

"METODOLOGÍAS PARA ENSAYOS DE TRAZADORES EN RESERVORIOS DE PETRÓLEO"

C.A. Somaruga¹ y G.H. Crapiste²

¹ Departamento de Física, Universidad Nacional del Comahue, 8300 Neuquén, Argentina
Fax: (0299) 4488308, Email: csomarug@uncoma.edu.ar

² PLAPIQUI (UNS-CONICET), La Carrindanga - km 7, 8000 Bahía Blanca, Argentina
Fax: (0291) 4861600, Email: gcrapiste@plapiqui.edu.ar

Resumen. Se presentan los ensayos de trazadores como herramienta de diagnóstico en proyectos de recuperación secundaria, proponiéndose una variante denominada "IBIP" que pretende ampliar la información habitualmente obtenida. Esta variante consiste en el cierre y reapertura de pozos y el posterior análisis de los efectos producidos en pozos productores que hayan tenido arribo de trazador. Se demuestra que ello permite discriminar la fracción del agua producida que proviene del inyector de la malla, sin necesidad de esperar la improbable recuperación total del trazador inyectado. Se presentan resultados logrados en un arreglo experimental de laboratorio y en un ensayo de campo.

Introducción

Los ensayos de trazadores se han constituido en una importante herramienta de caracterización de reservorios sometidos a procesos de recuperación secundaria y terciaria fundamentalmente por su capacidad para brindar información representativa de todo el espacio entre pozos, en contraposición a los métodos de evaluación tradicionales que miden sobre la pared del pozo. La faz operativa de un ensayo de trazadores se inicia mediante la inyección de una sustancia fácilmente identificable, en el conducto que transporta agua al interior de una formación petrolera (Fig.1).

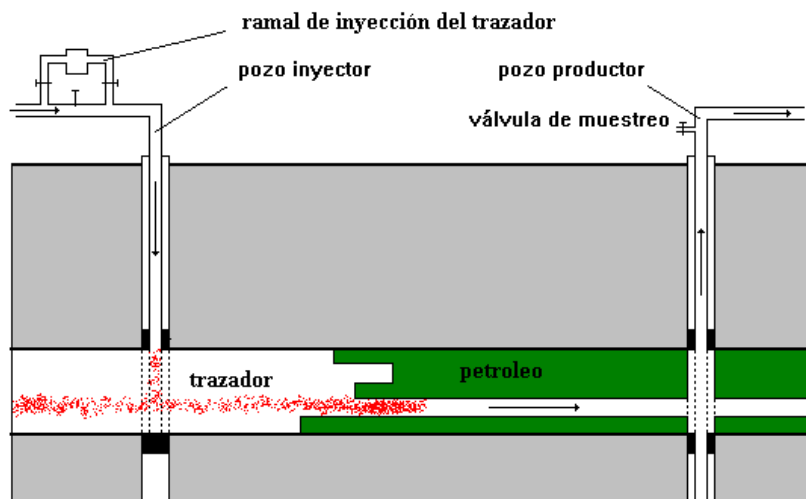


Figura 1. Esquema elemental del camino de los trazadores.

Se espera que la sustancia inyectada fluya invadiendo los espacios porales ocupados por el agua y pueda ser extraída en los pozos productores que estén comunicados con el de inyección. La detección y medición del trazador en los pozos productores, a lo largo del tiempo, debiera permitir, obtener información estructural y de distribución de los fluidos en el medio poroso involucrado.

Para interpretar las curvas de salida del trazador se requiere modelizar convenientemente los procesos de transporte que ocurren en el medio poroso. Es indudable que en los últimos veinte años se ha avanzado enormemente en este campo [1]. Sin embargo la calidad de las predicciones no está garantizada si no se cuenta con algunos datos precisos. En particular, como se expresara en trabajos precursores como el de Abbazadeh Deghani y Brigham [2], es crucial el conocimiento de los caudales de agua dirigidos entre cada par inyector-productor. Esta información no siempre está disponible ni surge habitualmente de los ensayos de trazadores convencionales, por lo que proponemos una variante que implica “interrupciones breves de inyección y producción” (IBIP) procurando cubrir esta falencia.

Ensayos convencionales de trazadores

Para simular la producción de trazador (representada por la curva de concentración de trazador en función del tiempo del ensayo) se asume habitualmente que el reservorio está constituido por un número limitado de capas horizontales de propiedades uniformes (Layer Cake Model). La velocidad de filtración está dada por la ley de Darcy [3]:

$$\vec{v} = -\frac{k}{m} \vec{\nabla} p \quad (1)$$

k y μ son la permeabilidad y viscosidad de la fase y p la presión. Considerando que la fase líquida es incompresible se obtiene:

$$\nabla^2 p = 0 \quad (2)$$

Si además los procesos de transporte dominantes son la convección y la dispersión hidrodinámica, el balance de masa del trazador conduce a:

$$\vec{\nabla} \cdot (C\vec{v} + \vec{j}) = -f \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

