

Análisis Conceptual de las Concentraciones de Actividad de Radionucleidos Naturales en
Operaciones de Perforación de la Industria Oil & Gas

Edwar Zair Castaño Mass y Sara González Sánchez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

José Carlos Cárdenas Montes

Magíster Scientiarum en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector:

Reinel Andrés Echavez Márquez

Magíster Scientiarum en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

A Dios por su infinita misericordia, que me permitió llegar hasta donde estoy.

A mi Madre Nayibe por creer en mí, por su infinita paciencia gracias, este título es más suyo que mío.

A mis hermanos Kandy y Andrés, por haber estado ahí siempre que los necesite, a mi Tía Yormi y sus hijas Ana y María José siempre tan maravillosas y comprensivas, y a mi Padre por su apoyo.

A Tatiana Lancheros por su amor, comprensión y su lucha junto conmigo.

A mis amigos Néstor Peña, John Sebastián Sanabria, Luis Mora, Jairo Díaz y Omar Figueroa, de no ser por ellos me hubiera graduado dos semestres antes, son hermanos de otra Madre.

A mis amigas María Paula Galán, Nayla Correa, Laura Olaya, Daniela Guerrero, Angie León, Melisa Álvarez y Jennifer Y. Mejía, quienes fueron incondicionales y las quiero como mi familia.

A la UIS por permitirme aprender y formarme, primero como persona y luego como profesional, al profesor José Carlos y a nuestro codirector Reinel, por guiarnos y permitirnos aprender de ellos.

Y gracias a cada amigo, compañero y persona que me ayudó y creyó en mí gracias.

EDWAR ZAIR CASTAÑO MASS

Agradecimientos

A Dios que fue y ha sido mi fortaleza en cada proceso; con su presencia viva en mí alcanzo este logro de mi vida.

A mis padres y hermano, porque siempre han creído en mí, me han apoyado y acompañado en cada paso de mi camino. Cada palabra, cada abrazo y todo el esfuerzo han sido motivación para culminar este sueño.

A mi familia, por creer en mí y ser mis maestros de vida.

A mis amigos, Paula, Tatiana y Juan Felipe, que fueron mi soporte y compañía. Me ayudaron a levantar y mantenerme fuerte en el proceso, me ayudaron a reconocermes.

A mi compañero de tesis, por la constancia, motivación y crecimiento profesional que compartimos a lo largo del desarrollo del proyecto.

A cada una de las personas que me enseñaron, guiaron y acompañaron en toda mi formación personal, académica y profesional.

SARA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Radiactividad	16
2.2 Concepto Básico del Átomo	16
2.3 Fuerzas Fundamentales	17
2.3.1 Fuerza de Gravedad	17
2.3.2 Fuerza Nuclear Débil	18
2.3.3 Fuerza Electromagnética.....	18
2.3.4 Fuerza Nuclear Fuerte.....	18
2.3.5 Estabilidad Nuclear	18
2.4 Ley de la Desintegración Radiactiva	20
2.5 Tipos de Radiactividad	21
2.5.1 Partículas Alfa (α).....	21
2.5.2 Partículas Beta (β).....	22
2.5.3 Rayos Gamma (γ) y Rayos X.....	23
2.6 Radionucleidos.....	23
2.6.1 Radionucleidos de Origen Natural (NORM, TENORM)	24

2.6.1.1 Serie del Uranio-238	26
2.6.1.2 Serie del Torio-232	27
2.7 Radionucleidos de Origen Artificial	28
2.8 Vida Media.....	29
2.9 Medición de Radiactividad	30
2.10 Incidencia de la Radiactividad en la Salud	33
2.11 Normatividad para los NORM.....	35
3. Presencia de Material Radiactivo en la Industria de los Hidrocarburos	39
3.1 Radionucleidos y las Etapas de Perforación Convencional	40
3.2 Relación Entre la Geoquímica de los Radionucleidos y la Industria Petrolera	43
3.3 Movilización y Disposición de los Radionucleidos.....	44
3.3.1 Uranio	45
3.3.2 Radio.....	45
3.3.3 Torio.....	46
3.4 Concentraciones de TENORMs en los Hidrocarburos	47
3.5 Concentraciones de TENORMs en los Desechos Petroleros.....	50
3.5.1 Agua producida.....	50
3.5.2 Escamas.....	55
3.5.3 Lodos de Retorno	62
3.6 Riesgos de TENORMs Sobre el Medio Ambiente	66
3.6.1 El Aire.....	67
3.6.2 El Suelo.....	67
3.6.3 Aguas Subterráneas.....	67

3.6.4 Aguas Superficiales y Marinas	68
3.7 Concentraciones de Radionucleidos en Colombia.....	68
3.8 Riesgos de los radionucleidos en la salud humana	71
3.8.1 Exposición Externa	71
3.8.2 Exposición Interna	72
4. Radionucleidos Presentes en Perforaciones de Yacimientos no Convencionales	74
4.1 Yacimientos no Convencionales.....	74
4.1.1 Metano Asociado a Mantos de Carbón (Coal Bed Methane)	75
4.1.2 Gas de Arenas Compactas (Tight Gas).....	75
4.1.3 Hidratos de Gas (Gas Hydrates)	75
4.1.4 Petróleo o Gas de Lutitas (Shale Oil-Shale Gas).....	75
4.2 Comportamiento de la Desintegración de los NORM en el Subsuelo.....	77
4.2.1 Desintegración en Subsuelo de la Serie U	77
4.2.2 Desintegración en Subsuelo de la Serie Th.....	79
4.3 Proceso de Perforación no Convencional de Shales	81
4.3.1 Adquisición de Agua.....	81
4.3.2 Mezcla Química	82
4.3.3 Perforación.....	82
4.3.4 Inyección.....	84
4.3.5 Contraflujo y Quema de Gas.....	85
4.3.6 Tratamiento	86
4.4 Radionucleidos en Yacimientos Convencionales y no Convencionales.....	88
5. Implicaciones en la Salud de los Trabajadores y el Medio Ambiente.....	92

5.1 Fuentes de Radiación Ionizante	95
5.1.1 Recortes de Roca.....	95
5.1.2 Agua de Retorno	96
5.1.3 Acumulación de Incrustaciones o Escamas	96
5.1.4 Radón en el Gas Natural	97
5.1.5 Lodos de Desecho	97
5.2 Riesgo Medioambiental	98
5.3 Efectos en la Salud.....	98
5.3.1 Efectos Deterministas	101
5.3.2 Efectos Estocásticos.....	101
5.4 Efectos en el Medio Ambiente.....	102
5.5 Manejo de Material Contaminado con Radiación Ionizante.....	103
5.6 Medidas de Protección.....	106
5.6.1 Medidas de Protección Contra la Exposición Externa.....	106
5.6.2 Medidas de Protección Contra la Exposición Interna.....	107
6. Conclusiones	109
7. Recomendaciones	111
Referencias Bibliográficas	112

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Banda de estabilidad nuclear</i>	19
Figura 2 <i>Migración de los radionucleidos desde los yacimientos</i>	25
Figura 3 <i>Serie del Uranio-238</i>	26
Figura 4 <i>Serie del Torio-232</i>	27
Figura 5 <i>Tipos de radiaciones ionizantes</i>	31
Figura 6. <i>Principales formas de contaminación de radionucleidos procedentes de la industria petrolera</i>	69
Figura 7 <i>Modelo teórico de partición NORM y desechos asociados en Marcellus Shale</i>	80
Figura 8 <i>Principales etapas en un proceso de perforación no convencional</i>	83
Figura 9 <i>Tipos de radiación presentes en la industria de los hidrocarburos y sus efectos biológicos</i>	94
Figura 10 <i>Efectos de las radiaciones ionizantes sobre los trabajadores a nivel molecular</i>	100
Figura 11 <i>Estrategia de manejo de NORM implementada por Saudi Aramco</i>	104

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Unidades radiológicas en el Sistema Internacional</i>	34
Tabla 2 <i>Límites de dosis</i>	35
Tabla 3 <i>Niveles de referencia de NORM recomendado por la IAEA para materiales residuales</i>	36
Tabla 4 <i>Niveles de referencia de TENORM recomendado por la IAEA para cantidades moderadas de materiales residuales</i>	37
Tabla 5 <i>Niveles de referencia para radionucleidos naturales en el agua</i>	38
Tabla 6 <i>Concentraciones de material radioactivo natural en la industria petrolera</i>	40
Tabla 7 <i>Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORM en los hidrocarburos y sus derivados al rededor del mundo.</i>	49
Tabla 8 <i>Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en el agua producida al rededor del mundo</i>	52
Tabla 9 <i>Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en las incrustaciones en campos al rededor del mundo</i>	57
Tabla 10 <i>Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en el lodo utilizado en campos al rededor del mundo</i>	63
Tabla 11 <i>Concentraciones de radionucleidos en las formaciones de la cuenca Ranchería</i>	71
Tabla 12 <i>Tasas promedio de dosis de radiación gamma externas observadas en algunas instalaciones de producción y procesamiento de petróleo en USA</i>	73

Tabla 13 <i>Comparación entre los radionucleidos extraídos de yacimientos convencionales y no convencionales alrededor del mundo</i>	90
Tabla 14 <i>Efectos biológicos sobre los organismos expuestos a altas dosis de radiación ionizante</i>	93

Resumen

Título: Análisis Conceptual de las Concentraciones de Actividad de Radionucleidos Naturales en Operaciones de Perforación de la Industria Oil & Gas*

Autores: Edwar Zair Castaño Mass y Sara González Sánchez**

Palabras Clave: TENORM, NORM, radionucleidos, no convencional, radiación ionizante

Descripción:

Este análisis conceptual se propone hacer una recopilación de información científica sobre la actividad de los radionucleidos naturales producto de la influencia ocasionada por la industria petrolera, en específico de la operación de perforación. Se hace una compilación de estudios realizados alrededor del mundo en los que se evidencia como los ripsos de perforación, las aguas de producción, los fluidos de desecho y otros subproductos contienen nucleidos radiactivos, los cuales pueden afectar el ambiente en el que entra en contacto y afectar la salud de los trabajadores y la comunidad.

Además, se realiza una comparación entre las concentraciones de actividad radiactiva de los yacimientos convencionales y no convencionales, teniendo como criterio de partida el tipo de muestra tomada por los estudios consultados, el país de procedencia y los isotopos medidos. Todo con la finalidad de establecer un precedente sobre los riesgos de radiación que pueden presentarse en la explotación de yacimientos no convencionales.

Finalmente puede apreciarse cuales son los mecanismos de exposición, los peligros y las consecuencias de la exposición prolongada a medianas y pequeñas dosis de radiación ionizante emitida al medio y que afecta a los organismos, sumado a esto se presentan las medidas de protección que ayudan a reducir el efecto radiactivo emitido por los radionucleidos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: José Carlos Cárdenas Montes. Magíster Scientiarum en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Reinel Andrés Echavez Márquez. Magíster Scientiarum en Ingeniería de Hidrocarburos.

Abstract

Title: Conceptual Analysis of Natural Radionuclide Activity Concentrations in Oil & Gas Drilling Operations*

Authors: Edwar Zair Castaño Mass y Sara González Sánchez**

Key Words: TENORM, NORM, radionuclides, unconventional, ionizing radiation

Description:

The purpose of this conceptual analysis is to compile scientific information on the activity of natural radionuclides resulting from the influence of the oil industry, specifically from drilling operations. A compilation of studies carried out around the world is made, showing how drilling cuttings, production waters, waste fluids and other by-products contain radioactive nuclides, which can affect the environment in which they come into contact and affect the health of workers and the community.

In addition, a comparison is made between the concentrations of radioactive activity in conventional and unconventional fields, taking as a starting criterion the type of sample taken by the studies consulted, the country of origin and the isotopes measured. All with the purpose of establishing a precedent on the radiation risks that may occur in the exploitation of unconventional reservoirs.

Finally, the mechanisms of exposure, the dangers and consequences of prolonged exposure to medium and small doses of ionizing radiation emitted to the environment and that affects organisms can be appreciated, in addition to this, the protective measures that help to reduce the radioactive effect emitted by radionuclides are presented.

* Degree Work

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: José Carlos Cárdenas Montes. Magíster Scientiarum en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Reinel Andrés Echavez Márquez. Magíster Scientiarum en Ingeniería de Hidrocarburos.

Introducción

La radiactividad es un proceso cuyos peligros son bastante conocidos por el público en general, al igual que varias de las consecuencias a la prolongada exposición a esta energía, no tanto así lo son las fuentes naturales de emanación de la misma. Existen en el ambiente materiales naturalmente radiactivos con los que se tiene contacto a diario, pero su radiación es tan baja que no logra afectar a corto plazo; aquellos materiales que emiten grandes cantidades de energía de manera natural son conocidos, por sus siglas en inglés, como NORM (naturally occurring radioactive materials). Muchos de estos se encuentran en el interior del planeta desde sus inicios y en su mayoría a grandes profundidades, es justamente allí donde operaciones como la perforación de nuevos pozos pueden interferir en el ciclo natural de los NORM y traerlos a la superficie.

En Colombia entre enero del 2018 y noviembre del 2020 se registraron 112 pozos perforados según los registros históricos de la ANH, mostrando una constante actividad de la industria; así mismo, desde el 2019 se han impulsado campañas en pro del desarrollo industrial en cuanto a exploración y perforación, y se suma un creciente interés en la explotación de yacimientos no convencionales. Esta situación genera un interés hacia la investigación profunda en aspectos ligados a estas actividades en las que intervienen los operadores y personal directamente.

Siendo la perforación el primer contacto real del hombre con el subsuelo, es necesario tener conocimiento sobre cómo puede verse afectada la salud de las personas involucradas en la operación, así como las comunidades cercanas y el medio ambiente circundante, y aunque se ha investigado mucho sobre los cambios que genera la industria en los entornos, se ha hablado poco de los riesgos radiactivos inherentes a la perforación. Dentro de los elementos naturalmente

radiactivos encontramos el U-238 y el Th-232, elementos primigenios de los que se derivan otros nucleidos radiactivos, los cuales son transportados a la superficie por medio de sólidos y fluidos procedentes del yacimiento. Las concentraciones de estos radionucleidos han sido poco estudiadas en Colombia, al igual que la comprensión sobre las interacciones fisicoquímica entre los materiales usados en la industria y la formación escasean, dado que cada interacción es diferente debido a la naturaleza heterogénea de la geoquímica del subsuelo, por lo tanto, existe el riesgo de contaminación ambiental y la incertidumbre en la afectación en la salud del personal operativo, así como de las comunidades cercanas a las instalaciones.

Finalmente, se destaca la importancia de ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de los radionucleidos en la formación, la forma en que la perforación influye en su movilización a superficie y en qué forma impactan en el entorno. En Colombia, no existen medidas o regulaciones sobre la radiactividad que pueda generarse en las operaciones de la industria, esto incentiva a tomar acción y empezar a investigar el posible impacto de los isotopos radiactivos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis conceptual de las concentraciones de actividad de radionucleidos naturales en operaciones de perforación de la industria Oil & Gas.

1.2 Objetivos Específicos

1. Recopilar información de estudios realizados a nivel global sobre la medición y afectación de los radionucleidos naturales en operaciones de perforación de la industria Oil & Gas.

2. Evidenciar en qué etapas de la operación de perforación se encuentran las mayores concentraciones de actividad de radionucleidos naturales.

3. Establecer diferencias entre las concentraciones de actividad radiactiva en yacimientos convencionales y no convencionales realizando una clasificación basada en investigaciones previas.

4. Clasificar las concentraciones de radiactividad según su material de procedencia e intensidad de radiación en los casos reportados y evidenciar si existe afectación en la salud y en el medio ambiente.

2. Marco Teórico

2.1 Radiactividad

Para Lawson (1999), la radiactividad es un fenómeno que ocurre naturalmente en los elementos y materiales. Los átomos inestables de una sustancia emiten espontáneamente radiación energética que implican la degradación de dicha sustancia.

El estudio de la radiactividad se remonta al año 1896, con el físico francés Henri Becquerel, quien descubre una radiación espontánea proveniente de sales de uranio, muy similar a los rayos X (López et al., 2018). Posteriormente en 1898, Pierre y Marie Curie, afirman el descubrimiento de H. Becquerel al concluir la radiación como fenómeno característico del uranio y el torio independiente de su estado físico o químico; además, introducen el descubrimiento de sustancias con actividades superiores a la del uranio, como el radio y polonio. De esta manera, se define la **radiactividad** como un proceso de desintegración espontánea de un núcleo atómico inestable, la cual emite radiación (López et al., 2018).

Rutherford inició con el estudio de sustancias radiactivas y sus propiedades de radiación. Mediante hojas metálicas, mide su absorción y, sometiéndolas a la acción de campos magnéticos y eléctricos, encuentra que estaban conformadas por tres componentes: radiación alfa (α), radiación beta (β) y radiación gamma (γ).

2.2 Concepto Básico del Átomo

En el entendimiento del proceso de emisión radiactiva, es importante tener clara la constitución de su fuente: el átomo. Está compuesto por un núcleo que, a su vez, lo componen partículas de protones con carga positiva y masa $m_p = 1.672623 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ y, partículas de neutrones con carga neutra y masa $m_n = 1.674929 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; siguiendo el modelo atómico basado en la

mecánica cuántica, alrededor de las partículas mencionadas, existe una nube de electrones con carga contraria a la de los protones y una masa $m_e = 9.109390 \cdot 10^{-31}$ kg.

Los átomos, comúnmente, se encuentran en estado eléctrico neutro (estado basal) de manera que la cantidad de protones en el núcleo es igual a la cantidad de electrones; este valor se conoce como número atómico y se representa con la letra Z, así, en la tabla periódica cada elemento tiene un lugar según su valor. La masa atómica, o número másico, es el número total de neutrones y protones (nucleones) en el núcleo y se representa por la letra A.

Teniendo claridad de lo anterior, se introduce el término *nucleído*, que hace referencia a una especie nuclear con un número atómico Z y un número másico A. Cuando dos o más nucleídos tienen el mismo número atómico, se denominan isótopos; mientras que, si tienen igual número másico se denominan isóbaros. También, se tienen propiedades atómicas como el momento angular, momento magnético y momento cuadripolar que sostienen las leyes y teorías actuales para el entendimiento del comportamiento a nivel atómico.

2.3 Fuerzas Fundamentales

Las interacciones fundamentales de la naturaleza son responsables de todos los fenómenos en el Universo, por lo tanto, influyen en el comportamiento de las moléculas, átomos y núcleos. Según Roy (1997), se resaltan 4 fuerzas fundamentales para estas partículas:

2.3.1 Fuerza de Gravedad

Es la fuerza responsable de la interacción de las partículas con masa definida, esto implica que define la estabilidad y configuración a escala macroscópica del Universo. Actúa sobre todas las partículas, a excepción de aquellas cuya masa es tan pequeña que tiende a cero. Esta fuerza tiene naturaleza atractiva y un alcance, considerado infinito. En comparación con las demás fuerzas, es entre 10 y 39 veces más débil, tomando como unidad la más fuerte de las cuatro fuerzas.

2.3.2 Fuerza Nuclear Débil

Es la fuerza responsable de la desintegración de ciertos átomos inestables, es decir, de aquellos procesos en los que algunas partículas se descomponen en otras más ligeras, este proceso origina algunos procesos radiactivos como las partículas beta β y actúa sobre algunas partículas fundamentales. El alcance de esta fuerza es muy corto, menos de 10^{-15} cm.

2.3.3 Fuerza Electromagnética

Es la fuerza que permite la interacción entre partículas con carga eléctrica y reacciones químicas, incluyendo todos los fenómenos biológicos. Es de naturaleza atractiva o repulsiva, puede tener un alcance considerado infinito y, en comparación con la fuerza fundamental más fuerte, es 0.01 veces más débil.

2.3.4 Fuerza Nuclear Fuerte

Define la interacción entre neutrones y protones (nucleones); es decir, permite mantener unido y estable el núcleo siendo esta la responsable de la estabilidad de toda la materia. Su naturaleza es atractiva, con un alcance cercano a los 10^{-13} cm.

2.3.5 Estabilidad Nuclear

Los nucleones están vinculados por fuerzas de atracción extremadamente fuertes que actúan en cortas distancias y vencen la repulsión electrostática entre los protones, este balance de repulsión-atracción determina si un nucleído es estable o radiactivo (Rodríguez et al., 2018). Según Alcañiz (1993), existe una relación entre la proporción neutrón-protón que afecta la estabilidad del núcleo, por tanto, afecta la reactividad de este.

La Figura 1 expone la *Banda de estabilidad*, donde se observa la relación neutrón-protón de los nucleídos. La banda está constituida por aquellos nucleídos estables, por lo tanto, los nucleídos situados fuera de esta son inestables y se descomponen en forma de radiactividad hasta

tener un núcleo estable. Al conocer el comportamiento de la relación entre el número de protones Z y el número de neutrones n , se tiene que:

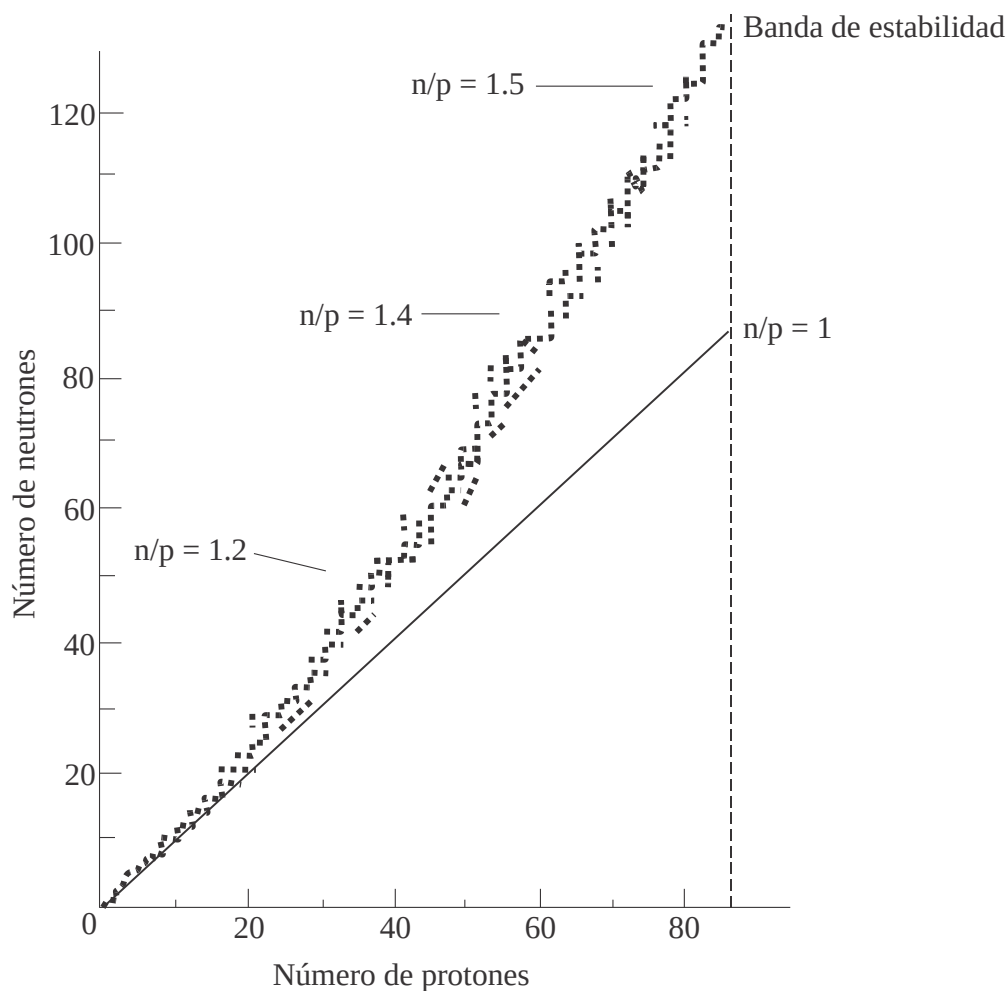
$$\text{Si } Z < 20 \quad \text{entonces} \quad n/Z = 1 \quad (1)$$

$$\text{Si } 20 < Z < 83 \quad \text{entonces} \quad 1 < n/Z < 1.5 \quad (2)$$

$$\text{Si } Z > 83 \quad \text{entonces} \quad \text{no hay nucleído estable} \quad (3)$$

Figura 1

Banda de estabilidad nuclear



Nota. Tomado y modificado de Química Nuclear. Facultad de Farmacia.

Universidad de Alcalá. Alcañiz, E. (1993).

2.4 Ley de la Desintegración Radiactiva

Como se ha descrito, la radiactividad es una propiedad nuclear; es decir, cualquier molécula que contenga un núcleo radiactivo, será radiactiva. Por tanto, debido al proceso radiactivo los átomos de la sustancia van desapareciendo mientras se convierten en los átomos de la sustancia descendiente (Ruipérez, 1979). Este proceso ocurre aleatoriamente, independiente de las condiciones físicas, de presión y temperatura, o del estado químico en que se encuentre; así pues, la desintegración radiactiva se rige por las leyes de la estadística.

Si se tiene un número de átomos radiactivos N de un radionucleido, en un tiempo t , suficiente, el número de núcleos que se desintegra por unidad de tiempo es directamente proporcional al número de núcleos existentes, así:

$$-dN/dt = \lambda * N \quad (4)$$

Donde dN/dt indica la velocidad de desintegración, el signo menos indica una disminución en el número de átomos. Esta velocidad se denomina actividad radiactiva A (López et al., 2018). La constante de proporcionalidad λ , indica el porcentaje de átomos que se desintegran por unidad de tiempo, sus dimensiones se expresan en s^{-1} , min^{-1} , etc. Siendo esta, propia de cada radionucleido. De la ecuación anterior, al integrar, se obtiene:

$$N = N_0 * e^{-\lambda * t} \quad (5)$$

Esta ecuación, expresa la ley de la desintegración radiactiva, donde N_0 es el número de átomos radiactivos en el instante inicial $t = 0$.

Para cada radionucleido existe una semivida o semiperiodo ($t_{1/2} = T$) y, se define como el tiempo necesario en que el número de átomos se reduce a la mitad. Al aplicar esta teoría, se encuentra que

$$t_{1/2} = T = 0.693/\lambda \quad (6)$$

Se observa entonces que, la semivida es una propiedad intrínseca del núcleo y, por tanto, independiente de la cantidad considerada (Ruipérez, 1979).

La actividad de una fuente radiactiva ($A = \lambda N$) mide el ritmo de desintegración de un determinado radionucleido; es importante diferenciar esta magnitud del ritmo de emisiones de radiación de una fuente radiactiva ya que, para esta última, se tienen en cuenta las emisiones causadas por la actividad de todos los productos de desintegración del radioisótopo padre.

2.5 Tipos de Radiactividad

En la sección 2.3.5 se caracterizan los nucleídos fuera de la banda de estabilidad como radiactivos; es decir, se desintegran liberando diferentes tipos de partículas o emisiones radiactivas. La desintegración radiactiva es un proceso espontáneo, aleatorio y exponencial que resulta en una transmutación nuclear (Alcañiz, 1993) debido a las emisiones de partículas alfa α , beta β , rayos gamma γ y rayos X, capaces de emitir radiación ionizante; es decir, que mientras atraviesan la materia ceden parte de su energía a los átomos que componen el material, haciendo que los electrones sean separados del átomo.

2.5.1 Partículas Alfa (α)

La desintegración de partículas alfa se observa para núcleos pesados con $Z > 83$, estos son característicos por un alto emparejamiento de neutrones y protones. La fuerza nuclear que mantiene unido el núcleo es de muy corto alcance y agregar demasiados nucleones al núcleo significa que los nucleones individuales están demasiado separados para que la fuerza nuclear pueda mantenerlos juntos, causando que la fuerza electrostática repulsiva entre los protones gane. En este caso, pueden presentarse una de dos situaciones:

1. Desintegración alfa, donde un grupo de dos protones y dos neutrones son expulsados del núcleo, formando un núcleo de helio muy estable y dando como resultado una reducción

de su número atómico (Z) en 2, al mismo tiempo que se reducen los neutrones (N) en 2. Muchos de los radionucleidos naturales investigados por Rutherford y Soddy presentaban emisiones alfa, pero no tienen aplicaciones médicas.

2. Fisión nuclear, un modo de desintegración alternativo para los nucleídos pesados en el que el núcleo se divide en dos fragmentos más o menos iguales. Este es el proceso a partir del cual se genera la energía nuclear.

Las partículas alfa, en comparación a las demás radiaciones, podría decirse que son pesadas y causan una gran cantidad de ionización cuando chocan con los electrones atómicos en el material al sacarlos de sus átomos, asimismo dado su peso, pueden expulsarlos sin desviarse de su camino, pero en cada choque pierde energía y ralentizan su marcha.

2.5.2 Partículas Beta (β)

La desintegración beta es la más frecuente, consiste en la emisión de electrones al convertir nucleones entre ellos para alcanzar la estabilidad; es decir, si el exceso es de neutrones, se convierten en protones liberando partículas β^- , de lo contrario, si el exceso es de protones se liberan partículas β^+ (López et al., 2018). El resultado neto para el átomo es aumentar Z en una unidad y disminuir N en la misma proporción, por lo tanto, no hay cambio en la masa atómica.

La energía de las partículas emitidas (electrones) está entre un valor cero y un máximo, propio de cada isótopo, debido a esto, las partículas beta presentan una distribución continua de energía. Las partículas beta son más ligeras y tienen carga única, esto causa una ionización menos densa que la causada por las partículas alfa y, se desvían más fácil a medida que ionizan los átomos del material a través del cual pasan. Este fenómeno sucede porque las colisiones con un electrón son lo suficientemente violentas como para hacer que la partícula beta se desvíe en grandes

ángulos. En ocasiones, si una partícula beta encuentra un núcleo atómico en un material con altos valores de Z , se desviará abruptamente emitiendo rayos X.

2.5.3 Rayos Gamma (γ) y Rayos X

La desintegración gamma, es el proceso de desexcitación por excelencia. Cuando un núcleo pasa de un estado excitado a su estado fundamental, u otro estado excitado de menor energía, emite radiación gamma (radiación electromagnética) que es similar a los rayos X, pero de muy corta longitud de onda y originada en el núcleo.

Los rayos gamma y los rayos X producen primero electrones secundarios para generar ionización, no lo hacen directamente, estos surgen de uno de dos procesos; dispersión y absorción. El primero se produce mediante el proceso de dispersión de Compton en el que un rayo gamma interactúa con un electrón libre en el material, transmitiendo parte de su energía al electrón y continúa su camino como radiación dispersa con una energía más baja y viajando en una dirección diferente; en el segundo proceso, un rayo gamma cede toda su energía a un electrón atómico que luego es expulsado del átomo. Después de cualquiera de estos procesos, los electrones secundarios producidos continúan produciendo la ionización del material, al igual que una partícula beta o alfa.

2.6 Radionucleidos

Según Planas (2021), los nucleídos radiactivos o radionucleidos son isotopos inestables que se desintegran y en este proceso emiten radiaciones ionizantes. Cuando un nucleido emite radiactividad alcanza un estado más estable, que requiere menos energía que antes, logrando así transformarse en un nucleído diferente, menos excitado, que puede ser también radiactivo o no; estos nucleidos nuevos se les denomina descendientes o hijos (Sánchez, 1993). Este proceso radiactivo ocurre en principio de manera espontánea, pero los científicos han aprendido a crearlo

de manera artificial; en ambos casos la radiactividad resultante tiene exactamente las mismas características.

2.6.1 Radionucleidos de Origen Natural (NORM, TENORM)

Conocidos como NOR (Naturally Occuring Radionuclides) y definidos por Kita et al. (2005) como los cronómetros del sistema solar primitivo, gracias a los radionucleidos de larga vida, los cuales tienen un tiempo de vida medio de aproximadamente 10^9 años. También están los radionucleidos de vida corta, que tienen un periodo de semidesintegración corto o medio (inferior a 30 años).

