

Hacia una mayor eficiencia en la recuperación secundaria de petróleo

Por Héctor R. Gómez, Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS);
Guillermo Eduardo Maggio y Gregorio B. Baró, Noldor S.R.L.

A partir de la incorporación de agua tritiada ($^1\text{H } ^3\text{H } \text{O}$) en pozos de inyección y de la posterior medición de la concentración del trazador en el agua recuperada por los pozos productores, es posible determinar diversos parámetros tales como tiempo de tránsito entre pozos, canalizaciones preferenciales, barreras geológicas y factor de reparto del agua inyectada entre los productores.

Bajo ciertas condiciones es también factible calcular la permeabilidad real media de toda la roca reservorio interesada por el agua de recuperación.

Héctor R. Gómez es Ingeniero Civil de la Universidad de Buenos Aires, ex Gerente de Aplicaciones de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Investigador Consulto de la CNEA, experto del Organismo Internacional de Energía Atómica, la Organización de Estados Americanos y la Cancillería en misiones al exterior y ex Miembro de la Comisión Asesora de Ciencias de la Tierra, el Agua y la Atmósfera.

Guillermo Eduardo Maggio es Ingeniero Electrónico de la Universidad Tecnológica Nacional, ex Jefe del Departamento Aplicaciones Tecnológicas de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), experto del Organismo Internacional de Energía Atómica y la Organización de Estados Americanos en misiones al exterior y ex Presidente de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.

Gregorio B. Baró es Doctor en Química de la Universidad de Buenos Aires, ex Director de Radioisótopos y Radiaciones de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Investigador Emérito de la CNEA y experto del Organismo Internacional de Energía Atómica y la Organización de Estados Americanos en misiones al exterior.

En el contexto de un acuerdo marco celebrado entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF), se realizó en 1977 en el Yacimiento El Medanita (Colonia Catriel - Provincia del Río Negro) el primer estudio destinado a comprobar el comportamiento dinámico, químico y físico de distintos trazadores isotópicos, naturales y artificiales, en rocas reservorio de yacimientos que operaban en recuperación secundaria o asistida por agua. Las investigaciones llevadas a cabo en ese entonces permitieron evaluar las características de los trazadores utilizados y seleccionar el tritio (^3H) como trazador ideal y también conocer los alcances o limitaciones del escandio-46 (^{46}Sc), del cromo-51 (^{51}Cr) y del yodo-131 (^{131}I). (1) (2)

A partir de la investigación y el desarrollo efectuados por estas instituciones se alcanzaron metas de aplicación a escala industrial, lográndose acceder al plano de los servicios a través de una racional transferencia de tecnología al sector privado teniendo en cuenta el nuevo papel asumido por el Estado, para este caso particular expresado en forma explícita en la misión y funciones de la CNEA. El nuevo marco regulatorio y de competencia vigente ha permitido realizar diez estudios como los aquí descriptos en el último año.

Trazadores

Un trazador es una sustancia que, incorporada a un proceso natural o artificial, permite estudiar la evolución y dinámica del mismo a través del seguimiento de su propio comportamiento.

Ejemplos de trazadores son: sólidos en suspensión, colorantes, sales y radioisótopos. La principal ventaja de éstos es la posibilidad de detectarlos y localizarlos sin establecer contacto físico con ellos, por medio de las radiaciones que emiten.

Un trazador, cualquiera sea su naturaleza, debe cumplir con el requisito fundamental de seguir fielmente al medio marcado.

Radioisótopos

El núcleo atómico está constituido por dos tipos de partículas: *protones* y *neutrones*. La cantidad de protones es llamada número atómico y es determinante del comportamiento químico del elemento al que el átomo pertenece, mientras que la suma de ambos tipos de partículas se denomina número de masa. Existen átomos con igual número atómico y distinto número de masa. Son llamados *isótopos* del elemento en cuestión.

Para ciertos valores de los números atómico y de masa, los núcleos son estables, es decir que, en función del tiempo, no sufren alteraciones de no mediar alguna acción externa. Cuando la cantidad de neutrones en un núcleo es mayor o menor que la correspondiente al estado estable,

el núcleo trata de lograr la estabilidad a través de la emisión de partículas alfa o beta. A este proceso se lo denomina *desintegración radiactiva* y puede ir acompañado de emisión de radiación electromagnética de origen nuclear, es decir *radiación gamma*.

