

TERCER EJERCICIO

GRUPO B – PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

TEMA 19

Comportamiento de los radionucleidos en el medio ambiente. Vigilancia radiológica ambiental.

ÍNDICE

1.	RESUMEN	2
2.	RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE LA OPOSICIÓN	2
3.	INTRODUCCIÓN	3
4.	MARCO NORMATIVO	4
5.	CONTROL Y VIGILANCIA DE EFLUENTES RADIATIVOS	5
6.	CONTROL Y VIGILANCIA DE RESIDUOS RADIATIVOS SÓLIDOS	7
7.	VIGILANCIA RADIOLÓGICA AMBIENTAL.....	8
	7.1. Programas de vigilancia radiológica ambiental (PVRA).....	9
	7.2. Vigilancia radiológica de ámbito nacional.....	12
	7.2.1. Red de Estaciones de Muestreo (REM)	12
	7.2.2. Red de Estaciones de Automáticas (REA)	14
8.	COMPORTAMIENTO DE LOS RADIONUCLEIDOS EN EL MEDIOAMBIENTE.....	15
	8.1. Ecosistema terrestre	16
	8.2. Ecosistemas acuáticos	19

1. RESUMEN

El tema proporciona una visión global del control y vigilancia de los efluentes radiactivos líquidos, gaseosos y sólidos de las instalaciones nucleares y radiactivas españolas y, en concreto, de los programas de vigilancia radiológica ambiental que conforman el sistema de protección radiológica ambiental nacional, todo ello sobre la base científica del comportamiento de los radionucleidos en el medioambiente,

2. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE LA OPOSICIÓN

Tercer ejercicio

B. Protección radiológica

18. Efluentes radiactivos en instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo del combustible. Sistemas de tratamiento. Limitación, vigilancia y control. Efluentes radiactivos en instalaciones radiactivas. Sistemas de tratamiento. Limitación, vigilancia y control.

20. Protección radiológica del público en circunstancias normales.

21. Redes nacionales de vigilancia radiológica ambiental.

3. INTRODUCCIÓN

La protección radiológica ambiental tiene por objeto proteger a las personas y el medioambiente de los posibles efectos nocivos de las radiaciones ionizantes presentes en nuestro entorno. La radiactividad en el medioambiente tiene su origen fundamentalmente en la propia naturaleza, aunque en las últimas décadas se ha visto incrementada por las pruebas nucleares realizadas en los años cincuenta y sesenta, los vertidos controlados de las instalaciones nucleares y radiactivas, y algunos accidentes.

La operación de las instalaciones nucleares y radiactivas conlleva la generación de residuos radiactivos sólidos, líquidos y gaseosos: los residuos radiactivos sólidos son tratados y acondicionados para su posterior almacenamiento, mientras que los residuos líquidos y gaseosos pueden ser vertidos al exterior tras su tratamiento si sus actividades y concentraciones no suponen un peligro para el público y el medioambiente. La operación de las instalaciones nucleares y radiactivas conlleva, por tanto, un impacto radiológico ambiental cuantificable a través del incremento en los niveles de radiactividad y concentración de radionucleidos en el medioambiente, así como las dosis potencialmente recibidas por la población.

Las fuentes de exposición generan, según su clasificación en el Sistema de Protección Radiológica (ICRP-103); situaciones de exposición existente, de exposición planificada y de exposición en emergencia, y les son de aplicación los principios de protección radiológica de justificación, optimización y limitación. Dos de dichos principios, el de justificación y el de optimización, se aplican a todas las situaciones de exposición con objeto de asegurar que el beneficio producido sea mayor que el detrimento y que el nivel de protección sea el más adecuado posible. El principio de limitación, sin embargo, únicamente se aplica a situaciones de exposición planificada, introduciendo límites de dosis reforzados con restricciones de dosis y niveles de referencia para proteger a trabajadores y miembros del público de todas las posibles fuentes de exposición reguladas a que estén sometidos.

Para garantizar el cumplimiento de estos límites se lleva a cabo en las instalaciones nucleares y radiactivas causantes de las emisiones tanto un programa de control y vigilancia sobre la fuente (efluentes radiactivos líquidos y gaseosos y residuos radiactivos sólidos) como un programa de vigilancia radiológica del medio ambiente en el entorno de estas instalaciones, y para llevar a cabo un seguimiento continuo de la exposición de la población en situaciones de exposición existente y de emergencia se lleva a cabo un programa formado por una serie de redes de vigilancia que permiten conocer la calidad radiológica en el medio ambiente del todo el territorio nacional.

Estos programas vendrán condicionados, además de por las características de las emisiones al exterior, por el comportamiento que presenten los radionucleidos emitidos en el medio ambiente, sus mecanismos de migración y las vías de transferencia hasta el hombre.

4. MARCO NORMATIVO

En el marco comunitario, los artículos 35 y 36 del [Tratado de Euratom](#), establecen que todos los Estados Miembros deben disponer de las instalaciones necesarias para llevar a cabo una vigilancia continua de los niveles de radiactividad en aire, agua y suelo y garantizar el cumplimiento de las normas básicas de protección radiológica (art. 35), así como transmitir regularmente a la Comisión de la UE la información relativa a estos controles (art. 36).

En el marco nacional, la normativa establecida es amplia y diversa, y se recoge en distintas leyes y reglamentos, tal y como se describe a continuación:

La Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, reformada por la [Ley 33/2007, de 7 de noviembre](#), cita en su apartado g) del artículo 2 las funciones relativas a la protección del medio ambiente asignadas a este Organismo.

Estas incluyen:

- Controlar las medidas de protección radiológica del público y del medio ambiente
- Vigilar y controlar las descargas de materiales radiactivos al exterior de las instalaciones nucleares y radiactivas y su incidencia, particular o acumulativa, en las zonas de influencia de estas instalaciones y evaluar su impacto radiológico ambiental
- Controlar y vigilar la calidad radiológica del medio ambiente en todo el territorio español en cumplimiento de las obligaciones internacionales, sin perjuicio de las competencias de otras administraciones públicas

Para cumplir con las funciones asignadas, el CSN, se apoya en el [Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre](#), por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (RPSI), mediante el cual se realiza la transposición de la Directiva 2013/59/Euratom, que, en su artículo 15 indica, que los límites de dosis para los miembros del público (excluyendo la dosis debida al fondo radiactivo natural o a la exposición sufrida como consecuencia de exámenes y tratamientos médicos) son: 1 mSv/año de dosis efectiva a cuerpo entero, 15 mSv/año de dosis equivalente al cristalino y 50 mSv/año a la piel en 1 cm² de superficie cutánea.

