

Radiotrazador orgánico de ^{99m}Tc prospectivo para aplicaciones en la Industria del Petróleo

A prospective ^{99m}Tc organic radiotracer for applications in the Oil Industry

Jorge Luis Batista-Roche¹ <https://orcid.org/0000-0003-4649-1354>

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), Universidad de La Habana, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: jorgeluisbr2019@gmail.com

RESUMEN

Los radiotrazadores tienen suma importancia en la industria petrolera. Se ha usado la extracción con trioctilamina (TOA) y tributilfosfato (TBF) para la obtención de un radiotrazador en fase orgánica, a partir del eluido del generador de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. En el presente trabajo se estudió la influencia del método de separación de fases en la extracción del pertecnato de tecnecio 99 metaestable ($^{99m}\text{TcO}_4^-$). Se comprobó que la centrifugación es necesaria para obtener una adecuada separación. Se optimizó la formulación TBF-TOA-ciclohexano para la extracción de una actividad de $^{99m}\text{TcO}_4^-$ de 600 MBq, perspectiva para aplicaciones a escala industrial. Adicionalmente, con la formulación 7,53 % TBF-0,77% TOA-ciclohexano se logró el mayor rendimiento de la extracción (96,86 %). Se construyó y evaluó una instalación de laboratorio que simula un separador gravitacional horizontal continuo (petróleo-agua de capa).

Palabras clave: radiotrazador; grado de extracción; separador gravitacional; flujo multifásico.

ABSTRACT

Radiotracers are very important in the oil industry. The extraction with trioctylamine (TOA) and tributylphosphate (TBF) has been used to obtain a radiotracer in organic

phase from the eluent of the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator. In this work we studied the influence of the phase separation method in the extraction of technetium 99 metastable pertechnetate ($^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$). Centrifugation was necessary to obtain adequate separation. The formulation TBF-TOA-cyclohexane was optimized for the extraction of 600 MBq activity of $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$, perspective for industrial scale applications. Additionally, with 7.53%TBF-0.77%TOA-cyclohexane formulation, the highest extraction yield (96.86%) was achieved. A laboratory installation that simulates a continuous horizontal gravitational separator (oil-water layer), was constructed and evaluated.

Keywords: radiotracer; extraction performance; gravitational separator; multiphase flow

Recibido: 24/1/2021

Aprobado: 20/3/2021

Introducción

La disminución de proveedores de isótopos radiactivos para aplicaciones industriales es una tendencia de los últimos años. Los productores de radioisótopos se han re-direccionado hacia un mercado mucho más lucrativo, como la radio-farmacia y medicina nuclear.⁽¹⁾ Por otro lado, se han incrementado las aplicaciones en sitios muy lejanos del centro productor de isótopos como las plataformas petrolíferas en alta mar.⁽²⁾

Varios países, como Cuba, no poseen instalaciones para la producción de isótopos radiactivos. A causa de esta problemática, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) promovió y cofinanció un Programa Coordinado de Investigación (2007-2011), dirigido a la evaluación y desarrollo de radiotrazadores para aplicaciones industriales, a partir de generadores radioisotópicos.^(3,4)

Estudios realizados por autores cubanos en el marco de este programa, evidenciaron la alta pertinencia de la extracción del eluido del generador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ con la mezcla 30% de tributilfosfato (TBF) y 16 % de trioctilamina (TOA) en ciclohexano, como vía para la obtención de un radiotrazador en fase orgánica a temperatura y presión normal (TPN).⁽⁵⁾ Sin embargo, no se ha optimizado la formulación TBF-TOA en ciclohexano para la extracción de actividades de $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ superiores a 4,5 MBq. Se requieren estas

grandes actividades donde se manejan grandes volúmenes, como en los tanques separadores crudo-agua-gas utilizados en la industria del petróleo.