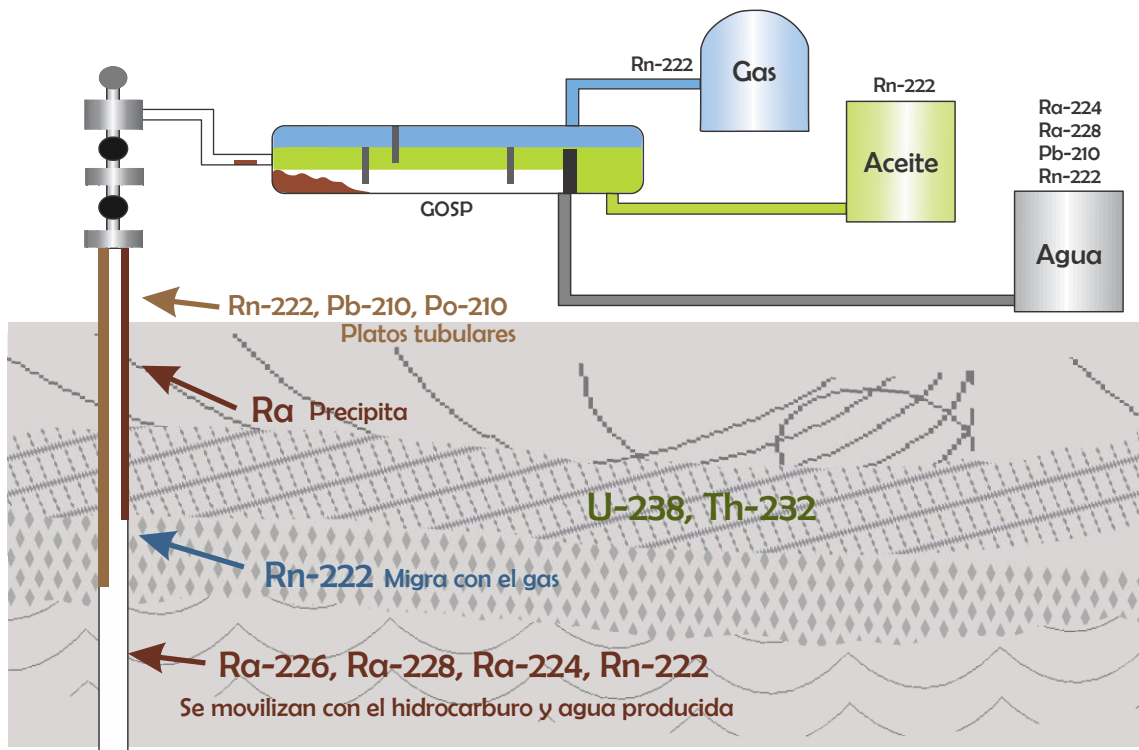
Los primeros radionucleidos se produjeron luego de las reacciones nucleares que tuvieron lugar en la formación de las estrellas, la mayoría decayeron rápidamente, pero algunos como el uranio y el torio sobreviven hasta la actualidad. En el planeta Tierra, algunos están presentes desde su formación a partir de un plasma gaseoso a elevada temperatura, o incluso antes, lo que explicaría la desaparición de los radionucleidos de cortos periodos de la naturaleza (López et al., 2018); mientras, otros se producen de forma continua mediante la interacción de partículas de rayos cósmicos con núcleos de la atmósfera terrestre. Los isótopos cosmogénicos son creados por las interacciones de alta energía las partículas primarias y secundarias de la radiación cósmica con núcleos de moléculas gaseosas de la atmósfera (por ejemplo, N_2 , O_2 , Ar, etc.) que resulta en la fragmentación de los núcleos; estos radionucleidos llamados cosmogénicos se producen en bajas concentraciones y se encuentran, principalmente, en el mar, lagos, plantes, suelos y, aquellos lugares donde llega el agua de lluvia que es su medio de transporte.

En la naturaleza existen materiales con contenido significativo de radionucleidos de origen natural, así, desde los años 70 se acopla y utiliza la expresión NORM (sus siglas en inglés: Naturally Occurring Radioactive Materials) para referirse a estos materiales. Según Nabhani et al.

(2016), estos materiales son resultados de procesos naturales que, a su vez, pueden ser potenciados por procesos asociados a la industria. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), asocia los principales elementos naturales radiactivos como el U-238 y el Th-232, y sus productos de desintegración. En la industria Oil & Gas, el término NORM se asocia normalmente con los yacimientos no convencionales y la práctica del fracking debido a su presencia constante en todos los fluidos y rocas que interactúan en los procesos, pero en las operaciones convencionales también hay presencia de radionucleidos (Figura 2). Existen tres series largas de desintegración natural radiactiva conocidas como series del uranio, actinio y torio, en la industria predomina la participación de dos, estas son:

Figura 2

Migración de los radionucleidos desde los yacimientos



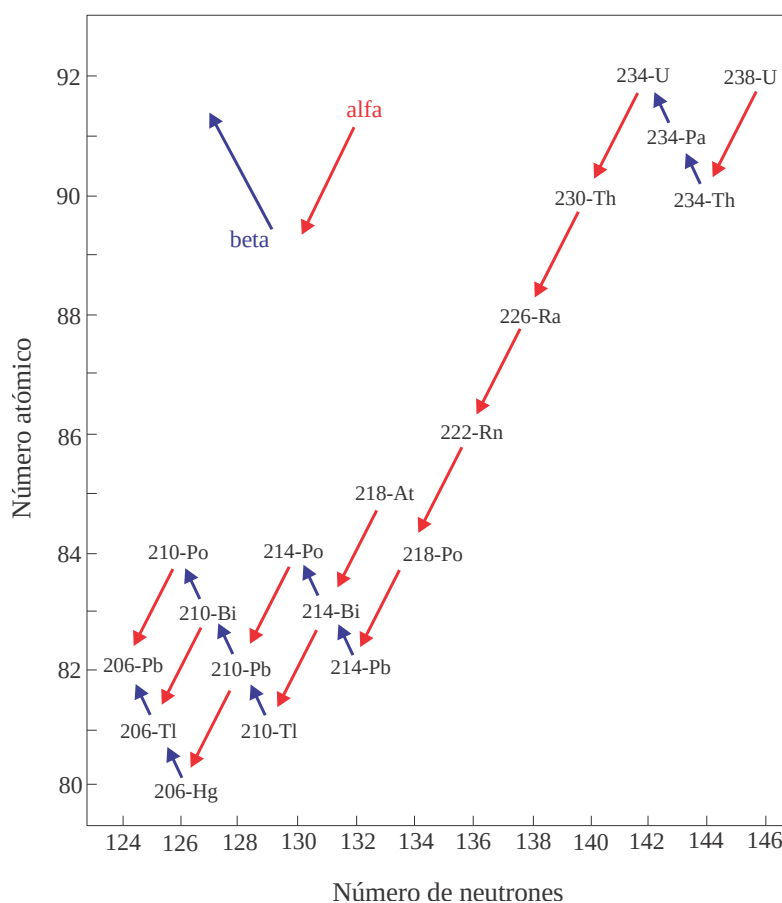
Nota. Tomado de NORM is an unwanted by-product of oil & gas production. Saudi Aramco. (2011).

2.6.1.1 Serie del Uranio-238

El uranio, en estado natural, posee tres isótopos radiactivos: uranio-238, uranio-235 y uranio-234; cada uno con el 99.2739%, 0.7205% y 0.0056%, respectivamente. Este elemento posee una semivida de 4.5 billones de años (la edad de la Tierra), tiende a decaer hasta formar un isótopo estable no radiactivo como el plomo Pb-206 (Figura 3). La serie de desintegración del uranio proporciona los radionucleidos más importantes del Ra, Rn y Pb.

Figura 3

Serie del Uranio-238.



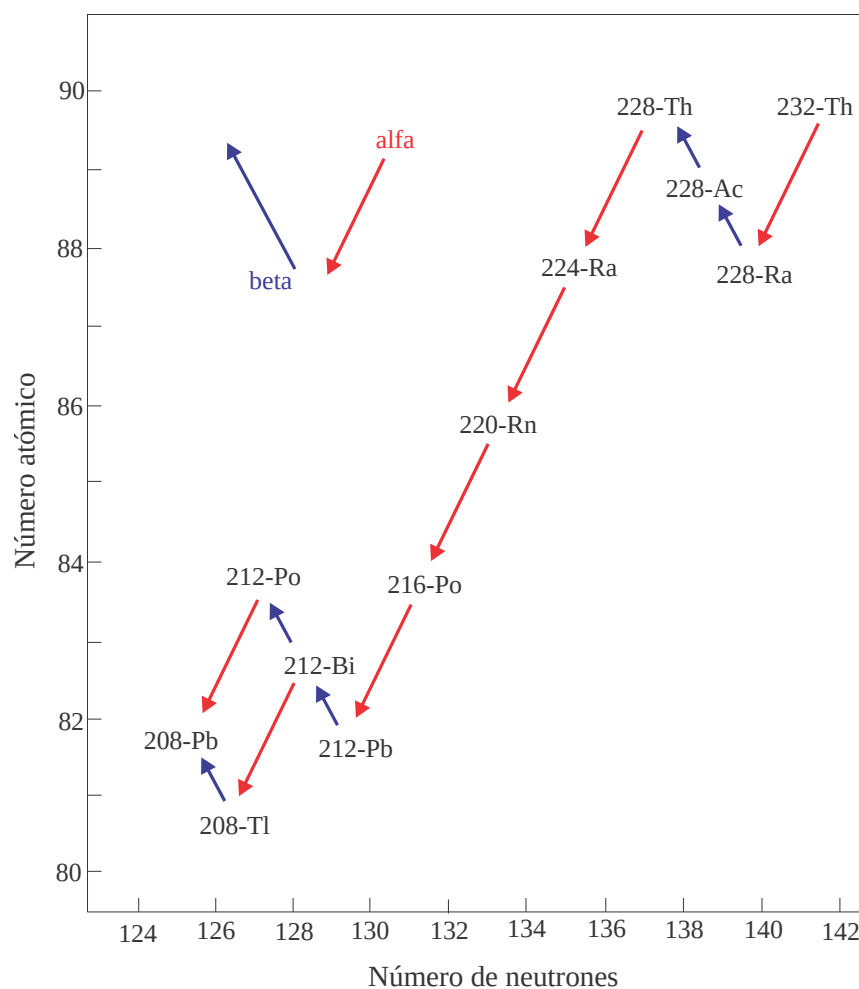
Nota. Tomado y modificado de La Radiactividad Bulbulian, S. (1987). Fondo de Cultura Económica

2.6.1.2 Serie del Torio-232

El torio, es un isótopo radiactivo conformado en su mayoría por el isótopo Th-232. Se encuentra, comúnmente, en minerales como torita y troyanita; posee una semivida de 14 billones de años. Su desintegración predomina por la emisión de partículas tipo alfa y decae hasta el isótopo de plomo Pb-208 (Figura 4).

Figura 4.

Serie del Torio-232



Nota. Tomado y modificado de La Radiactividad Bulbulian, S. (1987). Fondo de Cultura Económica

Las organizaciones nacionales e internacionales, tales como la Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas (IAOGP), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear; definen los NORM como aquellos materiales que contienen cualquier radionucleido tal como se da en la naturaleza, sin ninguna alteración por las actividades humanas, mientras que los TENORM acogen aquellos materiales radiactivos naturales que han sido concentrados o expuestos al medio ambiente a causa de actividades humanas (Nabhani et al., 2016).

2.7 Radionucleidos de Origen Artificial

En 1919, Rutherford observa el primer caso en que un átomo se transforma en otro átomo diferente, en este caso, un átomo de nitrógeno, al ser bombardeado con partículas alfa, se convierte en un átomo de oxígeno, liberando protones. Por otro lado, en 1934 los esposos Joliot-Curie, mediante un detector Geiger-Müller y una ventana de aluminio, midieron la actividad de una fuente de partículas alfa y luego de separar la fuente el detector siguió contando y la actividad radiactiva decaía de la misma manera que los radionucleidos naturales; así, mediante un estudio químico concluyeron la existencia de un nuevo emisor, en este caso, un isótopo de fósforo (López et al., 2018). Tal momento histórico resalta por la fabricación del primer radionucleido de origen artificial; a partir de entonces, se han bombardeado otros elementos con partículas alfa y nucleones, obteniendo más de 1300 radionucleidos nuevos (Kita et al., 2005), importantes para diagnósticos médicos, esterilizaciones y suministros médicos.

Con el descubrimiento de la radiactividad artificial, en 1939, aparece la fisión nuclear que permite el desarrollo de los reactores nucleares facilitando la producción de sustancias radiactivas en grandes cantidades para amplias aplicaciones en diversos campos como la química, la medicina, la agricultura, entre otros.

2.8 Vida Media

Las primeras investigaciones de Becquerel y los Curie y también de Rutherford y Soddy habían demostrado que la actividad de una fuente radiactiva se reducía durante un período de tiempo que era diferente para cada sustancia. Para Lawson, (1999) el tiempo que tarda la actividad en bajar a la mitad de su valor original se denomina vida media de la fuente. Sin embargo, la actividad no cae a un ritmo constante, esta decae a un ritmo cada vez menor reduciéndose a la mitad en cada ciclo.

Se llama vida media (τ) al valor de la vida de un átomo de un radionucleido, esta viene dada por la sumatoria de los tiempos de vida de cada uno de los átomos, dividida por el número de átomos iniciales, lo cual indica una proporcionalidad con el periodo del átomo. Esta es una magnitud estadística y representa un promedio del tiempo total de subsistencia (Ruipérez, 1979).

Los radionucleidos se caracterizan por tener una vida media finita, que puede ir desde pequeñas fracciones de segundo a miles de años, como los isótopos del uranio, que han sido importantes en la datación histórica de la Tierra. La vida media, no solo es responsable de la desaparición de un radionucleido, sino también de su formación; así, en algún momento podrá existir un equilibrio en el cual padre e hijo coexisten (Bosch, 1994), esto pasa cuando la vida media del radionucleido padre es muy larga y la del radionucleido hijo es corta, tal caso expone que la cadena de desintegración del nucleido padre, toda completa, tiene la misma radiactividad total (González, 2009). Este equilibrio se denomina equilibrio secular.

De los nucleidos conocidos actualmente, existen 90 teóricamente estables y 255 que no se les ha observado desintegrarse. Por otra parte, unos 650 nucleidos que se han observado con actividad radiactiva, tienen al menos una vida media de una hora.

En la Tierra se conocen alrededor de 3000 radionucleidos de vida media superior a una hora, la mayor parte de los cuales (cerca de un 90%) son de origen artificial, unos 2400 radionucleidos de vida media inferior a una hora y aún existen otros tan inestables que su vida media es cortísima, inferior a este tiempo (Planas, 2021).

2.9 Medición de Radiactividad

Hasta ahora se tiene claro que los NORM se caracterizan principalmente por su actividad, su vida media, el tipo de radiación que emiten y la energía. A pesar de que su desintegración es un proceso aleatorio, existe la posibilidad de saber la cantidad de actividad que posee una muestra de radionucleido mediante la obtención de partículas alfa o beta, a partir de una fuente emisora, y la medición de la velocidad con que se desintegran estas partículas; dichas mediciones pueden analizarse mediante espectrometría alfa y gamma.

A lo largo de la historia, se han desarrollado técnicas basadas en el principio básico de emisión y recepción; no obstante, el avance de cada método radica en la preferencia del tipo de partícula a medir teniendo en cuenta la capacidad de incidencia y recorrido que posee cada una (Figura 5). Para partículas alfa son suficientes los detectores de fino grosor, su recorrido es menor a 100 μm ; mientras que las partículas beta abarcan un recorrido mayor que implica aumentar el grosor de los detectores. Los rayos gamma han demostrado superar el recorrido de las partículas anteriores en alrededor 10 veces.

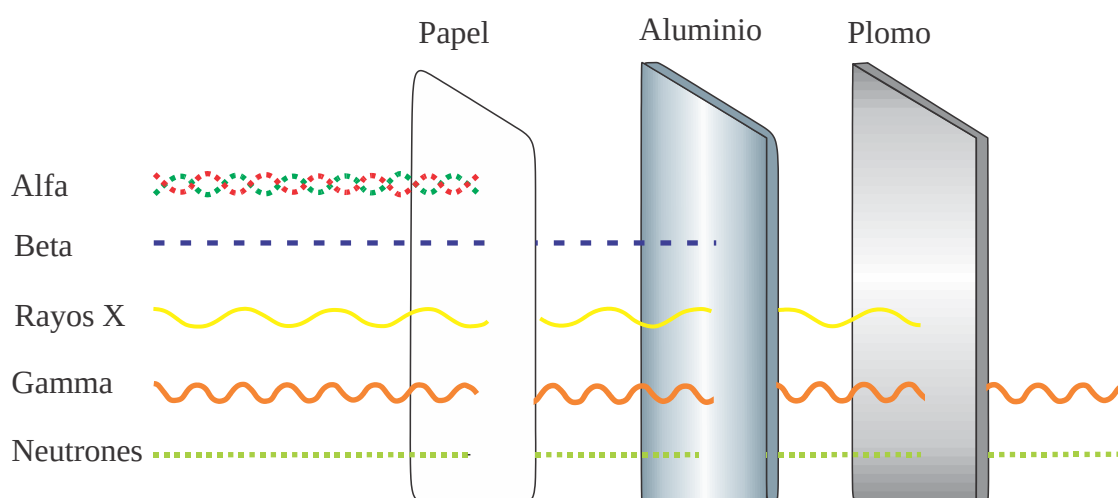
La radiactividad como propiedad del núcleo cuenta con unidades de medición en el sistema internacional (SI), estas miden amplias formas en las cuales el ambiente y los seres humanos interactúan con las radiaciones.

En 1953, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU), estableció la medición de la energía depositada en una masa de tejido mediante la unidad

denominada roentgen (unidad de exposición) que, expresa la relación entre la suma de las cargas eléctricas de los iones del mismo signo que se producen al detenerse todas las partículas liberadas por fotones incidentes. Así mismo, con el descubrimiento y desarrollo de diversas formas de radiación, en las aplicaciones terapéuticas se estableció una unidad para medir la dosis absorbida, el rad, equivalente a 0.01 J/Kg , no obstante, en el SI se adoptó el gray Gy, en honor a Luis Harold Gray quien realizó contribuciones con el principio de Bragg-Gray.

Figura 5.

Tipos de radiaciones ionizantes



Nota: Tomado y modificado de El daño en el ADN debido a las radiaciones ionizantes. Enfermería, (2020). Ocronos - Editorial Científico-Técnica.

Por otro lado, en 1910 se designa el curie (Ci) como unidad de medida para la actividad de un radionucleido, restringiendo su uso solo a la familia del radio; sin embargo, más adelante se generaliza su utilidad para la actividad de cualquier radioisótopo. En el SI se adopta el s^{-1} , nombrado becquerel (Bq), como unidad de medición en honor a Antoine Henri Becquerel premio

Nobel de Física en 1903, un becquerel corresponde a la desintegración de un núcleo por segundo, siendo su equivalencia con el curie así:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} = 27.027 * 10^{-12} \text{ Ci} \quad (7)$$

Trata un orden de magnitud muy pequeño (pCi) en comparación con la actividad radiactiva en el ambiente. Entonces, las técnicas nucleares de diagnósticos médicos utilizan las medidas en Ci para facilitar las interpretaciones.

En el campo de la protección radiológica las mediciones se hacen a través dosis equivalente (DE), que considera la efectividad biológica de las radiaciones ionizantes. H. M. Parker define el equivalente mamífero del roentgen (rem) como unidad de esta medición. Dado que existen diversos factores influyentes como la dosis absorbida (D), el factor de distribución (DF), el factor de calidad (QF), entre otros, no es posible su medición exacta. La Comisión Internacional de Protección Radiológica propone el sievert (Sv) como unidad de medida en el SI, en honor a M. Sievert, pionero en la radiofísica médica. Finalmente, Hernández (2020) presenta una síntesis de las unidades de mediciones radiológicas para el SI en la Tabla 1.

Cabe aclarar la diferencia existente entre la radioactividad medida en bequereles (Bq), la dosis absorbida medida en greys (Gy) y la dosis efectiva medida en sieverts (Sv), según Connor (2020), un sistema (sea biológico o no) recibe energía si está expuesto a una fuente que emite radiación ionizante (Bq), la energía que se administra al material se deposita y acumula en él, esta cantidad de energía se denomina dosis absorbida (Gy) y cuando se mide el daño biológico que puede provocar la cantidad de energía, se denomina a eso dosis equivalente (Sv). La magnitud de la dosis equivalente depende de diferentes factores, entre los que tenemos: el tipo de radiactividad, que puede ser alfa, beta o gamma (Sección 2.5) y sus interacciones con el tejido; la magnitud de la fuente, que influye directamente en la dosis depositada; la distancia, debido a que la cantidad de

exposición depende de esta (de manera similar sucede con el calor emitido por una fogata); El tiempo de exposición, entre mayor sea el tiempo más energía se acumulará en el material; El blindaje, dependiendo del material que deba atravesar la energía ionizante, puede verse afectada en intensidad; la parte del cuerpo afectada y la vía de exposición (que puede ser interna o externa).

Teniendo presente estas variables es posible afirmar que 1 Bq de radiactividad no siempre transmitirá la misma dosis de radiación, por ello se debe estudiar cada caso en particular, sin embargo las normas de seguridad de la IAEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) establecen que para evitar que las personas se vean afectadas por la radiación, los NORM que procedan de la cadena de desintegración del uranio o de la cadena de desintegración del torio deben tener 1 Bq/g y los materiales que contengan radionucleidos ^{40}K deben tener 10 Bq/g.

2.10 Incidencia de la Radiactividad en la Salud

Según lo visto, la exposición recurrente a fuentes radiactivas puede conllevar afectaciones graves a la salud humana, por esto, existen entidades internacionales que regulan las protecciones ante la radiación ionizante, algunas como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR), el Organismo Internacional de la Energía Atómica (IAEA), la Agencia de Energía Nuclear (NEA), la Comunidad Europea de Energía Nuclear (EURATION), la OMS, el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), entre otros.

En la publicación 103 del ICPR (2007) se reúnen las dosis recomendadas de radiación ionizante que puede recibir una persona según su rol dentro de un área específica y que no sea mala para la salud. La Comisión reconoce tres tipos de situaciones que abarcan la generalidad de las posibles exposiciones: planificadas, de emergencia y existentes. Esta última, abarca la mayoría de industrias que entran en contacto directo con los NORM, entre ellas, la industria de los hidrocarburos.

Tabla 1*Unidades radiológicas en el Sistema Internacional*

Cantidad	Unidad (SI)	Símbolo	Equivalente
Dosis absorbida	Gray	Gy	$100\ rad$
Intensidad de dosis absorbida	Gray por segundo	$Gy * s^{-1}$	$100\ rad * s^{-1}$
Actividad	Becquerel	Bq	$27,03 * 10^{-12}Ci$
Actividad específica	Becquerel por kilogramo	$Bq * kg^{-1}$	$27,03 * 10^{-12}Ci * kg^{-1}$
Exposición	Coulomb por kilogramo	$C * kg^{-1}$	$3876\ R$
Intensidad de exposición	Coulomb por kilogramo por segundo	$C * kg^{-1} * s^{-1}$	$3876\ R * s^{-1}$
Dosis equivalente	Sievert	Sv	$J.kg^{-1} = 100\ rem$

Según la OMS (2016), la radiación ionizante afecta la salud en función del tipo de radiación, la sensibilidad de los órganos y tejidos, y de la dosis recibida, o absorbida. La unidad de medición, sievert (Sv), se acepta internacionalmente para establecer el Sistema de Protección Radiológica definido por la ICPR para identificar las posibles situaciones de exposición, en el cual participan diversos profesionales para el desarrollo de tecnologías que permitan el desarrollo de trabajos más seguros frente a las radiaciones ionizantes. El sistema tiene como fin, evitar efectos negativos y establecer límites de dosis específicos para trabajadores expuestos y público en general.

En la Tabla 2, se presenta el resultado de los límites de dosis presentados por la ICPR que evitan los daños biológicos severos. Los valores reportados no incluyen las dosis que se reciben

por causa de diagnósticos, procedimientos o tratamientos médicos, lo que supone mantener los umbrales por debajo del establecido.

Tabla 2

Límites de dosis

Cantidad	Trabajadores expuestos	Público
Dosis efectiva	100 <i>mSv/5 años</i>	1 <i>mSv/año</i>
Dosis equivalente cristalino	150 <i>mSv/año</i>	15 <i>mSv/año</i>
Dosis equivalente piel y extremidades	500 <i>mSv/año</i>	50 <i>mSv/año</i>

Nota. Límites de dosis dados por la ICPR

Los efectos sobre la salud dependen, en gran medida, de varios factores como el tipo y la cantidad de radiación, la rapidez y cantidad de recepción del cuerpo, la sensibilidad y presencia de anomalías genéticas, la edad y el estado general de salud. La radiación ionizante en el cuerpo produce modificaciones críticas a nivel molecular generando radicales libres (Cascón, 2009) que son los causantes de los daños directos dentro del cuerpo; se generan síntomas en proporción a los niveles en exposición, así, a medida en que sean más bajos, los efectos no son inmediatos pero la acumulación tiende a generar riesgo de enfermedades crónicas y severas, como el cáncer.

2.11 Normatividad para los NORM

La gran mayoría de países alrededor del mundo basan sus políticas regulativas de energía nuclear en el consenso tomado en el Organismo Internacional de Energía Atómica IAEA, que es como lo indica su nombre, una organización internacional, compuesta de 173 naciones (a abril de 2021), del que Colombia hace parte desde el año 1960. Este organismo, a partir del momento de su fundación, adquirió la responsabilidad de trabajar con sus múltiples asociados de todo el mundo y Estados Miembros para suscitar el uso de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en

condiciones de seguridad tecnológica y física. Dentro de sus muchas normativas se encuentra la “Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad” publicada en 2017, donde indica entre otras cosas, los niveles recomendados de radiactividad que deben tener los materiales que contienen NORM y TENORM para que no representen un peligro (lo dicho implica que la dosis equivalente por la exposición prolongada del material no supere la de 1 mSv en un año), estos valores se muestran en la Tabla 3 para NORM y Tabla 4 para TENORM.

Tabla 3

Niveles de referencia de NORM recomendado por la IAEA para materiales residuales

Radionucleido	Concentración de actividad (Bq/g)
K-40	10
Cada radionucleido de la cadena de desintegración del uranio o de la cadena de desintegración del torio	1

Nota. Extraído y modificado de la “Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad”. IAEA 2017.

Otra institución que complementa las políticas de los países de todo el mundo, con respecto al tratamiento de isótopos radiactivos, es la Organización Mundial de la Salud. Las naciones se basan en las guías y recomendaciones dadas por la OMS (WHO), Uno de los lineamientos establecidos por la organización es la “Guía para la calidad del agua de consumo humano” (2011), normativa que plantea, entre otras recomendaciones, los límites de seguridad para radionucleidos presentes en el agua potable o aguas que tengan contacto con los seres humanos, esta información se encuentra planteada en la Tabla 5.

Tabla 4

Niveles de referencia de TENORM recomendado por la IAEA para cantidades moderadas de materiales residuales

Radionucleido	Concentración de actividad (Bq/g)	Actividad total de la fuente (Bq)
Serie ^{238}U		
^{238}U	1×10^1	1×10^4
^{234}Th	1×10^3	1×10^5
^{234}Pa	1×10^1	1×10^6
^{234}U	1×10^1	1×10^4
^{230}Th	1×10^0	1×10^4
^{226}Ra	1×10^1	1×10^4
^{222}Rn	1×10^1	1×10^8
^{214}Pb	1×10^2	1×10^6
^{210}Pb	1×10^1	1×10^4
^{210}Bi	1×10^3	1×10^6
^{210}Po	1×10^1	1×10^4
Serie ^{232}Th		
^{232}Th	1×10^1	1×10^4
^{228}Ra	1×10^1	1×10^5
^{228}Ac	1×10^1	1×10^6
^{228}Th	1×10^0	1×10^4
^{224}Ra	1×10^1	1×10^5
^{220}Rn	1×10^4	1×10^7
^{212}Pb	1×10^1	1×10^5
^{212}Bi	1×10^1	1×10^5

Nota. Los valores aquí mostrados están basados en cálculos de materiales que alcanzan pesos de una tonelada, pero pueden tomarse como referencia. Los radionucleidos pertenecientes a la serie de desintegración que no se muestran en la Tabla 4, se consideran no relevantes debido a i) Su vida media es muy corta ii) La radiación emitida se considera no riesgosa. Extraído y modificado de la “Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad”. IAEA 2017.

La Reglamentación en materia nuclear para Colombia, como ya se mencionó, se basa enteramente en el reglamento de protección y seguridad radiológica emitido por la Organización Internacional de Energía Atómica. Destaca la Resolución 180005 de 2010, por la cual se rige la gestión de los desechos radioactivos en Colombia y establecen los valores de Bq permitidos para los materiales de desecho, valores que coinciden con los expuestos en este trabajo. Cabe añadir que como lo establece Echavez et al. (2021), Colombia, no cuenta con laboratorios especializados para medir bajos niveles de concentraciones de radionucleidos naturales.

Tabla 5

Niveles de referencia para radionucleidos naturales en el agua

Radionucleido	h_{ing} (Sv/Bq)	Nivel de referencia (Bq/l)
^{238}U	4.5×10^{-8}	10
^{234}U	4.9×10^{-8}	1
^{230}Th	2.1×10^{-7}	1
^{226}Ra	2.8×10^{-7}	1
^{210}Pb	6.9×10^{-7}	0.1
^{210}Po	1.2×10^{-7}	0.1
^{232}Th	2.3×10^{-7}	1
^{228}Ra	6.9×10^{-7}	0.1
^{228}Th	7.2×10^{-8}	1
^{222}Rn	1.8×10^{-10}	1000

Nota. h_{ing} representa el coeficiente de la dosis de ingestión para adultos, calculado a partir del límite de dosis efectiva anual ingerida recomendada para un adulto (0.1 mSV). El nivel de referencia está establecido tanto para el agua potable, como para el agua en contacto con los seres humanos. Extraído y Modificado de las Guías para la calidad del agua de consumo humano. OMS (2011).

3. Presencia de Material Radiactivo en la Industria de los Hidrocarburos

Los materiales que contienen grandes cantidades de radionucleidos naturales se denominan NORM, están en la corteza terrestre y las personas están expuestas a ellos todos los días, son una parte integral tanto del planeta, como de los cuerpos, los alimentos, el aire, los lugares habitables, y los productos de uso diario. El tratamiento de algunos recursos naturales, intensifican la actividad de los radionucleidos naturales, lo que puede plantear riesgos para los seres humanos y el medio ambiente. Estos subproductos se denominan materiales radiactivos naturales tecnológicamente mejorados (TENORM). La mayoría de los radionucleidos que se catalogan como TENORM, son cadenas de descomposición del uranio y torio (El Afifi et al., 2010).

En la información recopilada por Nabhani, K. et al. (2016), entre las décadas de 1920 y 1930 Hempstead y Burton informaron, por primera vez, de altas concentraciones de radiación en el petróleo, tal como lo hicieron también investigadores rusos y alemanes; pero desde el punto de vista de la protección radiológica, no se realizó una encuesta oficial hasta principios de la década de 1970 por la Comisión de Energía Atómica (AEC). Luego del descubrimiento de niveles amenazantes de NORM en una plataforma petrolera del Mar del Norte en 1981 donde se encontraron varios tipos de desechos TENORM dispersos en las escamas, los lodos y el agua producida; los investigadores (Kolb y Wojcik, 1985; Smith 1987) inspeccionaron la presencia de radionucleidos en el crudo y en sus desperdicios. Midieron la tasa de dosis en muchos yacimientos petrolíferos en el norte de Albania y determinaron los valores de las concentraciones de ^{228}Ra , ^{226}Ra y ^{222}Rn . Fue en esta época también cuando se hizo evidente por primera vez, en los campos petroleros de EE. UU., la acumulación de radionucleidos, al detectarse inaceptables niveles de radiactividad en los envíos de crudo por oleoductos.

La comisión internacional de protección radiológica, ICRP por sus siglas en inglés, recopiló información sobre las concentraciones de TENORM en las industrias del gas y el petróleo medidas a nivel mundial, estas se muestran en la Tabla 66, en ella se observa que el ^{226}Ra es el isótopo más concentrado, especialmente en las escamas, por tanto, estas se consideran uno de los residuos más peligrosos de la industria del petróleo en términos de radiactividad.

Tabla 6

Concentraciones de material radioactivo natural en la industria petrolera

Isotopos Radiactivos	Escamas (Bq/kg)	Lodo (Bq/kg)	Agua Producida (Bq/L)	Crudo (Bq/kg)	Gas Natural (Bq/m³)
^{238}U	1–500	5–10	0.0003–0.1	0.0001–10	—
^{232}Th	1–2	2–10	0.0003–0.001	0.3–2	—
^{226}Ra	100–15000000	5–800000	0.002–1200	0.1–40	—
^{228}Ra	50–2800000	500–50000	0.3–180	3–17	—
^{224}Ra	—	—	0.5–40	—	—
^{222}Rn	—	—	—	3–17	5–200000
^{210}Pb	20–75000	100–1300000	0.05–190	—	0.005–0.02
^{210}Po	20–1500	4–160000	—	0–10	0.002–0.08

Nota. ICRP (1991). UNSCEAR (2000). ICRP (2019).

3.1 Radionucleidos y las Etapas de Perforación Convencional

Para lograr llegar a los hidrocarburos almacenados en el subsuelo, es necesario hacer un orificio con una profundidad preestablecida, este es el objetivo principal de la operación de perforación. Para cumplir este objetivo es necesario usar una broca, una herramienta usada para triturar y romper las rocas que se interponen entre la superficie y la ubicación del reservorio, unido a la broca se encuentra una sarta de tuberías, que tienen la función de introducir la herramienta en el suelo y llevarla hasta la profundidad objetivo, para luego ser extraída una vez esté cumplida su misión. Es necesario usar un taladro que sea capaz de soportar todo el peso de la sarta de tuberías

y el peso de la broca, además el taladro debe brindar el torque necesario a todo el conjunto para lograr perforar los estratos geológicos. Una parte fundamental en el desarrollo de la operación es el mantenimiento de presión, dadas las grandes profundidades que se alcanzan, la presión va ir en aumento a medida que se avanza, por ello se utilizan lodos de perforación para contrarrestar estas fuerzas, aprovechando la presión hidrostática generada por el lodo, este también tiene la función de lubricar la broca, facilitando su trabajo y desplazar los recortes generados (ripios), transportándolos a la superficie, es aquí donde se presenta el primer contacto con los radioisótopos presentes en el subsuelo, algunos ejemplos de niveles de radiactividad en los ripios en diferentes locaciones son : los medidos en campos del estado de Colorado en USA [^{208}Tl (7.77–18.13), ^{226}Ra (30.71–83.25), ^{228}Ra (23.31–60.31), ^{234}U (12.58–71.78), ^{235}U (0.37–4.551), ^{238}U (17.02–77.33), ^{228}Th (18.87–78.44), ^{230}Th (19.98–112.11), ^{232}Th (23.68–80.29) Bq/kg] (Field, 2014), los valores encontrados en el noreste de Polonia [^{40}K (446–1092), ^{238}U (35–99), ^{226}Ra (29–120), ^{210}Pb (30–43), ^{228}Ra (22–47), ^{228}Th (19–47), Bq/kg] (Jodłowski et al., 2017) y los datos mostrados en la subcuenca Ranchería en Colombia [^{238}U (26.1–47.2), ^{232}Th (39.9–56.86), ^{40}K (41.5–386.32)] (Salazar et al., 2021).