Además, en su Título V “Protección radiológica de los miembros del público en circunstancias normales”, se establecen los principios que rigen la protección a la población, estableciendo que los titulares de las prácticas serán los responsables de realizar los estudios adecuados conducentes a confirmar que el riesgo de exposición a que pudiera estar sometida la población como consecuencia de sus actividades no son significativos, a través de la evaluación de las dosis que pueda recibir la población y, en su caso, los sistemas de vigilancia necesarios para garantizarlo.

En el artículo 60 de dicho Título V se establece que la vigilancia se basará fundamentalmente en las dosis que pudieran ser recibidas por los miembros del público y, cuando esté justificado, en la realización de un programa de vigilancia

radiológica ambiental adecuado a dicho riesgo y a los medios potencialmente impactados. Adicionalmente, en este mismo título se asigna al CSN la competencia de establecer normas específicas, elaborar informes y vigilar el cumplimiento de lo dispuesto en el Reglamento, con objeto de asegurar el buen estado radiológico del medio ambiente.

El [Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre](#), por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas (RINR) establece el régimen de autorizaciones para estas instalaciones. En él se indica que para la obtención de las autorizaciones de construcción y explotación de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible, se deberá realizar un Estudio Analítico Radiológico (EAR) que estime teóricamente el impacto radiológico potencial sobre la población y el medio ambiente, un Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA), que se diseñará tomando como base los resultados del EAR y que permita el establecimiento del nivel radiológico antes y durante la operación de la instalación, y en el caso de la autorización de explotación, además, un Plan de Gestión de Residuos Radiactivos (PGRR). Para la obtención de la autorización de desmantelamiento se requiere un estudio del impacto radiológico ambiental de las actividades del desmantelamiento que contendrá el PVRA aplicable y un PGRR.

En relación con el impacto ambiental, en la [Ley 21/2013 de 9 de diciembre](#), de evaluación ambiental, se establece la necesidad de someter a la evaluación de impacto ambiental a las centrales y reactores nucleares, incluido el desmantelamiento o clausura definitiva de los mismos, así como a las instalaciones del ciclo.

5. CONTROL Y VIGILANCIA DE EFLUENTES RADIATIVOS

A las CCNN se les requiere el establecimiento de un programa para controlar los efluentes radiactivos y para mantener las dosis al público debidas a éstos tan bajas como sea posible y siempre inferiores a los límites legales establecidos en el RPSI. Con objeto de tomar en consideración las posibles dosis recibidas por el público por otras vías diferentes a las de la propia instalación, se establece una restricción operacional de dosis que será una fracción del límite establecido. Las restricciones operacionales de dosis consideran la suma de las dosis (externas e internas) resultantes de la incorporación de radionucleidos al organismo por el funcionamiento de las instalaciones. Las instalaciones radiactivas de primera categoría tienen establecidos programas similares que se incluyen en los diferentes documentos oficiales de la instalación.

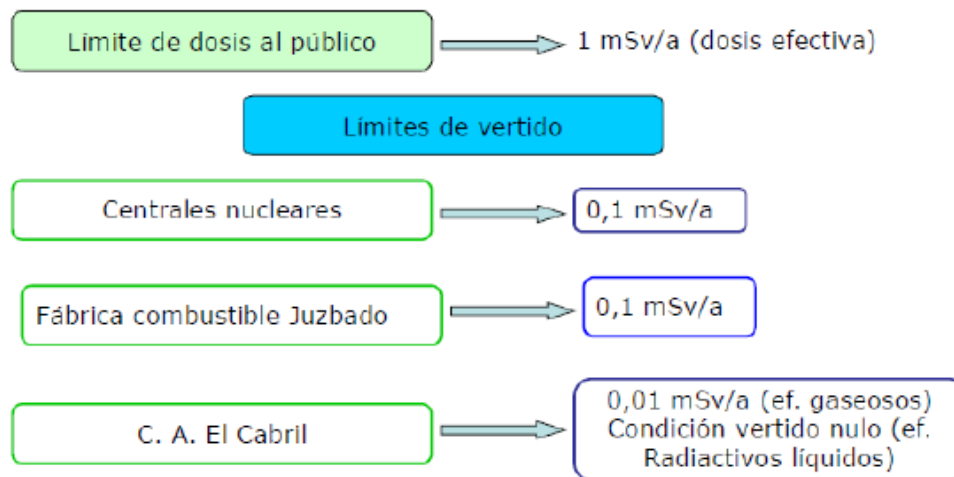


Figura 1. Límite de dosis y restricción operacional de dosis en instalaciones nucleares.

El Programa de Control de Efluentes Radiactivos (PROCER) se define en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) de las instalaciones nucleares, dentro del apartado de controles administrativos, y se desarrolla en detalle en el Manual de Cálculo de Dosis al Exterior (MCDE) de estas instalaciones. El Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA), documento preceptivo para obtener las autorizaciones de construcción, puesta en marcha y desmantelamiento establecidas en el RINR, también se encuentran contenido en el MCDE. Todos ellos son documentos oficiales de explotación de las instalaciones nucleares y recogen los requisitos de control y vigilancia de los efluentes y de la vigilancia radiológica ambiental. El MCDE incluye:

- El PROCER.
- Una descripción de las principales vías de vertido.
- La metodología y parámetros necesarios para la estimación de las dosis al público derivadas de los vertidos al medio.
- El PVRA.
- Una relación de los procedimientos necesarios para la adecuada implantación de todos los requisitos establecidos.

El PROCER contiene, además de la limitación de los vertidos, las acciones a llevar a cabo si se exceden estos límites y/o las condiciones establecidas, y los procedimientos necesarios para su adecuada implantación. En este programa se establece:

- La instrumentación de vigilancia de efluentes radiactivos junto con sus condiciones de operabilidad, programas de pruebas y los puntos de tarado de los monitores de radiación.
- Los límites instantáneos de concentración de material radiactivo liberado en los efluentes líquidos, calculados a partir de los límites establecidos.
- Los límites instantáneos de tasa de dosis debida al material radiactivo liberado en los efluentes gaseosos, calculados a partir de los límites establecidos.