La velocidad con que una sustancia radiactiva desintegra es proporcional a su masa y se llama *actividad*, siendo su unidad de medición el *Becquerel* que equivale a una desintegración por segundo ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ d} / \text{s}$). En la práctica suele utilizarse otra unidad más antigua, el *Curio* ($1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$).

El tiempo en que una masa dada de un radioisótopo se reduce a la mitad por efecto de la desintegración radiactiva se denomina *período de semidesintegración* y se mide en unidades de tiempo. El decaimiento radiactivo responde a una función exponencial.

Tritio

El hidrógeno natural está constituido en un 99,985% por un isótopo estable (^1H) caracterizado por poseer un único protón en su núcleo. La fracción restante está integrada por otro isótopo, también estable, llamado *deuterio* (^2H o D) cuyo núcleo posee un protón y un neutrón (ver tabla).

Aprovechando ciertas reacciones nucleares es factible producir un tercer isótopo de la familia del hidrógeno, conocido como *tritio* (^3H o T), que tiene un protón y dos neutrones en su núcleo atómico. El agua natural contiene trazas de tritio que se produce en la alta atmósfera a través de la acción de la radiación cósmica y que se incorpora a la tierra por medio de las precipitaciones. En este caso el exceso de neutrones hace que dicho núcleo sea inestable y que, entonces, busque la esta-

bilidad emitiendo una partícula beta para transformarse así en un isótopo del helio. La desintegración radiactiva del tritio no produce emisión de radiación gamma por lo que resulta muy sencillo su blindaje y transporte y lo constituye en el radioisótopo con menores restricciones de emisión al medio ambiente (Guía de Seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica N° 115).

La particularidad de este radionucléido de ser un emisor beta puro de baja energía hace que su medición con alta eficiencia sólo sea posible en laboratorio

mediante la técnica conocida como *centelleo líquido*.

Cuando se efectúan experiencias con tritio los resultados suelen expresarse en una unidad de concentración que cuantifica la actividad de este radionucléido por unidad de volumen. Una *unidad de tritio* (U.T.) equivale a una concentración de un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de hidrógeno común (^1H) o, lo que es lo mismo, $1 \text{ U.T.} = 0,118 \text{ Bq} / \text{l}$.

ESTUDIOS EN POZOS PETROLIFEROS

Una manera muy conveniente para determinar la existencia de vinculaciones entre pozos petrolíferos que operen en recuperación secundaria y, en caso afirmativo, de evaluar los tiempos de tránsito entre inyector y productores es el empleo de trazadores, siendo especialmente ventajoso el empleo de radioisótopos para esa finalidad. (3) (4) (5)

La técnica consiste en la incorporación al pozo, en forma conjunta con el agua de inyección, de una solución acuosa en la que se encuentra el trazador en una forma química apropiada. Una planificada y or-