C es la concentración de trazador, $\vec{j}$ la densidad de flujo difusivo-dispersivo, ϕ la porosidad y t el tiempo. La densidad de flujo difusivo-dispersivo, puede relacionarse con el gradiente de concentración a través de:

$$\vec{j} = -\overline{\overline{D}} \cdot \vec{\nabla} C \quad (4)$$

$\overline{\overline{D}}$ es el tensor de dispersión hidrodinámica:

$$\bar{D} = f D_m \bar{I} + \frac{a_L}{|\vec{v}|} \begin{bmatrix} v_x^2 & v_x v_y \\ v_y v_x & v_y^2 \end{bmatrix} + \frac{a_T}{|\vec{v}|} \begin{bmatrix} v_y^2 & -v_x v_y \\ -v_y v_x & v_x^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

D_m es el coeficiente de difusión molecular, I la matriz identidad y α_L y α_T las dispersividades longitudinal y transversal. Incluyendo las Ecs.4 y 5 en la Ec.3 y considerando iguales dispersividades longitudinal y transversal se obtiene:

$$f \frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} = D_{11} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{D_{11}}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D_{22}}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (6)$$

con:

$$D_{11} = D_{22} = D = a |\vec{v}| \quad (7)$$

En dominios elementales de sistemas de inyección balanceados, Ec.6 debe satisfacer:

$$\vec{j} = 0 \quad (8)$$

en todo el contorno excepto en los bordes de los pozos.

La resolución conjunta de las Ecs.2,1 y 6 (en ese orden) permite la obtención de las curvas de producción de trazador en los pozos productores.

Para reproducir las curvas obtenidas experimentalmente habitualmente se ajustan algunos de los siguientes parámetros: permeabilidad, espesor, porosidad, saturación y/o dispersividad de cada capa. Las presiones y los caudales totales asociados a cada pozo pueden ser medidos “in situ”. Sin embargo la correcta interpretación de los resultados de un ensayo solo es posible si se conocen los caudales dirigidos entre cada par inyector-productor. En general cada pozo productor puede recibir agua de distintos pozos inyectores, que eventualmente pueden ser externos a la malla o mallas ensayadas (Fig.2).

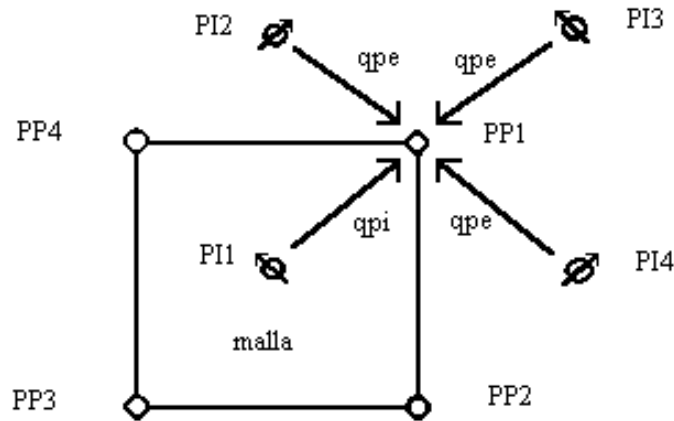


Figura 2. Aportes de agua al pozo productor PP1, desde el interior y exterior a la malla del inyector PI1.

Si en un ensayo de trazadores se recuperara totalmente la masa de trazador inyectado (A_I), estimando luego cuanto trazador se dirigió a cada pozo, se podría determinar por proporcionalidad directa la distribución del caudal inyectado. La masa de trazador recuperada en el pozo productor “k” (A_{rk}) es:

$$A_{rk} = \int_0^t q_{pk} C dt \quad (9)$$

donde q_{pk} es el caudal de agua producida por el pozo, C la concentración del trazador y t el tiempo del ensayo. El caudal de agua proveniente del inyector de la malla (q_{pki}) resultará luego :

$$q_{pki} = \frac{A_{kr}}{A_I} \cdot q_I \quad (10)$$

donde q_I es el caudal del inyector. Finalmente el caudal de agua del pozo “k”, aportado desde el exterior de la malla (q_{pke}) es:

$$q_{pke} = q_{pk} - q_{pki} \quad (11)$$

Lamentablemente, en la mayoría de los casos se observa que solo una fracción del trazador inyectado aparece en los pozos productores en tiempos razonables [4]. El resto podría estar viajando muy lentamente por otras capas hacia los pozos productores o hacia otros sectores. Así una recuperación parcial de trazador podría significar una subestimación del caudal aportado por el inyector de la malla (Ec.10) y sobreestimación del caudal externo (Ec.11). Si fuese posible prolongar el ensayo indefinidamente (tiempo de muestreo infinito) es muy probable que parte del caudal supuestamente aportado desde fuera de la malla deba considerarse como aporte del inyector de la malla.

La metodología propuesta a continuación pretende anticipar que fracción del supuesto caudal “externo” es realmente “interno” sin necesidad de aguardar la improbable salida total del trazador.

Ensayo IBIP

El aporte de agua limpia desde un inyector externo a una malla ensayada produce una dilución adicional del trazador en el interior del pozo. La metodología propuesta está dirigida a evaluar el cambio de concentración asociado al proceso de dilución mencionado. Para lograrlo se propone perturbar la distribución del caudal establecida mediante cierres y reaperturas de los pozos y luego analizar los efectos producidos en las curvas de salida de trazador. Se supone fundamentalmente que en un ensayo con trazadores que involucre tiempos muy prolongados se admite perturbar el ensayo para obtener información rápidamente, antes que esperar la eventual recuperación total del trazador. El tiempo de permanencia cerrado debe ser lo mas breve posible para que la distorsión no se prolongue en demasía, pero lo suficientemente largo como para provocar una respuesta representativa.

