientas Erica, Resrad-Biota y Cromerica para la evaluación del impacto radiológico en flora y fauna. En el caso de Cromerica, permite realizar de forma simultánea la evaluación de impacto radiológico en humanos y biota.

La ICRP ha decidido dar un paso más en la incorporación sistemática de la protección del medioambiente en sus actividades. Las tareas realizadas por el Comité 5 se integrarán en el futuro en los cuatro Comités Permanentes de la Comisión (Comité 1 sobre efectos de la radiación; Comité 2 sobre aspectos de dosimetría;

Comisión 3 sobre la radiación en medicina y Comité 4 sobre la aplicación de las recomendaciones de la Comisión). Para ello, se han modificado los mandatos de cada uno de estos comités para incluir los aspectos pertinentes de la protección de las personas y el medioambiente. En julio de 2017, coincidiendo con la renovación de los miembros de los Comités, entrarán en vigor estos mandatos (www.icrp.org/docs/Committees%20Announcement.pdf).

Sería muy útil disponer de herramientas que permitan realizar de forma conjunta evaluaciones del impacto radiológico en las personas y en la biota. El Ciemat, en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid, está trabajando en el desarrollo de la herramienta Cromerica, que permitirá llevar a cabo evaluaciones de impacto radiológico en humanos y biota de forma simultánea. Esta herramienta es el resultado de la integración de las herramientas Erica y CROM.

De la herramienta Erica ya se ha hablado extensamente en este artículo. La herramienta CROM nació como un código computacional que implementa los modelos incluidos en la Serie de Informes de Seguridad N° 19 del OIEA [19], que corresponden a modelos genéricos para el transporte de radionucleidos en el medioambiente, producidos

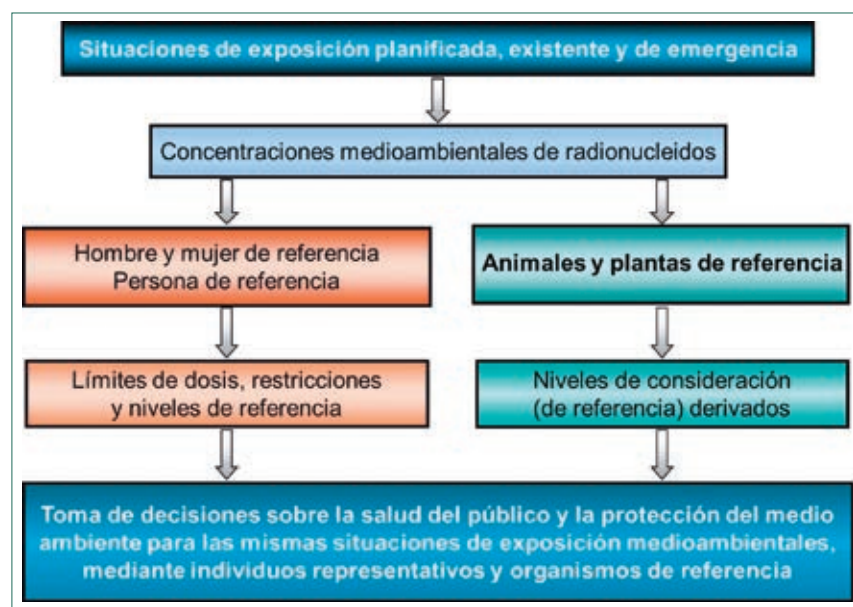


Figura 4. Similitud entre las aproximaciones de la ICRP para la protección radiológica de las personas y del medioambiente.



como descarga en una instalación, y todos sus parámetros asociados.

En 2007 se dispuso de la versión CROM 6, una versión estable cuyo control de calidad fue realizado por el OIEA, quien lo adoptó como la base para los cálculos de los modelos descritos en la SRS-19. Posteriormente, se creó CROM 7 para propagar las incertidumbres de las mediciones y parámetros a través de los modelos y casi de inmediato se comenzó a programar una nueva versión, Cromerica (CROM8), para incluir la protección de la biota. Todas estas versiones son de libre acceso y se pueden descargar en <ftp://ftp.ciemat.es/pub/CROM>.

Cromerica es una herramienta para las evaluaciones integradas de dosis efectivas para humanos y dosis absorbidas para biota. Se desarrolló bajo la base de que ambos enfo-

ques requieren niveles de contaminación de medios ambientales tales como aire, agua dulce, suelo, etc. Por lo tanto, el uso de modelos comunes para derivar esas concentraciones de las descargas producidas en una instalación nuclear o radiactiva, permitiría el cálculo simultáneo. La herramienta permite realizar evaluaciones en ríos, lagos y ambientes marinos y en atmósfera contaminada y suelos. Cromerica está actualmente en fase de prototipo.

