



Aplicaciones del radón como trazador en la industria petrolera

Radon applications as a tracer in oil industry

Aplicações do radon como traçador na indústria petrolífera

ARTÍCULO ORIGINAL



Beatriz Celeste Angulo Saldña¹ 
angulobcs@gmail.com

Juan Carlos Hernández Annette¹ 
annettejch@gmail.com

Aristeo Núñez Othón² 
anunez@gmail.com

¹Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas, Venezuela

²Piteau Associates Engineering Ltd. 2500 North Tucson Boulevard, United States

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v8i21.121>

Artículo recibido 12 de marzo 2024 / Aceptado 3 de abril 2024 / Publicado 15 de mayo 2024

RESUMEN

El radón es un elemento radiactivo, gaseoso, más denso que el aire, inodoro e insípido. Al ser producto del decaimiento radiactivo del uranio 238, debido a su asociación con la materia orgánica, está presente en forma natural en sistemas petrolíferos. De ahí que nos hayamos planteado como objetivo profundizar sobre la aplicabilidad del radón en las etapas de exploración y producción de la industria. El estudio constituye una investigación básica, en la que se realizó una revisión de literatura, para lo que empleó una investigación es cualitativa y se utilizó el método descriptivo-explicativo. La metodología empleada con enfoque inductivo que se nutrió principalmente de fuentes provenientes de plataformas académicas reconocidas, Science Direct, EBSCO, Cambridge CSA, One Petro, GeoScience World, entre otras y operadores booleanos: AND, OR y NOT. La revisión en bases de datos científicas, presenta las generalidades químicas y geoquímicas del ²²²Rn y muestra su utilidad como herramienta exploratoria de hidrocarburos desde superficie y como trazador de partición para la estimación de la saturación residual de crudos en producción, así como en caracterización de yacimientos y como soporte para la evaluación del progreso de proyectos de recuperación mejorada de hidrocarburos empleando vapor. Entre las ventajas en el empleo del radón resalta su presencia natural en el yacimiento, lo que evita el impacto ambiental, así como la sencillez y bajo costo de su determinación, potenciándolo como trazador natural en exploración y producción.

Palabras clave: Etapas críticas; Exploración petrolera; Geoquímica; Radón; Trazador Isotópicos

ABSTRACT

Radon is a radioactive, gaseous element, denser than air, odorless and tasteless. Being a product of the radioactive decay of uranium 238, due to its association with organic matter, it is naturally present in petroleum systems. Hence, we have set ourselves the objective of delving deeper into the applicability of radon in the exploration and production stages of the industry. The study constitutes a basic investigation, in which a literature review was carried out, for which qualitative research was used and the descriptive-explanatory method was used. The methodology used with an inductive approach was mainly drawn from sources from recognized academic platforms, Science Direct, EBSCO, Cambridge CSA, One Petro, GeoScience World, among others, and Boolean operators: AND, OR and NOT. The review in scientific databases presents the chemical and geochemical generalities of ²²²Rn and shows its usefulness as an exploratory tool for hydrocarbons from the surface and as a partition tracer for the estimation of the residual saturation of crude oil in production, as well as in reservoir characterization and as support for the evaluation of the progress of enhanced hydrocarbon recovery projects using steam. Among the advantages in the use of radon, its natural presence in the deposit stands out, which avoids environmental impact, as well as the simplicity and low cost of its determination, enhancing it as a natural tracer in exploration and production.

Key words: Critical stages; Oil exploration; Geochemistry; Radon; Isotopic Tracer

RESUMO

O radônio é um elemento radioativo e gasoso, mais denso que o ar, inodoro e insípido. Por ser produto do decaimento radioativo do urânio 238, devido à sua associação com a matéria orgânica, está naturalmente presente nos sistemas petrolíferos. Assim, estabelecemos como objetivo aprofundar a aplicabilidade do radônio nas etapas de exploração e produção da indústria. O estudo constitui uma investigação básica, na qual foi realizada uma revisão de literatura, para a qual foi utilizada a pesquisa qualitativa e utilizado o método descriptivo-explicativo. A metodologia utilizada com abordagem indutiva foi extraída principalmente de fontes de plataformas acadêmicas reconhecidas, Science Direct, EBSCO, Cambridge CSA, One Petro, GeoScience World, entre outras, e operadores booleanos: AND, OR e NOT. A revisão em bases de dados científicas apresenta as generalidades químicas e geoquímicas do ²²²Rn e mostra sua utilidade como ferramenta exploratória de hidrocarbonetos da superfície e como traçador de partição para estimativa da saturação residual de petróleo bruto em produção, bem como na caracterização de reservatórios. e como apoio à avaliação do progresso de projetos de recuperação aprimorada de hidrocarbonetos utilizando vapor. Dentre as vantagens na utilização do radônio, destaca-se sua presença natural na jazida, o que evita impacto ambiental, bem como a simplicidade e baixo custo de sua determinação, potencializando-o como traçador natural na exploração e produção.

Palavras-chave: Estágios críticos; Exploração de petróleo; Geoquímica; Radônio; Traçador Isotópico

INTRODUCCIÓN

Los crudos transicionales y algunos no convencionales han tenido que ser explotados masivamente por los requerimientos energéticos. Entre éstos están aquellos acumulados en rocas sedimentarias como esquistos y pizarras de baja porosidad y baja permeabilidad, en mantos continuos y en la mayoría de grandes extensiones y a profundidades de 400 a 5000 metros, lo que hace que estén en mucha menos concentración y se hagan más difíciles de extraer. Como indica Mata, et al., (2020) estos crudos no pueden ser producidos, transportados o refinados usando técnicas tradicionales. Por el contrario, se requieren métodos de extracción más intensivos y agresivos como el de Fracturamiento Hidráulico o Fracking, en el cual se hace necesario romper las capas de pizarra para conseguir acumular el gas/petróleo para que éstos fluyan hacia la superficie donde será recogido y almacenado.

