



## Riesgos asociados a la radioactividad natural en los proyectos de extracción de gas no convencional

**Autor:** Sonsoles Eguilior Diaz

**Institución:** Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

**Otros autores:** Antonio Hurtado Bezos (CIEMAT); Fernando Recreo Jiménez (CIEMAT)

## Resumen

La producción de gas de esquisto utilizando la fracturación hidráulica es un ejemplo de tecnología que tiene el potencial para concentrar NORM (Naturally-Occurring Radioactive Materials) y metales pesados procedentes de minerales que han sido disueltos. Durante la perforación, una mezcla de petróleo, gas y agua de formación es bombeada a la superficie. El agua se separa del petróleo y del gas en tanques o piscinas y, en unos pocos casos, el agua de retorno puede tener bajas concentraciones de metales pesados e isótopos radiactivos. En su estado natural, estos materiales están por lo general muy por debajo de los límites de exposición; sólo cuando se concentran debido a los tratamientos que sufren las aguas de retorno para su eliminación, o a su acumulación en lodos e incrustaciones en tuberías o equipos, pueden llegar a superarlos.

La exposición a fuentes naturales se considera generalmente como una situación de exposición existente, lo que significa que la exposición no está comprendida en el ámbito de la regulación en cuanto a los requisitos para las situaciones de exposición planificadas. Sin embargo, algunas actividades industriales dan lugar a exposiciones a fuentes naturales que tienen las características de las situaciones de exposición planificadas. Esto dependerá principalmente de la exposición generada por las concentraciones de radionucleidos de origen natural. Los requisitos para situaciones de exposición planificadas se aplican si la concentración de actividad de cualquier radionúclido de las cadenas de desintegración del uranio o torio es mayor que 1 Bq / g o la actividad del K-40 es mayor que 10 Bq / g. Como resultado de este criterio, la industria del petróleo y el gas se identifica como una de aquellas actividades industriales que pueden estar sujetas a los requisitos de las situaciones de exposición planificadas ya que las formaciones geológicas que contienen gas y petróleo también pueden contener radionucleidos de origen natural y estos pueden ser llevados a la superficie en el proceso de producción de gas natural y petróleo. Estos radionucleidos de origen natural se conocen como "NORM" (Naturally-Occurring Radioactive Materials). La gestión adecuada de NORM tanto en el agua como en los residuos sólidos será pues fundamental para prevenir los riesgos para la salud humana pública y ocupacional y la contaminación ambiental. Actualmente existen reglamentos, normas y prácticas para asegurar que las operaciones de petróleo y gas presentan un riesgo insignificante tanto para el público en general como para los trabajadores con respecto a la exposición potencial a NORM, cuando se aplican los controles adecuados.

**Palabras clave:** Radioactividad natural, NORM, gas no convencional

## **1. RADIATIVIDAD NATURAL**

La radiación natural comprende la radiación cósmica y la radiación resultante de la desintegración de los radionucleidos presentes en la naturaleza. Los radionucleidos naturales incluyen, además de los elementos radiactivos primordiales, sus productos de desintegración radiactiva, y los radionucleidos producidos por interacciones con la radiación cósmica. Los radionucleidos primordiales tienen vidas medias comparables con la edad de la Tierra, mientras que los cosmogénicos se producen continuamente por bombardeo de núcleos estables por los rayos cósmicos, principalmente en la atmósfera.

El origen de los radionucleidos naturales primordiales se asocia con el fenómeno de la nucleosíntesis en las estrellas. El hecho de que las cadenas de desintegración del uranio, el torio y el actinio se encuentren en la naturaleza está directamente relacionado con las largas vidas medias de los padres de estas cadenas. La ausencia de la cadena de desintegración del neptunio es debido a la falta de miembros de la cadena con vidas medias suficientemente largas, de manera que ya se ha producido la desintegración completa de los radionucleidos precursores y su progenie. También existen en la naturaleza radionucleidos naturales con largos períodos que no son miembros de cadenas de desintegración y en relativa abundancia isotópica. Así, los radionucleidos naturales que las formaciones geológicas pueden contener comprenden [1,2]:

- Serie del Actinio (U-235, ver Figura 1)
- Serie del Torio (Th-232, ver Figura 1)
- Serie del Uranio (U-238, ver Figura 1)
- Otros materiales radiactivos no incluidos en las series radiactivas (ver Tabla 1)

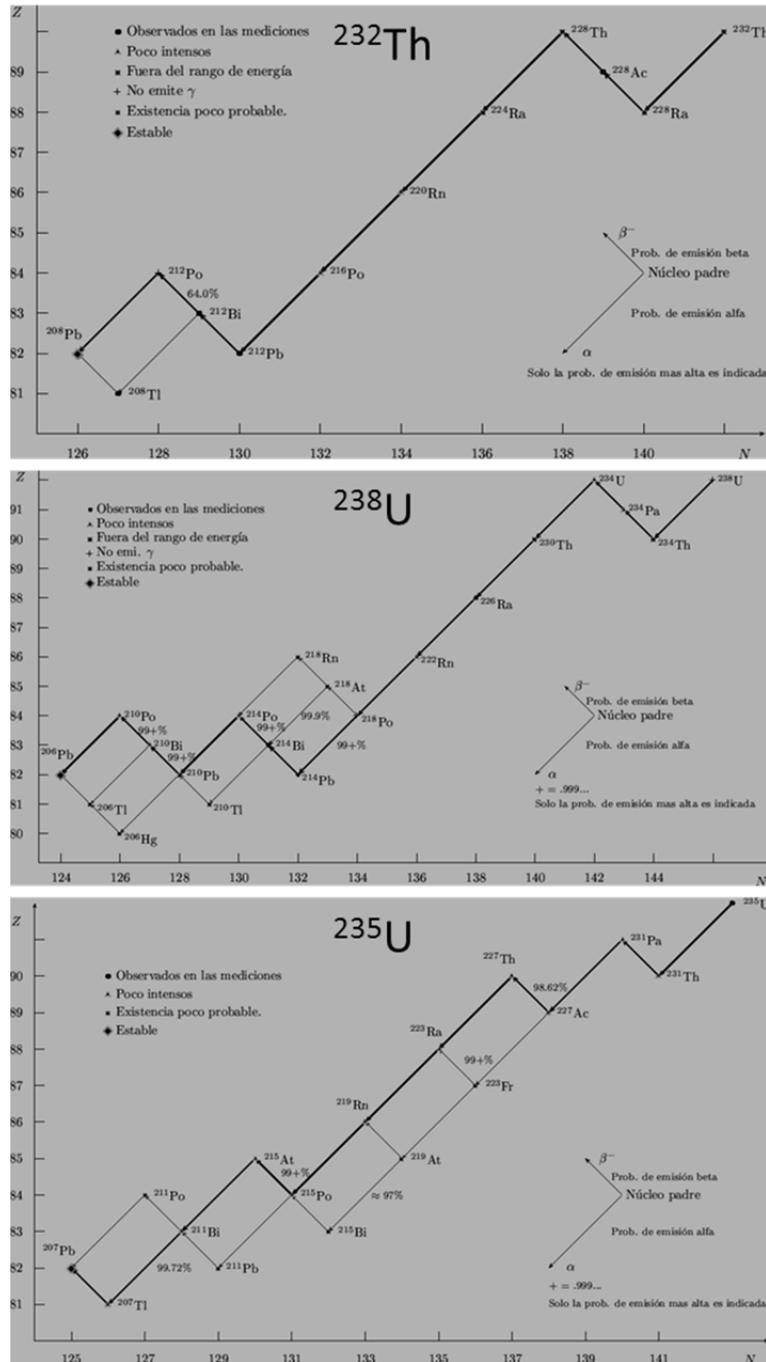


Figura 1: Cadenas de desintegración naturales [1]