La industria del petróleo en la actualidad constituye uno de los principales usuarios del radiotrazador de ^{99m}Tc desarrollado. Los radiotrazadores se han utilizado en diferentes aplicaciones que incluyen la exploración, producción, transporte y refinación del crudo.⁽⁶⁾ Por ejemplo, se reporta su uso en estudios de interconexión de pozos ^(7, 8), procesos de separación y control de calidad en las plataformas petrolíferas ⁽⁹⁾, en la determinación de fugas en intercambiadores de calor y de caudal en oleoductos.⁽¹⁰⁻¹²⁾

El crudo, cuando se extrae, viene acompañado de la denominada agua de formación, constituida fundamentalmente por agua de mar. Esta agua de capa es difícil de eliminar y forma parte del recorrido del crudo hasta la refinación, según la tecnología empleada en los procesos de exploración, producción y transporte.⁽¹³⁾ Cuando el flujo es multifásico en régimen estático, el trazador obtenido es un radiotrazador físico. Sin embargo, no se ha estudiado su comportamiento en régimen dinámico, puesto que no existe una instalación a nivel de laboratorio, escalable, que permita realizar los estudios dinámicos de partición del radiotrazador.

El objetivo de este trabajo fue optimizar la formulación TBF-TOA en ciclohexano para la extracción de actividades de $^{99m}\text{TcO}_4^-$ perspectivas para aplicaciones a escala industrial y construir una instalación a nivel de laboratorio, escalable, para realizar estudios dinámicos de estabilidad del radiotrazador.

Materiales y métodos

Preparación del radiotrazador

La síntesis del radiotrazador se realizó basada en la extracción a fase orgánica del $^{99m}\text{TcO}_4^-$ eluido del generador de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ (InSTEC, La Habana, Cuba). Se empleó como solvente la mezcla TBF-TOA-ciclohexano (Sigma, Estados Unidos). Las fases se pusieron en contacto y agitación (355 min^{-1}) durante 10 min en una jeringa plástica adaptada a embudo separador. Se utilizó el agitador horizontal Heidolph PROMAX 2020 (Alemania). La relación volumétrica de las fases se mantuvo en uno, el volumen de cada una se fijó en 4 mL, la concentración de NaCl (Sigma) fue 9 mg/mL y el pH se ajustó a 1 con HNO_3 (Sigma). Las fases se separaron y se tomaron tres alícuotas de

200 μ L de la fase acuosa u orgánica y se midieron tres veces en el sistema radiométrico cubano SRN1C-02, acoplado con un detector de pozo con cristal centelleante de NaI (TI) (Centro Nacional de Radioisótopos, La Habana, Cuba). Las condiciones de extracción corresponden a las mejores obtenidas en estudios anteriores.⁽⁵⁾ La actividad empleada varió según el experimento.

Se determinó el grado de extracción R (%) según la fórmula representada por la ecuación 1

$$R(\%) = \frac{O}{B} \times 100 \quad (1)$$

donde

O (cps/mL), es la concentración radiactiva de la fase orgánica después de la extracción y B (cps/mL), la concentración radiactiva inicial de la fase acuosa o blanco.

El blanco se midió en todos los casos inmediatamente después de la fase acuosa para evitar la corrección por desintegración del ^{99m}Tc. Los rendimientos se reportan con las desviaciones estándares.

Selección del método de separación de las fases en la preparación del radiotrazador

Se comparó la eficiencia de la separación de las fases por el método de gravedad. Se comparó el reposo de 10 min con la centrifugación luego de 5 min, a una velocidad de 1500 rpm en una centrífuga (Hardware Factory Store, China). La actividad empleada fue de 600 MBq. Se determinó el rendimiento de extracción (ecuación 1) en alícuotas de la superficie, el centro y la proximidad a la interfase. Se seleccionaron las formulaciones 8% TBF-5% TOA-ciclohexano y 3% TBF-1,5% TOA-ciclohexano por contener los extremos del núcleo central del diseño de optimización posteriormente realizado. Las condiciones de extracción se corresponden con las descritas en estudios anteriores.⁽⁵⁾