Para visualizar los efectos de los cierres, en las distintas variantes del método propuesto, se montó en el laboratorio el arreglo de recipientes, conductos y válvulas que se indica en la

Fig.3. El recipiente “1” representa al pozo inyector de la malla. Los recipientes “2” y “3” representan los pozos inyectores externos. En el punto “A” se produce el mencionado proceso de dilución, previo a la descarga (pozo productor). En tal sistema, se consideran variables conocidas (que pueden medirse directamente) al caudal en la descarga (q_s) y eventualmente a las presiones en las salidas de los recipientes (p_1 , p_2 y p_3). Como consecuencia del paralelismo establecido entre el arreglo experimental y el flujo en reservorios petroleros, es necesario suponer que los caudales inyectados que se derivan por cada conducción y sus conductancias hidráulicas no pueden medirse directamente (las conducciones estarían bajo tierra). Tampoco serviría para tal fin, medir la variación de nivel de los recipientes ya que estos abastecerían a otras conducciones subterráneas, que no aparecen en el esquema y cuyos caudales tampoco podrían medirse.

Se pretende comprobar experimentalmente la factibilidad de lograr información acerca del aporte de cada recipiente al caudal de descarga, mediante una adecuada operación de las válvulas.

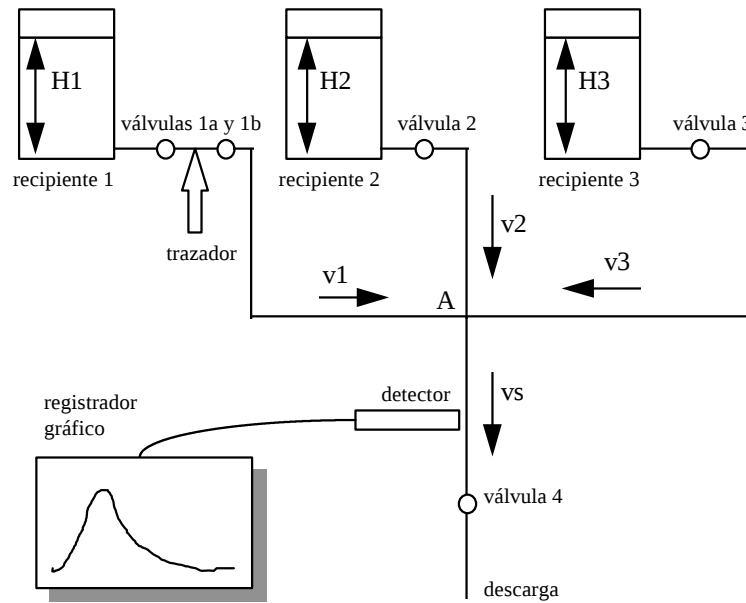


Figura 3. Esquema del arreglo experimental diseñado para mostrar las variantes del ensayo IBIP.

Las condiciones experimentales ($Re < 1000$) permiten aceptar la validez de la ecuación de Poiseuille en los conductos cilíndricos. Incluyendo las pérdidas por fricción en las cañerías y accesorios en la ecuación de Bernoulli, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones, cuya resolución permitirá calcular los flujos

$$rgH_1 = r \langle v_1 \rangle^2 + K_1 r \langle v_1 \rangle^2 + \frac{32mL_1 \langle v_1 \rangle}{d^2} + p_A \quad (12a)$$

$$rgH_2 = r \langle v_2 \rangle^2 + K_2 r \langle v_2 \rangle^2 + \frac{32mL_2 \langle v_2 \rangle}{d^2} + p_A \quad (12b)$$

$$rgH_3 = r \langle v_3 \rangle^2 + K_3 r \langle v_3 \rangle^2 + \frac{32mL_3 \langle v_3 \rangle}{d^2} + p_A \quad (12c)$$

$$p_a = K_s r \langle v_s \rangle^2 + \frac{32mL_s \langle v_s \rangle}{d^2} \quad (12d)$$

$$\langle v_s \rangle = \langle v_1 \rangle + \langle v_2 \rangle + \langle v_3 \rangle \quad (13)$$

$\langle v_j \rangle$ y $\langle p_j \rangle$ representan las velocidades y presiones, promediadas en las secciones de los distintos conductos del arreglo experimental, mientras que K_j , L_j y d_j son coeficientes de pérdidas en accesorios, longitudes y diámetros de los mencionados conductos.

Debido a que las pérdidas de energía en los accesorios pueden expresarse en términos de una longitud de tubería equivalente (L_e)

$$L_e = \frac{Kd \text{ Re}}{64} \quad (14)$$

y que además,

$$q = \langle v \rangle \left(\frac{pd^2}{4} \right) \quad (15)$$

usando la ley de Poisseuille,

$$q = \frac{pd^4}{128m(L + L_e)} \Delta p = G \Delta p \quad (16)$$

donde

$$G = \frac{pd^4}{128m(L + L_e)} \quad (17)$$

es la conductancia hidráulica de un ramal (que incluye conductos y accesorios). Usando la Ec.14 :

$$G = \frac{pd^4}{128mL + \frac{8}{p} rKq} \quad (18)$$

Situación de referencia

Constituye la situación previa al ensayo IBIP. Mientras fluye el agua con todas las válvulas abiertas, se inyecta un trazador radiactivo entre las válvulas “1a” y “1b”. Queda sujeto a convección, difusión y en las condiciones del ensayo (flujo laminar), a la dispersión provocada por la distribución no uniforme de velocidades en cada sección de los conductos. En el punto “A” de la Fig.3, sufre dilución adicional por el encuentro con agua limpia procedente de los recipientes 2 y 3 (Fig.4).