- Las restricciones operacionales de dosis para efluentes radiactivos. En este sentido, se establece generalmente un valor de 0.1 mSv/año, distribuido entre los efluentes líquidos y los gaseosos según lo indicado en el MCDE (normalmente un 80% para los gaseosos y un 20% para los líquidos, aunque puede variar ligeramente según la contribución a la dosis).
- Las condiciones de operabilidad de los sistemas de tratamientos de desechos radiactivos líquidos y gaseosos.

Los titulares de las instalaciones han de remitir periódicamente al CSN los datos relativos a los efluentes radiactivos. Las CCNN emiten mensualmente los denominados “Informes Mensuales de Explotación” (IMEX), donde se indica, a este respecto, la actividad emitida de cada uno de los radionucleidos por cada una de las vías, la dosis estimada efectiva y equivalente en piel mensual para el grupo de edad del individuo crítico y los puntos de tarado y lecturas máximas de los monitores de área y de proceso de la instalación. Los cálculos de dosis debidas a estos vertidos se realizan con el objeto de verificar el cumplimiento de los límites de dosis establecidos. La metodología e hipótesis utilizadas son comunes para cada tipo de instalación, a excepción de aquellos parámetros específicos del cada emplazamiento según se expone en el MCDE.

Los datos de efluentes se recopilan en el CSN en la base de datos ELGA (Efluentes Líquidos y Gaseosos). El CSN evalúa estos datos, verificando el cumplimiento de los límites y condiciones establecidos y evalúa las tendencias de los vertidos a fin de detectar incidencias operacionales y comprobar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento. Después remite los resultados a la Comisión de la Unión Europea. A partir de 2008, se ha requerido a las centrales (a través de Instrucción Técnica) que la información sobre dichos vertidos se remita, de forma normalizada, según la Recomendación de la Comisión, 2204/2/EURATOM de 18 de diciembre de 2003.

El control regulador de los vertidos radiactivos se complementa con inspecciones periódicas de comprobación.

6. CONTROL Y VIGILANCIA DE RESIDUOS RADIATIVOS SÓLIDOS

Todas las actividades implicadas en la gestión de los residuos sólidos, como son la manipulación, el tratamiento y acondicionamiento, el transporte y el almacenamiento temporal y definitivo de los mismos, han de estar debidamente controladas y vigiladas con el fin de que no supongan un riesgo inaceptable ni para el medio ambiente ni para la población.

En el caso de instalaciones nucleares e instalaciones del ciclo de combustible se requiere, durante el proceso de licenciamiento, la elaboración de unos procedimientos de control de los sistemas de tratamiento y acondicionamiento para garantizar de manera razonable su funcionamiento dentro de los límites y condiciones establecidos en las autorizaciones. Durante la operación se lleva a cabo un seguimiento continuo de los procesos de gestión de los residuos, lo que permite la detección de incidencias y el establecimiento de aquellas mejoras que se crean necesarias o acordes con los nuevos desarrollos tecnológicos.

En España, el CSN realiza un control y seguimiento del inventario de residuos radiactivos sólidos almacenados en las instalaciones, mediante la evaluación de la información preceptiva remitida periódicamente por las instalaciones, en el caso de las centrales nucleares, en los IMEX. En estos informes se reporta los bultos generados, los que han salido y los que permanecen almacenados durante el mes, indicando su actividad volumen y naturaleza. Además, se remite una descripción de los materiales contaminados o activados que permanecen sin acondicionar. De esta forma se controla la generación de residuos radiactivos (RR) sólidos, con frecuencia mensual en el caso de centrales nucleares, lo que hace posible la actualización del inventario total de RR sólidos almacenados en las instalaciones productoras y en el Centro de Almacenamiento de Residuos Radiactivos de El Cabril. En esta instalación, el CSN controla y vigila los procesos de aceptación de cada bulto-tipo realizado por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), tanto desde el punto de vista de la seguridad en el transporte como en el almacenamiento en El Cabril.

Para el caso específico de RR sólidos de alta actividad se establece un programa de control y vigilancia tanto de las piscinas de combustible gastado como de los almacenamientos temporales individualizados establecidos en las propias centrales nucleares. En los IMEX, las centrales remiten el balance mensual de elementos combustibles en el reactor, la piscina, el almacenamiento en seco y el almacén de combustible nuevo, así como, el balance de la capacidad de almacenamiento del combustible gastado.

El control de los RR se complementa con inspecciones periódicas de comprobación por parte del CSN.

7. VIGILANCIA RADIOLÓGICA AMBIENTAL

Con el fin de efectuar un seguimiento de la dispersión en el medio ambiente de los vertidos que realizan de modo controlado las instalaciones y para conocer y vigilar la calidad radiológica de todo el territorio nacional, se ha establecido en España un sistema de redes de vigilancia radiológica ambiental que con el objetivo de:

- Verificar el cumplimiento de los requisitos fijados en las autorizaciones de las instalaciones.
- Detectar la presencia y vigilar la evolución de elementos radiactivos tanto de origen natural como artificial y de los niveles de radiación ambiental y determinar las causas de posibles incrementos de los niveles radiactivos en el medio ambiente.
- Estimar el riesgo radiológico potencial para la población y establecer, en su caso, precauciones y medidas correctoras.

Se establecen, por lo tanto, dos tipos de vigilancia radiológica ambiental, una asociada a la explotación de las centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible nuclear, que denominamos Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA) y por otro lado la Red de Vigilancia Radiológica de ámbito nacional (REVIRA) no asociada a instalaciones y que se extiende a todo el territorio nacional.

Los datos radiológicos de todas las redes se evalúan y almacenan en la base de datos KEEPER de vigilancia radiológica ambiental del CSN, que, con más de 4,5 millones de registros y datos de hace más de 30 años, conforma un banco actualizado de datos medioambientales capaz de suministrar en cualquier momento niveles de referencia. Esta base de datos es de acceso público y se puede consultar a través de la aplicación web KeeperGisWeb en la página web: <https://www.csn.es/kprgisweb2/>