Estos radionucleidos de origen natural conocidos como NORM (*Naturally-Occurring Radioactive Materials*) [3], se definen como el material radiactivo que no contiene cantidades significativas de radionucleidos diferentes de los naturales (los medios en los que las concentraciones de los radionucleidos naturales se han cambiado por algún proceso industrial se conocen en ocasiones como TENORM, de *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) [¡Error! Marcador no definido.]. En

**Tabla 1:** Materiales radiactivos naturales no incluidos en las series radiactivas [2]

Isótopo radiactivo	Período (años)
K-40	$1,28 \cdot 10^9$
V-50	$1,4 \cdot 10^{17}$
Rb-87	$4,75 \cdot 10^{10}$
Cd-113	$9 \cdot 10^{15}$
In-115	$6 \cdot 10^{14}$
Te-123	$1,24 \cdot 10^{13}$
La-138	$1,05 \cdot 10^{11}$
Ce-142	$>5 \cdot 10^{16}$
Nd-144	$2,29 \cdot 10^{15}$
Sm-147	$1,06 \cdot 10^{11}$
Gd-152	$1,08 \cdot 10^{14}$
Hf-174	$2,0 \cdot 10^{15}$
Lu-176	$3,73 \cdot 10^{10}$
Re-187	$4,3 \cdot 10^{10}$
Pt-190	$6,5 \cdot 10^{11}$

su estado natural, estos materiales están por lo general muy por debajo de los límites exposición. Sólo cuando se concentran es cuando puede generarse algún problema de exposición a radiaciones [4]. Actividades que pueden concentrar por lo menos temporalmente estos materiales radiactivos de bajo nivel son: la minería del carbón y su combustión, la producción de petróleo y gas, la minería de metales, fabricación de fertilizantes, la fabricación de materiales de construcción y algunos procesos de reciclado de materiales [3]. Materiales y áreas con NORM y otros potenciales elementos radiactivos dentro de los hogares modernos incluyen: encimeras de granito, acumulación de gas radón en los sótanos, alarmas de humo, televisores, sustitutos de sal bajos en

sodio y algunos vidrios y cerámicas [5].

La exposición a fuentes naturales de radiactividad se considera generalmente como una situación de exposición existente, no comprendida en el ámbito de la regulación en cuanto a los requisitos para las situaciones de exposición planificadas. Sin embargo, existen algunas actividades industriales que dan lugar a la exposición a fuentes naturales que tienen las características de las situaciones de exposición planificadas [6]. La provisión de los requisitos para las situaciones de exposición planificadas a aplicar en estos casos depende principalmente de las concentraciones de actividad de los radionucleidos de origen natural en el material que da lugar a la exposición [6]. Los requerimientos para situaciones de exposición planificadas se aplican si la actividad de cualquier radionucleido de las cadenas de desintegración del uranio o del torio es mayor que 1 Bq/g o la actividad del Potasio-40 es mayor que 10 Bq/g. Como resultado de este criterio, la industria del petróleo y el gas se identifica como una de las actividades industriales que pueden estar sujetos a los requerimientos para las situaciones de exposición planificadas [7,8].

## 2. NORM EN LA INDUSTRIA DE EXTRACCIÓN DEL GAS NO CONVENCIONAL

Los materiales radiactivos son frecuentes en los suelos y en las formaciones geológicas que contienen gas y petróleo y, en consecuencia, en el agua que entra en contacto con ellos. Debido a su proceso de generación, los campos de petróleo y gas a menudo se producen en acuíferos que contienen salmuera como fluido *connato*, conocida como "agua de formación". La extracción y procesamiento de muchos de estos recursos puede exponer o concentrar esos radionucleidos de origen natural que pueden ser llevados a la superficie junto al agua de formación. El proceso de extracción de gas de esquisto utilizando la fracturación hidráulica es un ejemplo de tecnología que tiene el potencial para concentrar NORM y minerales disueltos. Durante la explotación, una mezcla de petróleo, gas y agua de formación es bombeada a la superficie. Posteriormente el agua

se separa del gas y se almacena en tanques o balsas donde puede sufrir procesos que concentren los minerales presentes en la misma. Estos, además de iones como el bario, el estroncio o el bromo pueden incluir bajas concentraciones de metales pesados e isótopos radiactivos.

De entre los distintos isótopos radiactivos que se pueden encontrar en las formaciones rocosas su capacidad para concentrarse y entrar en contacto con distintos materiales dependerá de su movilidad. El U-238 y el Th-232 son parte de la matriz de la roca y están ligados a la misma, siendo esencialmente insolubles en los fluidos de la formación [8,9] bajo las condiciones anóxicas típicas de las pizarras negras, pero el radio (producto de desintegración del U) se disuelve y transporta con facilidad [10,11]. El radio se encuentra naturalmente dentro de las pizarras negras [12,13] como, por ejemplo, en la formación *Marcellus Shale*. De los isótopos del radio, dos de ellos (Ra-223 y Ra-224) tienen una vida media corta (unos pocos días), mientras que los otros dos isótopos, Ra-226 y Ra-228, tienen 1.622 y 5,75 años de vida media, respectivamente. Si se dispersan en el medio ambiente, o bien persistirán durante largos períodos de tiempo o bien las dosis resultantes serán elevadas.

Pero no toda la exposición de NORM es debida al radio. El gas radón, procedente de la cadena de desintegración del radio, puede producirse tanto en la formación geológica a profundidad como en superficie y estar presente disuelto en los fluidos de la formación o mezclado con el gas natural [9].

Existen otros NORM, como el U-235 y su cadena de desintegración que o bien no se encuentran normalmente en las formaciones relevantes para la industria del gas y el petróleo o están en bajas concentraciones relativas al Ra-226 y al Ra-228 y sus hijos. Una excepción es el K-40 que se encuentra a menudo en cantidades elevadas, aunque posee un riesgo para la salud menor que el radio, y por tanto un límite de exención mayor [9]. Otro radionucleido de interés es el Pb-210 [14].

Por tanto, los residuos de gas de esquisto contendrán metales pesados y radiactivos que incluirán, sobre todo, Ra-228 y Ra-226 que son solubles en agua y pueden presentar un riesgo para la salud [3].

Las concentraciones de NORM en los residuos de la industria del gas y petróleo varían de acuerdo con la cantidad de uranio y torio presentes originariamente en las formaciones de interés y de la movilidad del radio en el agua de formación. Constituye un proceso complejo controlado por la química del fluido de la formación y por la temperatura y presión, así como por la cantidad de agua producida en el proceso de extracción de los hidrocarburos [14].