El lodo puede ser extraído gracias a las líneas de flujo dispuestas en el cabezal, este cuenta además con válvulas de cierre, necesarias para controlar la presión y los fluidos dentro del pozo; el cabezal cuenta también con un mecanismo para sostener los revestimientos que cubrirán y soportaran el pozo. Los mencionados revestimientos no son más que tuberías de gran tamaño, diseñadas para tener flexibilidad, alta dureza y resistencia a las altas presiones, se ubican dentro del pozo con el fin de controlar el desprendimiento de las paredes y evitar filtros de fluidos no deseados; para lograr un mejor funcionamiento de las tuberías de revestimiento, se inyecta en el

espacio anular entre las paredes del pozo y la tubería, una mezcla de cemento, fabricada con propiedades especiales para obtener la máxima adherencia al revestimiento.

Una sección importante es aquella que involucra a las operaciones externas al pozo, entre estas está el control de sólidos (es un manejo que se hace sobre el lodo y los ripios de perforación), al tiempo de este control, se realiza un registro (mud logging) para monitorear los residuos que lleva el lodo y poder tener conocimiento de la geología y ubicación de la broca en el subsuelo. En los registros y pruebas se pueden obtener muestras de lodo, de las que se puede obtener información como las concentraciones de radionucleidos, el promedio mundial para los isotopos ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po están entre 5-10, 2-10, 5-800000, 500-50000, 100-1300000 y 4-160000 Bq/kg, respectivamente; dichas concentraciones, generalmente, se encuentran bajo el límite establecido, sin embargo, al momento de su extracción se depositan o almacenan de manera que generan acumulaciones previas a los tratamientos necesarios.

El servicio de monitoreo cuenta con registros de diferentes naturaleza que se emplean para hacer seguimiento de las propiedades del hueco, el tipo de fluidos presentes y a que profundidades, el estado del revestimiento, entre otros aspectos. Esta actividad se caracteriza por medir radiaciones gamma para identificar contenidos de arcillas, junto con los recortes de perforación obtenidos en superficie se corrobora la información gracias a la presencia de altas cantidades de ^{238}U . Una vez ubicada la zona objetivo, se procede al cañoneo, un procedimiento que consiste en perforar la tubería de revestimiento, el espacio anular cementado y la formación, con la intención de crear canales de flujo desde el yacimiento hasta el pozo, permitiendo el paso de los fluidos, entre los que tenemos el crudo, el gas y el agua. Cada uno de estos fluidos presenta una concentración promedio de radionucleidos que han sido producto de análisis de diversos estudios hechos en diferentes partes del mundo y compilados por la Comisión Internacional de Protección

Radiológica (2019), los valores obtenidos fueron: para el crudo ^{238}U (0.0001–10), ^{232}Th (0.3–2), ^{226}Ra (0.1–40), ^{228}Ra (3–17), ^{222}Rn (3–17), ^{210}Po (0–10) Bq/kg, para el gas natural ^{222}Rn (3–17), ^{210}Pb (0.005–0.02), ^{210}Po (0.002–0.08) Bq/m³ y para el agua producida ^{238}U (0.0003–0.1), ^{232}Th (0.0003–0.001), ^{226}Ra (0.002–1200), ^{228}Ra (0.3–180), ^{224}Ra (0.5–40), ^{210}Pb (0.05–190). Para finalizar se debe realizar una prueba de estos fluidos, se hace por medio del servicio de pruebas de pozo (well testing), el cual nos ayuda a identificar el tipo de fluido que emana del reservorio, sumado a esto, permite obtener información sobre las propiedades de los mismos.

3.2 Relación Entre la Geoquímica de los Radionucleidos y la Industria Petrolera

Se demostró, gracias a los estudios geológicos estadounidenses realizados desde 1944 y en adelante, que las lutitas son una fuente importante de uranio y petróleo. Algunas de estas rocas contienen hasta cien veces más uranio que otro tipo de rocas sedimentarias junto a sustancias orgánicas que pueden producir petróleo. Asimismo, muchos trabajos científicos y académicos han abordado la presencia de NORM en yacimientos con presencia de hidrocarburos en diversos países. Por dar un ejemplo Fisher, R. S. (1995) encontró que en yacimientos típicos de Texas, Estados Unidos, compuestos por areniscas, calizas y dolomitas contienen concentraciones de uranio y torio en el rango de 1 a 10 ppm, al igual que las rocas asociadas a estos yacimientos como lo son las lutitas, limolitas y lutolitas. Otro ejemplo sería la exploración realizada por el Instituto Geológico Polaco (Chajduk et al., 2013), que resultó en el descubrimiento de mineralización de uranio en las lutitas dictyonema pertenecientes al Ordovícico (Paleozoico), ubicadas en la depresión de Podlasie y los sedimentos del Triásico inferior y medio (areniscas) en la Sineclisis Peribáltica (zona de depresión de Rusia Báltico-Central); el contenido de uranio en varias muestras tomadas del mismo depósito difieren entre sí, siendo las lutitas de dictyonema quienes contienen la mayor cantidad de uranio (tres veces más), en comparación con otros minerales encontrados.

Los resultados de estos estudios están en consonancia con la geoquímica tanto del uranio como del torio, que son las principales fuentes de TENORM y se encuentran abundantes en depósitos de rocas que contienen cantidades significativas de hidrocarburos. Partiendo de esto y desde el punto de vista de la geoquímica, el uranio y el torio tienen diferentes características de solubilidad en la matriz de la roca y su movilidad en sistemas acuosos está controlada principalmente por el pH, la alcalinidad, el potencial de óxido-reducción y el tipo de agentes complejos presentes como carbonatos, fosfatos, vanadatos, fluoruros, sulfatos y silicatos (Kumar et al., 2012).

3.3 Movilización y Disposición de los Radionucleidos

La movilización de radionucleidos debida a las intervenciones humanas es común, pero generalmente no intencional, y los mecanismos movilización más frecuentes son la disolución (Mezcla a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias puras, que es homogénea y que no reaccionan entre sí [Daub, 2005]), el transporte coloidal (Movilización de elementos con baja solubilidad, en fase coloidal por medio acuoso, [Albarrán, 2011]) y/o la especiación acuosa (Distribución de un elemento químico determinado entre las diferentes formas en las cuales puede existir, es decir sus especies, en un medio acuoso [Castañé et al., 2003]). La movilización de radionucleidos NORM se ve afectada por varias condiciones y procesos mecánicos y químicos que incluyen cambios en el pH, composición química, procesamiento térmico, volatilización, reducción mecánica, meteorización, partículas en el aire y difusión gaseosa. Por demás la precipitación y deposición de radionucleidos NORM implica muchos de esos mismos procesos químicos que se usan en la movilización (NCRPM, 2019).

3.3.1 *Uranio*

El uranio y el torio son actínidos que se encuentran comúnmente en los sedimentos en concentraciones bajas. En condiciones reductoras, su comportamiento geoquímico es similar y ambos son esencialmente inmóviles. El uranio tiene dos estados de valencia comunes en los medios geológicos, químicamente reducido (+4) y oxidado (+6), que tienen aproximadamente ocho órdenes de magnitud de diferencias en la solubilidad acuosa. Los compuestos de uranio (IV) en el ambiente reducido son insolubles. Por otro lado, tanto el uranio como el torio son elementos fuertemente litofílicos, y ambos pueden encontrarse en un estado de oxidación 4^+ . Sin embargo, el uranio también puede llegar a un estado de oxidación 6^+ como UO_2^{2+} (Okrusch, 2020). Hay que tener en cuenta que la precipitación de uranio ocurre más en ambientes reductores, a menudo de naturaleza ácida y normalmente en sedimentos ricos en orgánicos como las lutitas marinas y carbonatos que contienen hidrocarburos con un alto contenido de materia orgánica (Russell, 1945). Por ello es que se utiliza la radiactividad como indicación de la presencia de hidrocarburos. En prácticamente todos los entornos geológicos, los estados de oxidación 4^+ y 6^+ son los estados de oxidación más importantes del uranio, mientras que el ion U^{6+} es incluso más soluble que el ion U^{4+} , lo que también explica por qué los materiales radiactivos se encuentran más solubles con el agua de formación coproducida durante producción de hidrocarburos. Al mismo tiempo, el U^{4+} generalmente precipita como óxidos e hidróxidos de uranos estables y muy insolubles, en forma de pechblenda (UO_2), schoepita $(UO_2)_8O_2(OH)_{12} \cdot 12H_2O$ y coffinita $USiO_4(OH)_4$ (Langmuir, 1978).

3.3.2 *Radio*

El radio es un elemento alcalinotérreo con propiedades químicas muy similares a las del bario, estroncio y calcio, es extremadamente insoluble en algunos sistemas específicos que

contienen sales de carbonato, yodato, oxalato y sulfato, probablemente se mueve como un complejo coloidal, asociándose con materia particulada en suspensión (Gao et al., 2010). Presenta cuatro isótopos radiactivos naturales ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra y ^{228}Ra ; en solución, tiene un solo un estado de oxidación (+2), es sensible a los cambios de pH y es soluble en aguas que contienen iones de cloruro, sulfato, carbonato, nitrato y bromato, componentes comunes en la salmuera asociada a los depósitos de petróleo y gas (Almeida et al., 2004), (esta solubilidad selectiva del radio es clave para comprender el TENORM del petróleo y el gas). De estos, el ^{226}Ra y ^{228}Ra tienen semividas relativamente largas (1.600 y 5,75 años, respectivamente), como resultado, la mayor parte de la literatura publicada sobre el radio se relaciona con estos dos radioisótopos. De la desintegración del radio se producen dos productos gaseosos químicamente inertes, ^{222}Rn y ^{220}Rn , dependiendo de parámetros clave como el coeficiente de difusión del radón y la permeabilidad suelo-aire, algunos de los átomos de estos isótopos de radón se liberan de la matriz sólida del material por retroceso cuando el radio decae, acompañados de energía radiactiva, siendo más activo al encontrarse en las escamas de las tuberías (Rood et. al., 1998). El radio también es muy móvil en el medio ambiente bajo varias condiciones ambientales comunes y el valor promedio ponderado a nivel mundial para la concentración de ^{226}Ra en el suelo es de aproximadamente 32 Bq/kg según los datos informados por UNSCEAR (2000).

3.3.3 Torio

El torio se concentra en la fracción limosa de las lutitas y se encuentra en varios minerales pesados, el más común es la monacita, que puede contener hasta aproximadamente un 12% de óxido de torio, otro solo puede existir como Th^{4+} en el medio natural debido a su insolubilidad y se transporta casi en su totalidad en suspensión (NCRPM, 2019). El torio es muy insoluble y rara vez se encuentra en las columnas de agua subterránea. El torio disuelto casi invariablemente forma

complejos en aguas naturales. La baja concentración total de torio en las aguas refleja una combinación de velocidades de disolución lentas, insolubilidad de los minerales que contienen torio y una fuerte adsorción de torio por materiales naturales (Langmuir, 1980). Debido a la baja solubilidad del torio y su actividad relativamente baja, el ^{232}Th está presente en los sistemas biológicos en traza pequeñas, sin embargo, en los seres humanos, debido a que el torio se deposita preferentemente en los huesos y a que se elimina biológicamente de manera muy lenta, las concentraciones de torio en los huesos aumentan con la edad (Eisenbud, 1997).

En general, la movilización de uranio, torio y demás isótopos de radionucleidos que se lixivian de minerales o rocas, se rigen por varios factores que incluyen la condición física del mineral / roca, el desequilibrio químico, la polimerización, las reacciones químicas, la naturaleza de su incrustación en el mineral / roca y la composición química del agua de lixiviación (Zukin et al., 1987).

Las series de uranio, torio y otros minerales que existen en estas formaciones generalmente emiten radiaciones gamma naturales, emisiones de partículas alfa y beta cuando sus átomos inestables intentan alcanzar la estabilidad emitiendo tal exceso de energía.

La relación entre la radiación gamma natural emitida por el torio y el uranio en estas rocas de formación se utiliza como indicador de la presencia de hidrocarburos mediante una combinación de registros geoquímicos, registros espectrales de rayos gamma, registros de neutrones y resistividad.

3.4 Concentraciones de TENORMs en los Hidrocarburos

El termino hidrocarburo es un concepto amplio e incluye el crudo y sus productos, el gas natural, el bitumen y otros. Un término que se usa indistintamente para referirse a los hidrocarburos

es "petróleo", el cual hace referencia al petróleo crudo, pero a veces se puede usar para describir cualquier hidrocarburo sólido, líquido o gaseoso (Hrichi et al., 2013).

El petróleo crudo es un tipo de líquido naturalmente inflamable y se puede encontrar en depósitos naturales ubicadas en formaciones geológicas debajo de la superficie de la tierra. Dicho líquido es en una mezcla compleja con diferentes pesos moleculares de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos. La mayoría de los componentes del petróleo son fósiles que se forman cuando una cantidad considerable de organismos muertos, generalmente zooplancton y algas, se entierran bajo rocas sedimentarias y se someten a temperaturas y presiones intensas; luego, el petróleo se lleva a la superficie y sus componentes se separan en un número sustancial de productos derivados del petróleo de consumo, estos productos incluyen diesel, benceno, gasolina, combustible para aviones, gas natural, queroseno, varios tipos de aceite, asfalto, azufre y reactivos químicos utilizados en plásticos, lociones, tratamientos y otros (Islam, B. 2015).

Los resultados de un estudio en Argelia (Hamlat, 2001), muestran que las concentraciones de ^{226}Ra en el petróleo crudo están en el rango de 6-20 Bq/kg, que es un valor aceptable según los valores establecidos por la OIEA, la OMS, la EPO y otros. Asimismo, un estudio realizado en Egipto informó que la concentración de ^{226}Ra en el crudo llegó a valores máximos de 2669 Bq/L (Bakr, 2010) los cuales ya se muestran peligrosos. Por otro lado, los resultados para el uranio en Arabia Saudita fueron de valores bajo los límites de detección, donde evidentemente la concentración de uranio es particularmente baja en el crudo (Al-Saleh, 2008); al igual en los Estados Unidos, resultados de un estudio muestra bajas concentraciones de uranio en el crudo, con un rango de 0,0015 a 0,015 ppm, valores que se consideran típicos (Ball et al., 1960). Al analizar los resultados en diferentes partes del mundo se puede concluir que la presencia de radionucleidos varía significativamente dependiendo del lugar donde se tome la muestra. Los resultados de los

estudios llevados a cabo en diferentes partes del mundo y que muestran las concentraciones de radionucleidos en los hidrocarburos, han sido recopilados y se muestran en la Tabla 77.

Tabla 7

Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORM en los hidrocarburos y sus derivados al rededor del mundo.

Concentraciones del TENORM en crudo con su		
País	rango, promedios y unidades	Bibliografía
Arabia Saudita	^{238}U BLD ^a , ^{232}Th 0.30a, ^{226}Ra 0.65a, ^{224}Ra <, ^{40}K 4.3 Bq/kg	Al-Saleh et al., 2008
	^{238}U <8.5, ^{232}Th <0.62, ^{226}Ra <0.45, ^{224}Ra <0.598, ^{40}K (0.13–57.05) Bq/kg	Al-Harshan et al., 2008
Argelia	^{226}Ra (6–20) Bq/g	Hamlat et al., 2001
Egipto	^{226}Ra 3.02, ^{228}Ra < 0.02, ^{40}K < 0.2 Bq/kg	Othman et al., 2018
	^{226}Ra (31–2669), ^{232}Th (<–913.4), ^{40}K (<98) Bq/L	Bakr, 2010
	^{226}Ra (<21.30), ^{232}Th (<10.50), ^{40}K (56.6–126) Bq/kg	Hassan et al., 2019
Ghana	^{226}Ra (2.42–10.14), ^{40}K (21.08–34.39), ^{232}Th (11.5–12.65), Bq/kg	Darko et al., 2012
	^{226}Ra (0.12–17.81), ^{40}K (0.15–43.46), ^{232}Th (0.11–18.19) Bq/kg	Kpeglo et al., 2012
Iraq	^{238}U (15.23–33.16), ^{232}Th (5.82–19), ^{40}K (14.9–422.28), ^{137}Cs (1.17–10.64) Bq/L	Khadhim et al., 2016
	^{226}Ra 33.6, ^{232}Th 13.0, ^{40}K 197.0 Bq/kg	Ali et al., 2017
	^{226}Ra (2.30–5.80), ^{232}Th (2.90–5.50), ^{40}K (5–36) Bq/kg	Ali K. et al., 2017
Malasia	^{238}U (13–40), ^{232}Th (37–48), ^{226}Ra (104–167), ^{228}Ra (117–158) Bq/kg	Puad et al., 2004
Nigeria	^{40}K (2.24–19.73), ^{238}U (<1.29), ^{232}Th (<0.25) Bq/kg	Ajayi et al., 2009
	^{238}U (0.0000001–0.01), ^{226}Ra (0.0001–0.04), ^{210}Po (0–0.01) ^{232}Th (0.00003–0.002) Bq/L	Babatunde et al., 2019
Sudan	^{238}U 64.11, ^{232}Th 63.69, ^{40}K 22.13 Bq/kg	Ali et al., 2019
Túnez	^{226}Ra (0.106–0.38), ^{232}Th (0.02–0.12), ^{40}K (0.057–1.308) Bq/kg	Hrichi et al., 2013
Turquía	^{224}Ra (3–11), ^{226}Ra (5–16), ^{228}Ra (2–10) Bq/kg	Parmaksız et al., 2015
USA	^{238}U (0.0015–0.015) ppm, ^{226}Ra (1–40) Bq/g	Ball et al., 1960
	^{238}U (0.0001–10), ^{226}Ra (0.1–40), ^{210}Po (0–10), ^{232}Th (0.03–2) mBq/g	Snaveley, 1989
	^{222}Rn (5–200 000), ^{210}Pb (0.005–0.02) ^{210}Po (0.002–0.08) Bq/m ³	Landa, 2007
Venezuela	^{228}Th 112, ^{226}Ra 16, ^{212}Pb 63, ^{214}Pb 17, ^{208}Tl 27, ^{214}Bi 16.7, ^{212}Bi 70, ^{228}Ac 14, ^{232}Th 0.48, ^{232}Th 38, ^{235}U 4×10^{-4} , ^{238}U 0.65, ^{40}K 20 Bq/kg	Barescut et al, 2005

Nota. Los valores máximos recomendados de radiactividad que puede contener un material, antes de ser considerado peligroso según la normativa internacional, medidos en Bq/g, son: ^{238}U 1×10^1 , ^{234}Th 1×10^3 , ^{234}Pa 1×10^1 , ^{234}U 1×10^1 , ^{230}Th 1×10^0 , ^{226}Ra 1×10^1 , ^{222}Rn 1×10^1 , ^{214}Pb 1×10^2 , ^{210}Pb 1×10^1 , ^{210}Bi 1×10^3 , ^{210}Po 1×10^1 , ^{232}Th 1×10^1 , ^{228}Ra 1×10^1 , ^{228}Ac 1×10^1 , ^{228}Th 1×10^0 , ^{224}Ra 1×10^1 , ^{220}Rn 1×10^4 , ^{212}Pb 1×10^1 , ^{212}Bi 1×10^1 . BLD^a Significa que está bajo los límites de detección /Los datos entre paréntesis indican el rango.

En particular, para el caso de Venezuela, los datos reportados son provenientes del análisis realizado a muestras de combustibles y cenizas, el primero refinado a partir de crudos pesados y medianos, las muestras fueron tomadas en dos plantas termoeléctricas, una ubicada cerca a Caracas llamada Ricardo Zuluaga y otra en el litoral del Estado de Carabobo llamada Planta Centro. Es importante resaltar que los estudios sobre radioisótopos para países latinoamericanos son de difícil acceso o no se han llevado a cabo con regularidad, la información disponible sobre esta zona del planeta es escasa o confidencial, en comparación con los países africanos, europeos y los ubicados en el norte del continente americano.

3.5 Concentraciones de TENORMs en los Desechos Petroleros

Los ripios que se abordarán en este trabajo se enfocarán en el agua producida, las escamas y el lodo de perforación.

3.5.1 Agua producida

La extracción de crudo a menudo está acompañada por la producción de grandes cantidades de agua, según Ali, M. et al. (2019) de los desperdicios generados por la industria petrolera, el agua producida representó el 91% del total de los desechos y los TENORMs son arrastrados a la superficie por el agua de formación, por ello a mayor cantidad de agua mayor proporción de TENORMs; Se estima que se coproducen entre 3 y 9 barriles de agua con cada barril de petróleo,

con más de 250 millones de barriles por día de agua producidos a nivel mundial y más del 40% descargado al medio ambiente (Igunnu et al., 2014).

Dicho de otro modo, el agua contaminada con TENORM debe considerarse como un importante desperdicio a tener en cuenta y el rango de concentración de radiactividad, de dicha agua, suele oscilar entre 1 y 10 Bq/kg (Othman, I. et al., 2005).

El agua producida usualmente es una mezcla de compuestos orgánicos entre los que se encuentran, inhibidores de incrustaciones y corrosión añadidos a la producción de hidrocarburos, aditivos químicos residuales, ácidos orgánicos e hidrocarburos disueltos y dispersos, además de compuestos inorgánicos como el radón y/o radio disueltos, partículas en suspensión (radionucleidos resultado del estado de solubilidad y movilidad del U y Th), oligoelementos y sales disueltas, así lo explica Neff, J. M. (2002). La complejidad química de las aguas producidas da lugar a su capacidad para ser el principal contribuyente en la formación de escamas en los equipos de producción, que poseen una gran variedad de minerales. Esta misma variabilidad física química de las aguas de producción es cambiante alrededor del mundo y se alteran significativamente debido a muchos factores, los principales podrían ser: la geología del reservorio con el que el agua producida ha estado en contacto durante muchos años (cientos de miles), el tipo de hidrocarburo que se está produciendo, la ubicación del campo y la vida útil del yacimiento, debido a que las propiedades químicas y el volumen se alteran con el tiempo (Li et al., 2013).

En la Tabla 88 se muestra una compilación de resultados de niveles de radiactividad en el agua de producción en diferentes partes del mundo.

El agua producida, el principal desperdicio en términos de cantidades, resultante de la operación de la industria del petróleo, también se dice que la principal fuente de TENORM en las

industrias del petróleo son los radionucleidos en los flujos de agua producida y los radionucleidos microscópicos suspendidos, que luego se transporta a la superficie.

Tabla 8

Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en el agua producida al rededor del mundo.

País	Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en el agua producida al rededor del mundo	Bibliografía
Argelia	^{226}Ra (5.1–14.8) Bq/g	Hamlat et al., 2001
Argentina	^{238}U (10.0–33.0) $\mu\text{g/L}$, ^{226}Ra (1.7E-3–26.8), ^{228}Ra (1.1E-3–9.6) Bq/L	Ali, M et al., 2019
Azerbaiyán	^{226}Ra (<101.07), ^{232}Th (<13.71), ^{40}K (26.1–194.5) Bq/L	Khalilova, 2016
Brasil	Ba (0.36–25.7) 8.80 mg/L, ^{226}Ra (0.012–6.0) ^{228}Ra (<0.05–12.0) Bq/L	Vegueria et al., 2002
Congo	^{238}U < 4.5E-3, ^{232}Th < 4.5E-3, ^{226}Ra 5.1 Bq/dm ³	Testa et al., 1994
Egipto	^{226}Ra (1.07–34.15), ^{228}Ra (<0.02–13.26), ^{40}K (3.6–15.37) Bq/kg	Othman et al., 2018
	^{226}Ra (5–40), ^{214}Pb (0.8–27), ^{214}Bi (1.3–27), ^{228}Ac (1.1–59), ^{212}Bi (0.7–12), ^{208}Tl (1.1–4), ^{40}K (19–43) Bq/kg	Doyi et al., 2016
	^{226}Ra (7.98–17.82), ^{232}Th (4.55–9.60), ^{210}Pb (4.03–41.49), ^{40}K (31.55–166.88) 98.14 Bq/kg	El-Kameesy et al., 2017
	^{238}U (9.47–25.2), ^{232}Th (7.33–22.6), ^{40}K (632.5–1448.7) Bq/L	Zakaria et al., 2018
	^{226}Ra 8.04, ^{232}Th 8.62, ^{210}Pb 35.86, ^{40}K 72.84 Bq/kg	El-Kameesy et al., 2017
	^{226}Ra (29.8–46.3), ^{228}Ra (8.5–10.2) Bq/L	Attallah et al., 2013
Ghana	^{238}U (0.11–1.03), ^{232}Th (0.21–0.56), ^{40}K (1.65–11.99) Bq/kg	Faanu et al., 2011
	^{234}U (<6.10), ^{238}U (<5.50), ^{210}Po (22–145), ^{230}Th (2.9–15), ^{232}Th (1.6–5.6) Bq/L	Kpeglo et al., 2016
	^{226}Ra (6.20–22.30), ^{228}Ra (6.40–35.50), ^{228}Th (0.71–6.41), ^{224}Ra (0.78–7), ^{40}K (5.90–23.90) Bq/L	Kpeglo et al., 2015

Irán	^{226}Ra (<28), ^{228}Ac (<10), ^{235}U (<1.6), ^{214}Pb (<334.1), ^{214}Bi (<471), ^{40}K (4.4–43.7), ^{238}U (30–211), ^{208}Ti (4–44.3), Bq/L	Moatar et al., 2010
Iraq	^{238}U 4.12, ^{232}Th BLD ^a , ^{40}K 14.16, ^{137}Cs 11.16 Bq/L ^{226}Ra 20.3, ^{232}Th 9.4, ^{40}K 66.4 Bq/kg	Khadhim et al., 2016 Ali, K. et al., 2017 Ali, K. et al., 2017
Italia	^{226}Ra 1.20, ^{232}Th 9.4, ^{40}K 66.4 Bq/kg ^{238}U (7.3E-3 –1.5E-2), ^{232}Th < 4.5E-3 ^{226}Ra (0.06–20) Bq/dm ³	Testa et al., 1994
Nigeria	^{226}Ra 8.9, ^{228}Ra 8.1, ^{40}K 39.8 Bq/L ^{228}Ra (0.75–12.30), ^{226}Ra (2.01–13.19), ^{40}K (9.08–155.22), Bq/L	Agbalagba et al., 2013 Avwiri et al., 2013
Noruega	^{226}Ra 3.3, ^{228}Ra 2.8 Bq/L, ^{210}Pb < 10, ^{210}Po <BLD mBq/L	Gaefvert et al., 2005 Eriksen et al., 2006
Omán	^{226}Ra (0.5–16), ^{228}Ra (0.5–21), ^{210}Pb –BLD Bq/L ^{228}Ac (1019–1040), ^{226}Ra (514–529), ^{40}K (1522–1535), Bq/L	Pillay et al., 2010
Polonia	^{40}K (5–499), ^{238}U < 30, ^{226}Ra <2, ^{210}Pb < 5, ^{228}Ra < 2, ^{228}Th < 2 Bq/L	Jodłowski et al., 2017
Reino Unido	^{226}Ra (0.16–90), ^{228}Ra (0.5–12) Bq/L	D.E.C.C. et al., 2014
Rumania	^{226}Ra (0.002–1200), ^{228}Ra < 0.001 Bq/L ^{238}U (0.043–1.1), ^{226}Ra (23–45), ^{232}Th (0.2–8), ^{40}K (221–899) Bq/L	Mykowska et al., 2014 Botezatu et al., 2004
Siria	^{226}Ra (13.8–111.2), ^{228}Ra (12.4–67.4), ^{224}Ra (0.2–3.7) Bq/L ^{224}Ra (0.2–3.7) Bq/L	Al-Masri, 2006 Othman et al., 2018 Ghafar et al., 2017
Túnez	^{226}Ra 186.2, ^{232}Th 19.2, ^{40}K 1460.8 Bq/kg ^{226}Ra (9.90–111.2), ^{224}Ra (0.20–3.70), ^{228}Ra (8.80–67.40), Bq/L	Al-Masri, 2006 Hrichi et al., 2013
Turquía	^{226}Ra 19, ^{232}Th 39.9, ^{40}K 66 Bq/kg ^{224}Ra (1–4) 2.83, ^{226}Ra (3–10) 6, ^{228}Ra (1–4) 3.17 Bq/L	Parmaksız et al., 2015

Ucrania	^{224}Ra (1.57–5.51), ^{226}Ra (27.40–39.80), ^{222}Rn (16.87–19.77), ^{228}Ra (3.20–5.57), ^{230}Th (0.06–0.19), ^{232}Th < 0.001, ^{234}U 0.01, ^{238}U 0.01 Bq/dm ⁻³	Plyatsuk et al. 2017
USA	^{226}Ra (2–56), ^{228}Ra (2–22) Bq/L	Lagera et al., 1999
	^{226}Ra (30–2690), ^{228}Ra (35–763) Bq/L	McDevitt et al., 2019
	^{226}Ra (<0.002–58), ^{228}Ra (0.02–59) Bq/L	Kraemer et al., 1984
	^{226}Ra (20–147), ^{228}Ra (3–40), Bq/L	Habib et al., 2014
	^{238}U (0.0003–0.10), ^{226}Ra (0.002–1200), ^{210}Pb (0.05–180), ^{232}Th (0.0003–0.001), ^{228}Ra (0.30–180) Bq/L	Gardner et al., 2003
	^{226}Ra BLD, ^{228}Ra (<3.6), ^{238}U BLD, ^{235}U BLD, ^{137}Cs BLD, ^{40}K (<9.8), Bq/L	Ali, M. et al., 2019
	^{226}Ra (<13 033), ^{228}Ra (<1485) Bq/L	Zhang, 2015
	^{226}Ra (0.74–8.88), ^{228}Ra (0.02–0.17) Bq/L	Bandong et al., 2005
	^{226}Ra (14.8–2601) Bq/g	Christie, 2012

Nota. Los valores máximos recomendados de radiactividad que puede contener el agua, antes de ser considerada peligrosa según la normativa internacional, medidos en Bq/L, son: ^{238}U 4.5×10^{-8} , ^{234}U 4.9×10^{-8} , ^{230}Th 2.1×10^{-7} , ^{226}Ra 2.8×10^{-7} , ^{210}Pb 6.9×10^{-7} , ^{210}Po 1.2×10^{-7} , ^{232}Th 2.3×10^{-7} , ^{228}Ra 6.9×10^{-7} , ^{228}Th 7.2×10^{-8} . BLD^a significa que está bajo los límites de detección / Los datos entre paréntesis significan el rango / Los datos solos son los promedios de concentración.

La principal fuente de TENORM en la industria del petróleo, según Ali, M. et al. (2019), son el radionucleido microscópico suspendido y el disuelto, que se transportan a la superficie en el agua y los hidrocarburos producidos, siendo el suspendido, resultado del estado de solubilidad y movilidad del U y Th.

Como puede observarse en la Tabla 88, Las concentraciones de actividad de los isótopos de radio en la mayoría de los estudios van desde bajos límites de detección (BLD) hasta menos de 100 Bq / L. La mayoría de los resultados aparecen en el rango más bajo incluso en 10 Bq / L.

Estudios anteriores han demostrado que el U y el Th no migran mucho durante la extracción de petróleo y gas, por otro lado, el ^{40}K es un elemento abundante en el agua producida y como se muestra en los informes anteriormente mostrados, el ^{40}K se manifestó en aguas producidas en las industrias del petróleo de Egipto, Túnez y Nigeria.

El ^{137}Cs también está presente en el agua producida por las industrias petroleras, como es el caso de Estados Unidos e Irak. Sobre las concentraciones de los nucleidos ^{210}Po , ^{210}Pb y ^{228}Th en el agua producida la información disponible es escasa en comparación con los isótopos Ra, lo cual es preocupante debido a su alta radiactividad. En 1997, se informó la presencia de radionucleidos ^{210}Po , ^{232}Th , ^{226}Ra y ^{228}Ra en el agua producida, en procesos de descarga y en modelos ambientales asociados con instalaciones de producción costa afuera de Louisiana/Texas en los Estados Unidos (Lagera, L., et al. 1999), los valores de radioisótopos correspondientes fueron ^{226}Ra (2–56) y ^{228}Ra (2–22) Bq/L, para el agua producida y ^{232}Th (14.5–150.3) Bq/g, ^{210}Po (0–10) mBq/g en procesos de descarga y modelos, pero su información reciente en aguas producidas es insuficiente. Esta condición puede afectar a los trabajadores, el público en general, las plantas, el medio ambiente circundante y los organismos marinos que viven cerca de las plataformas de petróleo y gas.