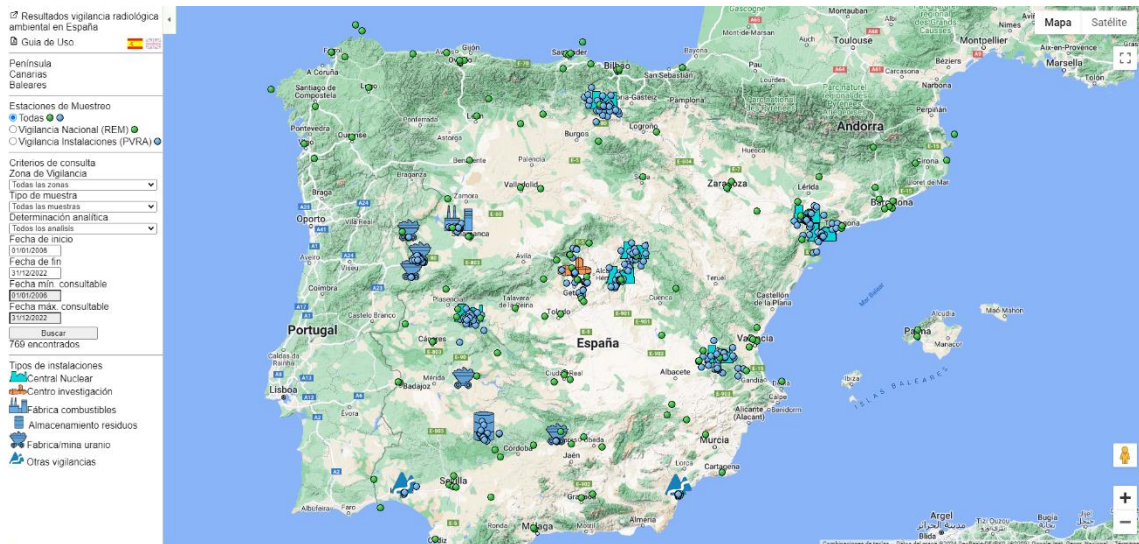


Figura 2. Página de inicio de KeeperGisWeb.

7.1. Programas de vigilancia radiológica ambiental (PVRA)

En las instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo de combustible nuclear de primera categoría se requiere el establecimiento de un PVRA que proporcione datos sobre los niveles de radiación en las vías potenciales de exposición al hombre más importantes para cada emplazamiento y que permita verificar la idoneidad de los programas de vigilancia y control de efluentes (PROCER).

El PVRA debe incluir un programa de muestreo, con la localización de las estaciones, la frecuencia de muestreo y el tipo de análisis y medida de la radiación que proporcione información sobre los radionucleidos existentes en el medio ambiente. Además, debe contener un censo del uso de la tierra y el agua (CUTA) en el entorno de la instalación actualizado, definido en función de los hábitos de la población del entorno de la instalación en cuanto a utilización de recursos naturales. La bondad de los resultados analíticos del PVRA se verifica con un programa de calidad analítico (CC) por el que un laboratorio diferente al que analiza las muestras del PVRA analiza en torno a un 5% de sus muestras con objeto de comparar los resultados y detectar posibles desviaciones en los métodos analíticos.

Las restantes instalaciones radiactivas tienen implantados programas de vigilancia similares que se incluyen en diferentes documentos oficiales de explotación dependiendo de la instalación específica.

Los titulares de las instalaciones son los responsables de implantar estos programas de vigilancia. La instalación condicionará los análisis a realizar, en relación con los isótopos y las vías de emisiones radiactivas presentes en la misma.

Dentro del desarrollo de un PVRA se pueden distinguir 4 fases temporales:

- 1) Fase pre-operacional, que se establece y desarrolla antes de la entrada en funcionamiento de la instalación para determinar el fondo radiológico de la zona.
- 2) Fase operacional, que se establece y desarrolla durante la fase de operación de la instalación para comprobar el impacto de esta sobre su entorno.
- 3) Fase de desmantelamiento y clausura, que permite vigilar el impacto de los trabajos de desmantelamiento.
- 4) Fase postclausura, que permite estudiar la evolución de la radiación y la contaminación después de clausurada la instalación.

Las características del emplazamiento van a determinar el tipo de muestras a analizar mediante el estudio concreto de las vías de transferencia de los radionucleidos presentes a la población. En general, se toman muestras de aire, radiación directa, agua (potable, lluvia, superficiales y subterráneas), suelo, sedimentos, organismos indicadores y alimentos. En ellas se mide la actividad total y los isótopos más representativos según el tipo de muestra e instalación.

Actualmente hay en vigor 18 PVRAS:

- Centrales nucleares en operación: incluye los PVRAs de las centrales nucleares de Almaraz, Ascó, Cofrentes, Vandellós II y Trillo.
- Instalaciones nucleares o radiactivas del ciclo de combustible en fase de parada, desmantelamiento, clausura o latencia: incluye los PVRAs de las centrales nucleares de Garoña, Vandellós 1 y José Cabrera, la instalación nuclear del Ciemat y las antiguas plantas de fabricación de concentrados de uranio planta Lobo G, Quercus y Fábrica de Uranio de Andujar (FUA).
- Instalaciones del ciclo de combustible en operación: incluye los PVRAs de El Cabril, Juzbado.
- Otras instalaciones: incluye los PVRAs de antiguas minas de uranio como las de Vademascaño y Casillas de Flores y otras zonas contaminadas radiológicamente como el Centro de Recuperación de Inertes (CRI) en Huelva o la zona del accidente de Palomares.