Optimización de la composición de la formulación TBF-TOA-ciclohexano para la extracción de $^{99m}\text{TcO}_4^-$

El rendimiento de extracción de 600 MBq de $^{99m}\text{TcO}_4^-$ con la formulación TBF-TOA-ciclohexano se evaluó teniendo en cuenta la relación costo beneficio del proceso. Se ejecutó un diseño de experimentos central compuesto rotacional 2^2 con dos puntos estrellas, para cada una de las variables independientes: las concentraciones de TOA (%) y de TBF (%). Los niveles de variación aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Intervalos de variación del diseño experimental

	TBF (%)	TOA (%)
Max	8	5
Min	3	1,5
$-\alpha$	1,95	0,77
$+\alpha$	9,05	5,74

Las fases se separaron mediante centrifugación durante 5 min a 1500 rpm. Los extremos del núcleo central del diseño, así como las condiciones de extracción se seleccionaron teniendo en cuenta los resultados de estudios anteriores.⁽¹⁴⁾ Se empleó el rendimiento directo para evaluar la influencia en el proceso de extracción de la concentración volumétrica de los extraentes (ecuación 1). Se realizó un análisis de superficie de respuesta y de regresión múltiple para determinar el modelo que describe la dependencia del grado de extracción con la concentración de los extraentes. Se evaluó, además, la influencia estadística de los coeficientes de regresión del modelo utilizando el estadígrafo t y el ajuste del modelo mediante el estadígrafo de Fisher, a un nivel de significación de $p < 0,05$. Se utilizó el software STATGRAPHICS.

Evaluación de la estabilidad del radiotrazador ^{99m}Tc -TOA-TBF-ciclohexano en régimen estático

La distribución del radiotrazador entre el agua de capa sintética y el crudo venezolano, se estudió mediante un experimento de re-extracción en régimen estático. La preparación del radiotrazador se realizó mediante la formulación óptima obtenida en el estudio de optimización. Se marcaron 45 mL de crudo con 4 y 600 MBq del radiotrazador. Las dos fases se pusieron en contacto y agitación durante 10 min en una relación volumétrica: Volumen de agua de capa/ Volumen de crudo = 1:4. El volumen de fase acuosa se fijó en 4 mL. Luego de la agitación, se centrifugaron las fases durante 5 min. Seguidamente se tomaron alícuotas de 200 μL de la fase acuosa y se midieron

tres veces en el sistema radiométrico cubano SRN1C-02, acoplado con un detector de pozo con cristal de centelleo de NaI (Tl).

Se empleó la ecuación 2 para evaluar la estabilidad del radiotrazador en la fase orgánica de interés:

$${}^{99m}\text{Tc}^{\text{AC}}(\%) = \frac{A}{O_T} \times 100 \quad (2)$$

donde

A (cps/mL), es la concentración radiactiva de ${}^{99m}\text{Tc}$ en el agua y O_T (cps/mL), la concentración radiactiva inicial de la fase orgánica o blanco.

Construcción y ensamblaje de la instalación para estudios de estabilidad en régimen dinámico

Se construyó un separador gravitacional horizontal de vidrio (figura 1B.) para posibilitar los estudios de partición del radiotrazador ${}^{99m}\text{Tc}$ -TBF-TOA-ciclohexano en régimen dinámico. Se empleó una relación: $L/D = 6$, donde L es la longitud del separador y D el diámetro del mismo.⁽¹⁵⁾ Se ensambló una instalación para simular el régimen continuo de funcionamiento del separador a nivel del laboratorio (figura 1).