3.5.2 Escamas

Las escamas o incrustaciones, de acuerdo a lo planteado por Doyi, I. (2016), son uno de los desechos adicionales en la industria del gas y el petróleo que se adhieren, sedimentan y obstruyen el flujo de fluidos en la operación, están compuestos por materiales complejos que contienen las formaciones geológicas, dichos materiales a menudo están formados de metales alcalinotérreos, como silicato, carbonato y sulfato (particularmente BaSO_4 , SrSO_4 y CaCO_3). Estos materiales son generados por diversos procesos físicos y químicos, como la inyección de agua en

reservorios, cambios de presión, temperatura, evaporación en tubos de extracción de gas, cambios en el balance del pH, expansión de fluidos, cambios en la acidez del agua, mezcla inconsistente del agua, diferentes caudales y aditivos o impurezas presentes durante la extracción. Los mencionados procesos facilitan la deposición de las escamas, junto con ellas el radio, que sumado a otros elementos como el azufre, estroncio y calcio, (los cuales gracias a su composición química) dan pie a la formación de carbonato de radio, sulfato de radio y en algunos casos, silicato de radio, haciendo parte de la deposición de escamas. En suma a lo planteado, la acidez del agua de formación y su salinidad, los cambios bruscos de presión y temperatura son factores que contribuyen a la acumulación de escamas.

El American Petroleum Institute (Otto, G. H. 1997) informó que las escamas en la industria del petróleo y el gas que a menudo se encuentran dentro de tuberías, pueden llegar a tener concentraciones de radiactividad que alcanzan las decenas de miles de Bq/g; estas concentraciones alcanzan sus valores máximos en las tuberías de boca de pozo y en las tuberías de producción, sin embargo, buena parte de las de incrustaciones se dan en tres áreas principalmente: las líneas de agua asociadas con los separadores de gas, los tratadores térmicos y los deshidratadores de gas, donde los sedimentos pueden acumularse en tamaños de hasta 4 pulgadas de espesor (datos suministrados por la EPA, 2021). La concentración media de radionucleidos en las escamas es de 17,76 Bq / g (aproximadamente 18 000 Bq/kg o 480 pCi/g). Este valor puede ser mucho más alto (hasta 148 000 Bq/g) y depende de la geología. Las incrustaciones provenientes de los pozos de gas y el equipo usado para tratarlo, también pueden contener elementos hijos del radón, como ^{210}Pb y ^{210}Po y demás.

En la Tabla 99 se incluyó varios estudios sobre los radionucleidos presentes en las escamas generadas en la industria del petróleo y el gas en diferentes partes del mundo. Las muestras se

obtuvieron en las instalaciones, principalmente en los separadores, tanques de almacenamiento de petróleo y gas y tuberías.

Algunos ejemplos incluyen las escamas formadas en los campos en Rusia, Brasil, Ghana, Rumania, entre otros, la composición de las incrustaciones pueden contener azufre, carbonato, sulfato y silicato, pero los principales tipos de escamas son Sulfato de bario (BaSO_4), Sulfato de estroncio (SrSO_4) y Sulfito de calcio (CaSO_3), y de las mencionadas la escama más común es BaSO_4 , también conocida como barita, que tiene forma de un polvo cristalino y cuyas características pueden variar según las impurezas cristalinas presentes durante el asentamiento, la variación en las densidades y si las impurezas son químicamente inertes o insolubles en agua (Attallah, M. F., 2012).

Tabla 9

Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en las incrustaciones en campos al rededor del mundo

País	Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en las incrustaciones al rededor del mundo	Bibliografía
Alemania	^{226}Ra (850–100000), ^{228}Ra (<240000), ^{210}Pb (1400–70000), ^{228}Th (<48000), ^{227}Ac (<2500) Bq/kg	Kolb et al., 1985
Arabia Saudita	^{238}U < BLD, ^{232}Th (0.14–3.10), ^{226}Ra (0.80–1.50), ^{40}K (4.30–9.60), ^{235}U < BLD ^{224}Ra (1.40–2.71) Bq/kg	Al-Saleh et al., 2008
Argelia	^{226}Ra (1–950) Bq/g	Hamlat et al., 2001
Argentina	U (<0.4–1.9) mg g ⁻¹ , ^{226}Ra (<0.1–1270), ^{228}Ra (115–1670) Bq/g	Pillai et al., 2007
Brasil	^{226}Ra (19.1–323), ^{228}Ra (4.21–235) kBq/kg	Gazineu et al., 2004
	^{226}Ra (120.80–3500), ^{228}Ra (147.90–2195) kBq/kg	Xhixha et al., 2013
	^{226}Ra (77.90–2110), ^{228}Ra (101.50–1550), ^{40}K (16–144.60) kBq/kg	Gazineu et al., 2008

	^{226}Ra (109.60–2110) Bq/kg	Mykowska et al., 2014
	^{226}Ra (16.10–93.20), ^{228}Ra (4.04–36.8), ^{228}Th (4.46–18.5) kBq/kg	Mykowska et al., 2014
Congo	^{226}Ra (120.80–955), ^{228}Ra (131.40–792) kBq/kg	Barescut et al 2005
Egipto	^{238}U (0.9–2.7), ^{232}Th (0.8–2.2), ^{226}Ra (97–151) Bq/kg	Testa et al. 1994
	^{238}U (4500–11800), ^{226}Ra (43000–120000), ^{214}Pb (41900–97500), ^{214}Bi (42500–99700), ^{210}Pb (4200–6500), ^{223}Ra (1700–5700), ^{228}Ac (19100–43700), ^{212}Bi (21400–42500), ^{212}Pb (17000–38500), ^{208}Tl (20300–39000), ^{40}K (1100–4800), ^{228}Ra 24000 Bq/kg	Attallah et al., 2012
	^{226}Ra (7541–143262), ^{228}Ra (35 460–368 654), ^{214}Pb (18215–322604), ^{214}Bi (17627–320008), ^{212}Bi (<368654), ^{208}Tl (<8615), ^{40}K (2914–45882) Bq/kg	Shawky et al., 2001
	^{226}Ra 37.28, ^{232}Th 45.70, ^{210}Pb 34.77, ^{40}K 621.79, Bq/kg	El-Kameesy et al. 2016
	^{238}U (9140–285 823) 147481.5, ^{232}Th (427–34 339) 17383, ^{40}K (51–1031) Bq/kg	Mansour et al., 2012
	^{226}Ra (493–519), ^{223}Th (35.38–54.08), ^{40}K (<0.177) Bq/kg	Abo-Elmagd et al., 2010
	^{226}Ra (7–314.8), ^{223}Th (<DL–177.3), ^{40}K (<223.0), Bq/kg	Bakr, 2010
	^{238}U 2500, ^{226}Ra 11700, ^{210}Pb 12800, ^{228}Ra 4200, ^{224}Ra 3900 Bq/kg	Attallah et al., 2013
	^{226}Ra (13–31), ^{228}Ra (5–9), ^{40}K (0.271–0.324) kBq/kg	Attallah et al 2018
	^{226}Ra (14.1–8.9), ^{228}Ra (5.0–9.5) kBq/kg	El Afifi et al., 2005
	^{226}Ra 68.9, ^{228}Ra 24 Bq/g	Hilal et al., 2018
Ghana	^{238}U (568–729), ^{226}Ra (2874–2197), ^{210}Pb (997–1643), ^{228}Ra (574–696), ^{224}Ra (678–894), ^{40}K (456–687), ^{235}U (23.3–29.9) Bq/g	Abdelbary et al., 2019
	^{226}Ra (38.5–58.3) 43.9, ^{210}Pb (0.20–0.60), ^{228}Ra (26.8–39.2), ^{228}Th (6–15.9), ^{224}Ra (8.8–15.4), ^{40}K (1.3–2.3), kBq/kg	García et al., 2016
	^{226}Ra (28.22–47.54), ^{40}K (42.65–44.05), ^{232}Th (16.90–40) Bq/kg	Darko et al. 2012

Indonesia	^{226}Ra (78–36106), ^{228}Ra (127–222974), ^{228}Th (144–90887), ^{238}U (<13030), ^{232}Th (<6024), ^{40}K (20–5496) Bq/kg	Wisnubroto, 2005
Iraq	^{238}U (11.22–32.62), ^{232}Th (6.28–26.56), ^{40}K (51.22–277.59), ^{137}Cs (<3.05) Bq/kg ^{226}Ra (137.6–152.4), ^{232}Th (34.4–49.4), ^{40}K (462–750.3) Bq/kg ^{226}Ra (61.80–128.40), ^{232}Th (12.80–26.80), ^{40}K (82.60–83.10) Bq/kg	Khadhim et al., 2016 Ali et al., 2017 Ibraheem et al., 2017
Italia	^{238}U (0.9–53.8), ^{232}Th (0.8–18.9), ^{226}Ra (2.7–1126) Bq/kg	Testa et al. 1994
Kazajistán	^{226}Ra (510–51000), ^{228}Ra (200–10000) ^{212}Pb (100–11000), ^{214}Pb (510–49 000), ^{212}Bi (100–12000), ^{208}Tl (100–10 100), ^{234}Th (2000–3000) Bq/kg	Feofanov et al., 2005
Malasia	^{226}Ra (550–434000), ^{228}Ra (900–479000) Bq/kg	Omar et al., 2004
Noruega	^{226}Ra (4.9–100), ^{228}Ra (0.40–28.90), ^{210}Pb (0.2–49) Bq/g	Varskog et al., 2005
Reino Unido	^{226}Ra (58.80–131.60), ^{214}Pb (47.50–119.70), ^{214}Bi (49.90–127.20), ^{210}Pb (6.30–11.50), ^{228}Ra (17– 59.60), ^{212}Pb (18.70–49.10), Bq/g, ^{238}U (0.94–5.17), ^{232}Th (0.18–0.86) Bq/kg ^{226}Ra (1–15 000), ^{232}Th (0.001–0.002), Bq/kg	Garner, 2017 Mykowska et al., 2014
Rumania	^{226}Ra (20–9260) Bq/kg	Botezatu et al., 2004
Rusia	^{226}Ra (0.03–7.93), ^{232}Th (0.02–5.09), ^{40}K (<2.28), kBq/kg	Galitskaya et al., 2015
Siria	^{224}Ra (27–115), ^{226}Ra (147–1050), ^{228}Ra (43–181), ^{210}Po (224–2371), ^{210}Pb (<12–174) Bq/g ^{226}Ra (0.3–1520), ^{224}Ra (0.1–780), ^{228}Ra (0.6–868) Bq/kg ^{226}Ra (5.90–215), ^{224}Ra (1.90–96.10), ^{228}Ra (2.30–83.30), Bq/kg ^{226}Ra (2–2922), ^{228}Ra (0.3–254), Bq/kg ^{226}Ra (226–306), ^{210}Pb (263–42) Bq/g ^{226}Ra (1317–2039), ^{210}Pb (843–1036) Bq/g	Al-Masri et al., 2005 Al-Masri et al., 2005 Al-Masri, 2006 Al Attar et al. 2015 Al Abdullah et al., 2017 Al Attar et al., 2016

	^{226}Ra (5900–215000), ^{228}Ra (2300–4000), ^{224}Ra (1900–96 100) Bq/kg	Kolb et al., 1985
	^{238}U (358.05–4106.9), ^{232}Th (375.88–2736.7), ^{40}K (16.07–9294) Bq/kg	Abdelmoniem, 2016
Túnez	^{238}U (0.9–7.6), ^{232}Th (0.8–5.1), ^{226}Ra (31–1189) Bq/kg	Testa et al. 1994
	^{226}Ra (51–136), ^{232}Th (59–177), ^{40}K (5.1–105) Bq/kg	Hrichi et al., 2013
Turquía	^{224}Ra (<1–520), ^{226}Ra (13–132 000), ^{228}Ra (<1–453) Bq/kg	Parmaksız et al., 2015
USA	^{210}Pb 1370, ^{226}Ra 6230, ^{228}Ac 565, ^{228}Ra 565 Bq/kg	Landsberger et al. 2012
	^{226}Ra (15400–76100) Bq/kg, ^{222}Ra (0.037–0.153) fracción de emanación	White et al., 2001
	^{40}K (<0.032), ^{226}Ra (<0.7), ^{228}Ra (<0.15) Bq/g	Ali, M. et al., 2019
	^{238}U (0.001–0.50), ^{226}Ra (0.1–15000), ^{210}Pb (0.02–2000), ^{210}Po (0.02–1.5), ^{232}Th (0.001–0.07), ^{228}Ra (0.05–2800) Bq/g	Landa, 2007
	^{210}Pb 19250, ^{226}Ra 90190, ^{228}Ra 23286 Bq/kg	Landsberger et al. 2013
	^{226}Ra 13.3, ^{210}Pb 13.3, ^{210}Po 13.3, ^{228}Ra 4.44, ^{228}Th 4.44 Bq/kg	Fournier et al. 2000
	^{226}Ra (0.031–0.27), ^{228}Ra (0.006–0.084) Bq/g	Habib et al., 2014

Nota. Los valores máximos recomendados de radiactividad que puede contener un material, antes de ser considerado peligroso según la normativa internacional, medidos en Bq/g, son: ^{238}U 1×10^1 , ^{234}Th 1×10^3 , ^{234}Pa 1×10^1 , ^{234}U 1×10^1 , ^{230}Th 1×10^0 , ^{226}Ra 1×10^1 , ^{222}Rn 1×10^1 , ^{214}Pb 1×10^2 , ^{210}Pb 1×10^1 , ^{210}Bi 1×10^3 , ^{210}Po 1×10^1 , ^{232}Th 1×10^1 , ^{228}Ra 1×10^1 , ^{228}Ac 1×10^1 , ^{228}Th 1×10^0 , ^{224}Ra 1×10^1 , ^{220}Rn 1×10^4 , ^{212}Pb 1×10^1 , ^{212}Bi 1×10^1 . BLD^a significa que está bajo los límites de detección / Los datos entre paréntesis significan el rango / Los datos solos son los promedios de concentración.

Entre los casos mostrados en la Tabla 99, resaltan aquellos cuyos valores de radiactividad son peligrosamente altos, entre estos se tienen a campos del Norte de Alemania donde las incrustaciones de celestobarita (Ba/SrSO₄) y deposiciones de óxido de silicio (SiO₂), entre otras,

que se encuentran en los tanques de almacenamientos de salmuera, tienen rangos de ^{228}Th (<48000) y ^{226}Ra (850–100000) (Kolb et al., 1985); otro caso a resaltar es el mostrado en Egipto, centrando la atención en tres áreas, en la Gobernación del Sinaí Sur, en el área del Golfo de Suez y en la Gobernación de Matrouh, en donde las muestras de incrustaciones recolectadas, presentan actividades elevadas de concentración de radionucleidos como: ^{238}U (4500–11800), ^{226}Ra (43000–120000), ^{214}Pb (41900–97500), ^{228}Ac (19100–43700), ^{212}Bi (21400–42500), ^{212}Pb (17000–38500), ^{208}Tl (20300–39000) y ^{214}Bi (42500–99700), que superaron el nivel de exención de 10.000 Bq/kg recomendado por las normas de seguridad del IAEA. En las observaciones recopiladas por Attallah et al., 2012 y la EPA, se han generado estimaciones de la cantidad total de desechos radiactivos producto de la extracción de hidrocarburos, supone que se generan anualmente 100 toneladas de incrustaciones por pozo de petróleo en los Estados Unidos, mientras que para los pozos del Mar del Norte se intuye un valor algo menor de aproximadamente 20 toneladas y sólo 2,25 toneladas por un pozo productor en el año para los países productores de América Latina. También se estimó que aproximadamente $2,5 \times 10^4$ y $2,25 \times 10^5$ toneladas de incrustaciones y lodos contaminados, respectivamente, se generaron cada año de la industria del petróleo a mediados de la década anterior.

Desde el punto de vista de la evaluación y gestión de riesgos, este sigue siendo un tema debatible, mientras que, la probabilidad de contaminación es baja, las consecuencias del riesgo podrían ser altas, teniendo en cuenta el volumen de las plantas pertenecientes a la industria petrolera distribuidas en todo el mundo vs. el número de trabajos de mantenimiento de rutina y personas involucradas. Desafortunadamente, hay muchas industrias que no realizan estudios ni evaluaciones que midan las dosis recomendadas de radiactividad. El mantenimiento rutinario de

las instalaciones donde se generan las incrustaciones debe realizarse teniendo en cuenta los valores de dosis para minimizar el riesgo de contaminación para los trabajadores y el medio ambiente.

3.5.3 Lodos de Retorno

El lodo de retorno es una sustancia viscosa que consta de una mezcla compleja que contiene diversas cantidades de minerales de desecho, aceites usados, aguas residuales, arena y otros elementos (Islam, B. 2015) además de contener hidrocarburos, metales pesados, radionucleidos naturales, sedimentos y, en menor medida, escamas y productos de corrosión (Omar, M., et al., 2004). Esta mezcla compleja, a menudo contiene compuestos de sílice y también puede contener grandes cantidades de bario. La industria del petróleo es responsable de la generación de grandes cantidades de lodo de diferente naturaleza como los químicos, biológicos y oleosos, que son una fuente importante de contaminación ambiental, siendo los lodos oleosos desechos de mayor peligro de acuerdo con la Ley de Protección Ambiental (Environment Protection Act, expedida en Canadá en 1988) y las Reglas de Manejo de Desechos Peligrosos (expedido por el gobierno de India y respaldado por la FAO, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura). Al igual que en el agua de producción los lodos traen consigo, en su viaje a la superficie, algunos elementos radiactivos productos de las series ^{238}U y ^{232}Th , además del elemento ^{40}K (Kolb, W., et al., 1985), entre los que caben resaltar los isótopos ^{210}Pb que emiten radiación beta y gamma, ^{210}Po que emite radiación alfa, ^{226}Ra , ^{228}Ra y ^{224}Ra (isótopos Ra altamente abundantes), que imitando el comportamiento de las escamas contaminadas liberan fuertes emisiones de rayos gamma. Se estima que la concentración media de radio en los lodos es de 2.775 Bq/g (75 pCi/g) y aunque la concentración de radiación es menor en los lodos que en las escamas, los lodos son más solubles y por ende, se liberan más fácilmente al eliminarse, pues se filtran a través del suelo y contaminan gradualmente las aguas subterráneas y las poco profundas, presentando un mayor riesgo de

exposición. Si sumamos a esta situación que los procesos de producción de crudo utilizados en la perforación convencional generan grandes cantidades de lodo, convierte esta situación en un riesgo importante para el ambiente y las personas. Para tener una idea, se tiene un estimado de cinco millones de ft³ (141 mil metros cúbicos) de lodo TENORM cada año solo en EE. UU (EPA, 2021), por otro lado en Inda se producen aproximadamente 20 mil toneladas de Lodo aceitoso. Hasta el 2015, se tenían reportes de poco más de 9 mil millones de toneladas de residuos de lodos aceitosos en el planeta (Islam, B. 2015). Los lodos generados a menudo, se acumulan en los tanques de crudo, tanques de productos de refinería, desalinizadores y en otros lugares durante la producción y el procesamiento del petróleo, los cuales posteriormente se tratan para su disposición final, esto implica que la dosis de radiación externa y los riesgos asociados en las proximidades de las instalaciones de petróleo y gas aumentan a medida que se acumula más lodo. En la Tabla 1010, se muestra una recopilación de estudios hechos alrededor del mundo, donde se enlistan los niveles de radiación encontrados en lodos de perforación.

Tabla 10

Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en el lodo utilizado en campos al rededor del mundo

País	Rangos y valores promedios de las concentraciones de TENORMs en el lodo utilizado en campos al rededor del mundo	Bibliografía
Albania	²²⁶ Ra (18–20), ²²⁸ Ra (21–22), ²²⁸ Th (13–25), ⁴⁰ K (175–348) Bq/kg	Xhixha et al., 2015
	⁴⁰ K, ²²⁶ Ra (15.40–22.80), ²²⁸ Ra (17.20–25.60), ²²⁸ Th, ¹³⁷ Cs 7 Bq/kg	Xhixha et al., 2014
Arabia Saudita	²³⁸ U (10.3–52.8), ²³² Th (6.3–47.6), ²²⁶ Ra (6.8–59.4) ⁴⁰ K (79.9–594) ²³⁵ U (0.46–7.3), ²²⁴ Ra (3.57–37.7) Bq/L	Al-Saleh et al., 2008
Argentina	²³⁸ U (<0.4–0.7) µg/g, ²²⁶ Ra (1.9x10 ³ –18.7), ²²⁸ Ra (2.1x10 ³ –65.4) Bq/g	Pillai et al., 2007

Brasil	^{226}Ra (50–167.80), ^{228}Ra (48.60–152.40), kBq/kg	Gazineu et al., 2005
	^{226}Ra (0.36–367.0), ^{228}Ra (0.25–343.0) kBq/kg	Gazineu et al., 2004
	^{226}Ra (2.4–3500), ^{228}Ra (35.5–2052) kBq/kg	Barescut et al 2005
	^{226}Ra (8.10–413.40), ^{228}Ra (9.40–117.90), ^{40}K (16.20–53.70) kBq/kg	Xhixha et al., 2013
	^{226}Ra (0.20–265), ^{228}Ra (0.11–244), ^{228}Th (<0.1–172) kBq/kg	Matta et al., 2002
Egipto	^{226}Ra (<0.2–44.3), ^{228}Ra (<0.02–43.89), ^{40}K (<0.2–19.44) Bq/kg	Othman et al., 2018
	^{226}Ra (5.27–8.68), ^{223}Th (1.08–2.09), ^{40}K (<0.677) Bq/kg	Abo-Elmagd et al., 2010
	^{226}Ra 18032, ^{214}Pb 19394, ^{214}Bi 18324, ^{228}Ac 13257, ^{212}Bi 7398, ^{208}Tl 5105, ^{40}K 1261 Bq/kg	Shawky et al., 2001
	^{238}U (12.3–29.6), ^{232}Th (14.63–28.22), ^{40}K (789.4–1680.5) Bq/kg	Zakaria et al., 2018
	^{238}U 108, ^{226}Ra 11960, ^{228}Ra 1750 Bq/kg	Attallah et al., 2015
	^{226}Ra (13.10–94.20), ^{232}Th (1.50–27.70), ^{40}K (<81.80) Bq/kg	Hassan et al., 2019
	^{226}Ra (5.50–1785.80), ^{232}Th (<DL–885), ^{40}K (<880) Bq/kg	Bakr, 2010
	^{226}Ra 14.67, ^{232}Th 9.99, ^{210}Pb 68.04, ^{40}K 112.82 Bq/L	El-Kameesy et al. 2016
	^{226}Ra 8908, ^{228}Ra 933 Bq/kg	Hilal et al., 2014
	^{238}U (66–1567) 816.5, ^{40}K (787–1544) 1165.5 Bq/kg	Abo-Elmagd et al., 2010
Ghana	^{238}U 108, ^{226}Ra 11963, ^{210}Pb 2290, ^{228}Ra 1747, ^{224}Ra 1904 Bq/kg	Attallah et al., 2018
	^{226}Ra (2.84–36.09), ^{40}K (26.76–189.87), ^{232}Th (2.60–55.90) Bq/kg	Darko et al., 2012
Indonesia	^{238}U (12.40–98), ^{232}Th (4–148), ^{226}Ra (40–6129), ^{40}K (105–268), ^{228}Ra (515–7993), ^{228}Th (135–2198) Bq/kg	Bakri et al., 2003
Irán	^{226}Ra 41a, ^{210}Pb 70a, ^{210}Po 92 Bq/kg	Sedighian et al., 2014
	^{226}Ra (6.80–466.30), ^{232}Th (<47.6), ^{40}K (<154.70), Bq/kg	Taheri et al., 2019
Iraq	^{238}U 35.04, ^{232}Th 15.22, ^{40}K 149.01, ^{137}Cs 1.82 Bq/kg	Adnan et al., 2016

	^{226}Ra (235.4–321.8), ^{232}Th (48.9–140.8), ^{40}K (502.7–800.8) Bq/kg	Ali et al., 2017
	^{226}Ra (1.80–38.10), ^{232}Th (6.80–14.40), ^{40}K (12.10–242.10) Bq/kg	Ibraheem et al., 2017
Libia	^{226}Ra (5.00–19.00), ^{232}Th (2.00–12.00) Bq/kg	Mykowska et al., 2014
Malasia	^{226}Ra (6–560), ^{228}Ra (4–520), (Bq kg 1) 173 ^{238}U (13–40), ^{232}Th (37–48), ^{226}Ra (104–167), ^{228}Ra (117–158) Bq/kg	Omar et al., 2004
Noruega	^{226}Ra (<0.1–4.7), ^{228}Ra (<0.1–4.6) 210Pb < 0.7 Bq/g	Strand, 2004
Omán	^{226}Ra (0.07–0.203), 210Pb (<0.20–<0.30), ^{228}Ra (0.0094–0.0636), ^{228}Th (<0.11–<0.15) ^{40}K (0.0492–0.154) Bq/g	Al-Futaisi et al., 2007
	^{228}Ac (1019–1040), ^{226}Ra (514–529), ^{40}K (1522–1535), Bq/L	Pillay et al., 2010
Polonia	^{40}K (116–272), ^{238}U (14–393), ^{226}Ra (15–415), 210Pb (12–391), ^{228}Ra (8–516), ^{228}Th (5–515), Bq/kg	Jodłowski et al., 2017
Qatar	^{226}Ra (394.49–27 884.9), ^{232}Th (30.6–94.07), ^{40}K (62.8–110.6) Bq/kg	Al-Kinani et al., 2015
Reino Unido	^{226}Ra (0.08–27.70), ^{214}Pb (0.06–22.20), ^{214}Bi (0.03–22.50), 210Pb (0.06–3.95), ^{228}Ra (0.28–8.58), 212Pb (0.32–8.98), Bq/g, ^{238}U (1.56–9.42), ^{232}Th (0.03–0.94) Bq/kg	Garner, 2017
Rumania	^{226}Ra (21–330) Bq/kg	Botezatu et al., 2004
Siria	^{224}Ra (7620–27 700), ^{226}Ra (10050–45350), ^{228}Ra (10800–29100) Bq/kg	Al-Masri, 2006
Sudan	^{238}U (23.30–655.36), ^{232}Th (16.19–396.34), ^{40}K (16.07–238.65) Bq/kg	Abdelmoniem, 2016
Túnez	^{238}U (5–6.6), ^{232}Th (2.6–10), ^{226}Ra (66–453) Bq/kg	Testa et al., 1994
Turquía	^{224}Ra (<1–178), ^{226}Ra (1.01–988), ^{228}Ra (<1–188) Bq/kg	Parmaksız et al., 2015
Ucrania	^{226}Ra (0.012–1270), ^{214}Bi (0.105–1270), ^{214}Po (0.107–1275), ^{228}Ac (0.003–9.83), ^{212}Bi (0.012–1350), 212Pb (0.07–1.85) kBq/kg, ^{234}U (0.98–8.50), ^{238}U (0.77–8.90), ^{228}Th (63–1570), ^{232}Th < 1.0 Bq/kg	Plyatsuk et al., 2017
USA	^{210}Pb 5148, ^{226}Ra 59000, ^{228}Ac (^{228}Ra) 28501 Bq/kg	Landsberger et al., 2012
	^{238}U (0.005–0.01), ^{226}Ra (0.05–800), 210Pb (0.1–1300), 210Po (0.004–160), ^{232}Th (0.002–0.01), ^{228}Ra (0.5–50) Bq/g	Landa, 2007

^{226}Ra 2.07, ^{210}Pb 2.07, ^{210}Po 2.07, ^{228}Ra 0.7, ^{228}Th 0.7 Bq/kg	Fournier et al., 2000
^{40}K 0.82, ^{226}Ra (0.087–0.133), 1148 ^{226}Ra (4.48–34.26) Bq/g	Ali, M. et al., 2019

Nota. Los valores máximos recomendados de radiactividad que puede contener un material, antes de ser considerado peligroso según la normativa internacional, medidos en Bq/g, son: ^{238}U 1×10^1 , ^{234}Th 1×10^3 , ^{234}Pa 1×10^1 , ^{234}U 1×10^1 , ^{230}Th 1×10^0 , ^{226}Ra 1×10^1 , ^{222}Rn 1×10^1 , ^{214}Pb 1×10^2 , ^{210}Pb 1×10^1 , ^{210}Bi 1×10^3 , ^{210}Po 1×10^1 , ^{232}Th 1×10^1 , ^{228}Ra 1×10^1 , ^{228}Ac 1×10^1 , ^{228}Th 1×10^0 , ^{224}Ra 1×10^1 , ^{220}Rn 1×10^4 , ^{212}Pb 1×10^1 , ^{212}Bi 1×10^1 . BLD^a significa que está bajo los límites de detección / Los datos entre paréntesis significan el rango / Los datos solos son los promedios de concentración.

La concentración de plomo-210 (^{210}Pb) suele ser relativamente baja en escamas duras, pero puede ser superior a 999 Bq / g (27.000 pCi / g) en depósitos de lodos.

3.6 Riesgos de TENORMs Sobre el Medio Ambiente

Además de estar presentes en el crudo, el agua de producción y los desechos, los radionucleidos también se pueden encontrar en el suelo, arena, plantas y en entornos circundantes a las operaciones de la industria.

Las concentraciones de elementos altamente radiactivos en estas muestras, en un ambiente contaminado con aceite, son relativamente altas en comparación con las que no son de aceite.

Por ejemplo, las concentraciones de elementos radiactivos obtenidos de muestras de suelo en Arabia Saudita tomadas del área de Ras Tanura (un ambiente contaminado por petróleo) son mayores que las de los mismos elementos radiactivos obtenidos en muestras de arena tomadas del área de Qassim en Arabia Saudita (un ambiente que no está contaminado por aceite) (Alshahri et al., 2019).

La eliminación de desechos peligrosos generados por la exploración y extracción (fluidos de perforación y aguas residuales), así como la por la inyección de agua con el fin de mejorar la

productividad, según Swiedler E., et al., 2019, suele hacerse enterrándolos en el suelo o arrojándolos al mar, lo cual conduce a la posibilidad de contaminación de:

3.6.1 El Aire

La contaminación del aire es provocada por las emisiones de gases asociados a la industria, esa polución se da principalmente por el consumo de combustible, el proceso de disposición de gases no deseados que aparecen con el proceso de extracción del petróleo y la evaporación de partes volátiles del crudo, siendo el ^{222}Rn uno de los gases más significativos emitidos por los procesos de exploración y extracción (Purvis R., 2019).

3.6.2 El Suelo

Es evidente que el proceso de perforación afecta directamente al suelo, debido a que causa grandes impactos en el mismo, entre los que se encuentra la filtración de fluidos utilizados en la perforación y los fluidos provenientes del yacimiento, dando como resultado, entre varios aspectos, la transferencia de radionucleidos a la tierra, que a su vez se mueven luego a las plantas y a células vivas. Los métodos existentes para la disposición de desechos radiactivos en la industria como la inyección profunda, así como la implementación de tecnologías de recobro mejorado como la inyección de agua producida (la cual contiene TENORM), tienen también un gran impacto en la contaminación del suelo (Adebisi F., 2020).

3.6.3 Aguas Subterráneas

Ellas se contaminan como resultado de los desechos líquidos y no líquidos procedentes la perforación, conteniendo estos desechos altos niveles de elementos como el bario y el benceno, las cuales son ricas en radionucleidos, donde la parte líquida de los desechos se filtra al agua subterránea, provocando una grave contaminación radiactiva (Nwaka B., et al., 2018).

3.6.4 Aguas Superficiales y Marinas

Todos los efluentes de la industria del petróleo y el gas, como el agua producida, agua para perforación, mantenimiento y reparación, agua contaminada con aceite, lodos y demás, pueden contener materiales radiactivos (como se explicó anteriormente) y la descarga de estos al mar, deriva en la liberación de estos materiales a la superficie de la tierra, causando daños inesperados debido al aumento de las concentraciones de materiales radiactivos (Shlomy Z., 2018).

Animales, plantas y seres humanos, no cuentan con una protección radiológica natural (APPEA, 2002), por ello la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 1991) estableció estándares para la protección de los organismos vivos. La protección de la radiación para el ambiente y la salud, se aplica ampliamente a la industria nuclear, pero en la industria petrolera, esta protección parece ser relativamente baja. Las áreas donde se evidencia la contaminación por los residuos pueden verse en la Figura 6.