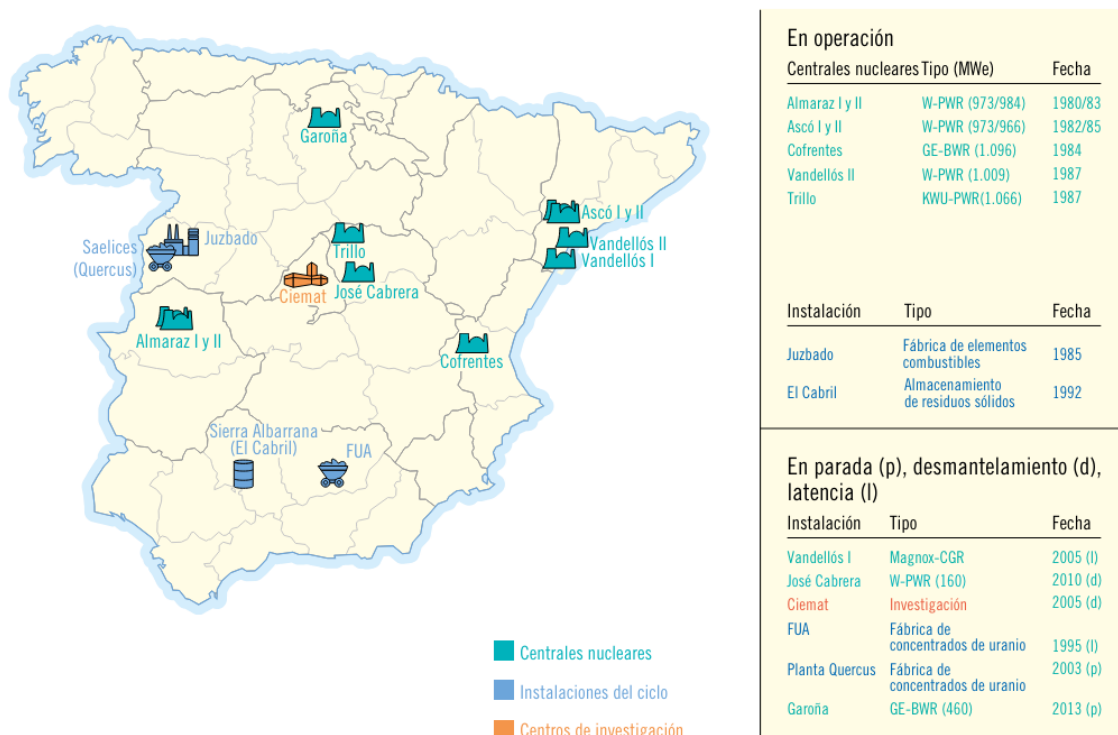


Figura 3. Mapa de los PVRAs de las instalaciones nucleares y radiactivas.

Además de estos programas llevados a cabo por el titular, el CSN superpone a estos controles su propio Programa de Vigilancia Radiológica Independiente (PVRAIN), que lleva a cabo bien directamente mediante acuerdos bilaterales con laboratorios de universidades españolas cercanas a la instalación o bien a través de acuerdos de encomienda con las comunidades autónomas, como es el caso de Cataluña y Valencia. Los puntos de muestreo, el tipo de muestras y los análisis realizados representan una proporción del 5% de los del PVRA.

En relación a los niveles de radiactividad permitidos en las muestras ambientales, el CSN ha establecido unos niveles de notificación (NN) para concentraciones de actividad en muestras ambientales (en Bq/m³, Bq/l o Bq/kg), para cada uno de los radionucleidos en las distintas vías de exposición (aire, agua, alimentos, etc.) al hombre. Estos niveles fueron calculados a partir de los límites de emisión (en mSv/año) que se deben cumplir para los efluentes, de forma que la superación de estas concentraciones de actividad en las muestras supondría una superación de los límites establecidos para efluentes y sería necesaria notificación inmediata al CSN y posterior investigación. Además, en el MCDE, se establecen los requisitos sobre las capacidades de detección necesarias para los análisis de muestras ambientales y una relación de los procedimientos establecidos para la adecuada implantación del programa. En el caso de las CCNN estas capacidades de detección se basan en la GS-4.1 del CSN.

En los IMEX las centrales remiten mensualmente el resumen de la toma de muestras y los resultados de las medidas realizadas en los distintos puntos de muestreo.

Los resultados del PVRA son evaluados y analizados por el CSN que además realizará las inspecciones periódicas correspondientes.

7.2. Vigilancia radiológica de ámbito nacional

El Tratado de Euratom exige a los Estados Miembros la realización de una vigilancia del medio ambiente por todo el territorio nacional, no asociada a una instalación, que se realiza mediante la implantación de la Red de Vigilancia Radiológica nacional (REVIRA) que es gestionada por el CSN.

La REVIRA es por tanto una red de vigilancia no asociada a las instalaciones nucleares o radiactivas, que tiene como objetivo vigilar la calidad radiológica del medioambiente en todo el territorio español. Esta red se desarrolla en todo el territorio nacional y proporciona información sobre el contenido radiactivo en la atmósfera, el suelo, las aguas (continentales y costeras) y los alimentos.

La REVIRA está constituida por dos redes:

- * Red de Estaciones de Muestreo (REM), en la que se realiza la vigilancia se realiza mediante programas de muestreo y análisis llevados a cabo por diferentes laboratorios.
- * Red de Estaciones Automáticas (REA), en la que se realiza la vigilancia se realiza mediante la medida continua de la radiactividad de la atmósfera.

7.2.1. Red de Estaciones de Muestreo (REM)

La Red de Estaciones de Muestreo (REM) tiene como objetivo vigilar permanentemente el contenido radiactivo en las vías primarias de exposición al ser humano (atmósfera, suelo, aguas y alimentos) y está integrada por programas de muestreo, medida y análisis realizados por diferentes universidades e instituciones mediante acuerdos con el CSN.

La REM está constituida por 2 subredes:

- La Red Densa (Dense Network). Esta red comprende numerosas localizaciones de muestreo distribuidas por todo el territorio nacional, de forma que abarque todas las regiones, archipiélagos incluidos. La presencia de un elevado número de puntos de muestreo permite al CSN determinar los valores medios de radiactividad existentes en España. A su vez este tipo de redes permiten a la Comisión Europea determinar los valores medios de radiactividad existentes en la Unión Europea.

En España esta red existe desde el año 1992, y en el caso de las aguas continentales desde el año 1984.

En el año 2000 se modificó el programa que se venía realizando, eliminándose el muestreo de agua de lluvia e incorporándose el de leche y agua potable.

En el año 2008 se amplió con la recogida y análisis de muestras de dieta tipo.

- La Red Espaciada o red de alta sensibilidad (Sparse Network). Esta red comprende menos localizaciones que la densa, pero de mayor sensibilidad. La red espaciada dispone de puntos de muestreo en todas las Comunidades Autónomas, excepto en Murcia, Navarra, La Rioja,

Ceuta y Melilla. Se considera que es una red representativa de todo el territorio nacional por estar distribuida por todas las regiones geográficas.

La principal característica de la red espaciada es que en ella se deben emplear técnicas de muestreo y analíticas de gran sensibilidad que permitan conocer los valores actuales y las tendencias de los niveles de radioactividad con gran precisión.

En España esta red existe desde el año 2000.

Al mismo tiempo, la REM comprende dos programas de vigilancia complementarios:

- 1) Programa de vigilancia del medio atmosférico y terrestre, el cual comprende la toma de muestras de aire, suelo y agua de lluvia o depósito seco, agua potable, leche y dieta tipo y en el que se realizan análisis de índices de actividad α -total y β -total, espectrometría gamma, y concentración de Sr-90 y I-131.
- 2) Programa de vigilancia del medio acuático (continental y costero), el cual comprende la toma de muestras de aguas continentales de ríos de distintas cuencas hidrográficas y aguas costeras del litoral marítimo, y en el que se realizan análisis de índices de actividad α -total, β -total y β -resto (β -total menos contribución del K-40), espectrometría gamma, y concentración de H-3.