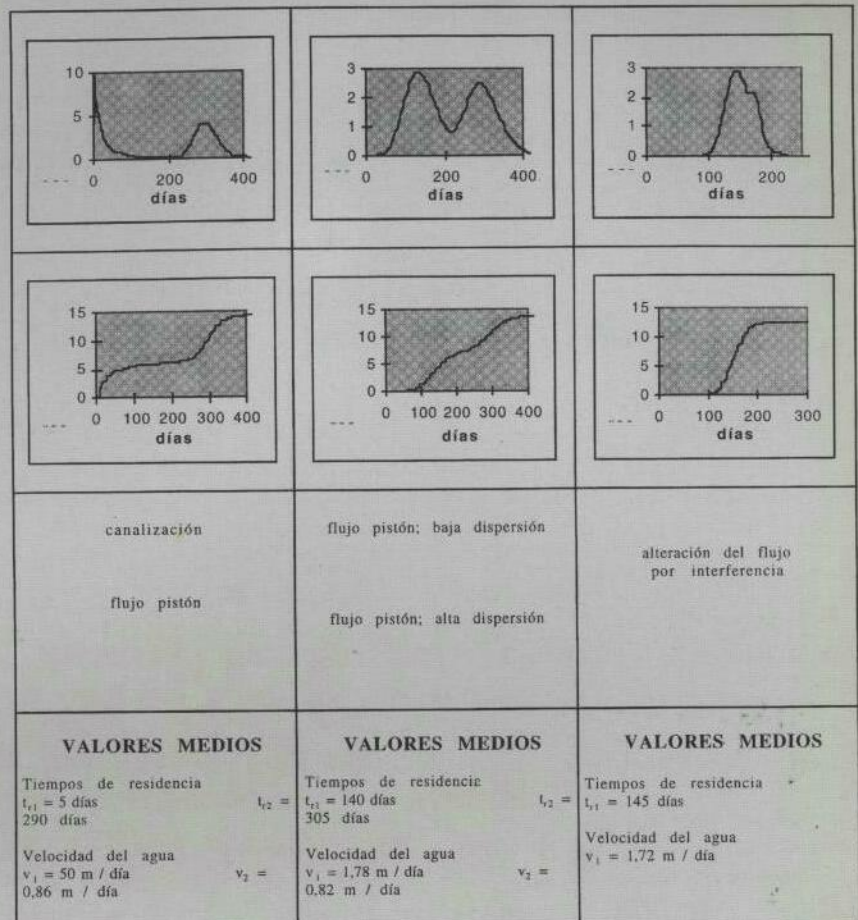


FIGURA 2: RESPUESTA DEL POZO REM-69 (YACIMIENTO EL MEDANITO)

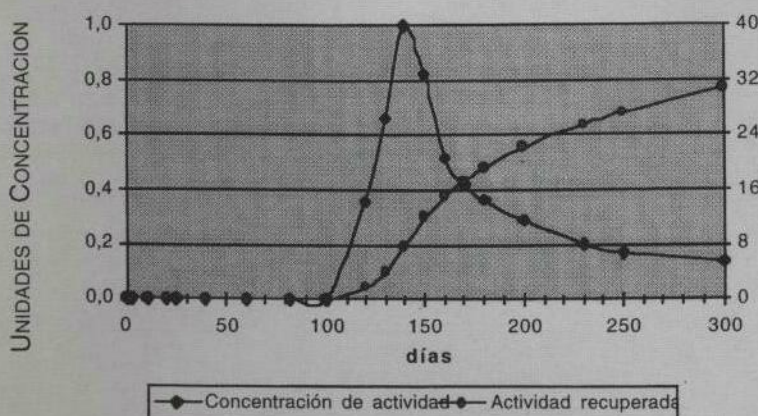
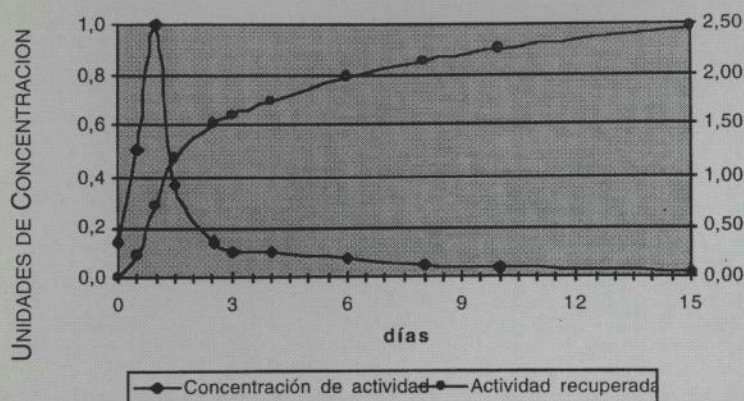


FIGURA 3: RESPUESTA DEL POZO REM-70 (YACIMIENTO EL MEDANITO)



denada extracción de muestras en los pozos productores permite obtener gráficos representativos de las curvas de respuesta y, a partir de ellos, conocer los tiempos involucrados en el proceso. (6)

El trazador más ampliamente utilizado a nivel mundial para el propósito mencionado es el tritio, el cual posee las ventajas siguientes:

- posibilidad de marcar grandes volúmenes del medio con una pequeña masa de trazador (esta propiedad es común a cualquier radioisótopo);
- ser un emisor beta puro de baja energía, lo que hace innecesario el empleo de grandes blindajes y prácticamente nulo el riesgo de irradiación;
- facilidad para ser medido con gran sensibilidad, lo que permite su detección en concentraciones sumamente bajas con un umbral de medición para análisis de rutina comprendido entre 1 y 20 átomos de tritio (^3H) por cada 10^{18} átomos de hidrógeno (^1H);
- comportamiento ideal por tratarse de un isótopo del hidrógeno y, en consecuencia, formar parte de la molécula de agua natural.