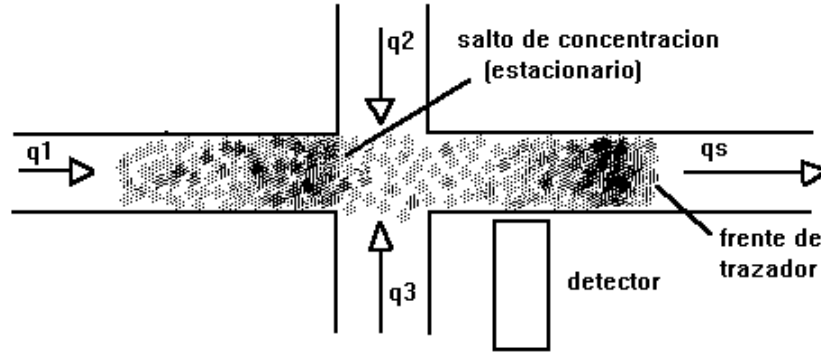


Figura 4. Aspecto supuesto de la mancha de trazador (radiactivo) en la zona de encuentro.

La concentración registrada por el detector puede expresarse en función de la del caudal del conducto 1, como

$$C_{si} = \frac{q_{1i} C_1}{q_{1i} + q_{2i} + q_{3i}} \quad (19)$$

El subíndice i expresa aquí que la situación descrita es la inicial para todas las variantes analizadas posteriormente.

Variante A

Consiste en el cierre, durante un pequeño intervalo de tiempo, de las válvulas 2 y 3, mientras se está registrando el paso de la mancha radiactiva. El cierre repentino de ambas válvulas cancelará la dilución que ocurre en el punto A. Así el salto de concentración de la Fig.4, comenzará a desplazarse hacia la descarga (Fig.5) registrándose un pico secundario de concentración. Esta situación se recreó experimentalmente, con los caudales y resultados que se indican en la Fig.6 (en la cual la concentración se ha expresado en forma relativa al valor umbral previo al pico C_{si}). La concentración, registrada por el detector antes del cierre (inicial), está dada por la Ec.19. Al cerrarse las válvulas 2 y 3, la concentración de salida (final) resultará

$$C_{sf} = C_1 \quad (20)$$

La relación de concentraciones del salto valdrá

$$r_{23} = \frac{C_{sf}}{C_{si}} = \frac{(q_{1i} + q_{2i} + q_{3i})}{q_{1i}} = \frac{q_{si}}{q_{1i}} \quad (21)$$

El subíndice 23 indica las válvulas que se cerraron.

La Ec.21 permite determinar el aporte del recipiente "1" (que representa al inyector interior de la malla), respecto al caudal producido total, a partir del conocimiento de la relación de concentraciones del salto.

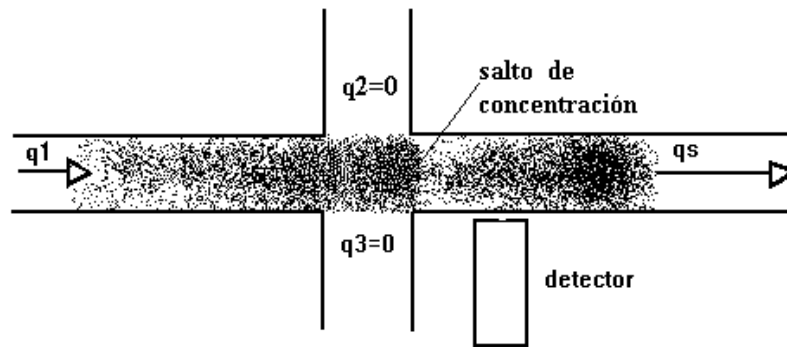


Figura 5. Desplazamiento del escalón de concentración hacia la descarga, debido al cierre repentino de las válvulas 2 y 3.

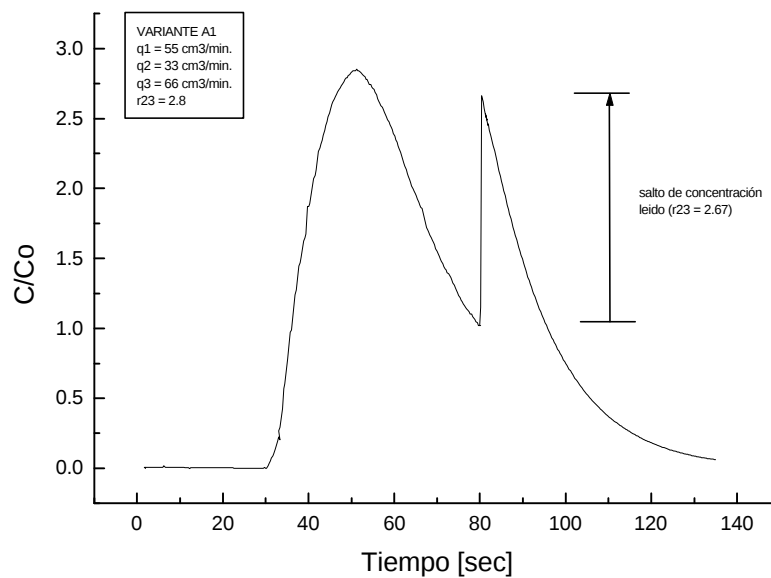


Figura 6. Registro del paso del trazador frente al detector en la situación variante A.