Evaluación del arreglo radiométrico

El arreglo radiométrico diseñado para los estudios de partición del radiotrazador se evaluó en régimen dinámico. Se usó el método de radiotrazadores combinado con el método estímulo-respuesta.⁽¹⁶⁾ Las formas de las curvas de paso del radiotrazador ${}^{99m}\text{Tc}$ -TBF-TOA-ciclohexano se analizaron a la salida del separador en la instalación de laboratorio construida para tres velocidades de flujo. Se emplearon 4 MBq del radiotrazador ${}^{99m}\text{Tc}$ -TBF-TOA-ciclohexano para marcar el crudo. Se utilizó el sistema radiométrico CAESAR. La inyección en pulso se realizó a la entrada del separador. El detector colimado con un orificio de 4 cm se ubicó justo en frente de la salida del separador. Se midió el fondo radiactivo antes de la inyección del radiotrazador. Los datos experimentales de la respuesta al trazado en cada experimento se transfirieron a Excel y posteriormente se procesaron con el software DTSPRO versión 4.2. A cada punto

de la curva se le substrajo el fondo promedio, corregido por desintegración y normalizado por el área.

Resultados y discusión

Influencia del método de separación de las fases en la preparación del radiotrazador

Los resultados experimentales obtenidos para las dos formulaciones empleadas se muestran en la tabla 2.

Se comprobó que 10 min de reposo son suficientes para lograr la separación total de las fases empleando la formulación 30 %TBF-16 %TOA-ciclohexano y una actividad de $^{99m}\text{TcO}_4^-$ de 4 MBq si la concentración de NaCl es superior a 0,17 %, según resultados anteriores.¹⁴⁾ Sin embargo, la dispersión de los grados de extracción obtenidos en este caso, evidencia su dependencia del sitio de muestreo y por consiguiente muestra una separación incompleta de las fases, luego de 10 min de reposo. Por otro lado, 5 min de centrifugación a una velocidad de 1500 rpm son suficientes para lograr la definición de las fases.

Tabla 2- Grados de extracción obtenidos para las formulaciones 8%TBF- 5%TOA-ciclohexano y 3%TBF-1,5%TOA-ciclohexano (medias \pm desviación estándar)

	Gravedad			Centrifugación		
	S	C	PI	S	C	PI
8%TBF- 5%TOA- ciclohexano	86,7 \pm 0,09	93,37 \pm 0,10	96,2 \pm 0,20	89,47 \pm 0,17	89,4 \pm 0,21	89,7 \pm 0,18
3%TBF- 1,5%TOA- ciclohexano	83,8 \pm 0,13	90,43 \pm 0,28	92,6 \pm 0,38	82,20 \pm 0,20	82,07 \pm 0,14	81,95 \pm 0,17

S: superficie, C: centro, PI: próximo a interfase

Optimización de la composición de la formulación TBF-TOA-ciclohexano para la extracción de $^{99m}\text{TcO}_4^-$

Los resultados obtenidos del grado de extracción R (%) para todas las formulaciones del diseño oscilan entre un 82-96 %. El cálculo del R (%) directo, mediante la actividad de $^{99m}\text{TcO}_4^-$ en la fase orgánica, muestra cambios sensibles con la variación de las concentraciones volumétricas. Si se considera la ley de fases de Gibbs, tal

comportamiento indica la existencia de una tercera fase más pesada que la orgánica inicial y menos que la acuosa, imperceptible a simple vista, que retiene en alguna medida al $^{99m}\text{TcO}_4^-$. Ha sido reportado en la literatura que la tercera fase puede ser tan delgada que es imperceptible a simple vista. Jacob y colaboradores observaron una tercera fase de 1 mm^2 con un ancho de entre 0,5 y 1 mm muy difíciles de detectar visualmente.⁽¹⁷⁾

La formación de una tercera fase es común en los procesos de extracción⁽¹⁸⁾ y debe ser rica en el extraente (TOA y TBF) y la sustancia extraída ($^{99m}\text{TcO}_4^-$). La otra, más ligera, debe estar compuesta fundamentalmente por el diluyente (ciclohexano). Este último al ser en un orden menos soluble en agua que la TOA y menos viscoso⁽¹⁹⁾, contribuye a la mejor definición de las fases.