Otros trazadores, emisores gamma en este caso, que también pueden ser empleados son: cromo-51 (^{51}Cr), cobalto-57 (^{57}Co), cobalto-60 (^{60}Co), escandio-46 (^{46}Sc) o yodo-131 (^{131}I); sin embargo ninguno de ellos se comporta como trazador ideal. El yodo se utiliza como anión bajo la forma de I^- ; posee las ventajas de su alta disponibilidad, bajo costo y fácil transporte. Al ^{46}Sc y al ^{51}Cr se los suele inyectar en el estado de un complejo orgánico bajo la forma química EDTA; la alta energía gamma emitida por el escandio dificulta su traslado. Por último los isótopos del cobalto son manipulados en forma de complejos de hexacianocobaltato. El ^{57}Co tiene el inconveniente de

su alto costo en tanto que el ^{60}Co si bien es de bajo costo, presenta los mismos inconvenientes que el ^{46}Sc en cuanto al transporte. (7)

Inyección

Se han propuesto diversas técnicas destinadas a la incorporación del trazador a la capa en estudio. En todos los casos debe asegurarse que la inyección se efectúe en forma instantánea, condición que se cumple cuando el tiempo que demora el trazador en ingresar es despreciable comparado con su tiempo de tránsito entre pozos.

El empleo de una bomba dosificadora es una de las posibles alternativas para lograr una correcta inyección. La bomba se alimenta de un recipiente en el que se encuentra la solución marcadora acoplándose su salida al caudal principal de inyección de agua de formación.

Otra alternativa consiste en tomar una derivación del caudal normal de inyección y hacerla pasar por el recipiente que almacena el trazador. Accionando válvulas adecuadamente dispuestas se logra arrastrar el fluido en forma efectiva.

Asimismo, puede utilizarse alguna herramienta especial de inyección que permita cargar el trazador en superficie y luego ser llevada hasta el nivel de inyección para luego ser accionada en forma remota.

Muestreo

El muestreo es una operación simple que normalmente es realizada por personal del yacimiento sin ninguna dificultad. El plan de muestreo debe comprender una alta frecuencia de toma de muestras durante los días inmediatamente posteriores a la inyección, para luego ir disminuyendo el ritmo a medida que transcurre el tiempo.

El motivo de la alta frecuencia inicial es la posibilidad de presencia de una canalización a través de la cual el trazador emerge en el pozo productor muy rápidamente, antes de haberse dispersado longitudinalmente produciendo una respuesta corta pero de gran amplitud que sólo es posible reconstituir si tiene un número suficiente de muestras.