El valor de relación de concentraciones medido en el salto, concuerda aceptablemente con la relación de caudales medida volumétricamente (2.67 frente a 2.80). Se esperaría una mejora en el acuerdo si se redujera la distancia entre el punto A y el detector y fundamentalmente si se aumentara la colimación de la radiación emitida hacia el detector.

Variante B

Consiste en el cierre de la válvula 4 de la Fig.3, mientras se está registrando el paso de la nube radiactiva. Se intercambia así agua entre los recipientes. El trazador alojado en el conducto 1 podría entonces seguir avanzando hacia el punto de encuentro "A" o retroceder hacia el punto de origen. Analizaremos las dos situaciones.

Variante B1 (trazador en retroceso):

El aporte de agua sin trazador desde los conductos 2 y/o 3 generará una “zona limpia” en el tramo del conducto 1, próximo a la zona de encuentro. Esta situación se esquematiza en la Fig.7. Mientras tanto el detector no acusa variaciones importantes de concentración debido al radiactivo remanente, que permanece estacionario frente a él. Cuando se abre la válvula “4” reestableciéndose el flujo original, la zona limpia se registrará como un valle de concentración. Le seguirá un pico que indicará el arribo del frente de trazador que había retrocedido en la etapa anterior (Fig.8).

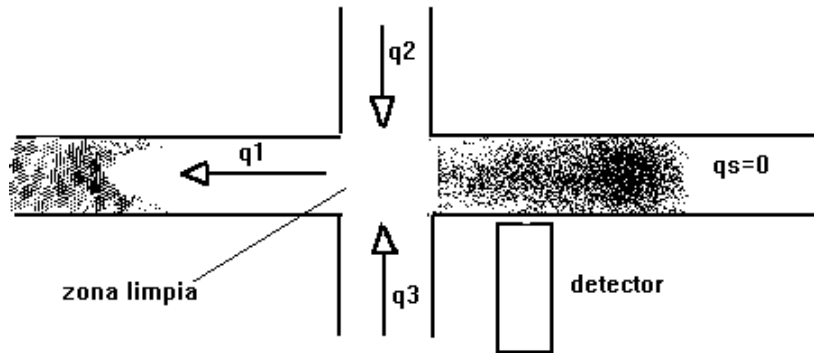


Figura 7 . Retroceso de la mancha radiactiva hacia el recipiente “1” y generación de una zona limpia.

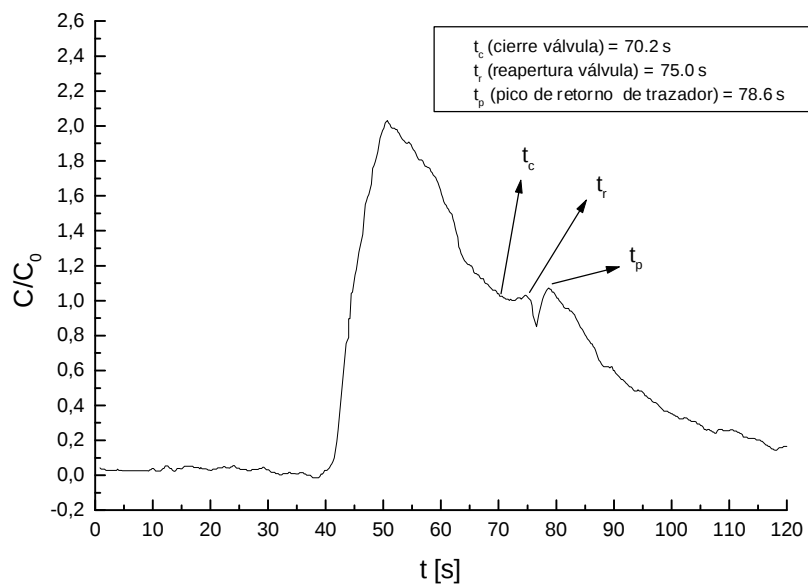


Figura 8. Registro de la nube radiactiva en la variante B1 (trazador en retroceso).

Un análisis de los tiempos de ocurrencia de los eventos mencionados (cierre de la válvula “4”, reapertura de la válvula “4” y detección del pico de trazador retrocedido) conjuntamente

con el conocimiento del cambio de presión experimentado en el punto A (Fig.3), nos permitirá obtener información acerca de la distribución de los caudales originales.