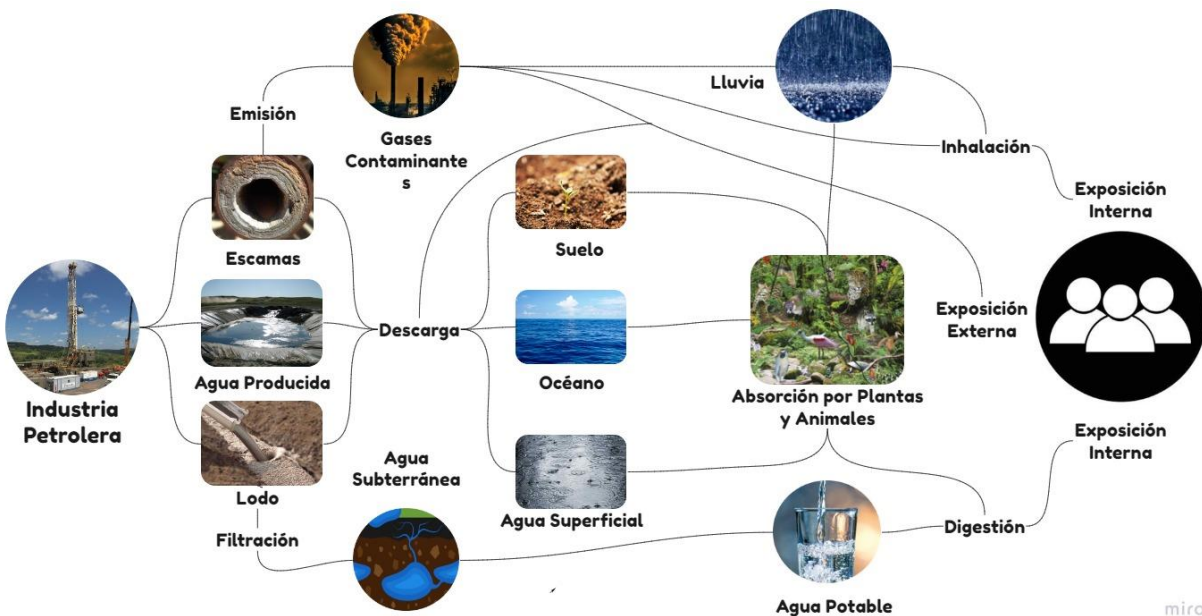
3.7 Concentraciones de Radionucleidos en Colombia

En Colombia el ente gubernamental encargado de legislar y tener control sobre las fuentes radiactivas, es el Ministerio de Minas y Energía; el país desde el año 1960 pertenece al Organismo Internacional de Energía Atómica y basa sus políticas de gestión de materiales radiactivos en las normas establecidas por esta organización, así mismo el Servicio Geológico Colombiano (SGC) tiene registro de todas y cada una de las fuentes ingresadas al país de manera legal, incluyendo la entidad o persona que la posee y la finalidad de la misma. Por otra parte las investigaciones relacionadas con los radioisótopos en el país son escasas, y más aún aquellas relacionadas con la industria petrolera, la cual representa una fuente importante de materiales radiactivos potencialmente peligrosos (como se ha querido mostrar en este trabajo). La legislación colombiana en su Resolución 180005 del 5 de enero de 2010, establece la reglamentación para la gestión de

desechos radiactivos en el territorio colombiano, pero no establece una política específica para el sector hidrocarburos.

Figura 6.

Principales formas de contaminación de radionucleidos procedentes de la industria petrolera.



Dentro de los estudios encontrados que están relacionados con los NORM en la industria petrolera colombiana, sobresale el llevado a cabo por Echavez et al. (2021), donde se realiza una evaluación del óxido de grafeno como agente secuestrante de radionucleidos naturales en aguas de retorno provenientes del fracturamiento hidráulico, en el mencionado estudio se analizaron muestras de roca provenientes de pozos ubicados en diferentes campos que se encuentran en la cuenca del Valle Medio del Magdalena, los valores promedio de radiactividad obtenidos para los nucleidos son: ^{226}Ra (60–620), ^{228}Ra (45–75), ^{238}U (18–597), ^{234}U (40–570), ^{230}Th (85–590), ^{228}Th (46–80), ^{232}Th (30–65), ^{210}Pb (10–587), ^{210}Po (50–470), ^{40}K (177–350). Aunque presenten valores relativamente altos, todos estos se encuentran dentro del rango que establece la IAEA para

actividad radiactiva no peligrosa (Tabla 5); sin embargo se desconoce la disposición realizada a los materiales de desecho resultantes de la perforación, para descartar el riesgo que pueden representar los TENORM producto de esta operación, es necesario realizar un estudio enfocado en los niveles de actividad de radionucleidos en los sitios de disposición.

Otra investigación publicada en el año 2021 (Junio) titulada “Evaluación de materiales radiactivos de origen natural (NORM) en el suelo, en un área potencial de yacimientos no convencionales en la subcuenca Ranchería” (Salazar et al., 2021) analizó muestras de suelo, agua producida y recortes de perforación en la cual se encontraron las siguientes concentraciones: los valores promedio para las muestras de suelo que contenían ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra , (Bq/kg) y ^{222}Rn (Bq/m³) son 11.7 Bq/kg, 33.0 Bq/kg, 424.5 Bq/kg, 15.59 Bq/kg y 24295.73 Bq/m³ respectivamente. De acuerdo con la UNSCEAR (2000), los valores promedio permitidos de concentración de actividad a nivel global para ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K y ^{226}Ra en el suelo son 35 Bq/kg, 30 Bq/kg, 400 Bq/kg, y 30 Bq/kg respectivamente, por su parte el radón presente en el suelo tiene un rango amplio que va desde 1930 Bq/m³ a 112245 Bq/m³, y a pesar de encontrarse dentro del rango, una concentración de 24295.73 Bq/m³ se considera alta. Las concentraciones de actividad para las muestras en el agua producida se movieron entre 193.3 Bq/L y 750.4 Bq/L, datos que se encuentran bajo el valor permitido por la OMS de 1000 Bq/L. Por ultimo las concentraciones de actividad encontradas en los ripios del pozo El Molino-1 se muestran clasificadas en la Tabla 11.

Los altos valores de las concentraciones de actividad de los elementos radiactivos naturales se asocian principalmente a procesos geogénicos como la deposición y la diagénesis, ya que no existe actividad industrial ni petrolera en esta zona. Los valores promedios encontrados en la región, son cercanos a los límites propuestos por las organizaciones internacionales, se recomienda

mantener un monitoreo de los niveles radiactivos en caso de implementarse una perforación de yacimientos no convencionales.

Tabla 11

Concentraciones de radionucleidos en las formaciones de la cuenca Ranchería

Formación	Tipo de roca	Concentración de actividad (Bq/kg)		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Molino	Pizarra con trazas de pirita, caliza arenosa con trazas de glauconitas.	47.2	50.1	386.32
La Luna	Calizas arcillosas, calizas arenosas con glauconitas intercaladas con pizarra con pirita.	32	52.3	305.2
Aguas Blancas	Caliza intercalada con limolita bituminosa con pirita.	39.9	39.9	398.6
Lagunitas	Margas y arenisca glauconita	26.1	56.86	41.5

Nota. Valores promedio de radionucleidos para formaciones pertenecientes a la subcuenca Ranchería en Colombia.

3.8 Riesgos de los radionucleidos en la salud humana

El material radiactivo emite radiación alfa, beta y gamma. Las energías emitidas actúan de diversas formas sobre la salud, y una persona puede estar expuesta a los NORM de dos maneras: interna y externamente.

3.8.1 Exposición Externa

Llamada también irradiación, ocurre cuando la fuente de energía radiactiva se encuentra fuera del cuerpo. En estudios realizados por el Organismo Internacional De Energía Atómica (IAEA, 2004), los trabajadores de la industria están expuestos a la radiación gamma durante las operaciones de rutina. La radiación gamma es capaz de atravesar las paredes de todos los

recipientes utilizados en la extracción de crudo, y la tasa de dosis a la que puede llegar la exposición en los contenedores de crudo y tuberías de transporte de hidrocarburos puede estar dentro de las decenas de microsievert por hora (Ver Tabla 1212). Sumada a esta situación, las personas implicadas en la operación de perforación y extracción de crudo pueden estar expuestos también a los radionucleidos en polvo y su radiación emitida. Las tasas de dosis dependen de las concentraciones y la cantidad de actividad de los radionucleidos presentes en el interior del blindaje proporcionado por las paredes de las tuberías o recipientes. Los casos en los que se han tenido medidas exteriores de los equipos de campo, con valores alcanzados de varios cientos de microsievert por hora, son equiparables a una exposición 1000 veces mayor a los valores históricos de radiación cósmica y terrestre.

En 1997, el investigador Otto, G. H., a través de la American Petroleum Institute, publicó un documento que mostraba la presencia de radioelementos en facilidades de producción e instalaciones de procesamiento de hidrocarburos, en los campos pertenecientes a 22 de los 35 Estados Americanos. También en 1997 Jonkers et al., realiza una caracterización de los NORM en la industria de producción de crudo y gas en los Estados Unidos, dichos trabajos fueron analizados en el Safety Reports Series No. 34 de la IAEA 2004 y los datos son mostrados en la Tabla 12.

3.8.2 Exposición Interna

También conocida como contaminación por radionucleidos, es el resultado de la ingesta, inhalación o absorción de NORMs. Esto ocurre mientras se trabaja en el manejo de equipos, plantas, materiales, superficies y/o desperdicios contaminados, la persona al entrar en contacto con el material radiactivo y no tener unos protocolos de limpieza adecuados, puede conllevar a la ingesta a través de la comida, la bebida, el fumar o respirar. Por dar un ejemplo de los riesgos afrontados, la actividad equivalente del radio presente en las escamas puede ser superior a los 500

Bq/g. Por lo tanto, solo 100 mg de polvo inhalado son suficientes para una dosis de irradiación que exceda el límite de dosis general anual de 1 mSv. Aunque la cantidad de radón liberado es baja, las concentraciones de radón en tanques con incrustaciones, lodos y arena no aireados pueden aumentar la exposición a la radiación.

Tabla 12

Tasas promedio de dosis de radiación gamma externas observadas en algunas instalaciones de producción y procesamiento de petróleo en USA

Facilidades	Dosis (μSv/h)
Crudo	
Tubería de fondo de pozo, válvulas de seguridad (internas)	Arriba de 300
Cabezas de pozo, colector de producción	0.1 - 2.5
Líneas de producción	0.3 - 4
Separador (escala, medida internamente)	Arriba de 200
Separador (escala, medida externamente)	Arriba de 15
Salidas de agua	0.2-0.5
Gas	
Tubería de fondo de pozo	0.1 – 2.2
Filtros, Tanques de almacenamiento	Arriba de 80
Piscinas de Lodo, pozos de inyección, tanques de salmuera	Arriba de 50

Nota: extraído y modificado del Safety Reports Series No. 34 de la IAEA 2004.

Muchos investigadores y especialistas han abordado en sus investigaciones los efectos sobre la salud de la exposición a las radiaciones ionizantes. Los resultados mostraron que los efectos sobre la salud asociados con la exposición a la radiación ionizante varían según la cantidad total de energía absorbida, el período de tiempo, la tasa de dosis y el cuerpo expuesto a la radiación (Gorski, I., et al., 2019). Una consideración crucial al tratar con radionucleidos es que, las exposiciones, por lo general, son bajas y por debajo de los niveles regulatorios definidos

internacionalmente (ICRP, 1991), en suma, la exposición a TENORM no produce efectos agudos, ni severos, similares a los efectos asociados con la exposición a altos niveles de radiación de fuentes artificiales. Sin embargo a pesar que la mayoría de los casos, la exposición a radiación ionizante baja no presenta efectos adversos para la salud, muchos estudios epidemiológicos y de laboratorio nuevos han llegado a la conclusión de que la exposición a dosis bajas de radiación ionizante aún puede representar un riesgo (Gallego, A. R. 2010), entre los que se encuentran una variedad de cánceres, que incluyen leucemia, cáncer de pulmón, estómago, esófago, huesos, tiroides, cerebro y sistema nervioso, que se han asociado con la exposición a radiación ionizante.

4. Radionucleidos Presentes en Perforaciones de Yacimientos no Convencionales

4.1 Yacimientos no Convencionales

Los yacimientos no convencionales, según lo define la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP, 2019), son aquellos reservorios que contienen hidrocarburos, que debido a su geología, poseen rocas poco permeables que dificultan el movimiento del fluido, obstaculizando o impidiendo su desplazamiento, por ello el crudo nunca se desplaza de la roca generadora (roca madre), que a su vez hace de roca almacén y roca sello. Esta definición caracteriza bien a los reservorios tipo shale, pero en una definición más amplia dada por Cabanillas et al. (2013) en la cual incluye aquellos yacimientos que no cuentan con los elementos de lo considerado convencional, los cuales son una roca generadora, migración, una roca almacén y una roca sello; también establece Cabanillas et al., que los reservorios de esta clase pueden ser de diversos tipos, entre los que se tienen:

4.1.1 Metano Asociado a Mantos de Carbón (Coal Bed Methane)

Los mantos de carbón hace referencia a la forma en la que se agrupa el mineral de manera horizontal o inclinada, y se agrupan en depresiones o cuencas, si los mantos tienen un alto contenido de materia orgánica, pueden llegar a retener una gran cantidad de gas, normalmente a profundidades someras (SGM, 2018).

4.1.2 Gas de Arenas Compactas (Tight Gas)

Se denomina así a reservorios, principalmente arenosos aunque califican también carbonáticos, que poseen permeabilidades muy bajas al gas. Debido a que es una definición amplia que no es exclusivo para definir yacimientos no convencionales, se suele usar el término gas de centro de cuenca (basin-centered gas system), la cual toma en cuenta sistemas que no están totalmente confinados, en los cuales, bajo condiciones de alta presión y por un efecto de cuello de botella, la acumulación del gas generado supera la capacidad de migración del gas.

4.1.3 Hidratos de Gas (Gas Hydrates)

Hace referencia a un compuesto conformado por moléculas de agua en estado sólido, en cuya estructura cristalina quedan atrapadas las moléculas de gas, principalmente metano. Su origen procede de la descomposición microbiana de materia orgánica en sedimentos de fondos marinos. Los hidratos de gas se encuentran en los suelos congelados en zonas árticas y en mayor medida, en los fondos oceánicos.

4.1.4 Petróleo o Gas de Lutitas (Shale Oil-Shale Gas)

Este nombre se usa para describir rocas de grano fino, ricas en materia orgánica (lutitas), que debido a procesos físico-químicos, logró transformarse en hidrocarburos, pero nunca pudo dejar la roca generadora y por ello en estos yacimientos, la roca madre actúa como reservorio y sello al mismo tiempo.

De los diferentes tipos de yacimientos no convencionales que se mostraron, los llamados shale oil y shale gas son los que han tenido un crecimiento dramático desde el año 2000 debido a su abundancia, al agotamiento de los yacimientos convencionales, los precios del crudo y entre otros factores, al desarrollo tecnológico centrado en el fracturamiento hidráulico y la implementación de pozos horizontales (Gorski et al., 2019). Dado el rápido desarrollo de la industria junto con su probabilidad de un mayor crecimiento, y la preocupación de la comunidad y los académicos, sobre los posibles impactos a corto y largo plazo que representan para la salud y el medioambiente, es importante revisar lo que se sabe actualmente sobre las repercusiones presentes en las perforaciones de depósitos no convencionales, en particular en lo referente a los radionucleidos naturales.

Los impactos medioambientales y de salud según Gorski et al., (2019) pueden ser psicosociales, químicos y físicos. Los peligros psicosociales pueden incluir el tráfico de camiones pesados, aumentos en los accidentes de tráfico, una rápida industrialización de áreas previamente rurales, cambios en las oportunidades de empleo, aumento de las tasas de delincuencia, así como en el valor de la tierra y la vivienda. Por su parte los peligros químicos incluyen, por lo general, la presencia de olores químicos; compuestos orgánicos volátiles en el aire, el suelo, aguas superficiales y subterráneas (volátiles entre los que se tienen el benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, y varios que han estado implicados en la alteración endocrina); materia particulada, ozono y óxidos de nitrógeno (NO_2) en el aire; y compuestos inorgánicos, incluidos metales pesados, en el suelo y el agua, particularmente cerca de los sitios de eliminación de aguas residuales. En el lado de los peligros físicos se incluyen el ruido, la luz, la vibración y la radiación ionizante inducida por los materiales radiactivos naturales (NORM) en el aire y el agua, que pueden afectar la salud, la fauna y la flora drásticamente y es el objeto de investigación del presente análisis conceptual.

4.2 Comportamiento de la Desintegración de los NORM en el Subsuelo

Basados en la investigación de los NORM realizada por Nelson et al., (2015), en los fluidos producidos de la formación Marcellus (Este de EE. UU.), fue desarrollada por estos mismos investigadores, un modelo general que predice las degradaciones de las series del U y Th y su progenie radiactiva, entre la fase sólida de los materiales (ripios de perforación) y los fluidos producidos en el proceso de fracturamiento hidráulico. Describiendo los eventos físico-químicos que direccionan el comportamiento biogeoquímico de los radionucleidos en estas series, es posible entender los principios de la división de los isotopos, en la Figura 7 se ilustra el modelo teórico de desintegración NORM y desechos asociados en Marcellus Shale.

4.2.1 Desintegración en Subsuelo de la Serie U

Debido a las condiciones químicamente reductoras de la formación Marcellus, se puede esperar que el ^{238}U , cuya vida media es de 4.5×10^9 años, está contenido en una red cristalina de minerales en un estado de oxidación reducido-inmóvil U^{+4} , a medida que el ^{238}U se desintegra a ^{234}Th por emisión de partículas alfa, imparte una gran cantidad de energía al núcleo Th (desintegración alfa); ahora, esa energía de desintegración alfa es suficiente para romper los enlaces químicos en la estructura cristalina de la roca (Osmond et al., 1976), lo que potencialmente conduce al enriquecimiento de los átomos ^{234}Th ubicados en la interfaz intersticial salmuera y fase sólida, y aunque es sabido que el Th es altamente reactivo, su geoquímica no es susceptible a cambios en la concentración de oxígeno, por lo tanto estas propiedades predicen que el Th será relativamente inmóvil a la absorción por parte de los minerales en las formaciones profundas. Tomando como base lo expuesto en este párrafo, Nelson et al., (2015) predicen que es poco probable que los radionucleidos U y Th sean extraídos en fluidos de fracturación hidráulica, en fase acuosa, por el contrario, la desintegración radiactiva del ^{238}U da como resultado nucleidos

de ^{226}Ra , los cuales son mucho más solubles en la salmuera intersticial, esto debido a las bajas concentraciones de sulfatos y las concentraciones de salinidad en el agua, lo que a su vez conduce a la formación del gas noble radiactivo ^{222}Rn , gracias a la desintegración del ^{226}Ra , que añade complejidad a las predicciones del destino de los sucesivos productos de desintegración. Debido a que el ^{222}Rn es un gas inerte con una vida media de casi cuatro días, es posible su difusión a través de las fisuras creadas por el fracturamiento hidráulico y subsecuentemente los productos de su desintegración, y aunque en general el ^{222}Rn solo viaja 0,1 m en suelos húmedos por difusión, el transporte a larga distancia es posible cuando se combina con un fluido portador, combinación que es mayor en condiciones de alta presión; cabe recordar que este gas puede descomponerse en una serie de isótopos de vida corta hasta el isótopo radiactivo insoluble ^{210}Pb que posee una vida media de 22.2 años. Una recomendación de los investigadores es la preparación cuidadosa de mediciones y muestras del agua de retorno y los fluidos producidos para poder dilucidar con mayor precisión la relación radiactiva del ^{226}Ra , ^{222}Rn y su progenie en productos de desecho líquido. Al continuar en la cadena de productos de desintegración, se encuentra que el ^{210}Pb se desintegra en el elemento ^{210}Po siendo su destino menos claro a partir de este punto. Investigaciones realizadas por (Wei et al., 2015), el ^{210}Po suele concentrarse en fases de partículas ricas en materia orgánica; otros estudios (Bacon et al., 1980; Benoit et al., 1990; Jones et al., 2015) muestran que en condiciones de bajo oxígeno, el ^{210}Po es una partícula activa y su transporte está asociado con la migración de minerales como el hierro (Fe) o el manganeso (Mn). Actualmente se desconoce si los reactivos utilizados en los fluidos de fracturamiento hidráulico movilizarán ^{210}Po , pero su transporte en el subsuelo probablemente se ve afectado por cambios en las condiciones redox, el pH y el movimiento a granel de las partículas que contienen Fe y Mn. Dado que ^{210}Po y ^{210}Pb pueden separarse entre sí en determinadas condiciones ambientales, el uso de niveles de ^{210}Po como

herramienta para medir las concentraciones de radiactividad de ^{210}Pb puede no ser apropiado, por ello los investigadores recomiendan hacer mediciones independientes de para ambos nucleidos.

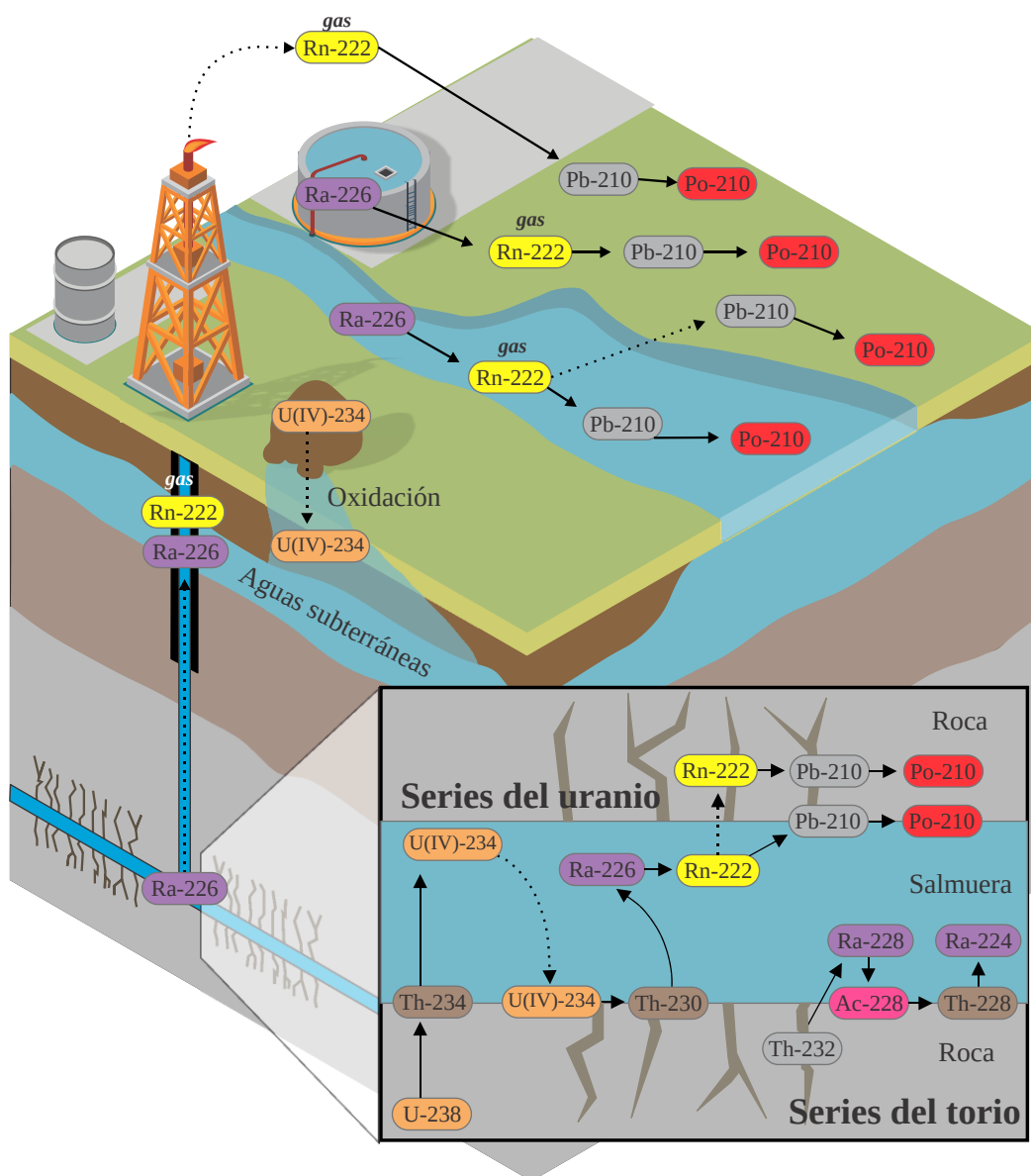
4.2.2 Desintegración en Subsuelo de la Serie Th

El destino y transporte de la serie ^{232}Th es similar a la explicado para la serie ^{238}U ; el radionucleido cabeza de serie ^{232}Th , con una vida media de $1,4 \times 10^{10}$ años, es insoluble en aguas y salmueras ambientales, pero a medida que este se desintegra por emisión alfa a ^{228}Ra (que posee una vida media de 5,75 años), es soluble en salmueras y aguas deficientes de sulfatos, este a su vez decae a ^{228}Ac por emisión beta, el destino en este punto de la serie es incierto, esto se debe a que generalmente el Ac forma moléculas complejas insolubles, es complicado discernir su comportamiento dada su corta vida media (6,15 horas), se especula que se adsorbe rápidamente en las superficies minerales; luego el ^{228}Ac se desintegra por emisión beta a ^{228}Th que es insoluble y su vida media es de 1,91 años, a continuación el núcleo se descompone para formar ^{224}Ra (con vida media igual a 3.63 días), que nuevamente posee la capacidad de solubilizarse en la salmuera.

Transcurrido este tiempo hay una breve transición, por el ^{220}Rn (vida media de 55.6 segundos), el ^{216}Po (vida media de 0.145 segundos) que a su vez emite partículas alfa para formar ^{212}Pb con una vida media de 10.64 horas; de manera similar al ^{210}Pb de la serie de desintegración ^{238}U , se espera que ^{212}Pb sea insoluble y reactivo, seguidamente el ^{212}Pb se desintegra por emisión beta a ^{212}Bi (con vida media de 60,55 minutos), que probablemente también sea insoluble. Luego, el ^{212}Bi se ramifica en dos productos de descomposición diferentes; el 64% de las desintegraciones son por emisión beta para formar el ^{212}Po de vida media muy corta ($0.299 \mu\text{s}$) mientras que el otro 36% de las desintegraciones forman ^{208}Tl (teniendo una vida media de 3.053 minutos) y tanto ^{212}Po como ^{208}Tl decaen, por emisiones de partículas alfa y beta, respectivamente, a ^{208}Pb ya estable.

Figura 7

Modelo teórico de partición NORM y desechos asociados en Marcellus Shale



Nota. Las flechas continuas indican una desintegración radiactiva o una serie de desintegraciones radiactivas. Las flechas discontinuas indican un proceso de partición físico o químico. Extraído y modificado de Understanding the radioactive ingrowth and decay of naturally occurring radioactive materials in the environment: an analysis of produced fluids from the Marcellus Shale.

Nelson et al., 2015

4.3 Proceso de Perforación no Convencional de Shales

Para entender de mejor forma el impacto, migración y naturaleza de los NORM, es necesario entender el proceso de perforación no convencional (fracturamiento hidráulico), el cual se puede dividir en seis etapas primordiales (Nelson, 2016), que incluyen: adquisición de agua, mezcla química, perforación, fracturamiento hidráulico, liberación de la presión del pozo (contraflujo / fluidos producidos y quema de gas), y tratamiento o almacenamiento de desechos líquidos y sólidos (Figura 8). Cada una de estas etapas tiene características y consideraciones distintas que ayudan a determinar qué radionucleidos esperar durante el proceso de perforación.

4.3.1 Adquisición de Agua

Las operaciones de fracturamiento requieren enormes cantidades de agua, poniéndolo en contexto, según Jaramillo (2014) la perforación de un pozo de shales, consume entre 230 mil y 3 millones de litros, mientras el solo proceso de fracturamiento de lutitas consume entre 8 millones 700 mil a 14 millones 400 mil litros de agua. Tomando como ejemplo la región de Marcellus Shale (Este de EE. UU.), donde se utilizan hasta 40.000 m³ (40 millones de litros) de agua para una sola fractura (Kargbo et al., 2010). Por ello para reducir costos de adquisición, suele tratarse el agua residual para su posterior reutilización, implementando tecnologías de purificación que pueden reducir o eliminar constituyentes del agua producida como trazas de aceite, componentes orgánicos disueltos, bacterias, productos químicos, metales y sólidos producidos, y algunas de las tecnologías de tratamiento pueden eliminar incluso isótopos de Ra, es probable que no eliminen otros NORM (Duraismy et al., 2013), llevando a una acumulación de productos de descomposición ²²⁸Ra como ²²⁸Ac, ²²⁸Th, ²²⁰Rn, ²¹²Pb, ²¹²Bi, ²⁰⁸Tl y productos de descomposición ²²⁶Ra tales como ²²²Rn, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁰Pb y ²¹⁰Po.

4.3.2 Mezcla Química

La mezcla química utilizada para fracturar los yacimientos contienen una variedad de químicos que como: borato, diferentes tipos de ácidos, carbonato de potasio, cloruro de potasio, cloruro de sodio, destilados, glicol, glutaldehído, goma guar, isopropanol, propantes entre otros que hacen el trabajo de biocidas, inhibidores de escamas, reductores de fricción, surfactantes además de otras funciones (Waxman et al., 2011); estos componentes, que varían dependiendo de las características geológicas, se ha demostrado que interactúan con los NORM presentes en la formación, por ejemplo, la movilidad del uranio aumenta cuando se complementa con citratos (sales de ácido cítrico), un componente conocido de los fluidos de fracturación hidráulica, conjuntamente, los fluidos de fracturamiento hidráulico se acidifican con ácido clorhídrico, un reactivo que se usa comúnmente en los laboratorios para solubilizar NORM (Francis et al., 1998). La diversidad, complejidad y cantidad de mezclas químicas utilizadas en los fluidos de fracturación, hacen necesario un estudio caso por caso de cada operación, por ello es necesario tener información detallada de los químicos en contacto con la formación para hacer predicciones sobre el comportamiento de los radionucleidos.

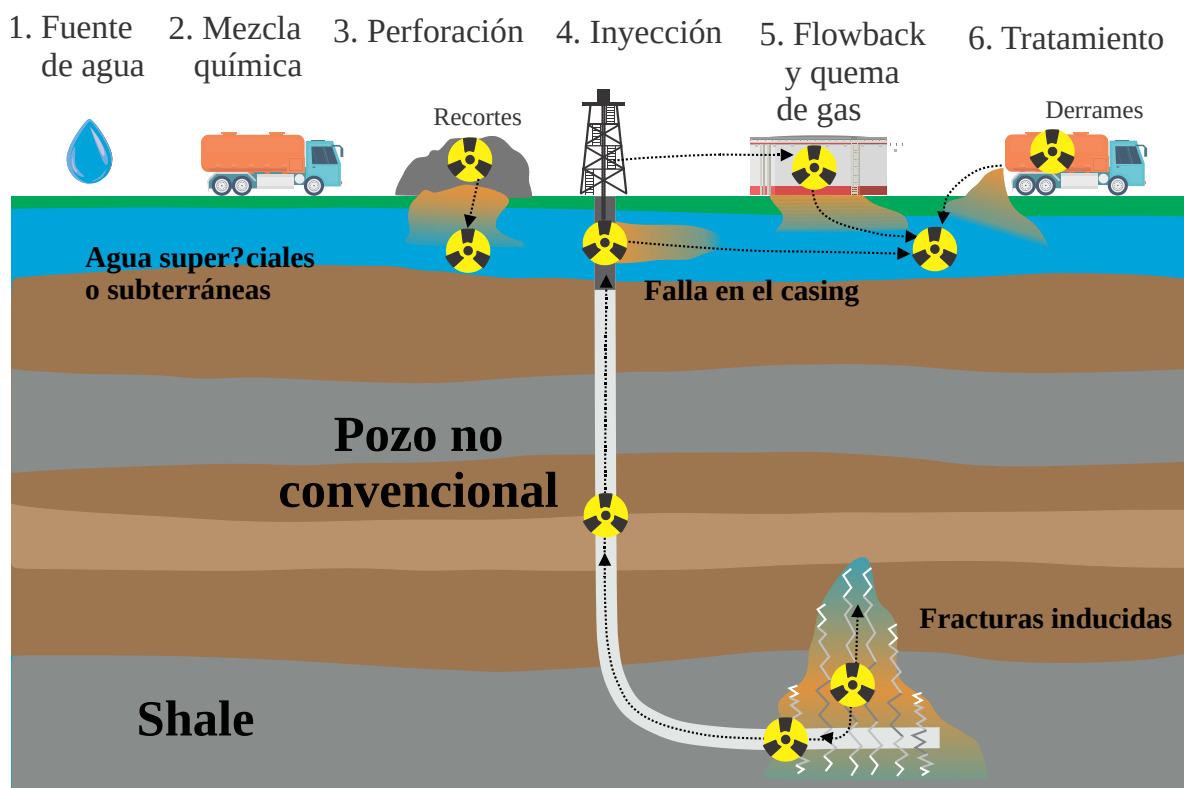
4.3.3 Perforación

A lo largo de la historia, la mayoría de pozos perforados para la extracción de hidrocarburos han sido pozos verticales, llamados también convencionales, en los cuales comúnmente se utilizan registros de rayos gamma para detectar la presencia de hidrocarburos gracias a la relación entre las zonas productoras y la radiactividad (Killeen, 1982), en este tipo de pozos, el área del yacimiento que está en contacto con el pozo es relativamente pequeña y los recortes que contienen NORMs provenientes de los yacimientos es bastante baja; por otro lado con los avances en perforación horizontal, han permitido que los contactos con las áreas productoras puedan extenderse por miles

de metros, y el material extraído que contiene NORMs es significativamente mayor (aunque los valores varían de un pozo a otro, Myers (2009), expresa que un pozo horizontal puede producir 250.000 kg de cortes de perforación). Un informe del departamento de protección ambiental de Pennsylvania de 2015, indica que las concentraciones de radiactividad de ^{238}U en cortes de pozos verticales estaban entre 40 y 70 Bq / kg, mientras que las concentraciones en cortes horizontales superaron los 300 Bq / kg, esto sin tener en cuenta que productos de desintegración de la serie U, que son insolubles y están presentes en estos desechos, como los isótopos Pa, Th, Po y Pb.

Figura 8

Principales etapas en un proceso de perforación no convencional



Nota. Tomada de naturally occurring radioactive materials associated with unconventional drilling for natural gas. Nelson W. 2016.