Los experimentos con concentraciones fijas de TOA y concentraciones variables de TBF, reflejan que a mayor concentración de TBF se obtienen mayores grados de extracción (94-96%) (tabla 2). El TBF influyó significativamente en el grado de extracción (prueba t-Student, $p < 0,05$).

Se obtuvo un rendimiento óptimo máximo teórico de $96,86 \pm 1,17\%$ para la formulación ^{99m}Tc -7,53% TBF-0,77% TOA-ciclohexano. Se ejecutaron tres réplicas con esta formulación cuyo promedio resultó ser de $95,72 \pm 0,65\%$. El valor de la concentración volumétrica de TOA en la formulación óptima es el mínimo de los utilizados en la matriz experimental ejecutada, lo que apunta a que posiblemente puedan obtenerse R (%) superiores al disminuir la concentración de TOA y manteniendo la misma de TBF.

La figura 1 muestra la superficie de respuesta y sus contornos. Esta brinda información visual que permite, de forma expedita, seleccionar la formulación de TBF-TOA requerida para el rendimiento de extracción del $^{99m}\text{TcO}_4^-$ deseado, en el intervalo de 1,95-9,05 % de TBF y 0,77-5,7 % de TOA.

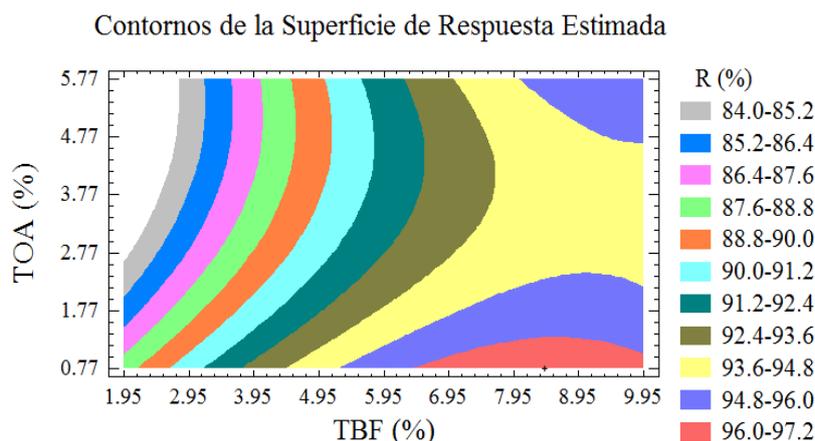


Fig. 1- Contornos de la superficie de respuesta

Estabilidad del radiotrazador ^{99m}Tc -TOA-TBF-ciclohexano en el crudo en contacto con agua de capa en régimen estático

Se empleó la formulación óptima (^{99m}Tc -7,53%TBF- 0,77 % TOA-ciclohexano) para la preparación del radiotrazador. Los resultados obtenidos de evaluar la migración del ^{99m}Tc en el agua de capa luego de 10 min de contacto con el crudo venezolano, son menores al 1% (ecuación 2). Esto significa que, en las condiciones experimentales evaluadas de relación volumétrica de fases y velocidad de agitación, el radiotrazador ^{99m}Tc -TOA-TBF-ciclohexano clasifica como radiotrazador conservativo.

Construcción y ensamblaje de la instalación para estudios de estabilidad en régimen dinámico

La instalación experimental a nivel de laboratorio propuesta (figura 2) se compone por: un depósito de 5 L de capacidad donde se almacena el fluido de estudio que es bombeado hasta el separador (E), una bomba peristáltica de caudal variable (D), una línea de enlace entre la bomba y el separador de 2 m de largo y 1 cm de diámetro interior (C), un separador gravitacional horizontal con una capacidad de 400 mL con una entrada y dos salidas, una para el crudo y otra ubicada en la parte posterior para la salida del agua de capa (más densa) cuando funcione como separador (B) y por último un depósito similar donde se almacena el fluido de salida (A). La relación $L/D = 6$ se corresponde con la empleada habitualmente en este tipo de separadores.⁽²⁰⁾