Denominaremos v_{1i} a la velocidad en el conducto “1” con la válvula “4” abierta y v_{1f} con la válvula “4” cerrada. Así,

$$v_{1f} \Delta t_{\text{retroceso}} = -v_{1i} \Delta t_{\text{avance}} \quad (22)$$

donde

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{retroceso}} &= t_{\text{reapertura}} - t_{\text{cierre}} \\ \Delta t_{\text{avance}} &= t_{\text{pico}} - t_{\text{reapertura}} \end{aligned} \quad (23)$$

Ahora definimos :

$$r_s = \frac{\Delta t_{\text{retroceso}}}{\Delta t_{\text{avance}}} = -\frac{v_{1i}}{v_{1f}} \quad (24)$$

que puede también expresarse

$$r_s = \frac{q_{1i}}{q_{1f}} = \frac{q_{1i}}{q_{2f} + q_{3f}} \quad (25)$$

El cierre de la válvula 4 provoca un aumento de presión en el punto de encuentro A. Una vez superados los efectos transitorios, si las conductancias hidráulicas son poco dependientes del flujo, podemos relacionar los caudales iniciales y finales :

$$q_{2i} = \frac{(p_2 - p_{Ai})}{(p_2 - p_{Af})} q_{2f} \quad (26a)$$

$$y \quad q_{3i} = \frac{(p_3 - p_{Ai})}{(p_3 - p_{Af})} q_{3f} \quad (26b)$$

Reemplazando en la Ec.25,

$$r_s = \frac{q_{1i}}{\frac{\Delta p_{2f}}{\Delta p_{2i}} q_{2i} + \frac{\Delta p_{3f}}{\Delta p_{3i}} q_{3i}} \quad (27)$$

Si además

$$\frac{\Delta p_{2f}}{\Delta p_{2i}} \approx \frac{\Delta p_{3f}}{\Delta p_{3i}} \quad (28)$$

entonces

$$r_s = \frac{q_{1i}}{(q_{2i} + q_{3i})} \left(\frac{\Delta p_{2i}}{\Delta p_{2f}} \right) \quad (29)$$

y finalmente

$$\frac{q_{1i}}{q_{si}} = \frac{r_s \Delta p_{2f}}{\Delta p_{2i} + r_s \Delta p_{2f}} \quad (30)$$

La aproximación dada por la Ec.28, es tanto mas cierta en la medida que sean similares las presiones de entrada de los conductos 2 y 3. Este requerimiento puede ser satisfecho en un proyecto de recuperación secundaria debido a que, en general, la alimentación de los pozos inyector es común. La determinación de la distribución de caudales mediante la Ec.30 requiere que sean medidas, una vez alcanzado el estado estacionario, las diferencias de presión entre los extremos de los conductos, para las dos condiciones (anterior y posterior al cierre de la válvula 4). Por este motivo, la variante B1 resulta mas compleja desde el punto de vista operativo. El registro de la Fig.8 se obtuvo mediante el arreglo experimental de la Fig.3, con los parámetros que se presentan en la Tabla 1, conjuntamente con los resultados de la simulación numérica del problema.

TABLA 1. Parámetros del arreglo experimental de la Fig.3 y resultados de la simulación numérica para el problema de flujo en la variante B1.

$H_1 = 0.425 \text{ m}$ $H_2 = 0.500 \text{ m}$ $H_3 = 0.500 \text{ m}$	G_1 [m ⁴ .s/kg]	$G_2 = G_3$ [m ⁴ .s/kg]	G_s [m ⁴ .s/kg]	P_A [Pa]	q_1 [cm ³ /s]	q_s [cm ³ /s]	r_s
válvulas abiertas	$1.24 \cdot 10^{-11}$	$2.68 \cdot 10^{-11}$	$2.68 \cdot 10^{-11}$	3388	0.0096	0.0905	1.30
válvula "4" cerrada			0	4762	0.0074	0	

El valor de r_s calculado tras la resolución numérica, mediante la Ec.29, resultó muy cercano al medido sobre la curva, empleando la Ec.24 (1.30 frente a 1.33). Este buen resultado se alcanzó reduciendo al mínimo los efectos inerciales (dependientes de la energía cinética).

Variante B2 (trazador en avance hacia los recipientes 2 y 3):

Al cerrarse la válvula 4 pueden presentarse también las situaciones de la Fig.9.

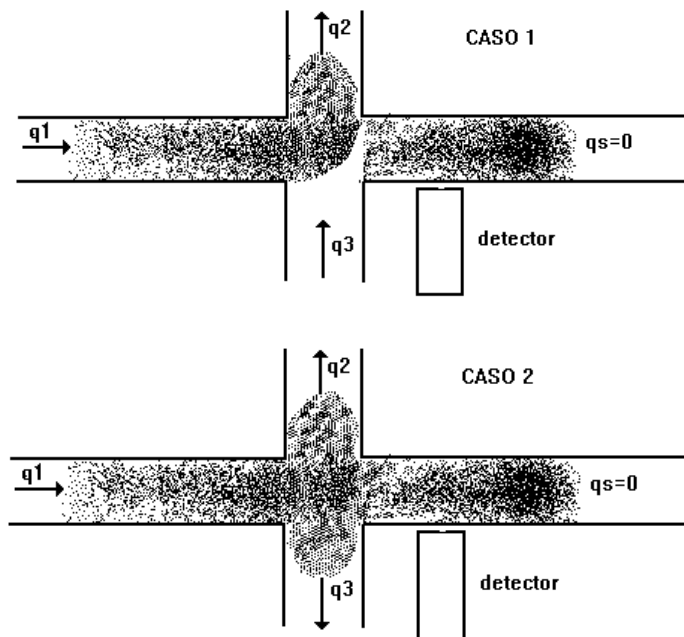


Figura 9. Avance del trazador hacia los recipientes 2 y/o 3 luego del cierre de la válvula 4.