Las fuentes de residuos de explotaciones de gas de esquisto incluyen salmuera, recortes (*cuttings* o *detritus* de perforación) de pizarras negras, fluido de retorno, y los lodos de perforación. Los radionucleidos presentes pueden permanecer en diversas formas, ya sea en solución o depositarse para formar lodos, que se acumulan en los tanques y pozos, o incrustaciones minerales, que se forman en el interior de tuberías y equipos de perforación. Una vez que los NORM se extraen de la formación pueden encontrarse en superficie en:

1. **Recortes de perforación (cuttings) y lodos de perforación de pizarras negras:** Los NORM están presentes en los residuos (fluidos de perforación y fangos) producidos por la perforación inicial, aunque los niveles son generalmente similares a las de las formaciones en profundidad, y no son un problema específico. Los isótopos de radio (Ra-226 y Ra-228) y sus productos de

desintegración pueden estar presentes en el flujo de retorno de agua, y más específicamente en el agua de formación, debido a su mayor solubilidad y pueden ser concentrados en diversos procesos como incrustaciones y lodos [15].

2. **Agua producida:** Los niveles de radiactividad en las aguas producidas son generalmente bajos, pero los volúmenes son grandes. Es un agua con una química compleja, con un alto contenido en sólidos disueltos totales y que contiene haluros, metales, aditivos químicos, compuestos orgánicos y materiales radiológicos producidos durante y tras el proceso de fracturación hidráulica.

La mayor parte de la concentración de NORM en el agua producida procede del radio disuelto en la misma cuyas concentraciones varían desde indetectable hasta niveles de 2.800 pCi/L con valores promedio medidos en el golfo de México de 539 pCi/L (262,3 pCi/L de Ra-226 y 276,7 pCi/L de Ra-228) En algunas nuestras tomadas de las salmueras producidas en instalaciones de gas y petróleo de Michigan, USA, han llegado a medirse valores de 29.000 pCi/L de Ra-226 [14].

En general puede decirse que las concentraciones de radio tienden a ser mayores cuanto más salinas son las aguas, aunque alta salinidad no siempre implica presencia de radio. Los rangos de salinidades en las aguas producidas varían entre 5.000 mg/L y más de 300.000 mg/L de cantidad total de sólidos disueltos [14].

Dada la química tan compleja de estas aguas resulta necesario el uso de instalaciones avanzadas de tratamientos de aguas residuales industriales que sean capaces de tratar los diferentes tipos de componentes presentes en el flujo de retorno [23]. La alta salinidad de los fluidos de la formación [16,17] presentan un reto adicional para las plantas de tratamiento y eliminación de dichas aguas [18]. Estas aguas de formación pueden contener concentraciones relativamente altas de sodio, cloruro, bromuro, y otros componentes inorgánicos, tales como el arsénico, bario, otros metales pesados, así como radionucleidos asociados que superan significativamente los valores permitidos para el agua potable [18]. Cuando se eliminan estos materiales en las instalaciones avanzadas de tratamiento de aguas residuales, se crea un desecho sólido concentrado (lodos residuales) que requiere un manejo especial y la eliminación en vertederos debidamente diseñados y regulados. Los componentes radiológicos plantean problemas incluso para las instalaciones de tratamiento avanzado, y cualquiera de los desechos residuales que se crean pueden tener emisiones de radiación gamma superiores a los niveles de fondo [19].

3. **Incrustaciones minerales dentro de las tuberías o equipos.** Químicamente, el radio comporta de manera similar al calcio (Ca), el estroncio (Sr) y el bario (Ba). Así, el radio puede coprecipitar fácilmente junto con sales de Ca, Sr y Ba presentes en aguas producidas que tengan un alto contenido de sólidos disueltos para formar incrustaciones en o sobre los equipos de perforación (ver Figura 2), en tanques de almacenamiento o en fosas de salmuera.

En general se encuentran concentraciones mayores de radio en tuberías de la cabeza de pozo y en tuberías de producción cercanas al mismo. El contenido en radio en la mayoría de las incrustaciones varía desde niveles cercanos a los de fondo hasta miles de picocuries por gramo, aunque en Michigan, USA, se han llegado a medir concentraciones mucho más altas (de 76.000 hasta 159.000 pCi/g

de Ra-226) lo que indica que el rango en las concentraciones de NORM es mucho mayor que lo indicado [14].

Aparte del radio, también se producen emanaciones de gas radón, aunque debido a la estructura sólida de la incrustación, que inhibe su liberación, normalmente la fracción de radón liberada supone alrededor de un 5%.

Las incrustaciones ricas en radio pueden emitir radiaciones que resulten en exposiciones que afecten al personal que trabaja cerca de dichos equipos. Además, las incrustaciones pueden llegar a ser retiradas de las tuberías y añadidas a la corriente de desechos de perforación que deben ir a un vertedero o ser dispersadas en el suelo local. Los lixiviados de estos materiales pueden contener radio que pueden llegar a alcanzar el nivel freático local o, mediante escorrentía, acabar en la cuenca local [23].



**Figura 2:** Incrustaciones de sulfato de bario en una tubería de perforación. El radio puede precipitar fácilmente con estas sales de bario y puede emitir radiaciones que afecten al personal que trabaja cerca de dicho equipo. También puede ser potencialmente liberado al medio ambiente si se elimina incorrectamente [23]

4. **Acumulaciones de lodos:** Los lodos se componen de sólidos disueltos en el agua producida que precipitan por cambios de temperatura y de presión. Los lodos generalmente consisten en compuestos de sílice y material suelto que a menudo contiene aceites, pero también puede contener grandes cantidades de

bario y, al igual que las incrustaciones, Ra-226 y Ra-228. La concentración media del radio en los lodos se estima en 75 pCi/g (típicamente varía entre el nivel de fondo y 300 pCi/g), aunque esto puede variar considerablemente de un sitio a otro, habiéndose medido valores de 6.600pCi/g en una muestra de Michigan (USA) [14]. Aunque la concentración de la radiación es más baja en los lodos que en las incrustaciones, los lodos son más solubles y por lo tanto más fácilmente liberados al medio ambiente. Como resultado, suponen un mayor riesgo de exposición [20].

Debido a la naturaleza granular de los lodos, sus emanaciones de radón, alrededor de un 22%, son más altas que las de las incrustaciones.

La medida en la que se producen lodos y la necesidad de eliminarlos regularmente de los separadores y sistemas para manejo de agua producida varían fuertemente entre yacimientos, pozos, y condiciones de producción e instalaciones. Como consecuencia, no hay ni concentraciones típicas de radionucleidos en NORM provenientes de producción de petróleo y gas, ni cantidades típicas de incrustaciones y lodos que se producen anualmente o durante la vida útil de un pozo [8].

- 5. Equipos o componentes contaminados:** Los niveles de contaminación por NORM en equipos varían ampliamente entre los tipos de equipo y la región geográfica. De acuerdo con los datos aportados por la industria, aproximadamente el 64% de los equipos de producción de gas y el 57% de los equipos de producción petróleo mostraron radioactividad en o cerca de los niveles de fondo. Los niveles de radiactividad tienden a ser más altos en equipos de gestión de agua. Los niveles medios de exposición para estos equipos varían entre 30 y 40  $\mu\text{R/hr}$ , aproximadamente 5 veces el nivel de fondo. Entre los equipo de procesamiento de gas con niveles más altos se incluyen las bombas de reflujo, bombas de propano y los tanques, otras bombas y las líneas de producción. Los niveles de radiación promedio para estos equipos están entre 30 y 70  $\mu\text{R/hr}$ . Las exposiciones de algunos equipos de producción de petróleo y procesamiento de gas superan el valor de 1 mR/hr.