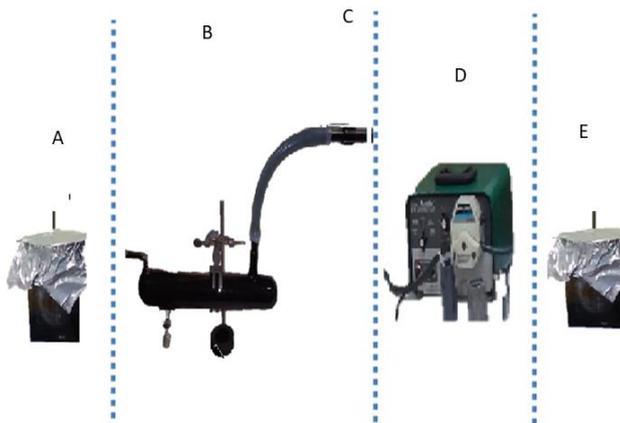


Fig. 2- Instalación de laboratorio

Evaluación del arreglo radiométrico diseñado para la instalación

El arreglo radiométrico utilizado en los experimentos se aprecia en la figura 3, que incluye la colimación del detector y el blindaje de plomo, en forma de castillete o de lámina, en diferentes puntos de la instalación. La insuficiente disponibilidad de blindaje no permitió emplear el menor grosor de plomo necesario para la atenuación de las radiaciones. Se garantizó un adecuado equilibrio entre la resolución espacial de la curva de paso del radiotrazador y la eliminación de la influencia progresiva del fondo radiactivo a causa de la proximidad entre el detector y el recipiente de almacenamiento del fluido marcado.

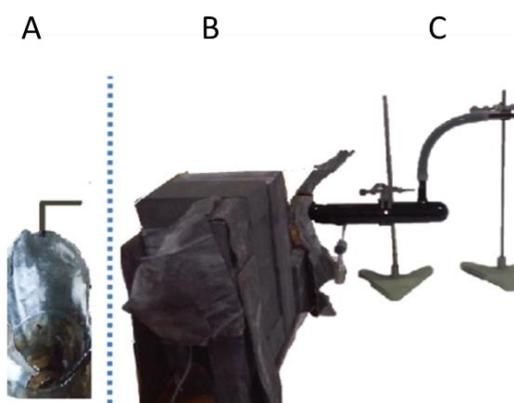


Fig. 3- Arreglo Radiométrico: (A) depósito de entrada y (B) detector recubiertos por láminas de plomo, (C) separador gravitacional

Se muestra en la figura 4 una de las curvas de paso del ^{99m}Tc -TBF-TOA-ciclohexano que se empleó para marcar el crudo, registradas a la salida del separador para la menor

velocidad de flujo de la bomba. Las velocidades de conteo están corregidas por desintegración y se les restó el fondo radiactivo promedio (27 cps).

Se aprecia en la figura 4 que las velocidades de conteos en el máximo de las curvas registradas y sus cercanías son mucho mayores que el fondo radiactivo, garantizando un error relativo de la velocidad de conteo entre 0,02 y 0,06. Por otro lado, se observa a partir del ancho y forma de la curva, que la resolución espacial y temporal son adecuadas, por lo que existe un equilibrio entre las velocidades de conteos registradas, el tiempo de cada medición y la colimación del detector empleada.