El cierre de la válvula 4 permite que el trazador alojado en el conducto 1, invada uno o ambos conductos (2 y 3), que originalmente transportaban agua limpia y provocaban dilución en el punto de encuentro (al respecto se hizo referencia en la Fig.4). La dilución se afectará luego, al reabrirse la válvula 4, debido a que los conductos 2 y/o 3 fueron invadidos con trazador. Pueden ocurrir los casos que se esquematizan en la Fig.10.

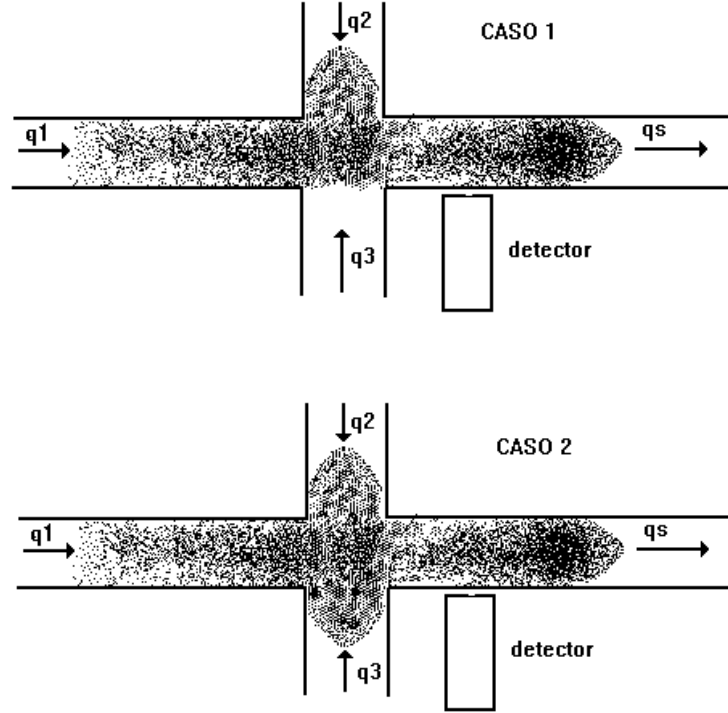


Figura 10. Avance del trazador hacia la descarga luego de la reapertura de la válvula 4.

Mientras se mantenga cerrada la válvula 4, se registrará un valor constante de concentración (debido al trazador que se mantiene estacionario frente al detector) y transcurrido un pequeño tiempo, una concentración mayor (pico secundario de la Fig.11).

La concentración registrada antes del cierre está dada por la Ec.19. Una vez producidos el cierre y la reapertura de la válvula 4, las concentraciones registradas serán

$$\text{Caso 1} \quad C_{sf} = \left(\frac{q_{1i} + q_{f1} \frac{q_2}{q_{f2}}}{q_{1i} + q_{2i} + q_{3i}} \right) C_1 \quad (31)$$

$$\text{Caso 2} \quad C_{sf} = C_1 \quad (32)$$

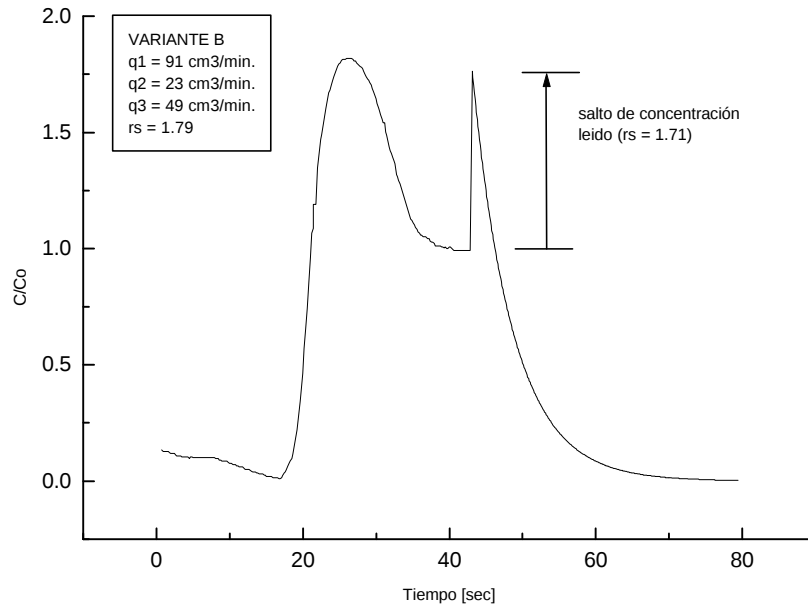


Figura 11. Registro del paso de trazador en la variante B2

Por lo tanto las relaciones de concentración del pico secundario valdrán

Caso 1

$$r_{s1} = 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{q_{3f}}{q_{1f}}\right)} \frac{q_{2i}}{q_{1i}} \quad (33)$$

Caso 2

$$r_{s2} = 1 + \frac{q_{2i} + q_{3i}}{q_{1i}} = \frac{q_{si}}{q_{1i}} \quad (34)$$

El caso 2, conduce a un valor de r_s idéntico al de la variante A (ver Ec.21) y por lo tanto, permite una determinación directa de la relación de caudales, una vez que se haya medido r_s sobre la curva de registro del trazador. El análisis del caso 1 es mas complicado. Si, procurando simplicidad, se aplicara directamente la Ec.34 se subestimaría el aporte de agua externo ya que por las características de la distribución de caudales posterior al cierre de la válvula “4”, solo se marcaría el agua proveniente del recipiente “2”.