4.3.4 Inyección

El siguiente paso luego de la perforación, es la instalación de la tubería de revestimiento, y realizado este paso es posible la inyección de los fluidos de fracturamiento, los cuales son bombeados a altas presiones del orden de los 480 a los 850 bar para lograr su cometido; una información importante a recalcar es que durante el periodo de flowback, gran parte de los fluidos inyectados (hasta el 90%) no se recupera (Vidic et al., 2013), lo que implica una prolongada interacción entre los componentes del fluido de fracturamiento y el yacimiento. En la determinación de presencia de NORM, se debe tener en cuenta que a pesar que se usen trazadores radiactivos en el pozo, los cuales tienen la función de corroborar si existe conectividad entre pozos y medir tasas de flujo, los radionucleidos emisores usados aquí tienen semividas cortas, (de algunas semanas o días) desintegrándose en elementos más estables, por lo tanto la radiactividad asociada con estos trazadores no es relevante. En cambio el mayor riesgo que puede presentarse en la inyección son las fallas en el revestimiento debido a las altas presiones, las cuales, a pesar de, tener una incidencia baja, son más probables que en los pozos convencionales; la estimación es de 6% para los pozos no convencionales y poco más del 1% en pozos convencionales (Jackson, 2014); en este escenario existe la posibilidad que fluidos del pozo que contengan NORMs se filtren a los acuíferos contaminándolos, algunos casos han sido documentados en EE.UU. donde en pozos domésticos poco profundos, ubicados cerca de operaciones de fracturamiento, se han encontrado contaminantes provenientes del fracturamiento (Osborn et al., 2011). Sin embargo, como comentan los investigadores, sin un estudio bien controlado que tenga datos previos y posteriores a la perforación, las conclusiones pueden ser propensas al sesgo de confirmación.

4.3.5 Contraflujo y Quema de Gas

Después de realizar la inyección y concretar el fracturamiento hidráulico con éxito, se reduce la presión en la boca del pozo, permitiendo que los fluidos regresen a la superficie; inicialmente quienes regresen serán los fluidos inyectados, en cuanto este se agote, los fluidos producidos serán los pertenecientes al reservorio, los cuales tienen: un porcentaje elevado de salinidad, sólidos disueltos y NORMs (Barbot et al., 2013). Estos fluidos aumentan su complejidad a medida que son producidos y parte de esa misma, se debe a interacciones físico-químicas con los componentes y reactivos utilizados para generar la fractura y condiciones cambiantes de temperatura; esta complejidad puede verse reflejada en los isotopos presentes en el flujo de retorno, resultantes de la desintegración de radionucleidos contenidos en la misma corriente de salida (Nelson et al., 2015). Junto con los líquidos producidos, es inevitable la asociación del fluido con el gas proveniente del yacimiento, algunos de los desechos que lo acompañan son el gas Rn radiactivo, el sulfuro de hidrogeno, compuestos orgánicos y el gas natural, cuyas maneras recurrentes (y necesarias) de eliminación son la quema y/o la ventilación, por ser maneras económicas y seguras para la operación; pero estas formas no tienen ningún efecto sobre la radiactividad del gas Rn (Caulton et al., 2014), y a pesar de ser reconocido como un elemento altamente contaminante, los estudios y documentación sobre los impactos y el alcance del Rn producto de la operación petrolera, concretamente del fracturamiento hidráulico, son pocos. Uno de los estudios a recalcar fue el realizado por Resnikoff, (2012) sobre el aumento de niveles de ^{222}Rn en el gas natural extraído de shales, usado en los hogares del estado de Nueva York, en calentadores y estufas mayormente, que aumenta el riesgo de generar cáncer de pulmón; las estimaciones en el mencionado artículo estipula un rango 1,182-30,448 casos de la enfermedad, pero son necesarios más estudios para validar la información.

4.3.6 Tratamiento

El tratamiento de desechos sólidos y líquidos es la etapa final de la perforación; los mecanismos usados generalmente para el manejo de desechos TENORM son el uso de reactivos, reciclaje de material y disposición inteligente de residuos sólidos y líquidos.

4.3.6.1.1 Reactivos

En facilidades de campo implementadas en Mar del Norte (Países Bajos), se emplean reactivos disueltos (disolventes comerciales de escamas) en un baño de agua caliente que circulan a través de los equipos contaminados, logrando retirar las incrustaciones y con ellas el material radiactivo. Para lograr su propósito los disolventes destinados para la eliminación in situ, utilizan agentes quelantes y son efectivos en sedimentos con baja actividad radiactiva (Eylander et al., 1997); la composición del disolvente aplicado fue de ácido acético al 15% v/v y un oxidante fuerte al 1% v/v, KMnO_4 y logró una remoción rápida y completa del ^{226}Ra y su progenie contenida en escamas de sulfato, así como del ^{210}Pb contenido en las incrustaciones de sulfuro.

4.3.6.1.2 Reciclaje de Material

La descontaminación de materiales y equipo (tuberías, tubos, bombas), se lleva a cabo mediante fusión a 1400 °C, para un mayor fraccionamiento de los radionucleidos en la escoria, el polvo o la masa fundida; Contaminación producida principalmente por metales pesados como el mercurio y materiales naturalmente radiactivos de origen natural. Continuando con el campo mencionado en el estudio por Eylander et al. (1997), situado en Mar del Norte (Países bajos), en donde se construyó una planta de fundición con capacidad anual de 2000 toneladas de acero y chatarra para tratar materiales contaminados con mercurio y TENORM, en donde se hicieron mediciones radiológicas después de la fusión, y se pudo concluir que el metal producido no contenía residuos detectable de radiación y que puede ser reutilizado nuevamente en acerías. Un

análisis posterior del proceso de fundición, mostró que la mayoría de las series ^{238}U y ^{232}Th se transfieren de la materia fundida a la escoria (componente menor que contiene el 98% de la radiactividad), y toda la actividad del nucleido ^{210}Pb se concentró en el polvo fino, porque se evapora a una temperatura de fusión normal por encima de los 1300 °C.

4.3.6.1.3 Residuos Sólidos TENORM

Una opción muy rentable es esparcir y mezclar los residuos sólidos como los lodos, suelos e incrustaciones contaminados con TENORM, con suelos no contaminados, esto es viable para desechos cuyos niveles de radiactividad son muy bajos, logrando diluir el nivel de radiactividad (Smith et al., 1995). Otra opción es la eliminación subterránea, que bien puede ser la inyección subterránea o la encapsulación en el fondo del pozo. La primera consiste en mezclar con cemento los sólidos contaminados y posteriormente inyectar la mezcla en una formación subterránea. La segunda forma de eliminación implica colocar los residuos dentro del revestimiento de un pozo al que se le debe inyectar cemento.

4.3.6.1.4 Residuos Líquidos TENORM

Los líquidos contaminados con materiales radiactivos se pueden reinyectar en formaciones profundas para su eliminación (Swann et al., 2004), y pueden ser diferenciadas en tres tipos: En la tipo 1, los fluidos que son inyectados son aquellos que tienen concentraciones normales de actividad radiactiva. En la eliminación tipo 2, se desechan los líquidos cuyas concentraciones se considera muy peligrosas debido a su nivel de contaminación, por ello los pozos destinados para la actividad deben ser muy profundos. En caso de no contar con un pozo profundo para destinar los desechos líquidos más peligrosos, surge la eliminación tipo 3, que consiste en crear una fractura en formaciones de lutitas permeables y disponer los fluidos allí. Después de la inyección, el pozo

se cierra, se sella con cemento y se tapa, aislando efectivamente los materiales inyectados de la superficie.

Algo muy importante para tener en cuenta es que cuando los iones de radio están presentes en el agua producida, cualquier caída de presión y temperatura puede conducir a la solubilidad de sulfatos y carbonatos se superen, lo cual es la principal causa de precipitación de radio en forma de escamas de sulfato y carbonato en las paredes internas de los túbulos de producción, cabezas de pozo, válvulas, bombas, separadores, tanques de tratamiento de agua, de tratamiento de gas y almacenamiento de petróleo, además las partículas de arcilla o arena producidas del yacimiento, pueden actuar como catalizadores, iniciando la deposición de incrustaciones, adsorbiendo los cationes (Awwad et al., 2015).

4.4 Radionucleidos en Yacimientos Convencionales y no Convencionales

La Tabla 13 muestra en paralelo los valores de actividad radiactiva para diferentes radionucleidos presentes en yacimientos de varios países. Se compararon valores de un mismo tipo de muestra que coincidieran en el país de procedencia, pero que difieren en el tipo de yacimientos, siendo las dos categorías, convencionales y no convencionales. Como fue expuesto en las secciones 3.2 y 4.2, los factores que influyen en la migración de radionucleidos desde las formaciones hasta la superficie son variados, entre los que destacan: el área de contacto con la formación y las interacciones físico-químicas entre los componentes de los fluidos de perforación y fracturamiento con los elementos de la geología perteneciente a la zona de interés; y justo son estas dos causas por las que se destacan mayormente los yacimientos no convencionales en la producción de radionucleidos. En la Tabla 13 se puede observar como los valores que muestran la medida de concentración actividad radiactiva para los yacimientos convencionales es más baja que la presentada en su contra parte, aunque esto no implique que siempre sea el caso siempre, si

es cierto que la presencia de sulfatos y componentes químicos que interactúan con el yacimiento, puede aumentar significativamente la actividad radiactiva. Uno de los casos con mayor documentación es el presentado en la formación Marcellus ubicada en el este de América del Norte, donde gracias a la perforación direccional y el fracturamiento hidráulico se ha tenido un aumento en la producción de hidrocarburos y acceso a zonas que antes no era posible, pero también ha derivado en una serie de problemáticas, entre las que se encuentra la contaminación por radionucleidos tanto de las aguas subterráneas como de las superficiales contaminación del aire y afectación a la salud de la comunidad y los trabajadores (Nelson et al. 2016).

En el caso del desarrollo de yacimientos no convencionales en Polonia, las muestras sólidas muestran un equilibrio radiactivo entre las series del U-238 y sus hijas, y entre el Ra-228 y sus hijas; esto implica poca radiación al medio. Sin embargo, en los fluidos de retorno durante la perforación no se encuentra este equilibrio lo cual conlleva a una exposición radiactiva constante, principalmente, del radio; el estudio hecho por Jodlowski et al. (2017) tuvo como propósito medir las concentraciones de actividad para tener una base en próximas investigaciones, todas ellas enfocadas en el riesgo medioambiental y de salud, además, se aclaran las especificaciones para cada zona de acuerdo a las características del yacimiento. Por otro lado, para la perforación convencional se ha hecho énfasis en la contaminación radiactiva por parte del radón y sus progenies, pero empezaron a notar altas concentraciones de radio en las salmueras (Skowronek et al., 2005); para tal momento no se evalúan los riesgos en salud de los organismos, pero si se resalta el riesgo que implica al medio ambiente.

Tabla 13

Comparación entre los radionucleidos extraídos de yacimientos convencionales y no convencionales alrededor del mundo

País	Tipo de muestra	Medida de actividad radiactiva en yacimientos convencionales	Medida de actividad radiactiva en yacimientos no convencionales	Bibliografía convencionales	Bibliografía no convencionales
USA	Ripio de perforación/ Sedimento	^{208}Tl (7.77–18.13), ^{226}Ra (30.71–83.25), ^{228}Ra (23.31–60.31), ^{234}U (12.58–71.78), ^{235}U (0.37–4.551), ^{238}U (17.02–77.33), ^{228}Th (18.87–78.44), ^{230}Th (19.98–112.11), ^{232}Th (23.68–80.29) Bq/kg	^{40}K (590–239), ^{235}U (<6.32), ^{208}Tl (8.58–17.30), ^{212}Pb (25.90–47.80), ^{212}Bi (35.80–104), ^{224}Ra (47.30–26), ^{228}Ra (228AC) (26.40–49.2), ^{210}Pb (<64.34), ^{214}Pb (27.30–47.10), ^{214}Bi (23.90–40.90), $^{234}\text{Pa m}$ (<95.60), ^{234}Th (28.30–50.30) Bq/kg	Field, 2014	Nelson et al., 2016
	Agua de producción	^{226}Ra (<0.002–58), ^{228}Ra (0.02–59) Bq/L	^{226}Ra (<13 033), ^{228}Ra (<1485) Bq/L	Kraemer et al., 1984	Zhang, 2015
	Agua de producción	^{226}Ra (0.74–8.88), ^{228}Ra (0.74–6.29) Bq/L	^{226}Ra (30–2690), ^{228}Ra (35–763) Bq/L	Bandong et al., 2005	McDevitt et al., 2019
Siria	Productos de desecho	^{224}Ra (9.0–14) 11.43a, ^{226}Ra (4.0–11), ^{228}Ra (3.0–13), ^{210}Po (224–2371), ^{210}Pb (12–160) Bq/g	^{210}Pb (498–4023), ^{210}Po (380–3100), ^{224}Ra (14–36), ^{226}Ra (77–135), ^{228}Ra (24–31) Bq/kg	Al-Masri et al., 2003	Al-Masri et al., 2012
Polonia	Agua de producción	^{226}Ra (258.1), ^{228}Ra (22.8) Bq/L	^{40}K (5–499), ^{238}U < 30, ^{226}Ra <2, ^{210}Pb < 5, ^{228}Ra < 2, ^{228}Th < 2 Bq/L	Skowronek et al., 2005	Jodłowski et al., 2017
Reino Unido	Agua de producción	^{226}Ra (0.16–90), ^{228}Ra (0.5–12) Bq/L	^{226}Ra (14–90), ^{214}Pb (14–50), ^{214}Bi (0.9–41), ^{228}Ac (1.7–12), ^{228}Th (4.0–10), ^{234}Th (2.0–6.0), ^{224}Ra (<4.0), ^{40}K (1.0–3.5) Bq/L	DECC et al., 2014	Moore et al., 2015
China	Suelo/Tierra	^{40}K (578), ^{232}Th (46.3), ^{226}Ra (42.7) Bq/Kg	^{226}Ra (16–82), ^{238}U (28–170), ^{40}K (523–973) Bq/kg	Ziqiang et al., 1988	Huang et al., 2017

Nota. Los valores máximos recomendados de radiactividad que puede contener un material, antes de ser considerado peligroso según la normativa internacional, medidos en Bq/g, son: ^{238}U 1×10^1 , ^{234}Th 1×10^3 , ^{234}Pa 1×10^1 , ^{234}U 1×10^1 , ^{230}Th 1×10^0 , ^{226}Ra 1×10^1 , ^{222}Rn 1×10^1 , ^{214}Pb 1×10^2 , ^{210}Pb 1×10^1 , ^{210}Bi 1×10^3 , ^{210}Po 1×10^1 , ^{232}Th 1×10^1 , ^{228}Ra 1×10^1 , ^{228}Ac 1×10^1 , ^{228}Th 1×10^0 , ^{224}Ra 1×10^1 , ^{220}Rn 1×10^4 , ^{212}Pb 1×10^1 , ^{212}Bi 1×10^1 . BLD^a significa que está bajo los límites de detección / Los datos entre paréntesis significan el rango / Los datos solos son los promedios de concentración.

China llevó investigaciones en áreas de interés para explotación de yacimientos no convencionales realizando una comparativa con las concentraciones de radionucleidos presentes en el campo Marcellus en Estados Unidos. Los niveles encontrados se relacionan con el tipo de roca ya que a medida que aumenta el contenido de arcilla también lo hace la concentración de uranio y torio. Al realizar la comparación entre las áreas de USA y China, se concluye que en China los niveles de radiactividad son más bajos, pero las vías de contaminación al medio son las mismas, con la diferencia de tener un menor impacto; la contaminación en el suelo y aguas subterráneas se ve producida por altas concentraciones de radio, así, el estudio sugiere identificar los riesgos debido a este radionucleido (Huang et al., 2017).

Las investigaciones referentes a los radioisótopos se han enfocado en medir las cantidades de estos, debido a varios factores que se evidencian en los diferentes estudios, entre los que se tienen: el corto tiempo de masificación de la explotación de yacimientos no convencionales, niveles de radiación que no generan repercusiones a corto plazo, la falta de opciones económicas en la gestión de desechos radiactivos y la falta de estudios sobre los mismos. Las recomendaciones planteadas en los estudios, se inclinan a sugerir investigaciones más robustas sobre las posibles afectaciones a la salud y el entorno, dado el hecho que son escasas en algunas zonas y nulas en otras, además dado el estado incipiente en el que se encuentran los estudios hechos sobre

afectaciones de radiactividad en la industria petrolera, no se han podido establecer normativas diferentes a las ya existentes que estén orientadas a una mejor protección y un mejor tratamiento de los NORM.

5. Implicaciones en la Salud de los Trabajadores y el Medio Ambiente

Los NORM están presentes en todo el desarrollo de la industria e inciden de forma directa e indirecta con el ambiente y el ser humano; sin embargo, el conocimiento sobre estos materiales está poco presente en las personas relacionadas con la industria Oil & Gas. Un estudio realizado en Dakota del Norte, por Torres et al (2017), sobre la familiaridad con el material radiactivo demuestra cómo la falta de información y conocimiento conlleva a generar y ampliar los riesgos radiológicos que impactan negativamente la salud. Para solo el 20% de los participantes de dicho estudio, el material natural radiactivo se relaciona con peligro y, seguido a ese porcentaje, otros lo relacionan con algo seguro debido a la palabra “natural”, lo cual evidencia la alerta frente al desconocimiento sobre los daños y efectos causados por esta fuente.

Las radiaciones de ionización emiten partículas altamente energéticas que pueden alterar el orden de los aminoácidos en el material genético dando lugar a cambios y/o daños genéticos que pueden ser transmitidos a generaciones futuras, o bien, afectar el organismo en un tiempo más cercano. Para esto, el tiempo transcurrido entre la exposición y el daño puede variar entre minutos, horas y años; al igual que, los síntomas se presentan de manera física (en la misma persona) o en la genética (en los descendientes), estos últimos se relacionan con los efectos biológicos. El control y observación sobre los efectos de la radiación han sido establecidos mediante la medición de dosis que recibe el organismo, en la Tabla 14 se relacionan los efectos según la dosis medida en mSv.

Tabla 14*Efectos biológicos sobre los organismos expuestos a altas dosis de radiación ionizante*

Dosis de radiación (mSv)	Efectos
7000 – 10000	Muerte
1000	Vómitos y nauseas
500	Reducción de glóbulos blancos en la sangre
< 200	No existen efectos clínicos demostrados

Nota: Tomado y modificado de Riesgos asociados a los residuos radiactivos. Cátedra Enresa. Universidad de Córdoba. (2015).

Los efectos biológicos trascienden por cambios físicos, en la producción de agua y electrones; y cambios químicos como las reacciones entre los productos formados a partir de las reacciones de los iones OH^+ y O^- , estos productos son capaces de romper cadenas de cromosomas y generar mutaciones o daños a la célula. Así pues, estos efectos se relacionan con la acción indirecta de la radiación sobre los organismos, siendo clasificada como la más peligrosa (Al Nabhani et al., 2020).

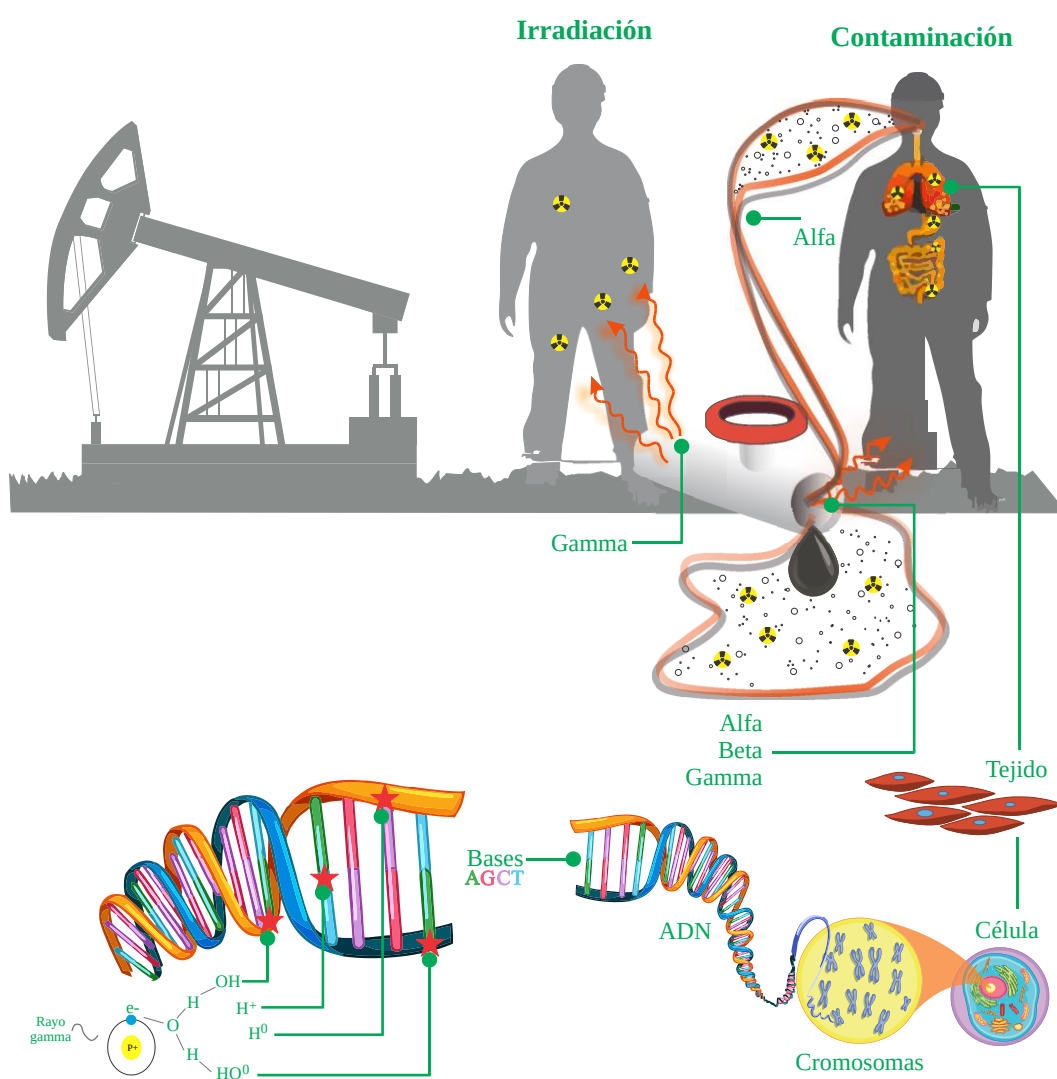
Como se observa en la Figura 9, los organismos pueden recibir las radiaciones de manera irradiante, haciendo referencia a la radiación externa, cuando esta impacta y permanece fuera del cuerpo; y en forma contaminante, haciendo referencia a la radiación interna, cuando se absorbe, ingiere o inhala polvo durante algún tratamiento u operación.

La tasa de dosis absorbida describe la intensidad de la energía depositada en el organismo como resultado de la exposición a la radiación, por lo tanto, no indica los posibles efectos biológicos; para este objetivo es necesario convertirla en dosis equivalente, que se expresa en Sievert (Sv). Para obtener esta última, se hace uso de un factor de ponderación de la radiación, siendo 1 para la radiación gamma y 20 para la radiación alfa (Ajayi et al., 2009) ya que 1 Gy de radiación alfa es 20 veces más grave que 1 Gy de radiación gamma, aproximadamente; dicho factor

es multiplicado por la dosis absorbida. Algunas dosis equivalentes reportadas que corresponden a la industria, por manipulación y exposición al petróleo crudo, se encuentran por debajo del límite perjudicial establecido por la ICPR; no obstante, una exposición prolongada tiende a suponer peligro para la salud dado que la radiación adicional debido a la acumulación, podría estar superando estos límites y el daño siendo significativo.

Figura 9

Tipos de radiación presentes en la industria de los hidrocarburos y sus efectos biológicos



Nota. Tomado y modificado de Fundamentals of technologically enhanced naturally occurring nuclear radioactive materials in the oil and gas industry (p. 76), por Al Nabhani, K. y Khan, F., 2020.

En la industria petrolera, los trabajadores involucrados en operaciones de perforación reciben, la mayor parte del tiempo, radiación externa causada por los rayos gamma que emiten los materiales radiactivos presentes en las tuberías en formas de escamas y lodos. Sin embargo, la presencia de radón y polvo contaminado es muy común y estas clasifican como fuentes de radiación interna mediante la inhalación de partículas alfa. También, existe un aumento en la concentración de los niveles de metales pesados traza, entre ellos el plomo (Pb), perteneciente a la cadena de desintegración del uranio-238 y torio-232, este metal se encuentra normalmente contenido en el petróleo crudo (Osui et al., 2004).

5.1 Fuentes de Radiación Ionizante

Las fuentes de radiación dentro de la industria aumentan con la explotación de yacimientos no convencionales, específicamente se han reportado aquellos en los cuales la roca característica es el shale y/o el mecanismo de producción es el fracturamiento hidráulico. Así mismo, se reportan muestras de lodo de perforación con mayor contenido de hidrocarburos oleosos que tienden a reducir la exhalación de radón-222, lo que podría deberse al incremento del contenido de líquido orgánico como absorbente y retenedor del radón.

5.1.1 Recortes de Roca

Son ricos en uranio y torio, estos no son solubles en agua por lo cual no es muy común su presencia en la superficie. Los residuos sólidos llegan, según la normativa, con un porcentaje de agua que permite la presencia de radionucleidos solubles como lo es el radio, de esta forma se da una acumulación que representa un aumento en la radiación emitida en la zona de vertimiento.

5.1.2 Agua de Retorno

En la fracturación hidráulica, parte del fluido de perforación fluye de vuelta al pozo; de acuerdo al origen y características del subsuelo, este será más radiactivo; un ejemplo es el esquisto Marcellus, es de origen marino y presenta concentraciones de radionucleidos alrededor de 267 veces mayor al límite permitido. Entonces, según Davies (2009), el agua de retorno en la perforación horizontal será mucho más radiactiva que en la perforación vertical, además de ser el residuo principal con radionucleidos disueltos en el flujo y capacidad de movilidad del uranio y torio hacia la superficie. Las aguas residuales tienen alcance a los trabajadores, público en general, plantas, medio ambiente y organismos marinos cercanos a las plataformas y lugares de desecho.

5.1.3 Acumulación de Incrustaciones o Escamas

Los radionucleidos disueltos en agua se depositan en las superficies de las tuberías y equipos de facilidades. Cuando el agua de formación contiene bario, estroncio o calcio, sulfatos y carbonatos, tiende al aumento de la acumulación en tuberías donde se producen amplias caídas de presión y temperatura (Hegazy, 2011); de acuerdo a la concentración de dichos cationes y aniones, es posible predecir la formación de incrustaciones (Oddo et al., 1994). Según sea el nivel de concentración de radio y torio en las formaciones del yacimiento será la concentración de radio en las incrustaciones y, la exposición a radiaciones externas aumenta para el personal de operación. El Departamento de Salud del Estado de Nueva York (2011) ha comprobado que estas exposiciones suponen un mayor riesgo al desarrollo de cáncer. Además, cuando el pozo o las tuberías usadas en la industria terminan su vida útil, se han reportado donaciones de estas últimas a lugares de tránsito público, aumentando las vías de emisión de radiaciones ionizantes (Resnikoff, 2012).

Se ha reportado el sulfato de bario como la incrustación más “difícil” de tratar desde el punto de vista de la gestión debido a su insolubilidad. Estas incrustaciones suelen ser más radiactivas que las de sulfato de carbonato (Kvasnicka, 1998).

El problema y peligro de las incrustaciones radica en las ingestiones, especialmente durante las operaciones de limpieza, el sarro ingerido tiene la posibilidad de quedar atrapado en el organismo de acuerdo al tamaño de las partículas y la vía de ingesta (APPEA, 2002). Teniendo en cuenta la cantidad de plataformas de la industria alrededor del mundo en comparación del número de trabajos de mantenimiento y personas implicadas, el riesgo de seguridad y salud pueden ser altas a menos que se tengan en cuenta las dosis mínimas establecidas por las instituciones internacionales y nacionales (Ali et al., 2019).

5.1.4 Radón en el Gas Natural

La explotación de yacimientos de gas natural es la mayor fuente de gas radón en la industria de los hidrocarburos. Un estudio en el yacimiento de Marcellus, evidencia la relación entre la concentración de radio-226 y la producción de radón en la perforación y tránsito por las tuberías hacia la cabeza de pozo; se concluye que entre mayor sea la concentración de radio en la formación, mayores son los niveles de radón (Resnikoff, 2012).

Las altas posibilidades de inhalación del gas radón o polvo con contenido de NORM hacen que la exposición de los trabajadores a las radiaciones sean diferentes durante las actividades de parada o mantenimiento a las operaciones rutinarias (APPEA, 2002).

5.1.5 Lodos de Desecho

La acumulación de lodos es considerada la fuente más peligrosa según la normativa de la Ley de Protección del Medio Ambiente y Reglamento de Gestión de Residuos Peligrosos; aunque la concentración de radiación sea baja, su alta solubilidad en el ambiente genera gran impacto en

el ambiente, sobretodo en el ambiente marino debido a su vertimiento directo desde las instalaciones de producción. Se acumulan en depósitos, refinerías, oleoductos, contenedores, entre otros; de forma química, biológica y oleosa.

5.2 Riesgo Medioambiental

En el ámbito industrial, la mayor fuente de contaminación por radiaciones se asocia a la industria nuclear la cual se rige bajo principios de protección hacia los seres humanos; para el caso de la industria petrolera estas medidas son relativamente escasas, por tal razón, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR) postuló y extendió normativas de protección a todos los organismos vivos. Entre estas se indica una exposición, procedente de vertidos o eliminación de residuos TENORM, inferior al límite general de 1 mSv por año como dosis absorbida aceptable. Sin embargo, al día de hoy se mantienen las incertidumbres en las mediciones debido a los múltiples factores que alteran la concentración de radiactividad; la mitigación de los posibles efectos en la salud se hace eficaz mediante el control de medidas de seguridad.

Constantemente, la industria genera desechos que contienen radionucleidos y aumentan la posibilidad de contaminación. Las aguas, tanto superficiales como subterráneas, terminan siendo el depósito final de los residuos de perforación con altos niveles de sales como el bario, el benceno, entre otros. Así mismo, el suelo puede presentar fugas de hidrocarburos y residuos que finalmente alcanzan una contaminación extendida a los organismos. El aire está en constante transmisión de gases asociados a las operaciones petroleras donde el radón es el radionucleido predominante.

5.3 Efectos en la Salud

Como se ha identificado, el radio, el radón y sus productos de desintegración son los radionucleidos más abundantes en la superficie durante las operaciones de perforación. El radón en sí mismo no representa un peligro tan alto para la salud ya que el cuerpo no lo absorbe

fácilmente o lo elimina de manera rápida, sin embargo, los productos de descomposición radiactivos si llegan a representar un peligro ya que tienen mayor asociación al riesgo de cáncer, principalmente, de pulmón (Jonathon et al, 1989).

Las ionizaciones pueden provocar daños en tejidos y alterar funciones celulares de acuerdo a las cantidades recibidas y el tiempo transcurrido. Las dosis suministradas pueden clasificarse como agudas (la energía se absorbe en pocas horas o días) o crónicas (la energía se absorbe durante un periodo de tiempo prolongado), según el tiempo de exposición. En la Figura 10 se evidencia el posible efecto que tienen las radiaciones sobre los organismos, el cual demuestra en todo momento una incidencia a nivel molecular siempre y cuando exista una dosis superior al límite umbral establecido por los entes reguladores. Un aumento de la dosis por encima del límite mínimo aumenta la gravedad del efecto.

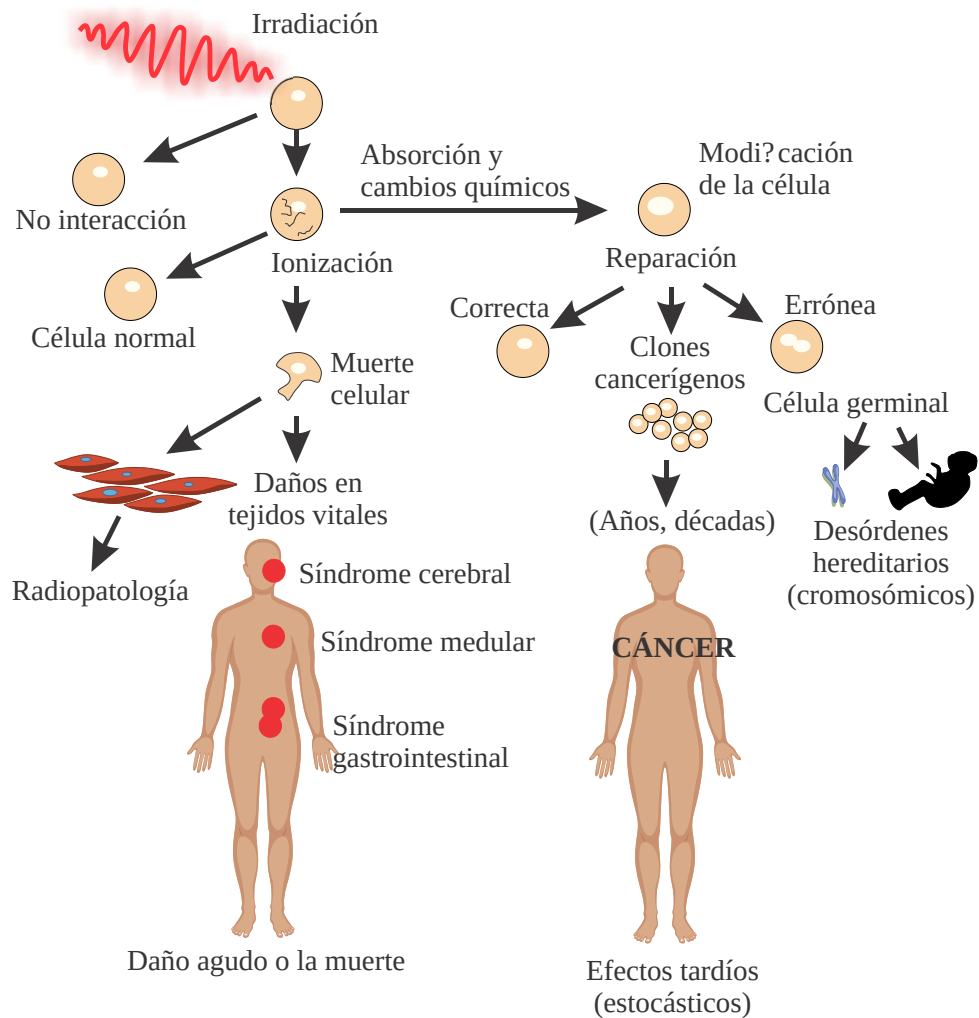
Los TENORM dentro de la industria no provocan efectos agudos ni graves asociados a los altos niveles de radiaciones, no obstante, pueden aparecer efectos tardíos como los que se presentan en las dosis crónicas, entre ellos el desarrollo de algún tipo de cáncer. Para este caso, la dosis aumenta la posibilidad de aparición del cáncer, pero no altera la gravedad de este (Doyi et al., 2016). A partir de investigaciones realizadas hacia la población japonesa bombardeada atómicamente en 1945, se intentó establecer diferencia entre los cánceres causados por la radiación y los causados por otros carcinógenos; dado que no se obtuvieron resultados frente a esto, se suele estimar la probabilidad de contraer cáncer por unidad de dosis de radiación a partir de la extrapolación de datos de poblaciones expuestas a altas dosis de radiación ionizante (ATSDR, 1999).