La industria petrolera mundial presenta grandes retos, esto ya que tras más de un siglo de extracción petrolera, ha sido alcanzada la madurez en la mayoría de los yacimientos, trayendo como consecuencia el aumento en el corte de agua en una proporción de tres barriles de agua por cada barril de crudo y la necesidad de mantener la presión del sistema por debajo de la denominada presión de burbuja, esto con el fin de evitar fenómenos adversos para la producción petrolera como la precipitación de asfaltenos (Balay, et al., 2000; Abdou, et al., 2011).

Los yacimientos venezolanos no distan de este escenario mundial; para el 2016 el corte de agua fue de 42%, así mismo en la actualidad Petróleos de Venezuela lleva a cabo proyectos de mantenimiento de presión mediante inyección de agua en escenarios tan diversos como la Faja Petrolífera del Orinoco Hugo Chávez, Cuenca de Maracaibo y Cuenca Oriental de Venezuela (PDVSA, 2016).

Todo esto trae consigo el reto de desarrollar tecnologías que con un bajo costo sirvan para la caracterización exhaustiva de yacimientos, sobre todo como soporte del modelado dinámico, lo que sirve de apoyo para la gestión de yacimientos y especialmente, para la gestión de los proyectos de recuperación mejorada de hidrocarburos. El gas radón ^{222}Rn , con las particularidades inherentes a su posición en la tabla periódica, destaca como un excelente trazador en el ámbito de la geoquímica, la geofísica y la geología. Al ser un gas noble no es reactivo, desplazándose con la fase acuosa sin presentar pérdidas ni retardos producto de la interacción con el medio sólido, su estado gaseoso favorece su migración por lo que sirve para detectar la conectividad entre el medio subterráneo, donde es originado y la superficie; su corto tiempo de vida media de 3,8 días permite evaluar procesos en progreso (Ponte-Sucre, 2017).

Los átomos del Radón tienen un retroceso muy pequeño ($3,0 \times 10^{-8} \text{ cm}$) por ello solo los

que están en la superficie de los granos de las rocas logran emanar fácilmente, facilitando con ello se transporte en aguas subterráneas circundantes. Así las concentraciones de Radón en aguas subterráneas dependen de la superficie de contacto de las rocas con el acuífero, el origen propio de las rocas es proporcional a las concentraciones de Uranio dentro de las rocas. Los hijos del ^{222}Rn son: ^{218}Po , ^{214}Po , ^{214}Bi , Pb . Y estos elementos tienen un semiperiodo relativamente pequeño en comparación con la del ^{222}Rn , esto permite que el Radón pueda recorrer gran distancia antes de desintegrarse por completo (Guerrero, 2021).

En el ámbito de caracterización de yacimientos petrolíferos, destaca en forma particular, su elevado coeficiente de partición crudo/agua; potenciando la factibilidad de aplicación del radón como trazador de partición en yacimientos. De ahí que nos hayamos planteado como objetivo profundizar sobre la aplicabilidad del radón en las etapas de exploración y producción de la industria petrolera.

METODOLOGÍA

El estudio constituye una investigación básica, en la que se realizó una revisión de literatura sobre aplicaciones del radón como trazador en la industria petrolera y su aplicabilidad del en las etapas de exploración y producción. La investigación es cualitativa y se utilizó el método descriptivo-explicativo.

La metodología empleada con enfoque inductivo que se nutrió principalmente de fuentes provenientes de plataformas académicas reconocidas, Science Direct, Ebsco, Cambridge CSA, One Petro, GeoScience World, entre otras y operadores booleanos: AND, OR y NOT. Donde se emplearon los siguientes descriptores: radon tracer groundwater, radon oil reservoir, radon exploration, radon geochemistry, radon oil industry. La selección de literatura se rigió por un criterio de relevancia, priorizando aquellos estudios que proporcionaran una comprensión más profunda de la interrelación existente entre el radón y la producción petrolera; así como su empleo en la etapa crítica en el proceso productivo en Venezuela.

La información recopilada se sometió a un proceso riguroso de organización y clasificación con el fin de descartar aquella que no se alinea con las variables fundamentales definidas para el análisis, se utilizó el procedimiento descrito por Barragán (2018), que utiliza tres etapas Identificar, Evaluar e Interpretar los resultados de la revisión para proporcionar las respuestas a las preguntas de investigación. Posteriormente, los datos seleccionados fueron objeto de un análisis detallado, donde se llevaron a cabo procesos de síntesis y organización con el propósito de estructurar una presentación coherente y secuencial en relación a la radón y la producción petrolera y su aplicación en la etapa crítica en el proceso productivo de la industria petrolera en Venezuela, preguntas de investigación utilizadas Tabla 1 y criterios de inclusión y exclusión Tabla 2.

Tabla 1. Preguntas de investigación.

#	Preguntas de investigación
1	¿Para qué se utiliza la aplicación del radón, cuáles son sus principios generales?
2	¿Cuáles son los ambientes geológicos asociados a depósitos de uranio? Presencia de ^{222}Rn ?
3	¿Qué aplicación tiene el radón en la exploración petrolera?
4	¿Cómo se Aplicaciones a nivel mundial?
5	¿Cuál es Aplicaciones del radón para prospección de hidrocarburos en Venezuela?
6	¿Cuál es la aplicación como trazador natural para evaluaciones in situ durante pruebas de vapor?

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión para los artículos de investigación.