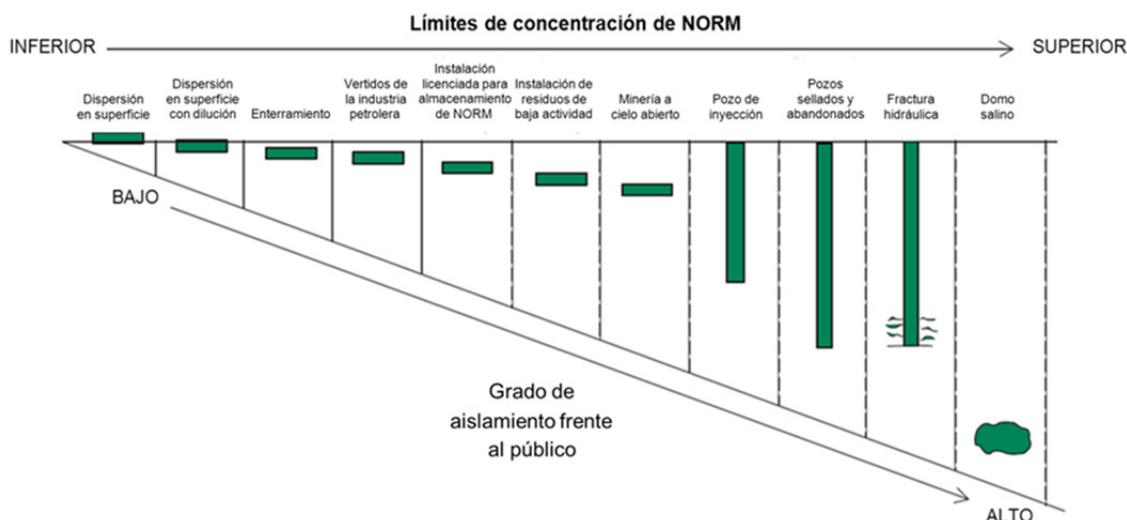
Los equipos de procesamiento de las plantas de gas están generalmente contaminados en superficie por el Plomo-210 (Pb-210), aunque también puede acumularse gas radón. El gas radón es muy móvil y se concentra principalmente en las fracciones más volátiles del gas (propano y etano) [20].

De lo anterior se deduce que los residuos de las explotaciones de petróleo y gas que es más probable que estén contaminados con concentraciones elevadas de NORM son el agua producida, las incrustaciones y los lodos. Los equipamientos de producción y procesamiento pueden contener cantidades residuales de estos, lo cual puede causar problemas con su eliminación cuando son retirados. Cantidades menores de radionucleidos también pueden encontrarse en los hidrocarburos producidos (radio y/o radón disuelto) y en los recortes y lodos de perforación (uranio, torio y radio) [14]. Como el proceso de extracción concentra los radionucleidos naturales y los expone al medio ambiente y al contacto humano, la mala gestión de estos residuos puede dar lugar a contaminación radiológica en suelos o en aguas superficiales, por lo que los materiales con NORM por encima de los niveles de radiactividad natural de fondo requieren de un manejo especial para su retirada y eliminación [21, 22].

Dado que las concentraciones de NORM presentes en los residuos de las explotaciones pueden ser mayores que los niveles ambientales de fondo, la eliminación de estos productos de desecho bien *in situ* o en vertederos autorizados requerirá de la evaluación tanto de las emisiones de radiación gamma como de las concentraciones de radionucleidos en sólidos y líquidos [23]. La gestión adecuada de los residuos que contienen NORM es fundamental para prevenir tanto los riesgos para la salud humana del público y de los trabajadores como la contaminación ambiental. En general, los problemas de residuos con NORM están generalmente asociados con las operaciones a largo plazo en los campos de gas de petróleo [24].

### **2.1. Medición de la radiactividad**

Aunque la medición de la radiactividad total con un instrumento manual de detección de la radiación permite una evaluación rápida de un emplazamiento respecto a su contaminación por NORM, los criterios de limpieza del sitio y las opciones para la eliminación de los residuos se basan en las concentraciones reales de isótopos del radio. Si bien algunos instrumentos especializados de campo permiten estimaciones rápidas de la concentración de isótopos de radio, esas estimaciones requieren confirmación mediante cuidadosos análisis de laboratorio de diversos subconjuntos de muestras seleccionados. Los análisis globales de radiación  $\alpha$  y  $\beta$  miden la radiactividad asociada con partículas  $\alpha$  y  $\beta$  que se liberan durante la desintegración natural de los elementos radiactivos, como el uranio, el torio y el radio. Los análisis globales de partículas  $\alpha$  y  $\beta$  se utilizan normalmente para cribar las aguas residuales procedentes de la fracturación hidráulica con el fin de evaluar los niveles brutos de radiactividad. Esta información puede ser útil para identificar las aguas que requieren de una caracterización específica de radionucleidos. Sin embargo, el total de sólidos disueltos (TDS) y el contenido orgánico característico de las aguas residuales procedentes de fracturación hidráulica interfieren con los métodos actualmente aceptados para realizar los análisis globales  $\alpha$  y  $\beta$ . En teoría, por tanto, puede resultar necesario el desarrollo y comprobación de métodos analíticos para llevar a cabo los análisis globales de radiactividad  $\alpha$  y  $\beta$  antes de comenzar los trabajos [25].

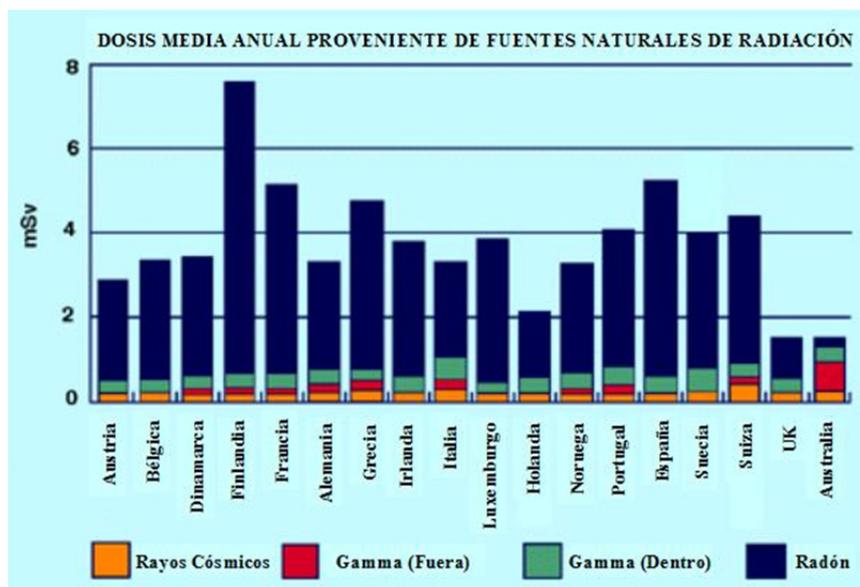


**Figura 3:** Tratamientos alternativos para residuos NORM. Modificada del *American Petroleum Institute*.

Las vías de exposición de radiación incluyen radiación gamma externa (mayor), ingestión (menor), y la inhalación de partículas y el gas radón (mayor). La Figura 3 ilustra el aislamiento relativo del público en general frente a los residuos NORM para diversas posibles opciones de eliminación. En la medida en que el grado de aislamiento sea mayor también lo será la capacidad para la eliminación de mayores concentraciones de radio. Actualmente la mayor parte de los residuos con NORM de los yacimientos de gas y petróleo se almacenan en los emplazamientos de producción a la espera de su eliminación en vertederos especialmente diseñados y autorizados, pozos de evacuación, o pozos de inyección. La dispersión y dilución en superficie de los residuos NORM de bajo nivel es una práctica actualmente no permitida por la mayoría de las administraciones públicas con regulaciones respecto a los NORM.