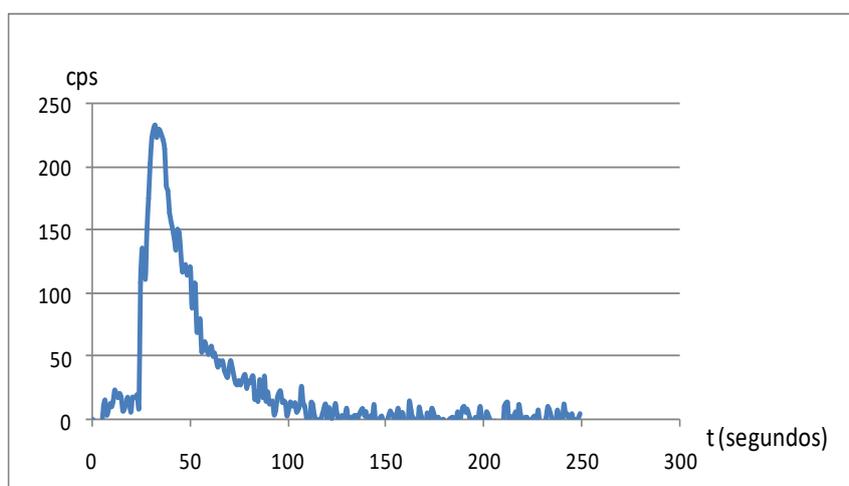


Fig. 4- Curva de paso del ^{99m}Tc -TBF-TOA-ciclohexano a la menor velocidad de flujo

Adicionalmente, las curvas comienzan en cero conteos a tiempo cero y terminan en cero una vez concluido el paso del radiotrazador. Esto indica que el blindaje utilizado para el recipiente de almacenamiento fue adecuado en cuanto a grosor y ubicación. Se impidió el efecto del aumento progresivo del fondo en las mediciones a causa de la acumulación del fluido marcado en la vecindad del detector.

Conclusiones

Los rendimientos de extracción R oscilaron entre 82 y 96 % con un óptimo máximo de 95,69 % para la formulación 0,77%TOA–7,53%TBF-ciclohexano. Además, la estabilidad del radiotrazador ^{99m}Tc -TBF-TOA-ciclohexano en el crudo venezolano luego de estar en contacto con agua de capa en régimen estático y las condiciones estudiadas, resultó mayor del 99 %. Se construyó y ensambló una instalación de laboratorio

escalable para una relación (L/D) = 6 El diseño radiométrico empleado (actividad, colimación, posicionamiento del detector, tiempo de medición y blindaje), garantizó un adecuado balance entre la resolución espacial y temporal y un error relativo de la velocidad de conteo entre 0,02 y 0,06.

Referencias bibliográficas

1. LOPCI E, CASTELLO A, MORENGHI E. “Cost-effectiveness of second-line diagnostic investigations in patients included in the DANTE trial”. *Nuclear Medicine Communications*. 2019, **40**(5), 508-516. DOI:10.1097/MNM.0000000000000993
2. DOMINGUEZ J.; ABREU A, BORROTO J. “Mixing characterization in batch reactors using radiotracer techniques”. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1999, **241**(2), 337-40. DOI:10.1007/BF02347471
3. DOMINGUEZ J, BORROTO J, PÉREZ E, HERNÁNDEZ A. “Use of the $^{99m}\text{TcO}_4$ - and the Rhodamine-WT as Tracers and the Mathematical Convolution Procedure to Establish the Alarm Model In the Almendares River”. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2004, **260**(2), 417-20. DOI:10.1023/B:JRNC.0000027118.79238.c8
4. BORROTO, J.; DOMÍNGUEZ, J. “20 años de investigaciones y aplicaciones en Cuba de los radiotrazadores y el escaneo en la industria y el medioambiente”. *Nucleus*. 2015, 58, 20-27. ISSN:2075-5635
5. DOMÍNGUEZ, J.; LEÓN, Y.; GAMBOA, R.; ABREU, A.; BORROTO, J. “Evaluation of TBP, TOA and MEK as extractants to obtain ^{99m}Tc radiotracers in organic phase from $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ generator”. *Nucleus*. 2012, 51, 26-3. ISSN:0864-084X
6. KASBAN, H. “Laboratory experiments and modeling for industrial radiotracer applications”. *Applied Radiation and Isotopes*. 2010, 68, 1049–1056. DOI: 10.1016/j.apradiso.2010.01.044
7. IAEA. *Application of radiotracer techniques for interwell studies*, Vienna: IAEA Radiation technology series. 2012, 3, 1-248. Disponible en <https://www-pub.iaea.org>. Consultado el 20 de noviembre del 2020