Inclusión	Exclusión
Artículos revisados por pares	Lectura gris
Artículo que analiza aplicación del radón en la industria del petróleo	Editoriales o resúmenes
Artículos en español e inglés	Diferentes al idioma inglés y español
Artículos de acceso abierto o libre	Libros o tesis

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Utilización del radón, principios generales

Los trazadores isotópicos son de dos tipos, estables y radioactivos. Los trazadores isotópicos estables, como el ^{18}O y el ^2H son aquellos que no suponen una variación en la composición isotópica del agua o de alguna de las sustancias que tienen disueltas. Los radiactivos, como el ^3H son muy importantes y presentan notables ventajas sobre los trazadores químicos, pero su manejo es más delicado y caro. En la industria gasopetrolífera la aplicación de las técnicas de trazadores desborda los límites tradicionales de la exploración y producción. La gestión ambiental de yacimientos onshore encuentra en las técnicas de hidrología de trazadores una herramienta adecuada para identificar problemas ambientales, evaluar el alcance, distribución espacial y variación temporal de contaminaciones

de petróleo de las aguas terrestres y marinas, del suelo y la vegetación y, en consecuencia, monitorear con ciertos trazadores la efectividad de las medidas para mitigar los efectos no deseados y la rehabilitación de las aguas y los terrenos contaminados (Soerens, et al., 2004).

Por lo que se describen algunos resultados obtenidos en la aplicación de técnicas de trazado utilizando Rodamina B, Tritio, Radón ^{222}Rn , microelementos como el, B, Br, Sr o macroconstituyentes conservativos como el Cl para la gestión ambiental de las aguas terrestres de los yacimientos (Molerio, et al., 2014):

El ^{222}Rn es hijo del ^{226}Ra , cuyo tiempo de vida media es de 1620 años y proviene a su vez, de la cadena de desintegración del ^{238}U , Figura 1.

Es importante mencionar que existe una relación intrínseca entre la actividad del ^{226}Ra y del ^{222}Rn , al ser este último producto del decaimiento radiactivo del primero. Haciendo

uso de esta relación es posible aplicar la ley del equilibrio secular por decaimiento radiactivo, en este sentido, toda vez que en un sistema cerrado el ^{226}Ra y el ^{222}Rn alcanzan dicho equilibrio secular,

las actividades de ambas especies radiactivas se igualan, según la ecuación 1:

$$A_t = A_{eq} [1 - \exp(-\lambda)] \quad [\text{Ec. 1}]$$

(Hoehn, et al., (1992).



Figura 1. Cadena de desintegración del ^{238}U . Los isótopos en la cadena vertical representan decaimiento alfa (4He^{2+}) y los isótopos en cadena lateral decaimiento beta. Grolander, (2009)

Los yacimientos que han sido explorados y explotados de manera intermitente por diferentes operadores plantean al operador actual el problema del alcance de responsabilidad de cada uno de los precedentes respecto al estado de calidad del aire, las aguas y los suelos. Esto es particularmente importante en tanto la legislación ambiental de muchos países exige o exige, según el caso, reparaciones por los daños causados al entorno por la actividad de exploración y producción. Pero en el caso, sobre todo, de actividades de E&P, en que la exigencia por el cuidado del medio ambiente era mucho menor y no constituía parte de la filosofía de

estado de muchos países y, mucho menos, de las propias compañías petroleras, sucede que los operadores que vuelven a esos campos pueden encontrarse problemas ambientales no creados por ellos y a los que, de cualquier modo, deben dar solución o responder por tales impactos, jurídicamente, ante las autoridades ambientales, gubernamentales y la sociedad civil en general.

Distinguir si la presencia de hidrocarburos (Líquidos de Fase No Acuosa –LFNA–, en general) en las aguas o los suelos son producto de la actividad de E&P actual o antigua o son manifestaciones naturales aisladas o si la salinidad de determinado horizonte acuífero

es producida por derrames de aguas de capa, explotación de pozos auxiliares, derrames o filtraciones en ductos de agua salada o es debida al aprovechamiento intensivo no petrolero (actual o antiguo) de las aguas subterráneas es un tema ambiental a resolver que se plantea con cierta frecuencia (Soerens, et al., 2004).

Ciertos trazadores (Soerens, et al., 2004) son particularmente bondadosos en la solución de

ciertos problemas de hidrogeología ambiental de yacimientos gasopetrolíferos en terrenos cársicos donde fuentes diferentes de contaminación de las aguas terrestres pueden provocar efectos semejantes que se prestan a confusión. En tal sentido, los trazadores isotópicos resultan de especial relevancia Figura. 2.

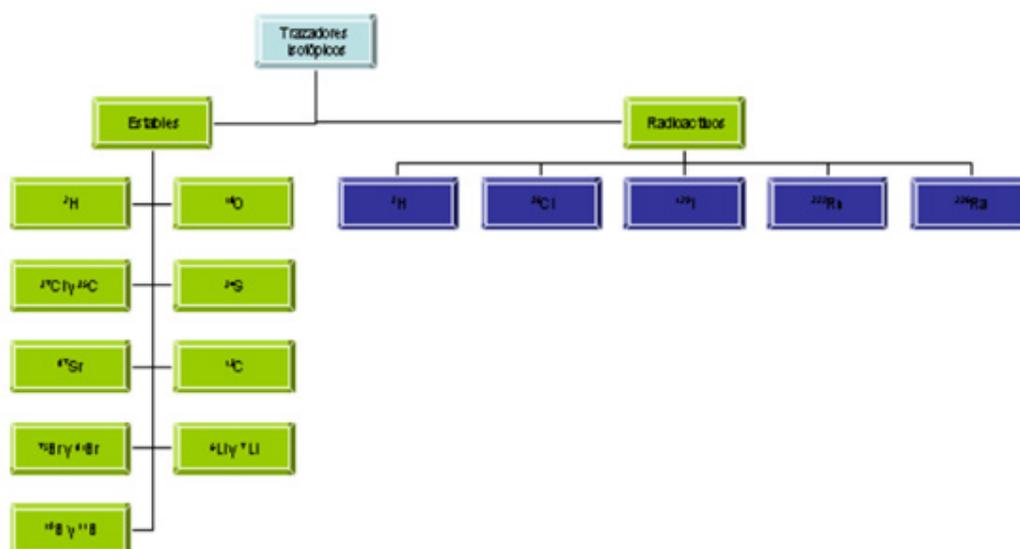


Figura 2. Trazadores isotópicos (estables y radioactivos) aplicables en la gestión hidrogeológica ambiental de yacimientos gasopetrolíferos. Molerio, (2012).