Los efectos de la radiación en los organismos dependen de la dosis; esta a su vez, depende de variables externas como la solubilidad de las partículas, su tamaño, el tipo y energía de

radiación, la toxicidad (metabolismo del organismo) y el tipo de exposición. Todos los efectos biológicos inician de las interacciones entre las radiaciones y los átomos en las células, dando lugar a efectos deterministas o estocásticos:

Figura 10

Efectos de las radiaciones ionizantes sobre los trabajadores a nivel molecular.



Nota. Tomado y modificado de Protección Radiológica en la Aplicación de Técnicas Nucleares por CPHR, 2002.

5.3.1 Efectos Deterministas

La radiación aumenta la tasa de pérdida o sustitución celular lo cual afecta tejidos y órganos del sistema biológico. Cuando existe una cercanía a un estado patológico, la exposición a radiaciones dirige a los individuos a este; para los individuos sanos el límite de dosis es mayor, por lo cual la tasa de dosis tiene mayor efecto que la dosis en sí misma. Pocos tejidos muestran efectos perjudiciales con dosis anuales menores a 0.5 Gy; las gónadas, el cristalino del ojo y la médula ósea son los más sensibles. También pueden generarse daños en los vasos sanguíneos de soporte.

5.3.2 Efectos Estocásticos

Las células hijas de una célula modificada tienen poca probabilidad de supervivencia; sin embargo, cuando sobreviven pueden convertirse en una célula de proliferación incontrolada, lo que es conocido como un cáncer. La sobreexposición al radio y sus descendientes se asocia con mayor riesgo de cáncer debido a que los NORM que ingresan al cuerpo tienden a depositarse en los huesos generando efectos internos y de manera directa e indirecta.

Desde el año 2000 ha incrementado la explotación de yacimientos no convencionales mediante la fracturación hidráulica en Estados Unidos y con ella la contaminación del medio ambiente y organismos, trayendo consigo un aumento en enfermedades y afecciones a la salud, sobre todo para quienes se encuentran en zonas cercanas a las operaciones. Se realizaron investigaciones sobre los efectos en el ambiente y la salud en la comunidad asociadas a las prácticas petroleras, se evaluaron los impactos en la calidad del agua, del aire, el clima, peligros físicos y químicos tóxicos producidos; entre ellos se resaltaron los TENORM como fuentes constantes (Gorski et al., 2019). Entre los resultados se encontraron dos grupos poblacionales en los que prevalecieron los casos de cáncer entre 1990 y 2011, estos fueron niños y residentes

hospitalizados; se evaluaron mediante estudios clínicos y las bases de datos entre un *antes* y un *después* de las actividades de perforación (Fryzek et al., 2013; Jemielita et al., 2015). Además, afectaciones generales listados a continuación se encontraron en dichas comunidades:

- Mayor prevalencia de bajo peso al nacer.
- Mayor probabilidad de ser pequeño para la edad gestacional.
- Menor peso medio al nacer.
- Mayor probabilidad de defectos cardíacos congénitos y defectos del tubo neutro.
- Mayor probabilidad de síntomas respiratorios y dermatológicos.
- Mayor probabilidad de parto prematuro.
- Mayor probabilidad de embarazo de alto riesgo.
- Mayor probabilidad de tres tipos de asma.
- Mayor probabilidad de muerte fetal.
- Mayor probabilidad de rinosinusitis crónica, migraña y síntomas de fatiga.
- Menor índice de salud infantil.

5.4 Efectos en el Medio Ambiente

Para el caso del medio ambiente, se han realizado estudios e investigaciones en zonas cercanas a las plataformas petroleras para identificar el efecto a largo plazo de la radiación debido al desplazamiento y acumulación de TENORM en los residuos del petróleo y gas. Las concentraciones de los radionucleidos se ven influenciadas por el nivel de actividad petrolera del lugar y la cercanía a dichas plataformas; por ejemplo, en muestras tomadas del suelo de Arabia Saudí, una en zonas contaminadas por petróleo como lo es Ras Tanura, y otra en zonas lejanas como Qassim, obteniendo mayores concentraciones de elementos radiactivos en Ras Tanura (Alshahri et al., 2019) que superan el límite permitido de 30 Bq/kg (UNSCEAR, 2000) por parte

del radio; en las zonas no contaminadas por petróleo, las concentraciones no alcanzaban dicho límite (El.Taher, 2012).

Las concentraciones de radionucleidos en los suelos, aguas, plantas, recortes de perforación y otros tipos de muestras en campos e instalaciones petroleras son mucho más altas, junto con sus alrededores, esta situación puede ser resultado de derrames de petróleo, malas prácticas de vertimientos, fugas de lodos, de agua producida o escamas, la acumulación concentrada de TENORM, y la interacción de todas estas posibilidades con el medio ambiente. En resumen, los efectos pueden presentarse debido al vertimiento de fluidos y escamas, que aumentan el contenido de radionucleidos en el suelo, corrientes de agua y demás componentes del medio circundante; también, al existir poca actividad de TENORM y baja tasa de generación, la atención fácilmente es desviada permitiendo una acumulación significativa que supone peligro para los organismos.

5.5 Manejo de Material Contaminado con Radiación Ionizante

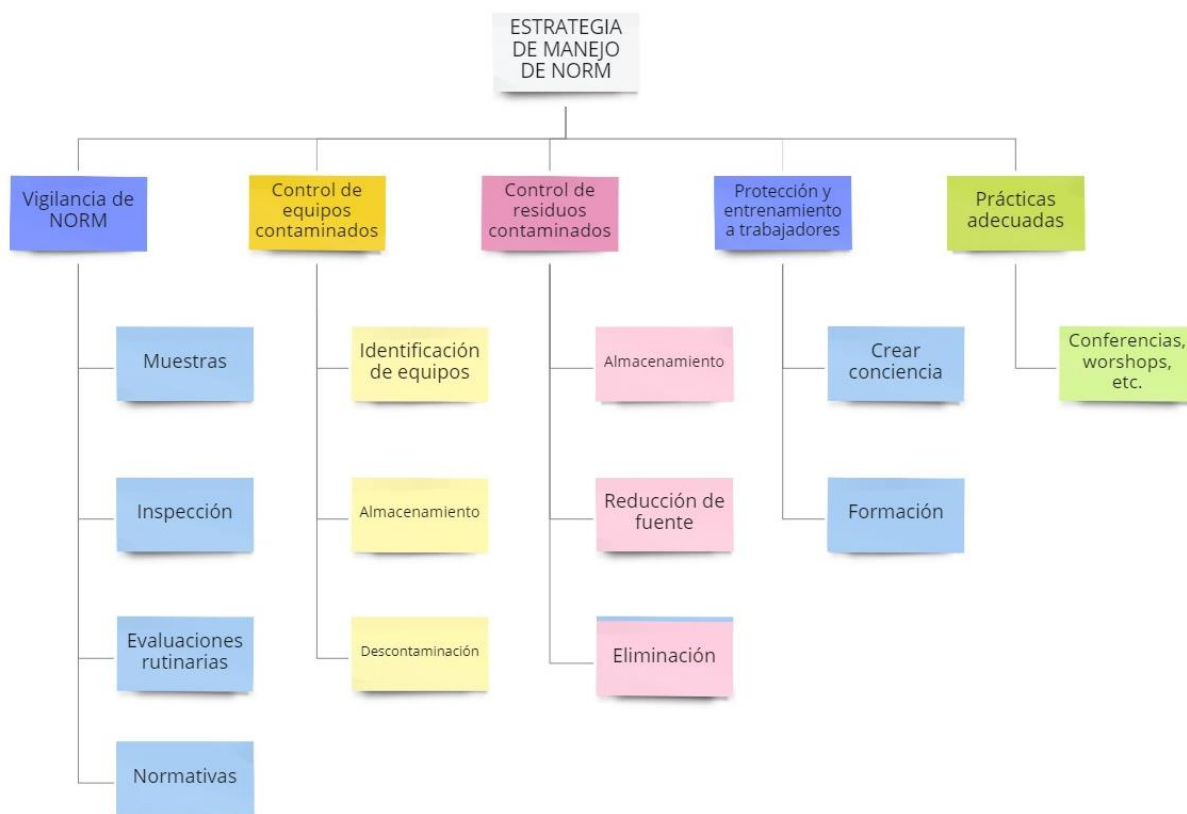
Las múltiples formas en que se pueden acumular los NORM implican un peligro potencial para los trabajadores, el público en general y el medio ambiente si no se establecen medidas de control. La compañía Saudi Aramco (2005) ha establecido propuestas y directrices en el manejo de los NORM con intenciones globales para mejorar el control de los equipos contaminados, la manipulación y desechos de residuos y la protección y formación de los trabajadores; en la Figura 11 se muestran los puntos importantes tomados en cuenta para el desarrollo de la estrategia. Los límites que se presentan para el desarrollo de la guía son:

- Los materiales y desechos como lodos y escamas deben presentar concentraciones inferiores a 1.1 Bq/g para el contenido de radio e inferiores a 5.5 Bq/g para el uranio.
- La contaminación del suelo por Ra-226 debe ser inferior a 0.185 Bq/g.
- La contaminación del suelo por U-238 debe ser inferior a 3.3 Bq/g.

- Los materiales y facilidades de superficie, junto con los implementos personales, se consideran contaminados con NORM si la contaminación de la zona es el doble del nivel de fondo de radiación; siendo este último dependiente del lugar (altura respecto al nivel del mar, temperatura, etc.).

Figura 11

Estrategia de manejo de NORM implementada por Saudi Aramco



Nota. Tomado y modificado de Saudi Aramco Radiation Protection Manual, 2004.

Inicialmente, se realiza una vigilancia y seguimiento de las posibles fuentes, operaciones y contaminación primaria o heredada de NORM (contaminación inicial resultante de operaciones previas a la gestión), lo cual permite identificar los puntos de quiebre durante las operaciones rutinarias que generan mayor contaminación. Una vez identificados dichos puntos, para los

equipos contaminados es importante aislarlos y almacenarlos de manera que no puedan seguir impactando el ambiente, y así, descontaminarlos para continuar su empleo o ser desechados; por otro lado, los residuos deben ser almacenados temporalmente con el mismo objetivo de reducir el impacto ambiental e identificar medios prácticos y rentables para su eliminación. Para este caso, se consideran los vertederos, reinyección, cavernas de sal y los humedales como depósitos de dichos residuos, teniendo en cuenta la ubicación respecto al público en general y las demás plataformas; sin embargo, el primer estudio a tener en cuenta antes del manejo de los residuos es la posibilidad de descontaminación parcial o total mediante agentes químicos (Cowie et al., 2012).

Al sureste de Libia se llevaron a cabo investigaciones con el fin de obtener valores de concentraciones de NORM en suelos por contaminación de los lodos presentes en los equipos de evaporación, dicha investigación adoptó el esquema presentado por Saudi Aramco y encontraron concentraciones desde 83 hasta 1000 Bq/kg para el Ra-226 y concentraciones desde 59 hasta 315 Bq/kg para el Th-232. Para tomar acción frente a la contaminación se tomaron medidas como (Elghawi et al., 2017):

- Revestir los equipos (blindaje) de los nuevos pozos para evitar la contaminación de aguas subterráneas y reducir la del suelo.
- Existe preferencia por la reinyección del agua contaminada en pozos abandonados sobre el vertimiento, encontrando como ventaja el aumento en la tasa de producción.
- Es importante un tratamiento in situ para reducir la exposición de los trabajadores.

Las investigaciones se llevaron a cabo en una zona pequeña y limitada, por lo tanto, las medidas frente a la contaminación son exclusivamente para dicha zona. Es importante evaluar control y medidas de gestión de acuerdo a la contaminación presente en cada lugar.

5.6 Medidas de Protección

De acuerdo a la política (2004) y propuesta (2005) presentada por Saudi Aramco se priorizan estrategias con la máxima protección a los trabajadores mediante difusión de directrices de protección, incluso si no existe claridad en estudios enfocados a la contaminación por NORM, también, realizar campañas informativas y capacitaciones para minimizar el riesgo y mantener el control de propagación de las radiaciones al medio (Cowie et al., 2012).

Las medidas de protección necesarias para limitar la exposición de los organismos se enfocan en tres aspectos: (1) la fuente emisora de radiación, (2) los medios por los cuales se reciben las radiaciones y (3) los receptores. Dicho orden es la base para establecer una ruta de protección y control sobre la exposición, así, aparecen los principios de distancia, tiempo y blindaje. Para el primero, la exposición disminuye a medida que la distancia frente a la fuente de radiación aumenta; el segundo influye en la cantidad de dosis recibida, por esto la capacitación de los trabajadores es importante; finalmente, el blindaje aparece en caso tal que los anteriores no sean suficientes y, dependiendo del tipo y cantidad de radiación se utilizan distintos materiales y espesores (CSN, 2012).

Las normas básicas de seguridad tienen en cuenta los NORM asociados a la industria petrolera, donde su objetivo común es mantener las dosis de radiación tan bajas como sea posible, teniendo en cuenta factores económicos y sociales. Las medidas prácticas difieren según el tipo de exposición a la radiación, así (Hegazy, 2011):

5.6.1 Medidas de Protección Contra la Exposición Externa

Las tasas de dosis externa tienen poca probabilidad de superar los límites de dosis anuales lo que conlleva a una poca atención por parte de los trabajadores y de la aplicación de las medidas preventivas.

- Las operaciones, elementos y/o zonas con NORM deben ser objeto de identificación y control, mediante marcación como zonas restringidas o de acceso frecuente.
- Minimizar la exposición innecesaria a fuentes de radiación como lugares cerrados o muy contaminados.
- Mantener material o equipo de blindaje entre el NORM y los trabajadores potencialmente expuestos. Esta medida presenta gran eficacia para la reducción en la tasa de dosis alrededor de las fuentes de radiación; no obstante, si la acumulación aumenta esta medida pierde eficacia a menos que se realice un refuerzo localizado al blindaje.
- Para los trabajadores que realizan limpieza de los equipos y materiales contaminados deben existir y aplicarse normas especiales y restringidas. Entre ellas está el tipo de vestimenta y accesorios para evitar obtener una contaminación interna.

Para el caso de los tanques de almacenamiento y facilidades de superficie, debido a la acumulación de incrustaciones y lodos, los implementos de protección deben ser constantes y en consonancia con el nivel de concentración de radionucleidos; para esto, es indispensable una vigilancia y control de la zona, implementos de protección individual para las vías respiratorias, guantes, botas, gafas, entre otros, y ropa adecuada (Brito, 2016); en ocasiones, si se tiene conocimiento de las concentraciones de TENORM en el lugar el material de la vestimenta puede ser adecuada al tipo de radiación presente.

5.6.2 Medidas de Protección Contra la Exposición Interna

Cuando existe una dispersión no controlada de contaminación radiactiva suele resultar una ingestión o inhalación de NORM; pero implementar medidas preventivas puede minimizar el riesgo.

- El uso correcto de ropa y accesorios de protección reduce el riesgo de contaminación y transferencia de la misma.
- No fumar, beber, ingerir alimentos, aplicar cosméticos, entre otras actividades que aumenten el riesgo de recibir y/o transferir materiales radiactivos en las áreas faciales.
- Priorizar la manipulación de NORM de forma que la contaminación sea húmeda o de confinamiento para evitar la contaminación del aire y generar escenarios de alto riesgo.
- Las prácticas de higiene y limpieza constante reducen en mayores porcentajes el riesgo de contaminación.
- Los trabajadores deben cumplir con las normas de protección radiológica y someterse periódicamente a vigilancia médica.

6. Conclusiones

- Este trabajo logra demostrar los riesgos para la salud y el medio ambiente que representan los radionucleidos procedentes de la operación de perforación, al recopilar información sobre estudios realizados alrededor del mundo, tanto en perforación de pozos convencionales y como en no convencionales, además de evidenciar la necesidad de realizar más investigación en Colombia.
- Las Investigaciones realizadas sobre los radionucleidos en la industria petrolera, están orientadas a medir los niveles de radiactividad, muchas mencionan los peligros que pueden representar, pero son muy pocas las que están orientadas a evidenciar las afectaciones sobre los trabajadores, comunidades o medio ambiente. Todas recomiendan realizar estudios sobre las afectaciones a la salud, dado que los niveles representan peligros a largo plazo.
- Los radionucleidos constituyen un riesgo para la salud de los trabajadores a largo plazo debido a que la acumulación de estos supone un aumento en las dosis de radiación absorbidas; al igual que los proyectos de explotación de yacimientos no convencionales incrementan dicho riesgo. Además, el manejo y desecho de residuos contaminados con TENORM requieren de constante estudio y proyección para minimizar lo más posible el riesgo frente al medio ambiente y la salud humana.
- El tipo de radiación predominante en el área de la perforación de pozos es la radiación externa proveniente de los rayos gamma, son emitidos por los materiales solubles e insolubles contenidos en las escamas, lodos, agua de retorno y recortes de perforación. Así mismo, durante las operaciones de mantenimiento o paradas, la exposición a radiación

interna incrementa a causa de la acumulación de radón en el aire, principalmente, en espacios cerrados (ej. Tanques de almacenamiento).

- La contribución al contenido efectivo del radio de acuerdo a las fuentes de radiación existentes actúa en un 89% las incrustaciones, un 10% los lodos y un 1% las arenas y sólidos. La concentración de actividad se presenta superior a los niveles internacionalmente establecidos para perforación de yacimientos no convencionales, por lo tanto, se requiere mayor cuidado en el tratamiento de los residuos y materiales.
- Cada operación en la industria petrolera debe estar estipulada de acuerdo a previos estudios que permitan gestionar los desechos con el fin de disminuir el riesgo de contaminación, existen entidades internacionales como el ICRP, la OMS, la UNSCEAR; y entidades nacionales colombianas (el Estado), que dictan normativas y requerimientos básicos y generales a tener en cuenta en las operaciones.
- Un lugar de trabajo gestionado y centrado en la seguridad es primordial para la reducir la exposición a radiación ionizante. La estrategia de protección de los trabajadores consta de tres principios: eliminar el riesgo (en lo posible), minimizar el riesgo y, en la medida que este persista, adoptar medidas eficaces como el uso incondicional de protección personal.

7. Recomendaciones

- Ampliar estudios e investigaciones en el campo radiológico dentro de la industria petrolera en Colombia, específicamente, la perforación de pozos ya que es el primer contacto de los trabajadores con el yacimiento, esto con el fin de minimizar los efectos sobre la salud, principalmente los efectos estocásticos relacionados mayormente con las alteraciones genómicas.
- Teniendo en cuenta que las características de los suelos influyen en la concentración de radionucleidos, los estudios geológicos del suelo colombiano son una base para el desarrollo industrial y la evaluación de los riesgos en la salud.
- Los controles y evaluaciones periódicas de las condiciones de salud de los trabajadores pueden brindar una estimación de la tasa de dosis recibida y los posibles efectos debido a esta.
- Con el fin de gestionar las exposiciones de cada trabajador a la radiación ionizante, se debe establecer un Plan de Gestión de la Radiación NORM para garantizar que la exposición se mantenga tan baja como sea razonable, sociable y económicamente posible.

Referencias Bibliográficas

- Abdelbary, H. M., Elsofany, E. A., Mohamed, Y. T., Abo-Aly, M. M., & Attallah, M. F. (2019). Characterization and radiological impacts assessment of scale TENORM waste produced from oil and natural gas production in Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(30), 30836-30846.
- Abdelmoniem, R. A. E. (2016). Measurement of Activity Concentration, Absorbed Dose Rate and Annual Effective Dose of Natural Occurring Radioactive Material (NORM) in Samples Encountered During Oil & Gas Industry. *IOSR J. Appl. Phys*, 8(5), 89-95.
- Abo-Elmagd, M., Soliman, H. A., Salman, K. A., & El-Masry, N. M. (2010). Radiological hazards of TENORM in the wasted petroleum pipes. *Journal of environmental radioactivity*, 101(1), 51-54.
- Adebiyi, F. M., & Ore, O. (2020). Measurement of radioactivity level of oil-contaminated soils around mechanic workshops for environmental impact assessment. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(17), 2145-2154.
- Adnan, O. H., & Kadhim, N. (2016). *Measurement the radioactivity of some local and imported oil products and for AL-Dora Refinery using gamma spectroscopy* (Doctoral dissertation, MSc thesis, Al-Mustansiriyah University).
- Agbalagba, E. O., Avwiri, G. O., & Ononugbo, C. P. (2013). Activity concentration and radiological impact assessment of ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K in drinking waters from (OML) 30,

58 and 61 oil fields and host communities in Niger Delta region of Nigeria. *Journal of environmental radioactivity*, 116, 197-200.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 1999. Toxicological profile for ionizing radiation. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Ajayi, T. R., Torto, N., Tchokossa, P., & Akinlua, A. (2009). Natural radioactivity and trace metals in crude oils: implication for health. *Environmental geochemistry and health*, 31(1), 61-69.

Al Abdullah, J., Al-Masri, M. S., Amin, Y., Khalily, H., Ammar, M., & Nassour, S. (2017). An innovative procedure for NORM scales treatment and radionuclides separation. *Applied Radiation and Isotopes*, 125, 139-143.

Al Attar, L., Doubal, W., Al Abdullah, J., Khalily, H., Abdul Ghani, B., & Safia, B. (2015). Characterization of NORM solid waste produced from the petroleum industry. *Environmental technology*, 36(9), 1104-1113.

Al Attar, L., Safia, B., Ghani, B. A., & Al Abdulah, J. (2016). Recovery of NORM from scales generated by oil extraction. *Journal of environmental radioactivity*, 153, 149-155.

Al Nabhani, K., & Khan, F. (2020). Fundamentals of technologically enhanced naturally occurring nuclear radioactive materials in the oil and gas industry [Libro electrónico]. En *Natural Occurring Radioactive Materials (NORM) in the oil and gas industry* (pp. 51–90). <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00058-4>

- Alshahri, F., & El-Taher, A. (2019). Investigation of Natural Radioactivity Levels and Evaluation of Radiation Hazards in Residential-Area Soil Near a Ras Tanura refinery, Saudi Arabia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(1).
- Albarrán Castro, N. (2011). *Procesos de migración de contaminantes asociados a coloides en un almacenamiento geológico de residuos radiactivos*. (Tesis doctoral), Universidad Autónoma de Madrid. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/6516>
- Alcañiz, E. (1993). Química Nuclear. Facultad de Farmacia. Universidad de Alcalá. http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG/Tema_2.pdf
- Al-Futaisi, A., Jamrah, A., Yaghi, B., & Taha, R. (2007). Assessment of alternative management techniques of tank bottom petroleum sludge in Oman. *Journal of hazardous materials*, 141(3), 557-564.
- Ali, K. K., Shafik, S. S., & Husain, H. A. (2017). Radiological Assessment of NORM Resulting From Oil and Gas Production Processing in South Rumaila Oil Field, Southern Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 58(2C), 1037-1050.
- Ali, K., & Ibraheem, D. B. (2017). Radiological hazard Assessment Due to Natural Occurring Radioactive Materials (NORM) in Oil and Gas Production Industry—East Baghdad Oil Field. *Iraqi J. Sci.*, 58, 115-126.
- Ali, M. M., Zhao, H., Li, Z., & Maglas, N. N. (2019). Concentrations of TENORMs in the petroleum industry and their environmental and health effects. *RSC Advances*, 9(67), 39201-39229.

- Al-Kinani, A. T., Hushari, M., Alsadig, I. A., & Al-Sulaiti, H. (2015). NORM in soil and sludge samples in Dukhan oil Field, Qatar state. *Donnish Journal of Research in Environmental Studies*, 2(4), 37-43.
- Al-Masri, M. S. (2006). Determination of radioactive scales in oil industry using naturally occurring radioactive materials. *Atomic Energy Commission of Syria AECS-PR/FRSR--* 357.
- Al-Masri, M. S. (2006). Spatial and monthly variations of radium isotopes in produced water during oil production. *Applied radiation and isotopes*, 64(5), 615-623.
- Al-Masri, M. S., & Aba, A. (2005). Distribution of scales containing NORM in different oilfields equipment. *Applied radiation and isotopes*, 63(4), 457-463.
- Al-Masri, M. S., & Haddad, K. (2012). NORM emissions from heavy oil and natural gas fired power plants in Syria. *Journal of environmental radioactivity*, 104, 71-74.
- Al-Masri, M. S., & Suman, H. (2003). NORM waste management in the oil and gas industry: The Syrian experience. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 256(1), 159-162.
- Almeida, R. M., Lauria, D. C., Ferreira, A. C., & Sracek, O. (2004). Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Regiao dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 73(3), 323-334.
- Almond, S., Clancy, S. A., Davies, R. J., & Worrall, F. (2014). The flux of radionuclides in flowback fluid from shale gas exploitation. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(21), 12316-12324.

- Al-Saleh, F. S., & Al-Harshan, G. A. (2008). Measurements of radiation level in petroleum products and wastes in Riyadh City Refinery. *Journal of environmental radioactivity*, 99(7), 1026-1031.
- APPEA, A. P. P. (2002). *Guidelines for Naturally Occurring Radioactive Materials*.
- Asociación Colombiana del Petróleo. (2019). *¿Qué son los hidrocarburos en reservorios no convencionales?* ACP. <https://acp.com.co/web2017/es/todo-sobre-el-fracking/955-que-son-los-hidrocarburos-en-reservorios-no-convencionales>
- Attallah, M. F., Awwad, N. S., & Aly, H. F. (2012). Environmental radioactivity of TE-NORM waste produced from petroleum industry in Egypt: review on characterization and treatment. *Natural Gas–Extraction to End Use*.
- Attallah, M. F., El Afifi, E. M., Awwad, N. S., & Aly, H. F. (2013). Comparative study on the radioactivity of TE-NORM in different components of oil separator tanks. *Radiochimica Acta*, 101(1), 57-65.
- Attallah, M. F., Hamed, M. M., El Afifi, E. M., & Aly, H. F. (2015). Removal of ^{226}Ra and ^{228}Ra from TENORM sludge waste using surfactants solutions. *Journal of environmental radioactivity*, 139, 78-84.
- Attallah, M., Hilal, M. & Mohamed, Y. (2018). Preliminary investigations on reducing the high radiation risk level of TENORM scale waste from petroleum industry. *Radiochimica Acta*, 106(9), 793-800. <https://doi.org/10.1515/ract-2017-2904>

Australian Petroleum Production and Exploration Association limited (APPEA), (2002). Guidelines for Naturally Occuring Radioactive Materials. March.

Avwiri Gregory, O., Emmanuel, E., & Agbalagba Ezekiel, O. (2013). Gamma spectroscopy analysis of produced water from selected flow stations in delta state, Nigeria. *International journal of environmental monitoring and analysis*, 1(5), 167-174.

Awwad, N. S., Attallah, M. F., El-Afifi, E. M., Ibrahim, H. A., & Aly, H. F. (2015). Overview about different approaches of chemical treatment of NORM and TE-NORM produced from oil exploitation. *Advances in Petrochemicals*.

Babatunde, B. B., Sikoki, F. D., Avwiri, G. O., & Chad-Umoreh, Y. E. (2019). Review of the status of radioactivity profile in the oil and gas producing areas of the Niger delta region of Nigeria. *Journal of environmental radioactivity*, 202, 66-73.

Bacon, M. P., Brewer, P. G., Spencer, D. W., Murray, J. W., & Goddard, J. (1980). Lead-210, polonium-210, manganese and iron in the Cariaco Trench. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 27(2), 119-135.

Bakr, W. F. (2010). Assessment of the radiological impact of oil refining industry. *Journal of environmental radioactivity*, 101(3), 237-243.

Bakri, J., & Siregar, R. (2003). Radiation and Radioactivity Levels Survey of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) at PT Caltex Pacific Indonesia.

Ball, J. S., Wenger, W. J., Hyden, H. J., Horr, C. A., & Myers, A. T. (1960). Metal Content of Twenty-Four Petroleums. *Journal of Chemical and Engineering data*, 5(4), 553-557.

- Bandong, B. B., Kreek, S. A., Bazan, J. M., Torretto, P. C., Dixon, J. A., Edwards, W. L., ... & Hall, H. L. (2005). Validation of a gamma-spectrometric method for the measurement of ^{226}Ra and ^{228}Ra in environmental media relevant to the offshore oil and gas industry. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 264(2), 429-435.
- Barbot, E., Vidic, N. S., Gregory, K. B., & Vidic, R. D. (2013). Spatial and temporal correlation of water quality parameters of produced waters from Devonian-age shale following hydraulic fracturing. *Environmental science & technology*, 47(6), 2562-2569.
- Barescut, J. C., Gariel, J. C., Péres, J. M., Gazineu, M. H. P., Hazin, C. A., & Godoy, J. M. O. (2005). Chemical and mineralogical characterization of waste generated in the petroleum industry and its correlation with ^{226}Ra and ^{228}Ra contents. *Radioprotection*, 40(S1), S753-S758.
- Benoit, G., & Hemond, H. F. (1990). Polonium-210 and lead-210 remobilization from lake sediments in relation to iron and manganese cycling. *Environmental science & technology*, 24(8), 1224-1234.
- Botezatu, E., & Grecea, C. (2004). Radiological impact assessment on behalf of oil/gas industry. *J. Prev. Med*, 12(1-2), 16-21.
- Bosch, P., Bulbulian, S., Fernández, M., Jiménez, M., Segovia, N., Solache, M., & ALEMANA, O. H. Y. L. E. (1994). *Pioneros de las ciencias nucleares*. Sep. <http://www.portalplanetasedna.com.ar/ingenieria/FISICA%20%20Pioneros%20De%20Las%20Ciencias%20Nucleares.pdf>

- Brito, J. W. A. (2016). Control de accidentes y enfermedades profesionales en actividades de mantenimiento de tanques de almacenamiento de hidrocarburos [Tesis para optar al título en Magíster en Seguridad e Higiene Industrial]. Universidad Estatal de Cuenca.
- Bulbulian, S. (1987). La Radiactividad (Primera edición, 1987 ed.) [Libro electrónico]. Fondo de Cultura Económica, S. A. de C. V.
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/sec_2.html
- Cabanillas, L., Carstens, G., Lovecchio, J. P., Marshall, P. A., Rebori, L., Soldo, J. C., & Vergani, G. (2013). Hidrocarburos convencionales y no convencionales. *Asociación Argentina de geólogos y geofísicos del petróleo*, 23(134), 41-48.
- Cascón, A. (2009). Riesgos asociados con las radiaciones ionizantes. *Revista argentina de cardiología*, 77(2), 123-128.
- Caselles Pomares, M. J. (2015). Química aplicada a la ingeniería. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/103054?page=32>
- Castañé, P. M., Topalián, M. L., Cordero, R. R., & Salibián, A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Revista de Toxicología*, 20(1), 13-18.
- Caulton, D. R., Shepson, P. B., Cambaliza, M. O., McCabe, D., Baum, E., & Stirm, B. H. (2014). Methane destruction efficiency of natural gas flares associated with shale formation wells. *Environmental science & technology*, 48(16), 9548-9554.

- Chajduk, E., Bartosiewicz, I., Pyszynska, M., Chwastowska, J., & Polkowska-Motrenko, H. (2013). Determination of uranium and selected elements in Polish dictyonema shales and sandstones by ICP-MS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(3), 1913-1919.
- Christie, C. (2012). Disposal of produced water from oil & gas exploration. *Masters project. Duke University Durham*.
- Connor, N. (2020). *Qué es sievert, gris y becquerel; conversión, cálculo y definición*. Radiation Dosimetry. <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-sievert-gris-becquerel-conversion-calculo-definicion/>
- Consejo de Seguridad Nuclear, CSN. (2012). Protección radiológica
- Cowie, M., Mously, K., Fageeha, O., & Nassar, R. (2012). NORM Management in the oil and gas industry. *Annals of the ICRP*, 41(3-4), 318-331.
- Cromer, A. H. (1984). *Física para las ciencias de la vida* (2a. ed.). Editorial Reverté. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/100526?page=1>
- Darko, E. O., Kpeglo, D. O., Akaho, E. H. K., Schandorf, C., Adu, P. A. S., Faanu, A., Abankwah E., Lawluvi H., & Awudu, A. R. (2012). Radiation doses and hazards from processing of crude oil at the Tema oil refinery in Ghana. *Radiation protection dosimetry*, 148(3), 318-328.
- Daub, G. W., Seese, W. S., & Alvarado, E. F. (2005). *Química* (8.^a ed.). Pearson Educación de México.