La división de evaluación medioambiental del *Argonne National Laboratory* realizó una evaluación preliminar de las dosis radiológicas relacionadas con la descontaminación de equipos, la eliminación subterránea, el esparcimiento de residuos, y la fundición y enterramiento de equipos para abordar las preocupaciones con respecto a la presencia de materiales radiactivos naturales en las corrientes de desechos de producción. Se consideró un escenario en el que las personas viven en un suelo alterado donde se han vertido NORM y donde se consumen agua, cultivos y ganadería locales [26]. Para suelos alterados donde se supone la presencia de radio con la mayor concentración permitida por la normativa de EE.UU. (30 pCi/g) la dosis de radiación anual adicional por todas las vías era equivalente a la dosis media de fondo anual en la población de los EE.UU. (la radiación de fondo varía ampliamente a lo largo del país, sobre todo por la diferente composición de las rocas y del suelo y por la altura. Ver Figura 4). Los límites actuales establecidos por la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos exigen que el total de dosis adicionales para el público en general no exceda en un 30% de la dosis media anual de fondo [27], por lo que del estudio se desprende la necesidad de gestionar adecuadamente el inventario de NORM que puede producirse durante la explotación del

gas no convencional de manera que las distintas opciones para el tratamiento de estos sean diseñadas para reducir los riesgos por radiación al público.



**Figura 4:** Dosis promedio anuales a partir de fuentes naturales. Modificada de *Nuclear Radiation and Health Effects. World Nuclear Association*

### 3. RIESGOS DE EXPOSICIÓN

La radiactividad en el medio ambiente, especialmente la presencia del radio, un carcinógeno reconocido, representa una amenaza potencialmente significativa para la salud humana. Por lo tanto, cualquier actividad que tenga el potencial de aumentar su exposición debe analizarse cuidadosamente previamente al inicio de sus operaciones de manera que los riesgos puedan ser plenamente comprendidos y reconocidos. Ya que la explotación de gases no convencionales tienen la potencialidad de generar de grandes cantidades de residuos que contengan Ra-226 y Ra-228, tanto en estado sólido como líquido, debería realizarse un análisis completo de las vías de exposición al público como requisito previo al inicio de sus actividades [28].

Aunque las primeras informaciones de NORM asociados con petróleo y gas natural aparecieron en 1904 [29] y, por lo menos desde la década de 1930, se sabe de la presencia de radionucleidos en los reservorios de petróleo (*US Environmental Protection Agency*, 1991). Sin embargo, no fue hasta la década de 1980, cuando los NORM fueron detectados en las operaciones de petróleo y gas del Mar del Norte británico, que el conocimiento de su presencia se hizo público [30]. La industria del petróleo y gas de EE.UU. tomó conciencia de fuentes específicas de la NORM en 1986, cuando incrustaciones de sulfato de bario que contenían niveles elevados de Radio-226 y Torio-232 [4] fueron descubiertas en unas tuberías que estaban siendo retiradas de un pozo en Mississippi. Debido a la preocupación de que algunas tuberías pudiesen haber contaminado el medioambiente circundante, se llevaron a cabo estudios radiológicos por la *EPA's Eastern Environmental Radiation Facility*. Estos estudios mostraron que algunos equipos y emplazamientos de eliminación de desechos mostraban niveles de radiación

externa por encima de 2 mR/hr y contaminaciones del suelo por Radio-226 por encima de 1.000 pCi/g. En un emplazamiento, además, parte de la contaminación se había vertido en una laguna y en un foso de drenaje cercanos, así como en un campo agrícola, con la consiguiente absorción de radio por la vegetación.

En general, los estudios desarrollados sugieren que las concentraciones de Ra-226, Ra-228 y Ra-224 en incrustaciones y lodos varían en un rango de valores menores a 0,1 Bq/g hasta los 15.000 Bq/g. En general, las concentraciones de actividad de isótopos del radio son más bajas en los lodos que en las incrustaciones. Lo contrario se aplica a Pb-210, que generalmente tiene una concentración relativamente baja en las incrustaciones, pero que pueden alcanzar una concentración de más de 1.000 Bq/g en depósitos de plomo y lodos. Aunque los isótopos de Th-232 no se movilizan desde el reservorio, la concentración de Th-228, producto de la desintegración del Ra-228, comienza a crecer a partir de la precipitación de este último. Como resultado, conforme más antiguas sean las incrustaciones que contienen Ra-228, mayor es la concentración de Th-228 en las mismas, pudiendo llegar a ser aproximadamente un 150% de la concentración de Ra-228 todavía presente [8].

Cuando los NORM son transportados hasta la superficie, estos permanecen en los *detritus* de perforación, en solución en el agua producida, o, bajo ciertas condiciones, precipitan en incrustaciones o lodos. La radiación de estos NORM es débil y no puede penetrar materiales densos, como el acero utilizado en las tuberías y tanques [26]. La principal preocupación respecto a los NORM, la industria del petróleo y el gas es que, con el tiempo, puedan llegar a concentrarse en los equipos de producción [31] y, como lodos o sedimentos, dentro de los tanques y recipientes de procesos que tengan un tiempo dilatado de contacto con el agua de la formación [32].

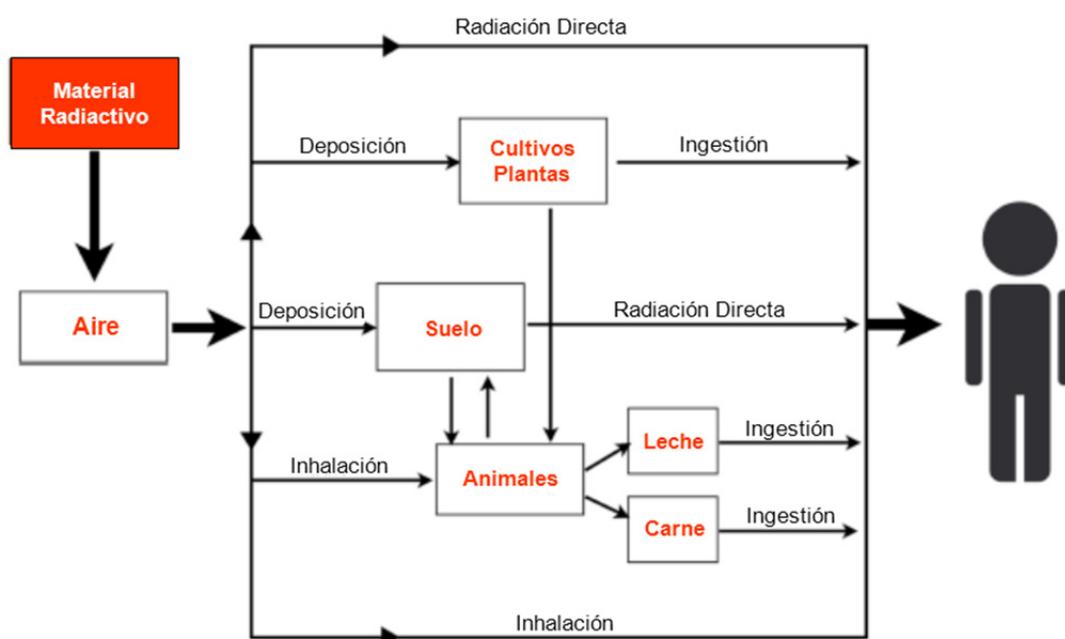
Debido a que en el pasado no se prestó el interés necesario en el reconocimiento apropiado de la presencia de NORM en los desechos de las operaciones de producción de petróleo y gas, la eliminación de estos residuos puede haber dado lugar a la contaminación del medioambiente en y alrededor de las instalaciones de producción y eliminación [33]. El almacenamiento superficial de incrustaciones y lodos radiactivos y del agua producida (como se practicaba usualmente en el pasado) ha conducido a la contaminación de las aguas, subterráneas y superficiales