Los isótopos estables, por sus propiedades de fraccionamiento, permiten caracterizar las condiciones hidrológicas y climatológicas en las que tuvo lugar la infiltración y la recarga de los acuíferos. La composición isotópica estable se modifica por los procesos meteóricos, por lo que las aguas de infiltración adquieren una huella isotópica característica del entorno en que se produjo la recarga. Los isótopos radioactivos, por su período de desintegración, permiten fechar el momento de tales infiltraciones. El decaimiento

radioisotópico desde las fuentes de recarga hasta las de descarga es una medida del tiempo de circulación y, en consecuencia, de las condiciones de renovabilidad del agua.

Geoquímica del uranio y el radón

Toda vez que el radón proviene de la cadena de desintegración del ^{238}U , su ciclo geoquímico está inherentemente relacionado con este último. En este sentido, resulta necesario esbozar las principales asociaciones geoquímicas del uranio,

especialmente en el medio acuoso, por ser lo que compete a este estudio. El Uranio, elemento de la serie de los actínidos, está presente en forma natural en estados de oxidación desde +2 hasta +6, manifestando una elevada sensibilidad a los cambios redox del medio, siendo los estados de oxidación de +4 y +6 los más relevantes desde el punto de vista geoquímico (Zielinski, y Meier, 1988).

Bajo el estado de oxidación de +4 tiene un comportamiento similar al torio y a los elementos de tierras raras, hallándose asociado a minerales accesorio de rocas ígneas ácidas como la monacita; sin embargo al exponerse a condiciones ambientales superficiales, oxida rápidamente para formar el ión uranilo (UO_2^{+2}) lo que facilita su transporte en el medio acuoso, favoreciendo su mineralización secundaria, además de su asociación a compuestos orgánicos en condiciones sub-óxicas a anóxicas, durante el proceso de acumulación de la materia orgánica, precursora de hidrocarburos del petróleo (Schumann y Gundersen, 1996).

Debe considerarse que el ión uranilo tiende a ser más estable en presencia de aguas ricas en carbonatos, al formar complejos monos o dicarbonílicos, así mismo puede formar complejos con iones OH^- , PO_4^{3-} , F^- así como con ácidos húmicos y fúlvicos, siendo los cambios redox y de pH, los que promueven su incorporación a la fase sólida como UO_2 o como óxidos polimetálicos (Spirakis, 1996).

Ambientes geológicos asociados a depósitos de uranio. Presencia de ^{222}Rn

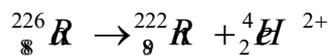
Entendiendo que la presencia del ^{226}Ra y por consiguiente del ^{222}Rn está vinculada al uranio, es de esperarse una concentración elevada de éstos en los ambientes geológicos propicios para la acumulación del uranio, en este sentido, el ^{222}Rn para el caso de los yacimientos petrolíferos, puede estar asociado a fluidos hidrotermales profundos, especialmente relacionado a fallas en rocas graníticas, a lutitas con alto contenido de materia orgánica y a sistemas de aguas subterráneas cuyo medio poroso se relacione con arenas de ambiente fluvial con acumulación de minerales incompatibles tales como la uraninita (UO_2) y la pechblenda ($\text{U}_2\text{O}_5 \cdot \text{UO}_3$), por mencionar aquellos con las mayores proporciones de uranio en su composición. Así mismo, la presencia del ^{226}Ra y del ^{222}Rn puede ser mayor en aguas subterráneas carbonatadas, esto debido al aumento de la estabilidad del uranio por los iones carbonato (Puigdomenech y Bruno, 1988).

Es importante resaltar, que si bien desde el punto de vista de explotación minera los depósitos en lutitas, rocas carbonáticas y arenas recientes, no son tan atractivos, sí pueden ser importantes como sustratos generadores de radio y radón, de interés como trazadores geoquímicos y geológicos, así mismo debe tenerse presente la alta movilidad del uranio en forma de uranilo en condiciones oxidantes, por lo que ambientes geológicos distantes con ingreso

de agua meteórica conteniendo oxígeno, podrían contribuir al aporte de uranio en las aguas asociadas a yacimientos (Folger, et al., 1996).

Emanación de ^{222}Rn

El radón en estado gaseoso, es liberado de rocas, sedimentos, suelos y aguas contentivos de la especie sólida o acuosa radiactiva ^{226}Ra , a medida que decae, liberando una partícula alfa, que no es más que un núcleo de helio doblemente ionizado:



Para el caso de sólidos, el fenómeno mediante el cual el radón neoformado fuga hacia el medio circundante (fase líquida o gaseosa) es denominado emanación, controlado por dos procesos, la difusión del nuevo átomo radiactivo a través de la estructura cristalina, hasta alcanzar el medio circundante y el impulso mecánico, (*recoil*) del ^{222}Rn producto de la energía cinética liberada durante la desintegración. Así mismo, el potencial de emanación depende principalmente de dos factores, uno físico y uno químico. El primero tiene que ver con el área superficial del sólido respecto al volumen, siendo que las partículas de menor tamaño o con mayor cantidad de fracturas, presentan una mayor emanación del radón, el segundo factor, corresponde a la concentración del ^{226}Ra presente en el medio, esto a su vez en la mayoría de los casos, condicionado por la concentración de ^{238}U (Cook, et al., 2003).