Para la ejecución de estos programas, el CSN ha establecido convenios de muestreo y análisis con 19 universidades públicas y con el CIEMAT, encontrándose estos centros repartidos por toda la geografía nacional. Adicionalmente, el CSN dispone de un encargo con el CEDEX para el muestreo análisis de las aguas costeras y continentales.

Los datos medidos por la REM se almacenan en la base de datos Keeper del CSN.



Figura 4. Red de Estaciones de Muestreo (REM): redes densa y espaciada, atmósfera y terrestre. En 2024 se incluye Palma y La Coruña en la red espaciada (solo atmósfera).

7.2.2. Red de Estaciones de Automáticas (REA)

La Red de Estaciones de Automáticas (REA) tiene como objetivo vigilar en tiempo real el contenido radiactivo en la atmósfera y obtener información para evaluar las consecuencias derivadas de un posible accidente.

En el año 2019 el CSN acometió la renovación de la REA, para tener en cuenta, entre otros, los avances tecnológicos disponibles y las lecciones aprendidas tras el accidente de Fukushima. Esta renovación finalizó en el año 2021. La modernización incluye una ampliación del número de estaciones así como una renovación tanto del equipamiento radiométrico como de las conexiones y comunicaciones automáticas con la Sala de Emergencias (Salem) del CSN.

La REA está integrada por 200 estaciones que se encuentran distribuidas por el territorio nacional. Estas estaciones son de diferentes tipos:

- 185 estaciones fijas (conocidas como estaciones SARA), que poseen sondas de cristal de centelleo NaI o LaBr₃, todas ellas con capacidad espectrométrica.
 - Las estaciones que poseen cristal de centelleo de NaI están situadas por todo territorio nacional, así como en las zonas de planificación de las centrales nucleares y algunas instalaciones radiactivas.
 - Las estaciones que poseen cristal de centelleo de LaBr₃ están situadas dentro de las zonas de planificación de emergencias de las centrales nucleares españolas y situadas en los sectores hacia los cuales sopla el viento de acuerdo con los Estudios de Seguridad de dichas centrales.
- 15 estaciones portátiles (conocidas como estaciones MIRA), que poseen sondas Geiger-Müller de baja y alta tasa de dosis, junto con un sensor de pluviometría y que pueden ser colocadas en cualquier punto geográfico pudiendo ser usadas en caso de emergencia nuclear o radiológica.

Los datos medidos por la REA se almacenan en bases de datos utilizadas por el programa Network Monitoring Centre (NMC).



Figura 5. Red de Estaciones Automáticas (REA).

8. COMPORTAMIENTO DE LOS RADIONUCLEIDOS EN EL MEDIOAMBIENTE

Un ecosistema es la combinación del ambiente físico (componente abiótico o biotopo) y de los organismos (componente biótico o biocenosis), para formar un sistema interrelacionado e interdependiente.

Debido a que todos los componentes de un ecosistema contienen trazas de radionucleidos naturales y en menor medida de radionucleidos artificiales, y teniendo en cuenta que estos representan las vías de exposición de los radionucleidos a las personas y el medioambiente, es necesario conocer su comportamiento dentro de los diferentes ecosistemas, siendo este el principal objetivo de la radioecología.

Los radionucleidos que se encuentran en los distintos ecosistemas pueden tener origen natural o artificial. Los de origen natural se clasifican en primordiales y cosmogénicos, siendo los primeros aquellos pertenecientes a las series radiactivas del Uranio, del Torio y del Actinio, cuyas cabezas de serie son el ^{238}U , el ^{232}Th y el ^{235}U respectivamente, y algunos no asociados a ninguna serie como son el ^{40}K y el ^{87}Rb , y los segundos los generados a partir de la interacción de la radiación cósmica sobre los diferentes elementos químicos existentes en el aire (Be-7 , Na-22 , Na-24 , C-14 y H-3 , teniendo los dos últimos también un origen artificial).

Para el estudio del comportamiento de los radionucleidos en los ecosistemas será necesario analizar las tasas de movimiento de los distintos elementos entre componentes del ecosistema, los mecanismos responsables de tales movimientos y el grado de concentración de los radionucleidos dentro de los componentes de los ecosistemas, en especial el componente biótico.

Se consideran tres tipos principales de ecosistemas:

- Ecosistema terrestre.
- Ecosistema acuático de agua dulce.
- Ecosistema acuático de agua salada o ecosistema marino.