### 3.1. Vías de Exposición

Para estimar las dosis potenciales debidas a los residuos con NORM provenientes de la industria de extracción de gas no convencional, tanto al público como a los sistemas naturales, resulta fundamental determinar las vías de transporte de los radionucleidos en la atmósfera, el agua, tanto superficial como subterránea, y el suelo.

Existen numerosas vías potenciales de exposición al material radiactivo presente en los residuos extraídos por la explotación de gas natural no convencional. Las posibles exposiciones directas a los humanos, ya sea personal laboral o público en general, incluyen: la contaminación de las aguas subterráneas, la contaminación del suelo, las partículas transportadas por el viento y el material en forma de aerosol, y las emisiones fugitivas de los procesos industriales. La contaminación del suelo y el agua por NORM, además de exponer al personal trabajador y al público en general a un aumento de los niveles de radiación de fondo, supone otras vías de exposición secundaria a través de la radiación absorbida por el sistema suelo-planta y la exposición de los animales a la misma. Radionucleidos presentes en el suelo pueden ser interceptados directamente por los cultivos, que luego se utilizan como alimento para el ganado, lo que aumenta aún más el potencial de exposición humana a los niveles crecientes de radiación a través de la

ingestión de productos lácteos y cárnicos [34]. En las figuras 5 y 6 se ilustran las vías posibles y los modos de exposición para los radionucleidos liberados en aire o en el agua [28]. Esas vías determinarán la cantidad de radiación a la que uno ha estado expuesto y el cálculo de la dosis absorbida que permitirá evaluar con precisión los posibles impactos en la salud función del tipo de exposición a la radiación, interna o externa y de la peligrosidad de las distintas radiaciones, alfa, beta y gamma, que será función de sus alcances en el tejido biológico.



**Figura 5:** Vías para la migración de los radionucleidos liberados en el aire. Modificado de [28]

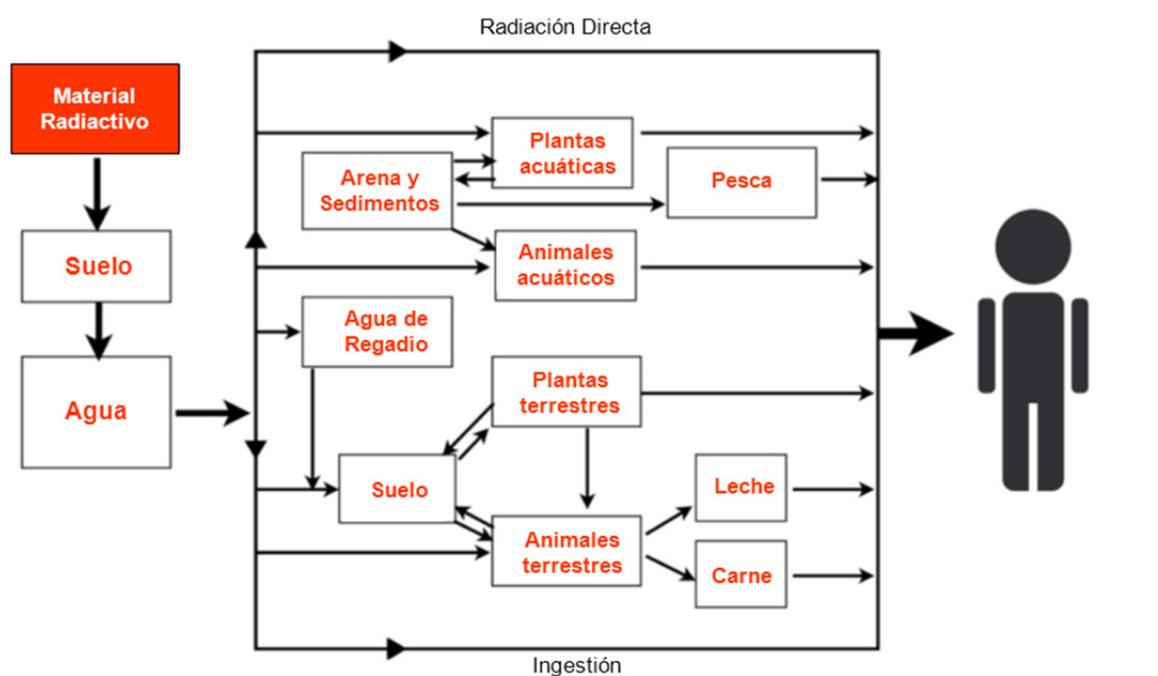
### 3.1.1. Exposición externa

La acumulación de incrustaciones y lodos contaminados en tuberías y depósitos puede producir tasas de dosis importantes dentro y fuera de estos componentes. Las tasas de dosis dependerán de las concentraciones y la actividad de los radionucleidos presentes en el interior del blindaje proporcionado por las tuberías o las paredes del depósito. Las tasas de dosis máximas se sitúan por lo general en el intervalo de hasta unos pocos microSieverts por hora ( $\mu\text{Sv/h}$ ). En casos excepcionales, las tasas de dosis medidas directamente sobre las superficies exteriores de los equipos de producción han alcanzado varios cientos de  $\mu\text{Sv/h}$ . En la práctica, las restricciones en el acceso y tiempo de ocupación han demostrado ser eficaces para la limitación de las dosis anuales a valores inferiores a los límites [8].

### 3.1.2. Exposición interna

La dosis equivalente potencial por inhalación depende de las características físicas y químicas de los NORM. La exposición interna a los NORM puede ser debida tanto a la ingestión como a la inhalación de radionucleidos. Esto puede ocurrir mientras se trabaja

en planta o con la maquinaria, durante el manejo de materiales de desecho y objetos contaminados en superficie, y durante la limpieza de los equipos contaminados. La ingestión también puede ocurrir si no se toman precauciones antes de comer, beber, fumar, etc. [8]



**Figura 6:** Vías para la migración de los radionucleidos liberados en el suelo a través del agua. Modificado de [28]

### 3.2. Condiciones de exposición

#### 3.2.1. Trabajadores en contacto con material contaminado por NORM

Puede existir riesgo de exposición a los materiales radiactivos en diferentes grados para los trabajadores en los pozos y en los vertederos de residuos sólidos desde el momento en que los recortes de perforación y otros residuos llegan a la superficie hasta que el material de desecho es eliminado [35].