La concentración de radón en aguas subterráneas someras no solo depende del potencial de emanación de los sólidos presentes; a esto deben sumarse factores como el decaimiento radiactivo del radio transportado en solución, la fuga de radón hacia estratos superiores o la atmósfera mediante fenómenos de difusión, las condiciones de presión y temperatura que inciden sobre la solubilidad del gas noble en la fase acuosa y el empuje hidráulico de los fluidos, que favorecerá su movilidad a través del medio poroso (Clever, 1979).

Para el caso de yacimientos petrolíferos la distribución y movilidad del gas radón se complica, al sumarse al análisis del párrafo anterior, el efecto de la mezcla compleja de fluidos orgánicos (desde metano hasta porfirinas y asfaltenos). Estudios previos muestran la elevada constante de partición del radón no solo para especies orgánicas puras (Clever, 1979), sino también para mezclas complejas tales como gasolina y diesel (Hunkeler, et al., 1997; Hohener y Surbeck, 2004; Fan, et al., 2006). Esto hace del ^{222}Rn un excelente candidato como trazador en el ámbito de estudios de aguas subterráneas o yacimientos petrolíferos (Baskaran, 2016).

Aplicaciones del radón en la exploración petrolera

El radón como método geoquímico exploratorio destaca por ser económico, sin impacto ambiental y, además, desde el punto de

vista analítico, de determinación sencilla, siendo también de bajo costo. En general el radón producto del decaimiento del U238 contenido en los yacimientos petrolíferos o en la capa superior de rocas, expuestas a condiciones reductoras por el ascenso de hidrocarburos volátiles, al ser poco soluble en medio acuoso, tenderá a ascender por sistemas de fallas, pudiendo ser detectado en superficie (Baskaran, 2016).

Aplicaciones a nivel mundial

Los estudios a nivel mundial fueron iniciados en la década de los 50 en el campo petrolífero Redwater de Canadá y en la URSS, demostrándose que los mapas de radiactividad servían para identificar la presencia de zonas con asociaciones de hidrocarburos en el subsuelo. Posteriormente para 1982, Morse y colaboradores, evidenciaron la existencia de una correlación positiva entre la concentración del radón y el hallazgo de hidrocarburos en el subsuelo (Sobolev, 2007).

Otro estudio pionero en la aplicación del ^{222}Rn para prospección geoquímica de hidrocarburos fue el publicado en 1993 por Zuhui y su equipo, relativo a la determinación de un halo de radón en superficie de dos zonas prospectivas que probaron la presencia de hidrocarburos; siendo que dicho halo presenta en forma característica, una baja concentración de radón hacia la zona central y un aumento en la concentración del mismo hacia los bordes. Estas observaciones en el patrón de concentración del radón fueron corroboradas en estudios posteriores. Nuevos estudios han mostrado

que la correlación entre las concentraciones de radón en superficie y las acumulaciones de hidrocarburos en el subsuelo no son tan simplistas, mucho tienen que ver los arreglos estructurales asociados (Sobolev, 2007).

Por lo que, Geiger, et al., (2016), propusieron un modelo que muestra que las emanaciones de radón no están directamente relacionadas con los yacimientos de hidrocarburos, sino con las reacciones redox que ocurren sobre este, en las denominadas “celdas geoquímicas” a causa de la migración de los hidrocarburos más livianos. En este sentido, el tránsito de los gases de hidrocarburos cambiaría las condiciones redox en las zonas más cercanas a la superficie, alterando la geoquímica del uranio, promoviendo su adsorción selectiva en el frente redox, su posterior decaimiento radiactivo en radio y del radio en radón, todo esto con la posterior migración del radón hacia superficie.

Artículos de reciente publicación muestran el potencial del ^{222}Rn para localizar yacimientos petrolíferos desde superficie, esto combinado con otros parámetros de prospección geoquímica, potenciado por técnicas para la determinación de radón más económicas y sensibles y por una mayor capacidad de procesamiento e interpretación de datos, incluyendo métodos estadísticos y geo-estadísticos (Sobolev, 2007; Geiger, et al., 2016).

En síntesis, en el área de exploración el ^{222}Rn ha mostrado su utilidad como marcador geoquímico para la presencia de yacimientos de petróleo que, combinado con otros indicadores

geológicos o geoquímicos, lo potencian como un método alternativo de prospección de bajo costo y alta eficiencia, comparado con los métodos geofísicos y de perforación exploratoria tradicionales (Khattak, et al., 2011).

Actualmente la simplificación del método de análisis mediante equipos portátiles de alta sensibilidad y confiabilidad abre un panorama optimista respecto a la utilidad del radón como método de prospección.

Aplicaciones del radón para prospección de hidrocarburos en Venezuela

Mención especial requieren los estudios realizados en Venezuela, con el objeto de evaluar la correlación entre la concentración de radón y los yacimientos. Palacios, et al., (2016), publicaron los resultados de varios estudios realizados en campos petrolíferos venezolanos.

Los autores determinaron la concentración de ^{220}Rn (torón) y ^{222}Rn (radón) por el método activo y el método pasivo, en dos sistemas de trampas estructurales distintos: una trampa anticlinal (Campo Amarilis, Monagas) 40 muestras captadas con una distancia de unos 250 m entre cada una; en el que además fueron incluidos dos escenarios, un pozo productor y un pozo que resultó seco un sistema de trampas por fallas (caso Campo Nodosaria 15, Jusepín, Monagas), 124 mediciones con un espaciamiento promedio de 200 m, obteniendo como resultados resaltantes que para el primer caso no se observó la anomalía de radón esperada de acuerdo al fallo más intenso en el domo del

anticlinal, quizás por una posible complejidad estructural no determinada; tampoco se observó una diferencia significativa en la cantidad de radón entre el pozo seco y el productor. Para el caso del Campo Nodosaria 15, estado Monagas, este campo petrolífero es controlado por una serie de fallas con saltos de más de 1000 pies; en este caso, aunque los autores esperaban hallar una anomalía positiva del radón a lo largo de todas las fallas presentes en la zona de estudio, el máximo de radón se ubicó en los bordes de las fallas interconectadas, sugiriendo que estas actúan como puente de tránsito del radón debido a su mayor permeabilidad (Palacios, et al., 2016).