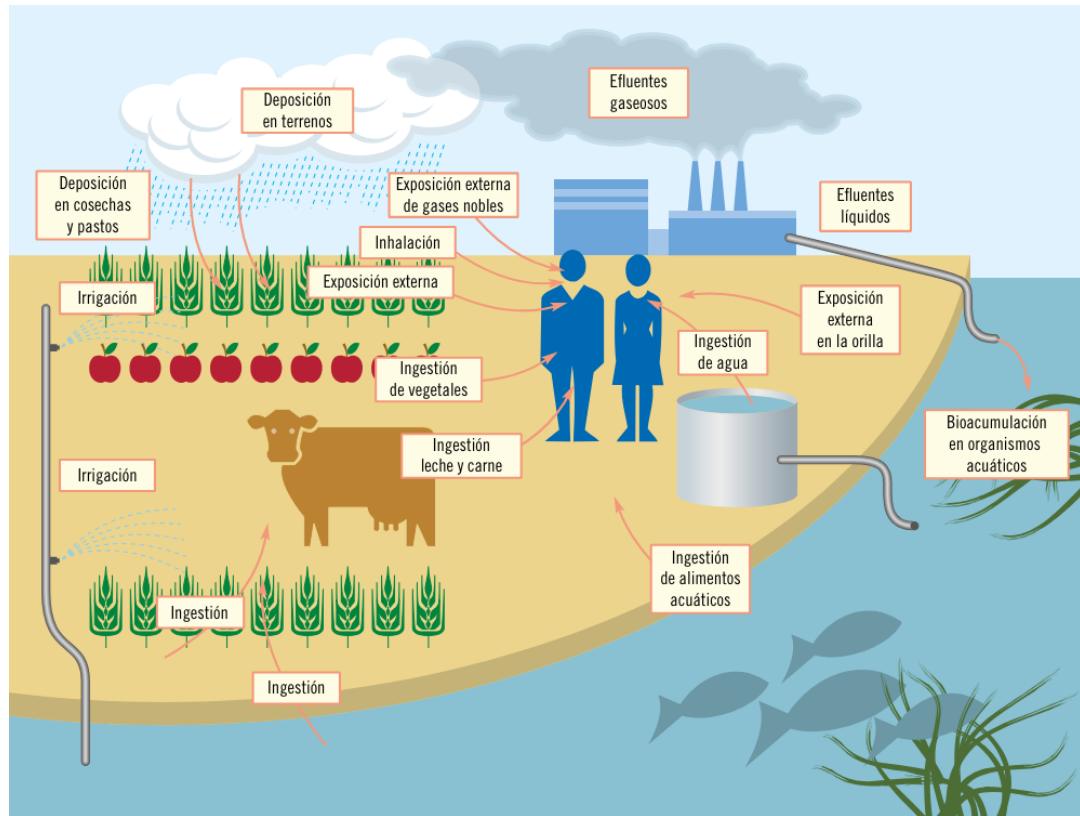


Figura 6: Vías de exposición de efluentes gaseosos y líquidos.

8.1. Ecosistema terrestre

El ecosistema terrestre, es el más importante de los ecosistemas mencionados anteriormente, no sólo porque es en el que se encuentra el hombre, sino que además una porción significativa de la alimentación humana es de origen terrestre. La transferencia de radionucleidos a través del ecosistema terrestre, es un aspecto complejo en el que están implicados muchos procesos que dependen de las características específicas de cada radionucleido y del medio ambiente.

Los estudios realizados tanto en laboratorio como en campo relativos a la transferencia de radionúclidos a través de las cadenas alimentarias terrestres, se centran principalmente en aquellos isótopos presentes en la naturaleza por intervención del hombre (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I , $^{239+240}\text{Pu}$ y ^{241}Am en el caso de los isótopos artificiales, y ^{222}Rn , ^{210}Pb y ^{210}Po entre los naturales). La transferencia de otros elementos no ha sido tan ampliamente estudiada y por lo tanto no se tiene actualmente tanta información como de los anteriormente indicados.

a) Comportamiento de radionucleidos en aire

El comportamiento que experimente cualquier gas emitido por una instalación, viene determinado por una serie de fenómenos que dependen de, las propiedades físicas del efluente y de las características atmosféricas del lugar.

Se denomina dispersión atmosférica a la combinación de los fenómenos de transporte y difusión de los gases, siendo el primero el que hace referencia al desplazamiento del efluente en la dirección del viento predominante y el segundo el que hace referencia al movimiento aleatorio del efluente en virtud del cual éste se disemina lateral y verticalmente al mezclarse con el aire limpio.

Se denomina deposición, al fenómeno por el cual los radionucleidos existentes en el aire en forma de partículas, se ponen en contacto con el suelo y la vegetación pudiendo incorporarse a la cadena alimentaria. La deposición puede ser seca o/y húmeda, siendo la seca un proceso continuo, en la que el material es removido de la pluma a causa del impacto de esta con superficies u obstáculos (suelos, paredes, vegetación), y la húmeda aquella que ocurre en periodos de precipitación, en los que la lluvia, nieve o granizo al atravesar la nube radioactiva, producirá un efecto de arrastre (*washout*) de los radionucleidos que se depositarán en la superficie terrestre.

La captura dentro de la nube al producirse la condensación (*rainout*) puede tener un efecto similar. La tasa a la cual el material se deposite, dependerá de la naturaleza del mismo y de las características de la superficie existente debajo de la pluma.

b) Comportamiento de los radionucleidos en el suelo

Una vez que los radionucleidos se encuentran depositados en el terreno están sujetos a dos tipos de movimientos, uno lateral y otro vertical.

El movimiento lateral puede estar causado por la lluvia, que produce un lavado superficial del terreno que puede causar el desplazamiento lateral de sus radionucleidos y depende de la intensidad de la lluvia, la topografía y la naturaleza del suelo. El mayor movimiento tendrá lugar en caso de lluvias fuertes, terrenos accidentados y con escasa cobertura vegetal. Este es el proceso principal de conexión del ecosistema terrestre con los ecosistemas acuáticos.

Otra causa de movimiento lateral es la acción del viento y dependerá de las características del terreno, de la fuerza del viento y del tamaño de las partículas. El mayor desplazamiento se dará en terrenos llanos, secos y sin vegetación, teniendo en cuenta que a mayor fuerza del viento, mayor desplazamiento. El fenómeno de la resuspensión es el proceso por el cual partículas que ya se habían depositado en el suelo vuelven por acción del viento a la fracción aérea en contacto con el terreno, pudiendo ser de nuevo transportadas. El mayor desplazamiento en este caso se producirá con las partículas de menor tamaño. Con este proceso se puede transferir la contaminación de zonas con alto contenido de radionucleidos a zonas relativamente alejadas no afectadas en un principio, como ha sido el caso del accidente de Chernobyl.

A partir de la superficie del terreno, los isótopos radiactivos pueden migrar verticalmente hacia capas más profundas, mediante el desplazamiento mecánico de las partículas, el efecto de la lluvia o a causa de los organismos que viven en el suelo.

Cuando la tierra es de cultivo, todos los preparativos que se realizan para la siembra facilitan la migración vertical de los radionucleidos, mientras que cuando la tierra no es de cultivo, la penetración de los radionucleidos en el suelo es un proceso relativamente lento que viene determinado por el grado de adsorción de los radionucleidos a las partículas minerales y por la acción del agua.

c) Comportamiento de los radionucleidos en las plantas

Los materiales radiactivos pueden alcanzar los tejidos de las plantas por incorporación directa, mediante la deposición de éstos en las partes aéreas de las plantas donde pueden adherirse y/o ser absorbidas, por incorporación indirecta mediante la deposición en el suelo y posterior absorción por las raíces o por traslocación.

En la incorporación directa de los isótopos a las plantas se pueden distinguir tres fases: Deposición, Retención y Absorción.

Los materiales radiactivos pueden depositarse como partículas, como vapores (caso del lodo) o como soluciones en la lluvia, la niebla o el agua de riego. La retención subsiguiente, depende de las características físicas del depósito y de la forma y fase de crecimiento de la planta. En el caso de la deposición seca, la retención será mayor cuanto más pequeñas sean las partículas.