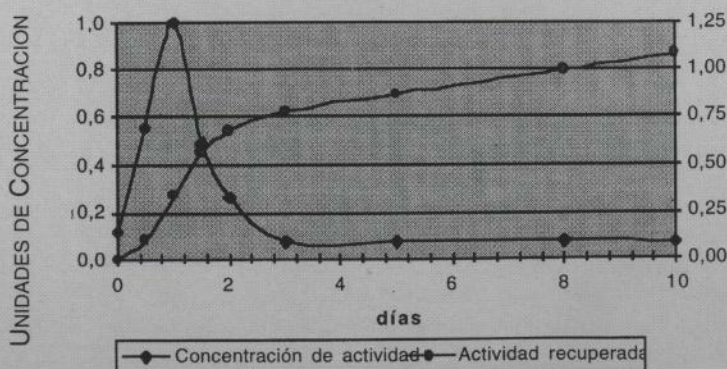
Medición y corrección de resultados

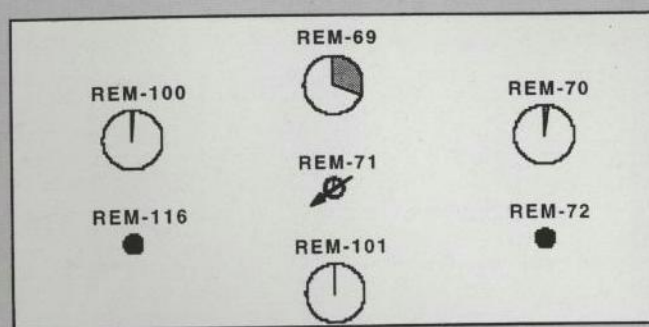
La medición de tritio se efectúa como ya se explicó mediante la técnica de centelleo líquido. En cambio, si se emplean otros radiotrazadores emisores gamma, deben utilizarse otro tipo de detectores, tales como los cristales de centelleo de yoduro de sodio. Los resultados se expresan en unidades de concentración de actividad corregidos por decaimiento radiactivo y por la presencia del fondo natural.

Curvas de respuesta

La respuesta de cada pozo, cualquiera sea el trazador utilizado, está constituida

FIGURA 4: RESPUESTA DEL POZO REM-100 (YACIMIENTO EL MEDANITO)





Los sectores grises indican el porcentaje de agua de inyección recuperada a los 300 días de comenzado el estudio.

por la representación gráfica de la concentración de actividad neta, corregida por decaimiento, en función del tiempo. Los datos originales pueden ser sometidos a un procedimiento de alisado y a un ajuste a través de alguna función teórica que describa el movimiento de agua en un medio poroso, fracturado o diaclasado, según el caso.

También resulta importante el trazado de la curva de actividad total recuperada en función del tiempo ya que ella permite determinar los factores de reparto del trazador entre los distintos pozos. Asimismo, es factible conocer la cantidad de agua de inyección que no participa del proceso productivo.

La curva de actividad recuperada se obtiene multiplicando los valores de ordenada por el caudal del pozo productor e integrando la función resultante por algún método numérico, tal como el de los trapecios o, si se cuenta con un número suficiente de mediciones, el de Simpson. La aplicación de técnicas más complejas por lo general no se justifica en razón de la dispersión estadística de los datos experimentales.

El tiempo de tránsito del trazador entre inyector y productor o tiempo medio de residencia se determina a partir del cálculo del baricentro de la curva de respuesta y representa el instante en que se ha recuperado la mitad de la masa total de trazador que se extraerá a tiempo infinito. También puede ser obtenido a partir de la curva de actividad acumulada.

En algunos casos las curvas de respuesta presentan varios picos debido, probablemente, a la existencia de caminos múltiples de acceso al productor. En situaciones como ésta, la curva debe descomponerse en tantas funciones como picos existan y hallar el tiempo medio de residencia para cada una de ellas y el equivalente total.

El análisis cualitativo y cuantitativo de las curvas de respuesta permite extraer diversas conclusiones y detectar situaciones específicas como las esquematizadas en la figura 1. En el primer caso se ilustra una canalización o fractura que da motivo al rápido acceso de una fracción del trazador al pozo productor, en tanto que la porción restante se desplaza siguiendo un trayecto de permeabilidad más elevada. En el segundo caso se representan dos caminos con distinta dispersión que son seguidos por fracciones parecidas del agua de inyección. Por último el tercer ejemplo

muestra el resultado de una alteración del flujo por efecto de una interferencia.

Un caso real

Se describirá, a manera de ejemplo, la primera experiencia de esta naturaleza llevada a cabo en el ámbito local y que tuviera lugar en el yacimiento El Medanita, tal como se mencionó más arriba.