Aplicaciones del radón en yacimientos

La aplicación de radón de mayor desarrollo en la cadena de valor de yacimientos tiene que ver con su empleo como trazador de partición, surgida históricamente, a partir de los resultados obtenidos como trazador de NAPL (*Non aqueous phase liquid*) en el ámbito ambiental.

Aplicación como trazador de partición para determinar saturación de crudo residual

Al iniciar estudios adjuntos al Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear, de Brasil Paulo et al., (2007), con miras a emplear el ^{222}Rn como trazador natural de partición para el cálculo de la saturación de crudo residual en el yacimiento (SOR, por sus siglas en inglés), proponiendo finalmente la ecuación de cálculo de saturación de crudo residual:

$$S = \frac{A_e^{S=0} - A_e^{S>0}}{A_e^{S>0} (K - 1)} \quad [\text{Ec. 2}] \quad (\text{Paulo et al., 2007})$$

Donde:

S= Saturación de crudo (volumen de crudo entre volumen poroso)

= Actividad del ^{222}Rn para el agua en contacto con crudo (Kbq.m^3)

= Actividad del ^{222}Rn para la misma agua sin contacto con el crudo (Kbq.m^3)

Kp = Coeficiente de partición agua/crudo para el ^{222}Rn

Durante sus experimentos los investigadores lograron establecer el coeficiente de partición del ^{222}Rn en el agua con respecto a los siguientes solventes orgánicos: tolueno, benceno y octanol, no sin algunas dificultades para lograr la reproducibilidad experimental. Esto muestra que, si bien el ^{222}Rn como trazador de partición es prometedor, aún faltan estudios para el éxito de esta aplicación.

Aplicación como trazador en pruebas de pozo para determinar permeabilidad

Resultados relativos al empleo de radón como trazador fueron publicados por Anisimov, et al., (2009), los que para la elaboración de perfiles de permeabilidad en pozos en yacimientos clásticos y carbonáticos en la región de Volgograd, Rusia.

Llama la atención el método particular empleado por estos autores, en el que el radón es usado como trazador artificial; esto es, inyectado

en el pozo. En este sentido, los autores reportan haber empleado el radón, aunque no indican origen ni dosis aplicada, tampoco señalan el tiempo transcurrido entre la inyección del trazador y las mediciones. Indican que luego de colocado el trazador en la zona productora del pozo, realizaron mediciones radiométricas (gamma ray). Los registros permitieron evidenciar las zonas de mayor permeabilidad en los pozos analizados (uno carbonático y uno clástico). Adicionalmente, emplearon la técnica para evaluar la efectividad de un proceso de fracturamiento hidráulico en un yacimiento carbonático; allí corrieron registros de rayos gamma antes y después del fracturamiento, posterior a la inyección de radón, encontrando una concentración final de radón de acuerdo a su capacidad de difusión a través de los distintos materiales del medio poroso (Anisimov, et al., 2009).

Aplicación como trazador natural para evaluaciones in situ durante pruebas de vapor

Esta aplicación particular, propuesta por O'Sullivan, (2015) en base a observaciones del aumento de la radioactividad gamma en pozos sometidos a recuperación térmica por vapor, sería de utilidad para evaluar la calidad del vapor emitido luego del proceso de calentamiento de pozos en yacimientos de crudos pesados, mediante inyección alterna de vapor, pero además muestra potencial para evaluar saturación del crudo residual, así como cambio en las propiedades de la roca.

Por lo que, O'Sullivan, (2008), observó que la radiactividad natural en los pozos a hoyo desnudo aumentaba a 1000 GAPI, luego que el vapor condensaba y que posteriormente, caía a valores de 100 GAPI al ser nuevamente calentados. La explicación teórica para este fenómeno es que las altas temperaturas movilizan el radón previamente entrampado en los poros hacia la zona del vapor disolviéndose en las gotas de vapor, no solo de agua, sino de hidrocarburos livianos; una vez allí, al enfriarse el sistema, este condensado enriquecido en ^{222}Rn queda en las vecindades del hoyo iniciándose el decaimiento del ^{222}Rn en sus hijos ^{214}Pb y ^{214}Bi , que emiten radiactividad gamma (O'Sullivan, 2015).

Esta explicación teórica fue comprobada por el autor mediante mediciones de registros a lo largo de los procesos de recuperación térmica en pozos productores de crudos pesados.

Para el 2015, O'Sullivan publicó un nuevo artículo en el que habría recopilado la información de miles de registros obtenidos en dos campos petrolíferos del Valle de San Joaquín, sometidos a procesos de recuperación térmica desde 1960 (O'Sullivan, 2008).

El análisis sistemático de los datos recopilados le permitió obtener un mayor conocimiento respecto al fenómeno de vapor gamma condensado (CVG, por sus siglas en inglés), logrando establecer que la magnitud de la señal del vapor gamma condensado está condicionada por los siguientes factores:

- 1.- Condiciones del pozo, temperatura del pozo, tiempo de enfriamiento y tiempo transcurrido desde el proceso de build up.
- 2.- Propiedades del yacimiento, incluyendo presión y temperatura.
- 3.- Propiedades de la roca, incluyendo radiactividad intrínseca, porosidad y permeabilidad relativa.
- 4.- Propiedades de las fases líquida y de vapor, incluyendo saturación de agua y crudo.
- 5.- Solubilidad del radón, composición del crudo y presión de vapor.