8. Guidebook on Application of Radiotracer Techniques for Interwell Studies. Radiation Technology Series No.3, International Atomic Energy Agency, 2012. Disponible en https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1539_web.pdf. Consultado el 30 de noviembre del 2020
9. STAVSETRA, L.; FURE, K.; HAUGAN, A.; BJORNSTAD, T. "Development of an oil tracer labelled with ^{137}mBa ". *The European Physical Journal Conferences*. 2013. DOI: 10.1051/epjconf/20135005002
10. IAEA. *Leak detection in heat exchangers and underground pipelines using radiotracers*, Vienna. 2009, 1-77. Disponible en <https://www-pub.iaea.org>. Consultado el 25 de noviembre del 2020
11. Guidebook on Radiotracers applications in industry. Safety Reports Series No. 423, International Atomic Energy Agency, 2004. Disponible en https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS423_web.pdf. Consultado el 30 de noviembre del 2020
12. WETCHAGARUN, S.; PETCHRAK, A; TIPPAYAKUL C. "Preliminary study of the use of radiotracers for leak detection in industrial applications". *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, **611**(1), 1-6. ISSN:1742-6596
13. ORTEGA, M.S.; DOMÍNGUEZ, J.; MARTÍNEZ, E.; BORROTO J. "Extracción del $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ con la mezcla 30% tributilfosfato -16% trioctilamina / ciclohexano. Evaluación del radiotrazador obtenido". CENIC. 2014, 45, 60-65. ISSN:1015-8553
14. STREETER, V. L.; WYLIE, E.B.; BEDFORD K. W. "Mecánica de los Fluidos". Novena Edición. Colombia: Ed. Emma Ariza H, 1999. ISBN:958-600-987-4
15. GRIFFITH, M.J.; FLORES, J.P.; CUESTA, B.J.; DÁMERA, M.A.; Y RAMOS E.K. "Características hidrodinámicas de clarificadores de alta velocidad de sedimentación por el método de los radiotrazadores". *Nucleus*. 2005, 37. ISSN:2075-5635
16. JACOB, J. *et al.* "Novel phase-transition behavior near liquid/liquid critical points of aqueous solutions: Formation of a third phase at the interface". *J. Phys. Chem.* 2001, 3, 829-831. DOI:10.1039/B008738F
17. ESPI N. *Métodos de separación y concentración*. 2da ed. La Habana: Editorial Félix Varela, Tomo I, 2002. ISBN:978-959-258-302-3
18. WATANABE, S.; HASHIMOTO, K. "Solvent extraction of Technetium in

urine with TBP”. *J. Radioanal. Nucl. Chem. (Japan)*. 1995, **201**(5), 361-370. DOI: 10.1007/BF02164212

19. OLÁN J. *Propuesta para el diseño de un separador bifásico a baja presión como uso didáctico para el área de ingeniería petrolera*. Tesis en opción al título de Maestro en Manufactura Avanzada, Villahermosa, Tabasco. 2018, 1-112. Disponible en [http://oilproduction.net/cms3/files/Separadores%20Bifasicos %20 y %20 Trifasico pdf](http://oilproduction.net/cms3/files/Separadores%20Bifasicos%20y%20Trifasico.pdf). Consultado el 20 de diciembre del 2020

20. KASBAN H. *et al.* “Laboratory experiments and modeling for industrial radiotracer applications”. *Applied Radiation and Isotopes*. 2010, **68** (6), 1049-1056. DOI:10.1016/j.apradiso.2010.01.044

Conflicto de interés

El autor expresa que no existe conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Jorge Luis Batista-Roche: realizó la planificación y organización del trabajo experimental, análisis, interpretación y discusión de los resultados así como la aprobación final de la investigación.