Davies, P. J., (2009). Radioactivity: A Description of its Nature, Dangers, Presence in the Marcellus Shale and Recommendations by the Town Of Dryden to The New York State Department of Environmental Conservation for Handling and Disposal of such Radioactive Materials. Cornell University.

Department of Energy & Climate Change, Llywodraeth Cymru Welsh Government, & The Scottish Government. (2014). *Strategy for The Management Of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) Waste in The United Kingdom*.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/335821/Final_strategy_NORM.pdf

Doyi, I., Essumang, D. K., Dampare, S., & Glover, E. T. (2016). Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM) in the oil and gas industry: a review. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 107-119.

Duraisamy, R. T., Beni, A. H., & Henni, A. (2013). State of the art treatment of produced water. *Water Treatment*, 199-222. Chapter 9.
<http://www.intechopen.com/books/watertreatment/state-of-the-art-treatment-of-produced-water>

Echavez Marquez, R. A., Cárdenas Montes, J. C., Gonzalez Silva, G., & Mejía Ospino, E. (2021). Evaluacion del oxido de grafeno como agente secuestrante de radionucleidos naturales de las series uranio (^{238}U) y torio (^{232}Th) en aguas de retorno provenientes del fracturamiento hidraulico [recurso electronico]. UIS.

Eisenbud, M., & Gesell, T. F. (1997). *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources: from natural, industrial and military sources*. Elsevier.

El Afifi, E. M., & Awwad, N. S. (2005). Characterization of the TE-NORM waste associated with oil and natural gas production in Abu Rudeis, Egypt. *Journal of environmental radioactivity*, 82(1), 7-19.

El Afifi, E. M., Attallah, M. F., Hilal, M. A., & El Reefy, S. A. (2010). Treatment of TENORM waste: phosphogypsum produced in fertilizer industry. *Radiochemistry*, 52(4), 441-445.

El-Kameesy, S. U., Diab, H. M., Ramadan, A. B., & Megahid, O. R. (2016). Assessment of radioactive concentrations in the Egyptian natural gas grid and their relevant impacts. *American Journal of Physics and Applications*, 4(6), 152.

El-Kameesy, S., Diab, H., Ramadan, A. B., & Megahid, O. R. (2017). Determination of Naturally Occurring Radioactive Material in the Egyptian Oil. *Arab J. Nucl. Sci. Appl.*, 50.

El-Taher, A. (2012). Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazards for building materials used in Qassim area, Saudi Arabia. *Romanian journal of physics*, 57(3-4), 726-35.

Elghawi, U. M., Abutweirat, F. A., & Barka, T. S. (2017). Evaluation of naturally occurring radioactive materials in oilfields of south east of Libya. *International Journal of Low Radiation*, 10(4), 304-313.

- Enfermería, M. R. Y. (2020). El daño en el ADN debido a las radiaciones ionizantes. Ocronos - Editorial Científico-Técnica. <https://revistamedica.com/adn-radiaciones-ionizantes/>
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2021, 23 febrero). TENORM: Oil and Gas Production Wastes. US EPA. <https://www.epa.gov/radiation/tenorm-oil-and-gas-production-wastes>
- Eriksen, D. Ø., Sidhu, R., Strålberg, E., Iden, K. I., Hylland, K., Ruus, A., & Rye, H. (2006). Radionuclides in produced water from Norwegian oil and gas installations—concentrations and bioavailability. *Czechoslovak Journal of Physics*, 56(1), D43-D48.
- Evans, P., Jonkers, G., Steffan, E. M., Campbell, J., & Lloret, C. (2016, April). Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the Oil and Gas Industry. In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Security, Environment, and Social Responsibility*. Society of Petroleum Engineers.
- Eylander, J. G. R., Lancée, P., Maatschappij, N. A., Hartog, F. A., Jonkers, G., & Frigo, D. M. (1997). Feasibility study: On-site decontamination of a Dutch E8P. *International Symposium on Radiological Problems with Natural Radioactivity in the Non-Nuclear Industry*.
- Faanu, A., Ephraim, J. H., & Darko, E. O. (2011). Assessment of public exposure to naturally occurring radioactive materials from mining and mineral processing activities of Tarkwa Goldmine in Ghana. *Environmental monitoring and assessment*, 180(1), 15-29.
- Feofanov, V. A. (2005). Radioactive components of scales at the inner surface of pipes in oilfields of Kazakhstan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 264(2), 413-416.

- Ferrer Soria, A. (2015). Física nuclear y de partículas (3a edición). Publicaciones de la Universidad de Valencia (PUV). <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3806/a/38884>
- Field, G. W. (2014). Analysis of naturally occurring radioactive materials in drill cuttings, Greater Wattenberg Field, Weld County Colorado. Colorado Oil and Gas Conservation Commission.
- Fisher, R. S. (1995). Naturally occurring radioactive materials (NORM) in produced water and scale from Texas oil, gas, and geothermal wells: Geographic, geologic, and geochemical controls. *Virtual Landscapes of Texas*.
- Fournier Jr, D. J., & White, J. K. (2000). The Debate Over Land Farming Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) Generated by the Oil and Gas Industry in Mississippi. *age*, 5, 2.
- Francis, A. J., & Dodge, C. J. (1998). Remediation of soils and wastes contaminated with uranium and toxic metals. *Environmental science & technology*, 32(24), 3993-3998.
- Fryzek, J., Pastula, S., Jiang, X., & Garabrant, D. H. (2013). Childhood cancer incidence in Pennsylvania counties in relation to living in counties with hydraulic fracturing sites. *Journal of occupational and environmental medicine*, 55(7), 796-801.
- Gaefvert, T., & Færevik, I. (2005). *Natural radioactivity in produced water from the Norwegian oil and gas industry in 2003* (No. NRPA--2005: 2). Statens Straalevern.

Galitskaya, P., Biktasheva, L., Saveliev, A., Ratering, S., Schnell, S., & Selivanovskaya, S. (2015).

Response of soil microorganisms to radioactive oil waste: results from a leaching experiment. *Biogeosciences*, 12(12), 3681-3693.

Gallego, A. R. (2010). Riesgos derivados de la exposición a dosis bajas de radiación ionizante. *Revista de Salud Ambiental*, 10(1-2), 43-48.

Gao, Y., Baeyens, W., De Galan, S., Poffijn, A., & Leermakers, M. (2010). Mobility of radium and trace metals in sediments of the Winterbeek: application of sequential extraction and DGT techniques. *Environmental Pollution*, 158(7), 2439-2445.

García-Tenorio, R., Mantero, J., Manjón, G., Vioque, I., & Kpeglo, D. O. (2016). Radioactivity levels in scales generated from crude oil production in Ghana.

Gardner, R. O. N. (2003). Overview and characteristics of some occupational exposures and health risks on offshore oil and gas installations. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(3), 201-210.

Garner, J. (2017). *Industrial radioactivity in the UK's onshore oil and gas industry* (Doctoral dissertation), Loughborough University.

Gazineu, M. H. P., & Hazin, C. A. (2008). Radium and potassium-40 in solid wastes from the oil industry. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(1), 90-94.

Gazineu, M. H. P., de Araújo, A. A., Brandão, Y. B., & Hazin, C. A. (2004). Radium-226 and Radium-228 in Scale and Sludge Generated in the Petroleum Industry. *In Proceedings of the 11th International Congress of the International Radiation Protection Association*.

Gazineu, M. H. P., de Araújo, A. A., Brandão, Y. B., Hazin, C. A., & Godoy, J. M. D. O. (2005).

Radioactivity concentration in liquid and solid phases of scale and sludge generated in the petroleum industry. *Journal of environmental radioactivity*, 81(1), 47-54.

Ghafar, R. M., & Marroshiah, F. (2017). Evaluation of Radioactivity and Potential Radiation

Hazard of NORM waste due to Produced Water Draining in Crude Oil Tanks Area in Banyas. *J. Res. Sci. Stud*, 39(3), 195-210.

Glorioso, J. C., & Rattia, A. (2012, March). Unconventional reservoirs: basic petrophysical

concepts for shale gas. In *SPE/EAGE European unconventional resources conference & exhibition-from potential to production* (pp. cp-285). European Association of Geoscientists & Engineers.

González, V. (2009, enero). Radiactividad y Salud. In *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* (Vol. 67, No. 4).

Gorski, I., & Schwartz, B. S. (2019). Environmental health concerns from unconventional natural

gas development. In *Oxford Research Encyclopedia of Global Public Health*.

Habib, A. S., Shutt, A. L., Regan, P. H., Matthews, M. C., Alsulaiti, H., & Bradley, D. A. (2014).

Characterization of naturally occurring radioactive materials in Libyan oil pipe scale using a germanium detector and Monte Carlo simulation. *Radiation Physics and Chemistry*, 95, 352-355.

Hamlat, M. S., Djeflal, S., & Kadi, H. (2001). Assessment of radiation exposures from naturally

occurring radioactive materials in the oil and gas industry. *Applied Radiation and Isotopes*, 55(1), 141-146.

- Hassan, N. M., Mansou, N. A., Salama, S., & Seoud, M. S. (2019). Assessment of radiological hazards of using petroleum raw materials and their waste. *Radiation protection dosimetry*, 185(4), 494-506.
- Hegazy, R. A. M. (2011). Risk analysis and protective measures for occupationally workers with technologically enhanced naturally occurring radioactive materials.
- Hernández, J. M. (2020). Sistema internacional de unidades (SI). Unidades radiológicas. *Revista Cubana de Medicina*, 20(3).
- Hilal, M. A., Abdelbary, H. M., & Mohamed, G. G. (2018). Physicochemical and radiation hazardous properties of scale TENORM waste: evaluation by different analytical techniques. *Radiochemistry*, 60(4), 444-449.
- Hilal, M. A., Attallah, M. F., Mohamed, G. Y., & Fayez-Hassan, M. (2014). Evaluation of radiation hazard potential of TENORM waste from oil and natural gas production. *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 121-126.
- Hrichi, H., Baccouche, S., & Belgaied, J. E. (2013). Evaluation of radiological impacts of tenorm in the Tunisian petroleum industry. *Journal of environmental radioactivity*, 115, 107-113.
- Huang, T., Hao, Y., Pang, Z., Li, Z., & Yang, S. (2017). Radioactivity of soil, rock and water in a shale gas exploitation area, SW China. *Water*, 9(5), 299.
- IAEA, International Atomic Energy Agency. (2004). Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. *Safety Reports Series No. 34*.

IAEA, International Atomic Energy Agency (2017). Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad. Requisitos de Seguridad Generales No. GSR Parte, 3.

ICRP, 1991. 1990 *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

ICRP. (2019). Publication 142: Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes. Draft Report For Consultation. International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, 48(4), 5-67.

Igunnu, E. T., & Chen, G. Z. (2014). Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 157-177.

Islam, B. (2015). Petroleum sludge, its treatment and disposal: A review. *Int. J. Chem. Sci*, 13(4), 1584-1602

Jackson, R. B. (2014). The integrity of oil and gas wells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(30), 10902-10903.

Jaramillo, J. (2014). ¿Qué es el fracking?. *Ciencia UANL*, 17(67), 7-14.

Jemielita T, Gerton GL, Neidell M, Chillrud S, Yan B, Stute M, et al. (2015) Unconventional Gas and Oil Drilling Is Associated with Increased Hospital Utilization Rates. *PLoS ONE* 10(7): e0131093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131093>

- Jodłowski, P., Macuda, J., Nowak, J., & Dinh, C. N. (2017). Radioactivity in wastes generated from shale gas exploration and production—North-Eastern Poland. *Journal of environmental radioactivity*, 175, 34-38.
- Jonathon, M.S. (1989). *Journal of the National Cancer Institute*, 81, No 10, pp. 745-757.
- Jones, P., Maiti, K., & McManus, J. (2015). Lead-210 and Polonium-210 disequilibria in the northern Gulf of Mexico hypoxic zone. *Marine Chemistry*, 169, 1-15.
- Jonkers, G., Hartog F.A., Knaepen, W.A.I. & Lancee P.J. (1997). Characterization of NORM in the oil and gas production industry. *Proceedings of the International Symposium on Radiological Problems with Natural Radioactivity in the Non-Nuclear Industry*. 23-47.
- Kargbo, D. M., Wilhelm, R. G., & Campbell, D. J. (2010). Natural gas plays in the Marcellus Shale: Challenges and potential opportunities. *Environ. Sci. Technol.* 44, 5679-5684
- Khadhim, N. F., & Adnan, O. H. (2016). Measurement of natural radioactivity in Al-Dora Refinery by using (HPGe) detector. *Advances in Applied Science Research*, 7(4), 197-208.
- Khalilova, K. H. (2016). Research into the radionuclide pollution of ecosystem on the territory of oil fields of Absheron peninsula. *Kimya Problemleri*, (3).
- Killeen, P. G. (1982). Gamma-ray logging and interpretation. In *Developments in Geophysical Exploration Methods—3* (pp. 95-150). Springer, Dordrecht.
- Kita, N. T., Huss, G. R., Tachibana, S., Amelin, Y., Nyquist, L. E., & Hutcheon, I. D. (2005, December). Constraints on the origin of chondrules and CAIs from short-lived and long-lived radionuclides. In *Chondrites and the protoplanetary disk* (Vol. 341, p. 558)

Kolb, W. A., & Wojcik, M. (1985). Enhanced radioactivity due to natural oil and gas production and related radiological problems. *Science of the Total Environment*, 45, 77-84.

Kpeglo, D. O. (2015). *Radiation Exposure to Natural Radioactivity in Crude Oil and Petroleum Waste from Oil Fields in Ghana; Modelling, Risk Assessment and Regulatory Control* (Doctoral dissertation, University of Ghana).

Kpeglo, D. O., Mantero, J., Darko, E. O., Emi-Reynolds, G., Faanu, A., Manjón, G., ... & Garcia-Tenorio, R. (2016). Radiochemical characterization of produced water from two production offshore oilfields in Ghana. *Journal of environmental radioactivity*, 152, 35-45.

Kraemer, T. F., & Reid, D. F. (1984). The occurrence and behavior of radium in saline formation water of the US Gulf Coast region. *Chemical geology*, 46(2), 153-174.

Kumar, A., Singhal, R. K., Rout, S., Narayanan, U., Karpe, R., & Ravi, P. M. (2013). Adsorption and kinetic behavior of uranium and thorium in seawater-sediment system. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(1), 649-656.

Kvasnicka, J. (1998). The Total Management of NORM in the Offshore Petroleum Industry. In *Proceedings of the 1998 APPEA Conference*. 8-11 March 1998, Canberra.

Lagera, L., Hart, A., & Graham, B. (1999). Radionuclides in oil and gas operational discharges and environmental samples associated with offshore oil and gas production facilities. I: Continental Shelf Associates, Inc. Radionuclides, metals, and hydrocarbons in oil and gas operational discharges and environmental samples associated with offshore production facilities on the Texas/Louisiana continental shelf with an environmental assessment of

metals and hydrocarbons. Prepared for US Department of Energy. *Radionuclides, metals and hydrocarbons in oil and gas operational discharges and environmental samples associated with offshore production facilities on the Texas/Louisiana continental shelf with an environmental assessment of metals and hydrocarbons. Prepared for US Department of Energy.*

Landa, E. R. (2007). Naturally occurring radionuclides from industrial sources: characteristics and fate in the environment. *Radioactivity in the Environment*, 10, 211-237.

Landsberger, S., Brabec, C., Canion, B., Hashem, J., Lu, C., Millsap, D., & George, G. (2013). Determination of ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{210}Pb in NORM products from oil and gas exploration: Problems in activity underestimation due to the presence of metals and self-absorption of photons. *Journal of environmental radioactivity*, 125, 23-26.

Landsberger, S., George, G., Lara, R., Tamalis, D., Louis-Jean, J., & Dayman, K. (2012). Analysis of naturally occurring radioactive material using neutron activation analysis and passive Compton suppression gamma-ray spectrometry. *Nukleonika*, 57(4), 461-465.

Langmuir, D. (1978). Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 547-569.

Langmuir, D., & Herman, J. S. (1980). The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11), 1753-1766.

Lawson, R. S. (1999). An introduction to radioactivity. Nuclear Medicine Department, Manchester Royal Infirmary, Manchester.

Li, H. (2013). *Produced water quality characterization and prediction for Wattenberg field* (Doctoral dissertation, Colorado State University).

López, A. J. y Ávila, M. (2018). Introducción a la radioquímica. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/48933?page=281>

Lord, P., Weston, M., Fontenelle, L. K., & Haggstrom, J. (2013). Recycling water: case studies in designing fracturing fluids using flowback, produced, and nontraditional water sources. In *SPE Latin-American and Caribbean Health, Safety, Environment and Social Responsibility Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Mansour, N. A., Ahmed, T. S., Fayez-Hassan, M., Hassan, N., Gomaa, M., & Ali, A. (2012). Measurements of radiation level around the location of NORM in solid wastes at petroleum companies in Egypt. *Journal of American Science*, 8(6), 252-260.

Matta, L.E., Godoy, J., & Reis, M. (2002). Ra-226, Ra-228 and Th-228 in scale and sludge samples from the Campos Basin oilfield E&P activities. *Radiation Protection Dosimetry*. 102. 175-178.

McDevitt, B., McLaughlin, M., Cravotta, C. A., Ajemigbitse, M. A., Van Sice, K. J., Blotevogel, J., Borch, T., & Warner, N. R. (2019). Emerging investigator series: radium accumulation in carbonate river sediments at oil and gas produced water discharges: implications for beneficial use as disposal management. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(2), 324-338.

Moatar, F., Shadizadeh, S., Karbassi, A., Ardalani, E., Akbari Derakhshi, R., & Asadi, M. (2010).

Determination of naturally occurring radioactive materials (NORM) in formation water during oil exploration. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 283(1), 3-7.

Moore, V., Beresford, A., & Gove, B. (2015). Hydraulic fracturing for shale gas in the UK:

Examining the evidence for potential environmental impacts. *The Royal Society for the Protection of Birds (RSPB), London, UK Retrieved from: https://www.rspb.org.uk/Images/shale_gas_report_evidence_tcm9-365779.pdf*.

Myers, T. (2009). Review and analysis of DRAFT supplemental generic environmental impact statement on the oil, gas and solution mining regulatory program well permit issuance for horizontal drilling and high-volume hydraulic fracturing to develop the marcellus shale and other low-permeability gas reservoirs. *New York State Department of Environmental Conservation, NYSDEC*.

Mykowska, A., & Hupka, J. (2014). Natural radioactivity of solid and liquid phases from shale oil and gas prospecting in Pomerania. *Pol J Environ Stud*, 23(6), 2137-2142.

Nabhani, K. A., Khan, F., & Yang, M. (2016). Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in oil and gas production: a silent killer. *Process Safety and Environmental Protection*, 99, 237-247.

National Council on Radiation Protection and Measurements. (2019). *Naturally occurring radioactive material (NORM) and technologically enhanced NORM (TENORM) from the oil and gas industry* (Commentary No. 29). <https://ncrponline.org/shop/commentaries/commentary-no-29/>

- Neff, J. M. (2002). *Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water*. Elsevier.
- Nelson, A. W. (2016). Naturally occurring radioactive materials associated with unconventional drilling for natural gas. PhD (Doctor of Philosophy) thesis, University of Iowa. <https://doi.org/10.17077/etd.hjbou3bs>
- Nelson, A. W., Eitrheim, E. S., Knight, A. W., May, D., Mehrhoff, M. A., Shannon, R., & Schultz, M. K. (2015). Understanding the radioactive ingrowth and decay of naturally occurring radioactive materials in the environment: an analysis of produced fluids from the Marcellus Shale. *Environmental health perspectives*, 123(7), 689-696.
- Nelson, A. W., Johns, A. J., Eitrheim, E. S., Knight, A. W., Basile, M., Bettis III, E. A., & Forbes, T. Z. (2016). Partitioning of naturally-occurring radionuclides (NORM) in Marcellus Shale produced fluids influenced by chemical matrix. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(4), 456-463..
- Nelson, A. W., Knight, A. W., May, D., Eitrheim, E. S., & Schultz, M. K. (2015). Naturally-occurring radioactive materials (NORM) associated with unconventional drilling for shale gas. In *Hydraulic fracturing: environmental issues* (pp. 89-128). American Chemical Society.
- Nwaka, B. U., Avwiri, G. O., & Ononugbo, C. P. (2018). Radiological Risks Associated with Gross Alpha and Beta Activity Concentrations of Water Resources within Salt Water Lakes, Ebonyi State, Nigeria. *International Journal of TROPICAL DISEASE & Health*, 1-10.

Oddo, J.E., and Tomson, M.B., (1994): “Why Scale Forms and How to Predict It”. SPE Production & Facilities, February 1994, pp.47-54.

Okrusch, M., & Frimmel, H. E. (2020). Introduction to Geochemistry. In *Mineralogy* (pp. 635-665). Springer, Berlin, Heidelberg.

Omar, M., Ali, H. M., Abu, M. P., Kontol, K. M., Ahmad, Z., Ahmad, S. H. S. S., I. Sulaiman & Hamzah, R. (2004). *Distribution of radium in oil and gas industry wastes from Malaysia. Applied Radiation and Isotopes*, 60(5), 779-782.

Organización Mundial de la Salud, OMS. (2016). Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección.

Osborn, S. G., Vengosh, A., Warner, N. R., & Jackson, R. B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8172-8176.

Osmond, J. K., & Cowart, J. B. (1976). The theory and uses of natural uranium isotopic variations in hydrology. *Atomic energy review*, 14(4), 621-679.

Osuji, L. C., & Onojake, C. M. (2004). Trace heavy metals associated with crude oil: A case study of Ebocha-8 Oil-spill-polluted site in Niger Delta, Nigeria. *Chemistry & biodiversity*, 1(11), 1708-1715.

Othman, I. M. E. S. A., Saleh, I. H., Ghatass, Z. F., & Metwally, M. A. A. (2018). Radiological Risk Assessment in a Type of Complex Petroleum Refinery in Egypt. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 51(4), 31-43.

- Othman, I., & Al-Masri, M. S. (2005). Disposal strategy for NORM waste generated by the Syrian oil industry. In *Disposal of low activity radioactive waste. Proceedings of an international symposium*.
- Otto, G. H. (1997). *A National Survey on Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Petroleum Production and Gas Processing Facilities*. American Petroleum Institute.
- Parmaksız, A., Ağuş, Y., Bulgurlu, F., Bulur, E., Öncü, T., & Özkök, Y. Ö. (2015). Measurement of enhanced radium isotopes in oil production wastes in Turkey. *Journal of environmental radioactivity*, 141, 82-89.
- Pillai, P. M. B. (2007, March). Naturally occurring radioactive material (NORM) in the extraction and processing of rare earths. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V) organized by University of Seville in cooperation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), Spanish Nuclear Safety Council and University of Huelva* (pp. 197-221).
- Pillay, A. E., Salih, F. M., & Maleek, M. I. (2010). Radioactivity in oily sludge and produced waste water from oil: environmental concerns and potential remedial measures. *Sustainability*, 2(4), 890-901.
- Planas O. (2021). ¿Qué son los radionucleidos? Grandville, EU. Energía Nuclear. <https://energia-nuclear.net/>
- Plyatsuk, L. D., Burla, O. A., Ablieieva, I. Y., Hurets, L. L., & Roy, I. O. (2017). Investigation of produced waters radioactivity of oil and gas deposits in the Dnieper-Donets province. *Journal of engineering sciences*, (4, Iss. 2), G17-G21.

- Puad, H. M., & Noor, M. M. (2004). Behaviors of ^{323}Th , ^{238}U , ^{228}Ra and ^{226}Ra on combustion of crude oil terminal sludge. *Journal of environmental radioactivity*, 73(3), 289-305.
- Purvis, R. M., Lewis, A. C., Hopkins, J. R., Wilde, S. E., Dunmore, R. E., Allen, G., Pitt, J. & Ward, R. S. (2019). Effects of 'pre-fracking' operations on ambient air quality at a shale gas exploration site in rural North Yorkshire, England. *Science of the total environment*, 673, 445-454.
- Resnikoff, M. (2012). Radioactivity in Marcellus Shale: Challenge for Regulators and Water Treatment Plants. *Contemporary technologies for shale-gas water and environmental management. Water Environ. Fed. 2012a*, 45-60.
- Resnikoff, M., & Network, D. R. (2015). Review of Pennsylvania Department of Environmental Protection Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactivity Materials (TENORM) Study Report.
- Rodríguez, J., Segura, J., & Suárez, W. (2018). Tabla de núclidos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Rood, A., White, G., & Kendrick, D. (1998). Measurement of ^{222}Rn flux, ^{222}Rn emanation, and $^{226,228}\text{Ra}$ concentration from injection well pipe scale. *Health physics*, 75 2, 187-92.
- Roy, N. R. (1997). Sobre las interacciones fundamentales, las partículas elementales y las teorías de campos. *Buran*, 41-44.
- Ruipérez, L. G. (1979). Radiactividad y medio ambiente. Universidad de Oviedo.

Russell, W. L. (1945). Relation of radioactivity, organic content, and sedimentation. *AAPG Bulletin*, 29(10), 1470-1493.

Salazar, S., Castillo, L. A., & Montes, L. (2021). Evaluation of naturally occurring radioactive materials-NORM in the soil, in a potential area for unconventional reservoirs in the RANCHERIA SUB-BASIN. *Chemosphere*, 131098.

Sánchez León, J. G. (1993). Radiactividad y medio ambiente. "Estratos", 26.

Saudi Aramco, 2004. Saudi Aramco Radiation Protection Manual. Saudi Aramco Internal Published Document, Dhahran, Saudi Arabia.

Saudi Aramco, 2005. Saudi Aramco Engineering Procedure (SAEP-0358). Management of Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Internal Procedure published by Saudi Aramco, Dhahran, Saudi Arabia.

Saudi Aramco. (2011). NORM is an unwanted by-product of oil & gas production. <https://www.icrp.org/docs/Michael%20Cowie%20Developemetrn%20of%20a%20NORM%20Management%20Strategy%20Oil%20and%20Gas%20.pdf>

Sedighian, S., Abdoli, M. A., Niksokhan, M. H., Kim, M. J., & Cho, S. Y. (2014). Radiological dose assessment of naturally occurring radioactive materials generated by the petroleum industry in wildlife: A case study of chinkaras of Lavan Island, Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 2(4), 215-222.

Servicio Geológico Mexicano. (2018, 9 abril). *¿Qué es el Carbón Mineral?* Gobierno de la Republica de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>

Shawky, S., Amer, H., Nada, A. A., Abd El-Maksoud, T. M., & Ibrahiem, N. M. (2001). Characteristics of NORM in the oil industry from Eastern and Western deserts of Egypt. *Applied Radiation and Isotopes*, 55(1), 135-139.

Shlomy, Z. M. S., Abo-adbba, M. M. A. S., & Salem, M. A. (2018). Separation Of Crude Oil and Its Derivatives Spilled in seawater By Using Spinal Oxide (Environmental Aspects).

Skowronek, J., Michalik, B., & Dulewski, J. (2005). NORM in mining industry in Poland. *Naturally occurring radioactive materials (NORM IV)*, 13.

Smith, G. E., Fitzgibbon, T., & Karp, S. (1995, March). Economic impact of potential NORM regulations. In SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference. OnePetro.

Snively, E. S. (1989). Radionuclides in produced water-a literature review. *American Petroleum Institute Publication*, (5404), 1-85.

Steinhauusler, F., Paschoa, A. S., & Zahorowski, W. (2000). Radiological impact due to oil-and gas extraction and processing: A comparative assessment between Asia-Pacific, Europe, and South America.

Strand, T. (2004). NORM in the Norwegian oil and gas industry—activity levels, occupational doses and protective measures. In *The 11th IRPA International Congress..., -ipen. br* (Vol. 55, pp. 1-5).

Swann, C., Matthews, J., Ericksen, R., & Kuszmaul, J. (2004). *Evaluations of Radionuclides of Uranium, Thorium, and Radium Associated with Produced Fluids, Precipitates, and Sludges from Oil, Gas, and Oilfield Brine Injection Wells in Mississippi*. University of Mississippi (US).

Swiedler, E. W., Muehlenbachs, L. A., Chu, Z., Shih, J. S., & Krupnick, A. (2019). Should solid waste from shale gas development be regulated as hazardous waste?. *Energy Policy*, 129, 1020-1033.

Taheri, A., Taheri, A., Fathivand, A. A., & Mansouri, N. (2019). Risk assessment of naturally occurring radioactive materials (NORM) in the hydrocarbon sludge extracted from the south pars gas field in Iran. *Process Safety and Environmental Protection*, 125, 102-120.

Testa, C., Desideri, D., Meli, M. A., Roselli, C., Bassignani, A., Colombo, G., & Fantoni, R. F. (1994). Radiation protection and radioactive scales in oil and gas production. *Health physics*, 67(1), 34-38.

The Ministry of Environment & Forests, Govt. of India. (2016). *Hazardous and other wastes (management and transboundary movement) rules*.
<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ind183717.pdf>

- Torres, L., Yadav, O. P., & Khan, E. (2017). Perceived risks of produced water management and naturally occurring radioactive material content in North Dakota. *Journal of environmental management*, 196, 56-62.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: sources. United Nations Publications, New York: USA, 2000, vol. 1.
- Varskog, P., & Aamlid, H. (2005, October). Assessment, Treatment and Management of NORM in the Norwegian Oil and Gas Industry. In *Proceedings of the 9th EAN ALARA Workshop* (Vol. 18, p. 21).
- Vegueria, S. J., Godoy, J. M., & Miekeley, N. (2002). Environmental impact studies of barium and radium discharges by produced waters from the “Bacia de Campos” oil-field offshore platforms, Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 62(1), 29-38.
- Vélez, E. E. (2008). Radioactividad natural y salud: ¿Ha llegado el momento de prestarle más atención? *Revista de Salud Ambiental*, 8(2), 74-80.
- Vidic, R. D., Brantley, S. L., Vandenbossche, J. M., Yoxtheimer, D., & Abad, J. D. (2013). Impact of shale gas development on regional water quality. *Science*, 340(6134).
- Waxman, H. A., Markey, E. J., & DeGette, D. (2011). Chemicals used in hydraulic fracturing. *United States House of Representatives Committee on Energy and Commerce Minority Staff*.

- Wei, C. L., Chen, P. R., Lin, S. Y., Sheu, D. D., Wen, L. S., & Chou, W. C. (2015). Distributions of ^{210}Pb and ^{210}Po in surface water surrounding Taiwan: a synoptic observation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 117, 155-166.
- White, G. J., & Rood, A. S. (2001). Radon emanation from NORM-contaminated pipe scale and soil at petroleum industry sites. *Journal of environmental radioactivity*, 54(3), 401-413.
- Wisnubroto, D. S. (2005). Implementasi Bss Pada Pengelolaan Norm-Tenorm. *Puslitbang Teknologi Maju-BATAN Jogjakarta*, 45-52.
- World Health Organization. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Guía. Guinebra.
- Xhixha, G., Baldoncini, M., Bezzon, G. P., Buso, G. P., Callegari, I., Colonna, T., Fiorentini, G., Gjeta, G., Goga M., Guastaldi, E., Hasani, F., Mantovani, F., Mou L., Rossi, C., Strati, V., Xhixha, M., & Zanon, A. (2014). Assessment of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORMs) in soils from the Kuçova oilfield, Albania.
- Xhixha, G., Baldoncini, M., Callegari, I., Colonna, T., Hasani, F., Mantovani, F., & Kaçeli, M. X. (2015). A century of oil and gas exploration in Albania: Assessment of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORMs). *Chemosphere*, 139, 30-39.
- Xhixha, G., Bezzon, G. P., Brogini, C., Buso, G. P., Caciolli, A., Callegari, I., De Bianchi S., Fiorentini G., Guastaldi E., Kaçeli Xhixha M., Mantovani F., Massa G., Menegazzo R., Mou L., Pasquini A, Rossi Alvarez C., & Shyti, M. (2013). The worldwide NORM production and a fully automated gamma-ray spectrometer for their characterization. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(1), 445-457.

- Zakaria, K. M. (2018). Radiological Impacts of Norm and Poly Aromatic Hydrocarbon in Petroleum Industry Process on Marine Ecosystem at the Red Sea, Egypt. *Environ. Anal. Ecol. Stud.*, 1(4).
- Zhang, T. (2015). *Origin and fate of radium in flowback and produced water from Marcellus Shale gas exploration* (Doctoral dissertation, University of Pittsburgh).
- Ziqiang, P., Yin, Y., & Mingqiang, G. (1988). Natural radiation and radioactivity in China. *Radiation Protection Dosimetry*, 24(1-4), 29-38.
- Zukin, J. G., Hammond, D. E., Teh-Lung, K., & Elders, W. A. (1987). Uranium-thorium series radionuclides in brines and reservoir rocks from two deep geothermal boreholes in the Salton Sea Geothermal Field, southeastern California. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(10), 2719-2731.