Todo esto le permitió evaluar la utilidad del vapor gamma condensado en la generación de mapas para caracterización de yacimientos en el caso de estudio del campo petrolífero Midway, USA. Como punto de partida el autor solo considero radiaciones gamma superiores a 300 GAPI, descartando de esta manera la radiactividad natural de las lutitas (con señales gamma muy por debajo de 300 GAPI). Obtuvo resultados alentadores, con patrones de radiactividad gamma contrastante, básicamente controlados por el escogimiento de la matriz en la roca; aquellas con muy buena selección con bajas concentraciones de Rn y las peor seleccionadas, con los valores más elevados de radón, todo esto controlado a su vez por la solubilidad del radón en el crudo.

En este sentido las arenas de mayor calidad tienden a almacenar el agua en la que la solubilidad de radón es baja, mientras aquellas con peor escogimiento almacenan el crudo, en el que la concentración del radón es mayor debido

a su solubilidad. Todo esto permitió generar un mapa en el que se aprecian canales de arenas limpias (color verde, amarillo) en un sistema de

arenas más sucias, color rojo, Figura 3.

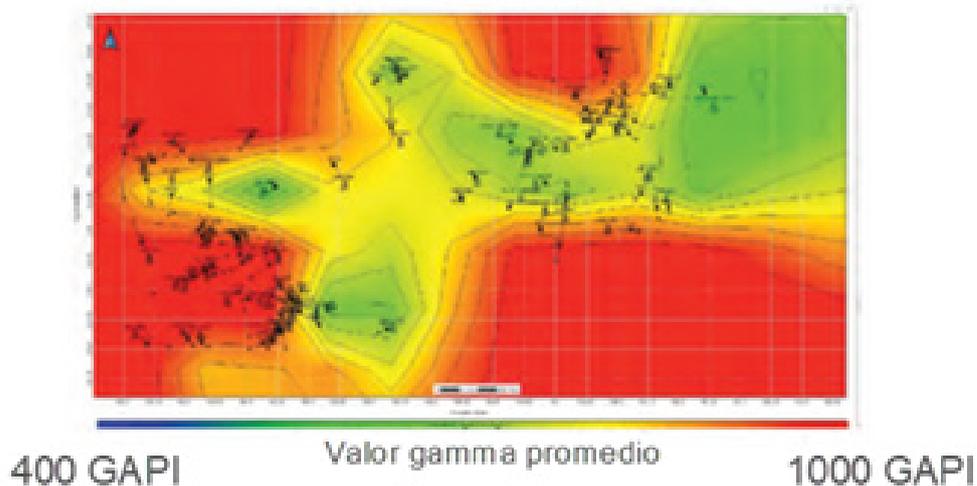


Figura 3. Mapa de radiactividad gamma de vapor condensado. O'Sullivan, (2015).

Estos resultados señalan el potencial de la técnica para evaluar la saturación residual de crudo con el paso del tiempo, esto basado en la alta solubilidad del radón en el crudo. Valores de radiactividad gamma muy elevados (>20.000 GAPI) sugieren la presencia de hidrocarburos livianos que tienen presión de vapor mayor a la del agua a temperaturas entre 100 y 150°C (O'Sullivan, 2015).

CONCLUSIÓN

El desarrollo de las aplicaciones de ^{222}Rn en los últimos 20 años, aunado al desarrollo de técnicas analíticas más sencillas y de bajo costo, lo potencian como un candidato al desarrollo de aplicaciones inherentes a la industria petrolera.

Entre las aplicaciones específicas en el área de exploración y yacimientos, destaca en el área de

yacimientos su factibilidad de uso como trazador de partición para la estimación de saturación de crudo residual, su uso en el seguimiento de proyectos de recuperación mejorada empleando vapor y en el área de exploración su aplicación como herramienta de exploración geoquímica de yacimientos petrolíferos de muy bajo costo, sin impacto ambiental añadido.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdou, M., Carnegie, A., Mathews, S. G., McCarthy, K., O'Keefe, M., Raghuraman, B., y Xian, C. (2011). Finding value in formation water. *Oilfield Review*, 23(1), 24-35. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7570225>