En esa oportunidad se inyectó agua tritiada en el arreglo constituido por el pozo inyector REM-71 y los productores REM-69, REM-70, REM-100 y REM-101 en operación y REM-72 y REM-116 cerrados. Estos pozos accedían a dos horizontes productores: la formación Quintuco (Jurásico superior - Cretácico inferior) compuesta por calizas arenosas de ambiente marino y la formación Sierras Blancas (Jurásico medio a superior) donde prevalecen areniscas de grano medio a grueso, fragmentos líticos de rocas volcánicas y material cementante de naturaleza arcillosa. (9)

La inyección, de tipo instantánea, se realizó desde la superficie, incorporando el trazador al caudal de la inyección de 90 m³ / día atacando sólo la capa 22 correspondiente a la formación Sierras Blancas. Un "packer" fue colocado en el pozo REM-101 entre las capas 20/21 y la 22 con el objeto de detectar posibles vinculaciones entre ellas.

Las figuras 2, 3 y 4 exponen las respuestas de los pozos REM-69, REM-70, REM-100, respectivamente, mostrando tanto la concentración de actividad instantánea en unidades arbitrarias como la actividad recuperada expresada en forma porcentual con respecto a la inyectada. En el pozo REM-101 no se obtuvo respuesta.

A partir de esta información determinó el tiempo medio de tránsito del REM-69 que resultó ser de 145 días, equivalente, según el modelo utilizado en esa oportunidad, a una permeabilidad de 230 mdarcy.

La recuperación de actividad alcanzó el 32%, lo que indica que a dicho pozo arribaban 28,8 m³ / día del agua inyectada en el REM-71. Tanto en el REM-70 como en el REM-100 se advirtieron canalizaciones preferenciales o "zonas ladronas" caracterizadas por tiempos de residencia muy cortos y una baja recuperación de trazador. La falta de respuesta del pozo REM-101 demostró la falta de interconexiones entre las capas 22 y 20/21. La figura 5 ilustra el arreglo estudiado e indica las fracciones recuperadas en cada pozo.

Como información complementaria, se muestran en las figuras 6 y 7 las respuestas de dos pozos pertenecientes a otro yacimiento de la misma cuenca con tiempos medios de tránsito marcadamente superiores.

CONCLUSIONES

El uso de trazadores brinda una información de gran valor respecto al comportamiento dinámico del agua de inyección y del petróleo recuperado en yacimientos que operan bajo asistencia hídrica. La información que surge de su aplicación no puede ser obtenida por medio de ninguna otra técnica resultando, asimismo, una herramienta de gran utilidad para ajuste y validación de modelos matemáticos.

En lo que respecta a los radiotrazadores, el tritio presenta las ventajas mencionadas que lo transforman en trazador ideal del agua por formar parte constitutiva de su molécula en su estado natural, es decir que el agua tritiada tiene propiedades físicas y químicas prácticamente idénticas a las propias del agua natural.

BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL

- 1- H. R. GOMEZ, R. J. GILLEN, G. E. MAGGIO, J. J. TRIGO: *Técnicas nucleares en recuperación secundaria de petróleo* - El Medanita, Colonia

FIGURA 6: RESPUESTA DE UN POZO DE LA CUENCA NEUQUINA

Respuesta de Pozo REF-01

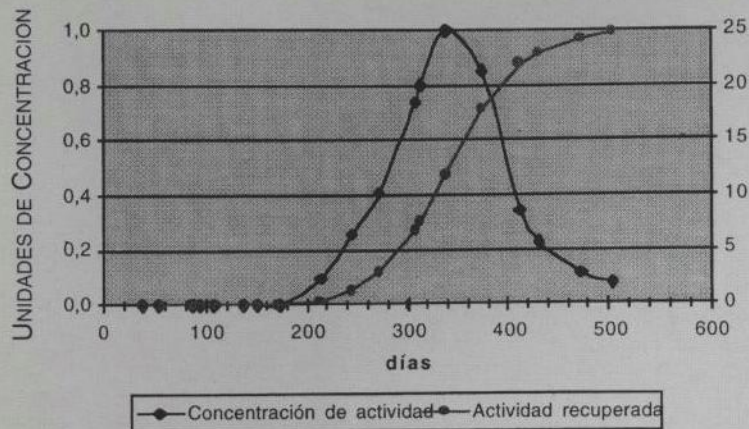
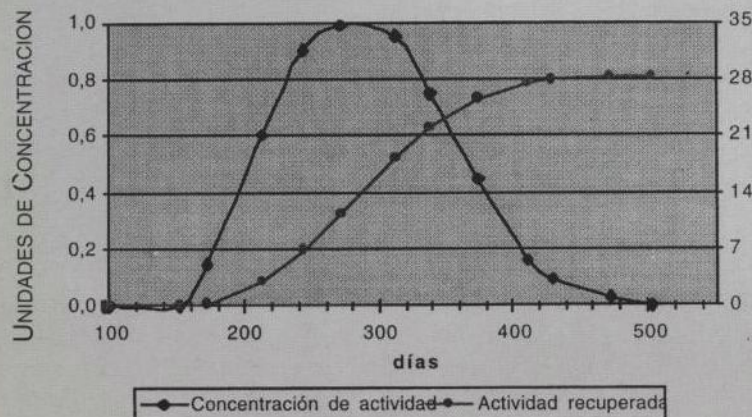