Para los materiales disueltos en agua, el grado de retención dependerá de la cantidad de agua depositada y del tamaño y forma de las hojas. Únicamente el material que está en forma soluble será absorbido por las plantas, mientras que si está en forma insoluble, contaminará a las plantas solo superficialmente.

Existen tres rutas a través de las cuales se realiza la absorción: foliar, floral y por la base de la planta. De las tres rutas, las hojas son los órganos absorbentes más importantes. Entre los factores que influyen en la absorción foliar, se pueden distinguir la humedad atmosférica, la temperatura y la edad de las hojas. La absorción se ve favorecida en tiempo húmedo, con temperaturas elevadas y con hojas jóvenes.

La incorporación indirecta de los radionucleidos por las plantas lleva implícita tres fases: la deposición de los radionucleidos en el suelo, la incorporación de los radionucleidos al suelo y la absorción de los isótopos por las raíces de las plantas.

d) Comportamiento de los radionucleidos en los productos de origen animal

Los elementos radiactivos pueden entrar en el cuerpo del animal por absorción a través de la piel, por inhalación y por ingestión. Esta última vía es la más importante para la entrada de contaminación radiactiva en los animales.

El material alimenticio que deja el estómago y pasa al intestino, consta de agua, ácido clorhídrico y de una variedad de sales y sustancias orgánicas que

dependerán de la dieta y de los hábitos alimenticios del animal. El intestino delgado, dependiendo de las especies, tiene una morfología tal que se incrementa enormemente la superficie disponible para la absorción debido a la existencia de plegamientos y vellosidades, que tienen células absorbentes y células secretoras de mucosidad. La concentración de actividad que aparece en el producto animal comestible, está relacionada directamente con la cantidad del isótopo que atraviesa las paredes intestinales.

Tras la absorción, los radionucleidos pueden incorporarse a la leche, depositarse en uno o varios tejidos y órganos o ser excretados en la orina y en las heces. El nivel alcanzado de radionucleidos en cualquier producto animal, es el resultado neto de todos estos procesos.

8.2. Ecosistemas acuáticos

El medioambiente acuático es muy diferente del medioambiente terrestre, estando la mayoría de las diferencias condicionadas por el componente abiótico (i.e. los componentes químicos y físicos sin vida del medio ambiente que afectan a los organismos vivos y al funcionamiento de los ecosistemas) de los ecosistemas acuáticos, el agua, cuyas propiedades fisicoquímicas condicionan en cierta manera al componente biótico.

El curso que seguirá un determinado radionucleido en un ecosistema acuático, dependerá de su forma físico-química, pudiéndose dar tres mecanismos principales que afectan a las concentraciones de los diferentes radionucleidos en estos sistemas ecológicos. Estos son: la formación de coloides, la coprecipitación, y la sorción y desorción en los sedimentos y sólidos en suspensión.

Los coloides son suspensiones de partículas muy finas de compuestos insolubles generalmente. Su pequeño tamaño impide la precipitación (0,005 a 0,2 μm). La formación de coloides es típica de una variedad de elementos pesados incluyendo a los lantánidos (La, Ce, etc.), o algunos de los elementos de transición como el Co y el Fe, así como el Th y el U. Las partículas coloidales pueden pasar a través de filtros de papel convencionales pero no pasan a través de membranas. Las partículas formadas están en el intervalo de los tamaños consumidos por muchos organismos acuáticos y esto puede favorecer su entrada en la cadena alimentaria.

El proceso de coprecipitación se da debido a que un radionucleido presente en el agua en concentraciones bajas puede ser precipitado al precipitar otros elementos presentes en mayor concentración mediante un proceso denominado coprecipitación. Por ejemplo, el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ puede precipitar bajo una variedad de condiciones naturales y es un importante portador de radionucleidos que pueden coprecipitar con él (Zr-95, Nb-95, Ru-106, Ce-144, Pr-144 y elementos de transición como el Cr-51, Co-60, Mn-54 etc.).

Los sedimentos juegan un papel importante en la radioecología acuática, ya que actúan de dos formas: como transporte de radionucleidos en el caso de sólidos suspendidos y como reservorio de sustancias radiactivas en el caso de los sedimentos.

Los radionucleidos introducidos en los cuerpos de agua alcanzan los sedimentos del fondo principalmente, o bien por adsorción en sólidos suspendidos y deposición de éstos en el fondo, o bien mediante deposición en el fondo, a través de la biota que ha absorbido o adsorbido radionucleidos. Un aspecto importante en la adsorción de los radionucleidos por los sedimentos, es que se trata de un fenómeno parcial y levemente reversible. La velocidad de desadsorción es muchísimo más lenta que la de adsorción.

En el caso de los ecosistemas acuáticos de agua dulce (ríos), los sólidos suspendidos juegan un papel muy importante en el transporte de radionucleidos a larga distancia. Dependiendo del tipo de sustancia adsorbente donde se retenga el radionucleido, éste será incorporado en la cadena alimentaria dentro del ecosistema del río o depositado en zonas adecuadas de la cuenca.

La relación entre la concentración de un elemento químico en el agua con la concentración de dicho elemento en un organismo acuático (algas, peces, moluscos etc.) se establece a través del denominado factor de bioacumulación.

Por lo tanto, la concentración de un isótopo en un organismo acuático, será función de la concentración de dicho isótopo en el agua y de su factor de bioacumulación en el organismo.

Entre las variables que afectan al valor del factor de bioacumulación cabe señalar:

- Porción del organismo analizado: Igual que en los organismos terrestres, ciertos radionucleidos se concentran preferentemente en ciertos órganos de los organismos acuáticos. El Sr y el Ra son osteófilos y presentan gran afinidad por las estructuras calcáreas, por lo que se acumularán preferentemente en los esqueletos de los peces y en las conchas de los moluscos, mientras que el Fe se acumula en las partes blandas así con el Zn, el Mn y el Cs.
- Concentración de elementos estables en el agua: la concentración de un elemento en un organismo acuático es directamente proporcional a la concentración del elemento en el agua para microconstituyentes y elementos trazas, pero esta relación no puede esperarse que se mantenga sobre todos los rangos de concentración o para todos los elementos.
- Especies y nivel trófico: La incorporación y retención de los isótopos, puede variar entre especies diferentes, dependiendo de los hábitos de alimentación y de su posición en la red alimentaria.
- Temperatura: Los efectos de los pequeños incrementos en la temperatura, parece que incrementan la actividad biológica y por lo tanto la incorporación y la excreción de los radionucleidos.