- Anisimov, L. A., Kilyakov, V. N., y Vorontsova, I. V. (2009). The use of tracers for reservoir characterization. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference (pp. SPE-118862). SPE. <https://doi.org/10.2118/118862-MS>
- Bailey, B., Crabtree, M., Tyrie, J., Elphick, J., Kuchuk, F., Romano, C., y Roodhart, L. (2000). Control del agua. *Oilfield Review*, 12(1), 32-53. https://www.researchgate.net/publication/271074683_The_Challenge_of_Water_Control
- Barragán, R. J. (2019). Vulnerabilidad de los cultivos de ciclos transitorios al sur de Quevedo frente al cambio climático, 2018. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3746>
- Baskaran, M. (2016). Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies. Basel: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21329-3>
- Clever H., (1979) Solubility data series, volume 2: Krypton, Xenon and Radon, gas solubilities. Pergamon Press, 2; 357. <https://srdata.nist.gov/solubility/IUPAC/SDS-2/SDS-2.pdf>
- Cook, P. G., Favreau, G., Dighton, J. C., y Tickell, S. (2003). Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. *Journal of Hydrology*, 277(1); 74-88. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00087-8)
- Fan, K., Kuo, T., Han, Y., Chen, C., Lin, C., y Lee, C. (2007). Radon distribution in a gasoline-contaminated aquifer. *Radiation measurements*, 42(3); 479-485. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.12.012>
- Folger, P. F., Poeter, E., Wanty, R. B., Frishman, D., y Day, W. (1996). Controls on ²²²Rn variations in a fractured crystalline rock aquifer evaluated using aquifer tests and geophysical logging. *Groundwater*, 34(2); 250-261. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1996.tb01885.x>
- Geiger, J., Jakab, N., Csökmei, B., Horváth, Z., y Gellért, B. (2016). Statistical and geostatistical study of Rn and hydrocarbon components of a soil gas monitoring system: an application to surface hydrocarbon exploration. *Geologia Croatica*, 69(2); 255-268. <https://doi.org/10.4154/gc.2016.21>
- Grolander, S. (2009). Radon as a groundwater tracer in Forsmark and Laxemar (No. SKB-R-09-47). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:41038315
- Guerrero-Usedá, M. E. (2021). Contaminación físico química en zonas de fracking. *Revista Politécnica*, 17(34); 70-81. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n34a5>
- Hoehn, E., Von Gunten, H. R., Stauffer, F., y Dracos, T. (1992). Radon-222 as a groundwater tracer. A laboratory study. *Environmental science & technology*, 26(4), 734-738. <https://doi.org/10.1021/es00028a010>
- Höhener, P., y Surbeck, H. (2004). Radon-222 as a tracer for nonaqueous phase liquid in the vadose zone: Experiments and analytical model. *Vadose Zone Journal*, 3(4); 1276-1285. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1276>
- Hunkeler, D., Hoehn, E., Höhener, P., y Zeyer, J. (1997). ²²²Rn as a partitioning tracer to detect diesel fuel contamination in aquifers: laboratory study and field observations. *Environmental science & technology*, 31(11); 3180-3187. <https://doi.org/10.1021/es970163w>
- Khattak, N. U., Khan, M. A., Ali, N., y Abbas, S. M. (2011). Radon Monitoring for geological exploration: A review. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 44(2); 91-102. [http://nceg.uop.edu.pk/GeologicalBulletin/Vol-44\(2\)-2011/Vol-44\(2\)-2011-Paper11.pdf](http://nceg.uop.edu.pk/GeologicalBulletin/Vol-44(2)-2011/Vol-44(2)-2011-Paper11.pdf)
- Mata, F. D., Almenares-Reyes, R. S., y Otaño-Noguel, J. A. (2020). Caracterización preliminar de las pizarras del depósito Tchingue (Angola) con fines de uso como roca industrial. *Minería y Geología*, 36(3); 253-267. <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v36n3/1993-8012-mg-36-03-253.pdf>
- Molerio, L. F. (2012). Hidrología de Trazadores en la gestión ambiental de yacimientos de petróleo onshore. https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3387&context=kip_articles

- Molerio, L. F., Vigil-Escalera, V., y Balado, E. J. (2014). Desarrollo gasopetrolífero y gestión de los recursos hidráulicos subterráneos en el área cársica protegida de Punta Guanós, Matanzas, Cuba. *Gota a Gota*, 6 (1), 10-20. http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2014_Morelios%20etal_Desarrollo%20petrolero%20y%20carso%20matanzas.pdf
- O'Sullivan, T. (2015) In-Situ Evaluation of Vapor Properties Using Condensed Vapor Gamma. *Petrophysics*, 56(4), 334-345. https://www.researchgate.net/publication/281685563_In_situ_vapor_evaluation_of_vapor_properties_using_condensed_vapor_gamma
- O'Sullivan, T. P. (2008). High Gamma Radiation in Heavy-Oil Steam Zones: A Condensation-Induced Effect. In *SPWLA Annual Logging Symposium* (pp. SPWLA-2008). SPWLA. <https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA08/All-SPWLA08/27729>
- Palacios, D., Fusella, E., Avila, Y., Salas, J., Teixeira, D., Fernández, G., y Regalado, J. (2016). Soil gas radon and thoron measurements in some Venezuelan oilfields. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307, 801-810. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4354-4>
- Paulo, J. M. D., Moreira, R. M., y Rocha, Z. (2007). Determination of partition coefficient of radiotracer ^{222}Rn . <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21074694>
- PDVSA (2016). Informe de Gestión Social Ambiental. http://www.pdvs.com/images/pdf/Balance_Social_Ambiental/BGSA_2016.pdf
- Ponte-Sucre, A. (2017). La energía nuclear en nuestro día a día. *Tribuna del Investigador*, 18(2). <file:///C:/Users/Danis/Downloads/15051-Texto%20del%20art%20C3%AD%20culo-144814482099-1-10-20180526.pdf>
- Puigdomenech, I., y Bruno, J. (1988). Modelling uranium solubilities in aqueous solutions: Validation of a thermodynamic data base for the EQ3/6 geochemical codes (No. SKB-TR--88-21). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/040/20040448.pdf?r=1
- Schumann, R. R., y Gundersen, L. C. (1996). Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient. *Environment International*, 22 (1); 439-446. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(96\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00144-4)
- Sobolev, I. S. (2007). Radio-geochemical methods at surface exploitation of oil and gas fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 311(1); 85-90. <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/982>
- Soerens, T. S., Ghanem, A., Smith, J., y MA, M. (1999, August). Characterizing DNAPL in Ground Water Using Partitioning Fluorescent Dyes. In *Water Resources into the New Millennium: Past Accomplishments and New Challenges*. Proceedings of International Water Resources Engineering Conference, ASCE Specialty Conference. https://www.academia.edu/download/37920412/Soerens_Seattle_tracer.pdf
- Spirakis, C. S. (1996). The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks. *Ore Geology Reviews*, 11(1-3), 53-69. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(95\)00015-1](https://doi.org/10.1016/0169-1368(95)00015-1)
- Zielinski, R. A., y Meier, A. L. (1988). The association of uranium with organic matter in Holocene peat: an experimental leaching study. *Applied geochemistry*, 3(6), 631-643. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(88\)90095-9](https://doi.org/10.1016/0883-2927(88)90095-9)