FIGURA 7: RESPUESTA DE UN POZO DE LA CUENCA NEUQUINA

Respuesta de Pozo REF-02



Abundancia isotópica de los elementos constitutivos de la molécula del agua (%)

Hidrógeno

^1H (H)	99,985
^2H (D)	0,015
^3H (T)	trazas

Oxígeno

^{16}O	99,762
^{17}O	0,038
^{18}O	0,200

Catriel. III Simposio de Recuperación Secundaria y Gas. Mendoza, Argentina (1979).

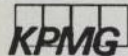
2- H. R. GOMEZ, R. J. GILLEN, G. E. MAGGIO, G. B. BARO: *Trazadores radiactivos en las aguas subterráneas*

para recuperación secundaria de petróleo. Interamerican Symposium on Isotope Hydrology. Bogotá, Colombia (1981).

- 3- M. TRAUTMAN, D. F. SCHUTZ: *Field applications of radioactive tracers in secondary recovery*. Europe & Oil (1970)
- 4- J. A. D'HOOGHE, C. Q. SHEELY, B. J. WILLIAMS : *Interwell radioactive tracers - an effective reservoir evaluation tool : West Sumatra field results*. SPE 8434.
- 5- G. J. LICHTENBERGER : *Field applications of interwell tracers for reservoir characterization of enhanced oil recovery pilot areas*. SPE 21652.
- 6- P. CAMELS : *Exploration du gisement de Villeperdue : bilan des mesures fin 1991*. Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble. Francia (1992).
- 7- O. R. WAGNER, L. E. BAKER, G. R. SCOTT : *The design and implementation of multiple tracer program for multifluid, interwell injection projects*. SPE 5125 .

Bibliografía complementaria

- 8- J. H. Di Gregorio, M. A. ULIANA: *Cuenca Neuquina. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Actas Volumen II*. Academia Nacional de Córdoba. 1980
- 9- M. LEVIN, H. O. PANARELLO, H. G. MORCHESE, R. BLOCKI: *Deuterio y oxígeno-18 en aguas de formación como indicadores ambientales y en el seguimiento de recuperación secundaria en yacimientos de la Cuenca Neuquina*. X Congreso Geológico Argentino. San Miguel de Tucumán, Argentina (1987).

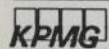


División Energía

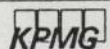
La clave del éxito empresarial es lograr la mejor compatibilización posible entre el contexto y las estrategias que se adopten. Los desafíos que el contexto impone a las empresas argentinas requieren la adopción de estrategias de primer nivel. Mediante nuestros recursos, experiencia y capacidad, asistimos a nuestros clientes en el diseño e implantación de estas estrategias en las áreas de:

- Organización de negocios
- Planeamiento estratégico
- Tecnología informática
- Gerenciamiento del cambio organizacional
- Recursos humanos
- Selección de personal superior
- Consultoría de gestión ambiental
- Corporate finance
- Asesoramiento impositivo
- Auditoría de estados contables

Para conocer más acerca de nuestra amplia gama de servicios, por favor comunicarse con Hernán Pflaum ó Alberto Schuster.



Finsterbusch Pickenhayn Sibille
Av. Leandro N. Alem 1050 - 5to. piso (1001) Buenos Aires
Teléfono: 54-1-313- 9633 Fax: 54-1-311- 7117



Consultores