Las actividades debidas a la concentración de radionucleidos son muy difíciles de predecir. En primer lugar, depende de la cantidad de residuos que incluyen el agua producida, las incrustaciones, los lodos, y el equipo contaminado así como de otros factores como la ubicación geológica, las condiciones de formación, tipo de operación de producción, el tiempo que lleva funcionando el pozo de producción, etc. [5]. En segundo lugar, porque el rango de concentraciones varía desde niveles insignificantes hasta más de 1.000 Bq/g, llegando excepcionalmente a 15.000 Bq/g en el caso de Ra-226. Las consideraciones respecto a la protección radiológica se deben principalmente a la eliminación de incrustaciones y lodos durante las operaciones de mantenimiento y desmantelamiento (pudiendo resultar en exposición debida a radiación gamma e inhalación de polvo) y de la posterior eliminación de dichos materiales como residuos.

Los trabajadores que actúen cerca de tuberías y depósitos con gran cantidad de incrustaciones pueden también necesitan estar sujetos a medidas de protección radiológica [7].

En ausencia de medidas de protección radiológica adecuadas, los NORM en la industria del gas de esquisto podrían causar la exposición externa durante la producción debido a la acumulación de radionucleidos emisores gamma y exposiciones internas de los trabajadores y otras personas, en particular durante el mantenimiento, el transporte de residuos y equipos contaminados, la descontaminación de los equipos, así como el tratamiento y eliminación de residuos. Exposiciones de naturaleza similar también pueden surgir durante la clausura de las instalaciones de petróleo y producción de gas y sus instalaciones de gestión de residuos asociados [8].

Los riesgos potenciales evaluados para estos trabajadores incluyen exposiciones debidas a la radiación gamma directa e inhalación de polvo radiactivo. Además, pueden inhalar el gas radón, tanto el que se libera durante la perforación como el que es producido por la desintegración del radio, dando lugar a un aumento en el riesgo de desarrollo de cáncer de pulmón. En este sentido, varios estudios epidemiológicos han confirmado el riesgo para la salud debido al radón en viviendas y en lugares de trabajo con una importante situación de exposición existente [¡Error! Marcador no definido.].

### 3.2.2. Residentes cercanos/Trabajadores de oficina.

Dado que el público en general no entra en contacto con equipos petroleros durante períodos prolongados, hay poco riesgo de exposición a NORM del campo petrolífero [36]. Los riesgos evaluados por miembros del público que trabajan o residen a menos de 100 metros de una zona de eliminación de residuos son similares a los del personal técnico de la instalación. Esto es: radiación gamma e inhalación de polvo contaminado, inhalación de radón, ingestión de agua de pozo contaminada, ingestión de alimentos contaminados por el agua de pozo, e ingestión de alimentos contaminados por la deposición de polvo [5].

Los riesgos de exposición analizados para la población en general en un radio de 80 km de una zona de eliminación de residuos incluyen exposiciones por transporte a favor del viento de partículas resuspendidas y radón, y exposiciones derivadas de la ingestión de aguas fluviales contaminadas a través de vías de agua subterránea y de la escorrentía superficial [5].

Otras posibles vías de exposición a la radiación vienen dadas para los individuos que trabajasen dentro de un edificio de oficinas construido inadvertidamente sobre una pila abandonada de residuos con NORM. Los riesgos potenciales *in situ* evaluados para dichos individuos incluyen exposiciones por radiación gamma, por inhalación de polvo, y por la inhalación de gas radón en el interior [5].

## 4. CONCLUSIONES

Actualmente, se sabe que la contaminación por NORM es generalizada y que se produce en las instalaciones de producción de petróleo y gas en todo el mundo. Tanto la industria del gas y el petróleo como los organismos reguladores gubernamentales<sup>1</sup> [37] examinan y

<sup>1</sup> En España, con el fin de modificar algunas disposiciones relacionadas con la regulación sobre la protección de la salud frente a fuentes naturales de radiación ionizante, el Real Decreto 783/2001 ha sido modificado por el Real Decreto 1439/2010, de 05 de noviembre (BOE 18.11.2010), en relación con la regulación de actividades con NORM. Esta nueva ley hace cumplir a los titulares de dichas industrias con la obligación de declarar sus actividades a los organismos reguladores españoles, así como a llevar a cabo una serie de

regulan los NORM en las instalaciones de producción de gas y petróleo y los NORM asociados a las mismas están sujetos a los requisitos de las normas básicas de seguridad para la protección y seguridad radiológica [38]. En respuesta a esta inquietud, en las instalaciones en EE.UU. y Europa se han realizados trabajos de caracterización de la naturaleza y extensión de los NORM en las incrustaciones de tuberías de petróleo y gas, evaluando la exposición potencial a los trabajadores y del público, y desarrollando métodos para el manejo adecuado de estos residuos de baja actividad específica [5].

En la actualidad existen reglamentos, normas y prácticas para asegurar que las operaciones de petróleo y gas presenten un riesgo asumible para el público en general con respecto a la exposición potencial a NORM, también para los trabajadores, cuando se aplican los controles adecuados [33].

Desde un punto de vista práctico, en todas las situaciones el objetivo común es mantener las dosis de radiación tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta factores económicos y sociales (ALARA, acrónimo de *As Low As Reasonably Achievable*), y por debajo de los límites de dosis reglamentarios para los trabajadores [39]. Las medidas concretas que deban adoptarse con el fin de alcanzar estos objetivos diferirán principalmente para los dos tipos de exposición a la radiación, es decir, a través de la radiación externa y de la contaminación interna [8].

Si los niveles de NORM medidos superan los niveles regulatorios de dosis, el material debe ser llevado a instalaciones autorizadas para su adecuada eliminación. En todos los casos, es necesaria la colocación de señalización de precaución y la dotación de equipos de protección individual a los trabajadores cuando las dosis de radiación puedan superar los valores límites establecidos. Además de estas protecciones a los trabajadores, los Estados han desarrollado reglamentos de requisitos a cumplir en las distintas operaciones con el fin de proteger la seguridad y la salud tanto de los trabajadores y como del público en general. Por el contrario, si las concentraciones de NORM están por debajo de lo que indica la normativa, los operadores pueden eliminar dichos residuos mediante los métodos aprobados para desechos estándar del yacimiento.

Respecto al público en general, no se espera que la extracción de gas de esquisto represente un riesgo radiológico significativo debido a los valores de concentración de NORM dados en los flujos de retorno y las dosis radiológicas estimadas para los trabajadores que participan en la industria de petróleo y gas. Sin embargo, dado que el riesgo de contaminación radiológica no es descartable, dichas actividades deben ser coherentes con los principios generales de protección radiológica. Es decir, es necesario la introducción y el seguimiento de un programa de seguridad y salud, en los que una dosimetría adecuada, el control de la exposición y la gestión adecuada de los residuos constituyen los principales componentes de este programa.

## Referencias

- [1] W.E. Burcham, "Física nuclear" Ed. Reverté 2003 ISBN 978-84-291-4031-6
- [2] EPA. (1999) "Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials". National Academies Press ISBN: 0-309-58070-6 <http://www.nap.edu/catalog/6360.html>

---

estudios que incluyen la caracterización radiológica de los procesos industriales y la evaluación de las dosis a los trabajadores.