De forma simultánea al desarrollo de Cromerica se comenzó el desarrollo de la Plataforma Abierta CROM (OP-CROM), con la intención de que se convierta en una herramienta flexible que permita la implementación de cualquier modelo, incluyendo los del SRS19, que pudieran funcionar bajo diferentes sistemas operativos y arquitecturas informá-

ticas, y que usara y produjera todos los datos y parámetros como archivos de texto separados, en contraposición al uso de una base de datos establecida como es el caso en la familia CROM. Como en el caso de CROM se distribuiría libremente y seguiría la filosofía del *software* abierto, lo que permitiría que otros grupos de investigación contribuyeran a su desarrollo. Sin embargo, se pretende que OP-CROM sea mucho más, y existen planes para generar nuevos módulos con modelos avanzados, desarrollar módulos que permitan cálculos dinámicos, incluir parámetros adicionales por defecto o codificar interfaces gráficas de usuario adicionales que incluirían la presentación de los resultados en mapas geográficos integrados en otras herramientas como en Google Earth. ■

- [1] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [2] IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standard Series No. GSR Part 3.
- [3] Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013. Diario Oficial de la Unión Europea Volumen 57. 17 enero 2014
- [4] ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP 108 (4-6)
- [5] Andersson, P., Beaugelin-Seiller, K., Beresford, N.A., Copplestone, D., Della Vedova, C., Garnier-Laplace, J., Howard, B. J., Howe, P., Oughton, D.H., Wells, C., Whitehouse, P. PROTECT Deliverable 5 Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations 2008.
- [6] Garnier-Laplace J and Gilbin R (ed) 2006 Derivation of predicted no effect dose rate values for ecosystems (and their sub-organisational levels) exposed to radioactive substances ERICA Deliverable D5. European Commission, 6th Framework Contract No FI6R-CT-2003-508847 (Cadache: IRSN)
- [7] ICRP, 2014. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. Ann. ICRP 43(1).
- [8] N.A. Beresford, A. Hosseini, J.E. Brown, C. Cailles, D. Copplestone, C.L. Barnett, K. Beaugelin-Seiller. PROTECT Deliverable 4 Evaluation of approaches for protecting the environment from ionising radiation in a regulatory context. 2008
- [9] Brown, J.E., Alfonso, B., Avila, R., Beresford, N.A., Copplestone, D., Pröhl, G. and Ulanovsky, A. (2008). The ERICA Tool. Journal of Environmental Radioactivity 99 (9), 1371-1383.)
- [10] USDoE, 2002. A Graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Technical standard DOE-STD-1153-2002, Modules 1-3, United States Department of Energy, Washington D.C.
- [11] ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3).
- [12] Smith, K., Robinson, C., 2006. Assessment of doses to non-human biota: Review of developments and demonstration assessment for Olkiluoto repository. Working report 2006-112. POSIVA OY, Olkiluoto. Available from: <http://www.posiva.fi/englanti/tietopankki.php?page=nayta&id=10/>.
- [13] Beresford, N.A., Anderson, P., Beaugelin-Seiller, K., Brown, J., Copplestone, D., Garnier-Laplace, J., Hosseini, A. Howard, B.J., Oughton, D.H., 2008. Approaches to demonstrate protection of the environment from ionising radiation (second workshop), 28 -30 Workshop report for the PROTECT project, EC Contract Number:036425 (FI6R). CEH-Lancaster. http://www.ceh.ac.uk/PROTECT/pages/documents/PROTECTosloworkshopWP2_3reportFinal.pdf
- [14] Beresford, N.A., Appleton, J.D., Barnett, C.L., Bescoby, M.W., Breward, N., Jones, D.G., MacKenzie, A.C., Scheib, C., Thørring, H., Wood, M.D., 2007. Assessment of naturally occurring radionuclides around England and Wales. Science Project SC030283. ISBN: 1844325679. Environment Agency, Bristol.
- [15] Allott, R., Copplestone, D., 2008. Update on habitats assessments for England and Wales. National Dose Assessment Working Group. Paper 13-04. Available from: <http://www.ndawg.org/documents/Paper13-04.pdf>
- [16] Hosseini, A., Thørring, H., Brown, J. E., Saxén, R., Ilus, E., 2008. Transfer of radionuclides in aquatic ecosystems - Default concentration ratios for aquatic biota in the ERICA Tool. Journal of Environmental Radioactivity, 99, 1408-1429.
- [17] USDoE, 1993. Radiation protection of the public and the environment, DoE order 5400.5, United States Department of Energy, Washington D.C. Available from: <http://www.directives.doe.gov/pdfs/doe/doetext/oldord/5400/o54005c2.pdf>.
- [18] USDoE, 2003. Environmental protection program, DOE Order 450.1. United States Department of Energy, Washington D.C. Available from: <http://www.directives.doe.gov/pdfs/doe/doetext/neword/450/o4501.pdf>
- [19] SRS-19, 2001 Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. International Atomic Energy Agency Vienna, 2001.