- [3] World Nuclear Association, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM), August 2011, <http://world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Radiation-and-Health/Naturally-Occurring-Radioactive-Materials-NORM/>. Accessed: January 2014.
- [4] George E. King, "Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. SPE 152596 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. The Woodlands, Texas, USA, 6-8 February 2012.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Section on Radiation Protection. Available at <http://www.epa.gov/radiation/>. Accessed: January 2014.
- [6] Paragraph 3.4 of INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - Interim Edition, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim), IAEA, Vienna (2011).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials, Safety Reports Series No. 49, IAEA, Vienna (2007).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry, Safety Reports Series No. 34, IAEA, Vienna (2003).
- [9] T. Rick Irvin. "Naturally Occurring Radioactive Materials: Principles and Practices". Ed. St. Lucie Press. 1996. ISBN 1-57444-009-8
- [10] Rowan, E.L., Engle, M.A., Kirby, C.S., and Kraemer, T.F., 2011, Radium content of oil- and gas-field produced waters in the northern Appalachian Basin (U.S.A.): Summary and discussion of data: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5135, 38 p., accessed February 2013, at <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5135/pdf/sir2011-5135.pdf>.
- [11] Szabo, Zoltan, dePaul, V.T., Fischer, J.M., Kraemer, T.F., and Jacobsen, Eric, 2012, Occurrence and geochemistry of radium in aquifers used for drinking water in the United States: Applied Geochemistry, v. 27, p. 729-752, accessed February 2013, at doi:10.1016/j.apgeochem.2011.11.002.
- [12] Schmoker, J.W., 1981, Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs: American Association of Petroleum Geologist Bulletin, v. 65, p. 1285-1298.
- [13] Bank, T., Malizia, T., and Andresky, L., 2010, Uranium geochemistry in the Marcellus shale: effects on metal mobilization: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 42, p. 502.
- [14] K.P. Smith. "An Overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry". Argonne National Laboratory. Environmental Assessment and Information Sciences Division. ANL/EAIS-7. Dec. 1992
- [15] A Kibble, T Cabianna, Z Daraktchieva, T Gooding, J Smithard, G Kowalczyk, N P McColl, M Singh, S Vardoulakis and R Kamanyire. Review of the Potential Public Health Impacts of Exposures to Chemical and Radioactive Pollutants as a Result of Shale Gas Extraction: Draft for Comment. Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards. PHE-CRCE-002. ISBN 978-0-85951-744-7. October 2013.
- [16] Blauch, M.E., Myers, R.R., Moore, T.R., Lipinski, B.A., 2009, Marcellus Shale post-frac flowback waters - Where is all the salt coming from and what are the implications?: Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting, Charleston, WV, p. 1-20.
- [17] Haluszczak, L.O., Rose, A.W., and Kump, L.R., 2013, Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA: Applied Geochemistry, v. 28, p. 55-61.
- [18] Lutz, B.D., Lewis, A.N., and Doyle, M.W., 2013, Generation, transport, and disposal of wastewater associated with Marcellus Shale gas development: Water Resources Research, v. 49,

accessed February 2013, at doi10.1002/wrcr.20096. 10 p., at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wrcr.20096/pdf>.

[19] U.S. Environmental Protection Agency, 2008, Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) from uranium mining, volume 1: mining and reclamation background: U.S. Environmental Protection Agency Technical Report EPA-402-R-05-008, accessed February 2013, at <http://www.epa.gov/rpdweb00/docs/tenorm/402-r-08-005-voli/402-r-08-005-v1.pdf>.

[20] U.S. Environmental Protection Agency. Oil And Gas Production Wastes. <http://www.epa.gov/radiation/tenorm/oilandgas.html>

[21] Resnikoff, M., Alexandrova, E., Travers, J.: Radioactivity in Marcellus Shale, May 19, 2010.

[22] NY DEC Publication “An Investigation of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) In Oil and Gas Wells in New York State”, April 1999.

[23] USGS “Water Resources and Shale Gas/Oil Production in the Appalachian Basin—Critical Issues and Evolving Developments” Prepared in cooperation with the U.S. Department of Energy. Open-File Report 2013–1137 August 2013

[24] Hydraulic Fracturing in the State of Michigan. Environment/Ecology Technical Report University of Michigan. Graham Sustainability Institute Integrated Assessment Report Series. September 2013.

[25] EPA. “Study of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources. Progress Report”. EPA 601/R-12/011 | December 2012 | [www.epa.gov/hfstudy](http://www.epa.gov/hfstudy). Accessed: January 2014.

[26] Smith, K.P., D. L. Blunt, G. P. Williams, and C. L. Tebes. 1996. “Radiological Dose Assessment Related to Management of Naturally Occurring Radioactive Materials Generated by the Petroleum Industry”. Argonne National Laboratory Environmental Assessment Division. Publication ANL/EAD-2, 65 pp. September 1996.

[27] USGS “Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Oil-Field Equipment - An Issue for the Energy Industry” USGS Fact Sheet FS–142–99. September 1999.

[28] E. Ivan White. “Consideration of Radiation in Hazardous Waste Produced from Horizontal Hydrofracking”. Staff Scientist for the National Council of Radiation Protection.

[29] McLENNAN, J.C., “On the radioactivity of mineral oils and natural gases”, paper presented at the Int. Electrical Congress, St. Louis, 1904.

[30] Escott, P. The Occurrence of Radioactive Contamination on Offshore Installations. NRPB report for the Department of Energy (Gr. Brit.), London, 1984.

[31] API. 2004. Naturally Occurring Radioactive Material in North American Oilfields A Fact Sheet from the American Petroleum Institute. 2004.

[32] Barnett Shale Energy Education Council Environment. <http://www.bseec.org/topic/barnett-shale>. Accessed: January 2014.

[33] Smith, K.P., D. L. Blunt, G. P. Williams, and C. L. Tebes. 1996. Argonne National Laboratory. Environmental Assessment Division. Radiological Dose Assessment Related to Management of Naturally Occurring Radioactive Materials Generated by the Petroleum Industry. September 1996.

[34] Rich A.L. and Crosby E. C. (2013) “Analysis of reserve pit sludge from unconventional natural gas hydraulic fracturing and drilling operations for the presence of technologically enhanced naturally occurring radioactive material (TENORM)”. New Solutions, vol. **23**(1) 117-135, 2013

[35] The Ohio Environmental Council RADIOACTIVE SHALE GAS (FRACKING) WASTES <http://www.theoec.org/publications/radioactive-shale-gas-fracking-wastes>. Accessed: January 2014.

[36] Environmental impacts of Hydraulic Fracturing. Frank R. Spellman, CRC Press, Taylor&Francis Group (2013). Pp. 141.

[37] IAEA Country Nuclear Power Profiles. 2013 Edition. Spain. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2013\\_CD/countryprofiles/Spain/Spain.htm](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2013_CD/countryprofiles/Spain/Spain.htm). Accessed: January 2014.

[38] Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Panamerican Health Organization, World Health Organization. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).

[39] International Atomic Energy Agency, International Labour Office, Occupational Radiation Protection, Safety Standards Series No. RS-G-1.1, IAEA, Vienna (1999).