La indistinguibilidad entre los dos casos analizados, constituye una dificultad insalvable respecto a esta variante del ensayo IBIP. El error relativo en la evaluación de la relación de caudales, cometido al suponer la ocurrencia del caso 2, cuando realmente existe el caso 1, está dado por

$$\frac{\Delta r_s}{r_{s2}} = \frac{r_{s2} - r_{s1}}{r_{s2}} = (1 - b) \frac{q_{2i}}{q_{si}} + \frac{q_{3i}}{q_{si}} \quad (35)$$

donde

$$b = \frac{1}{1 + \frac{q_{3f}}{q_{1f}}} \quad (36)$$

Los aportes de agua desde el recipiente 3, tanto el anterior como el posterior al cierre de la válvula 4, tienen un peso fundamental en la magnitud del error cometido.

- Si ambos son relativamente bajos frente a los otros dos aportes (q_1 y q_2), nos aproximaríamos a una condición similar a la del caso 2, por lo que la utilización directa de la Ec.34 significaría una buena aproximación.
- Si por el contrario el aporte es importante, el error relativo porcentual cometido al usar la Ec.34 podría resultar próximo al 100 %.

El registro de trazador de la Fig.11, fue obtenido forzando la ocurrencia del caso 2, elevando el nivel de agua del recipiente 1, respecto a los dos restantes, en el arreglo experimental de la Fig.3. Se observa una buena coincidencia entre los valores de relación de caudales medidos volumétricamente y mediante el ensayo IBIP empleando la Ec.34 (1.79 frente a 1.71).

Metodología propuesta : Variante mixta.

El análisis realizado sobre las distintas variantes del ensayo IBIP, nos permite concluir que

- La variante A es simple y aparentemente segura. Sin embargo en una situación de campo podría ocurrir que el cierre de los pozos inyectoros externos a la malla, durante un tiempo acotado, no garantice marcar la totalidad del agua vecina al productor. Los bajos gradientes de presión en la zona exterior de la malla del pozo productor, originados tras el cierre de los inyectoros externos podrían favorecer la aparición de zonas prácticamente estancas dificultándose la marcación del agua en el sector.
- La variante B requiere:
 - mas información (relativa a la evolución de las presiones) en su alternativa B1.
 - un análisis más cuidadoso de los resultados en su alternativa B2 y la posibilidad inevitable de cometer errores del mismo orden de magnitud que el valor determinado de r_s .

Como conclusión puede afirmarse que solo la aplicación simultánea de las variantes A y B, esto es el cierre conjunto de los pozos productor e inyectoros externos a la malla, garantiza la obtención de valores confiables de la relación de caudales (aplicando las Ecs.21 o 34). El efecto de esta operación puede apreciarse en la Fig.12.

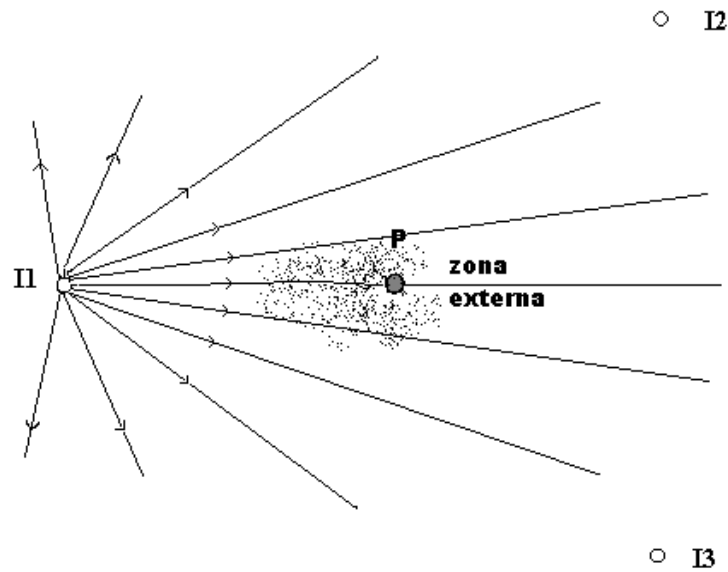


Figura 12. Evolución de la mancha de trazador tras el cierre conjunto del pozo productor (P) y de los inyectores externos a la malla (I2 e I3).

La nueva distribución de presiones posibilita que la mancha de trazador alcance la zona estanca detrás del pozo productor, marcándose así la totalidad del agua “externa”, que estará luego en condiciones de ser registrada.

Formaciones multicapa

En formaciones constituidas por varias capas, todas con aporte de agua de inyección, no existe una forma operativamente simple de lograr que el trazador producido por una capa invada los sectores internos de otras capas (gradiente de presión opuesto). En la Fig.13, se

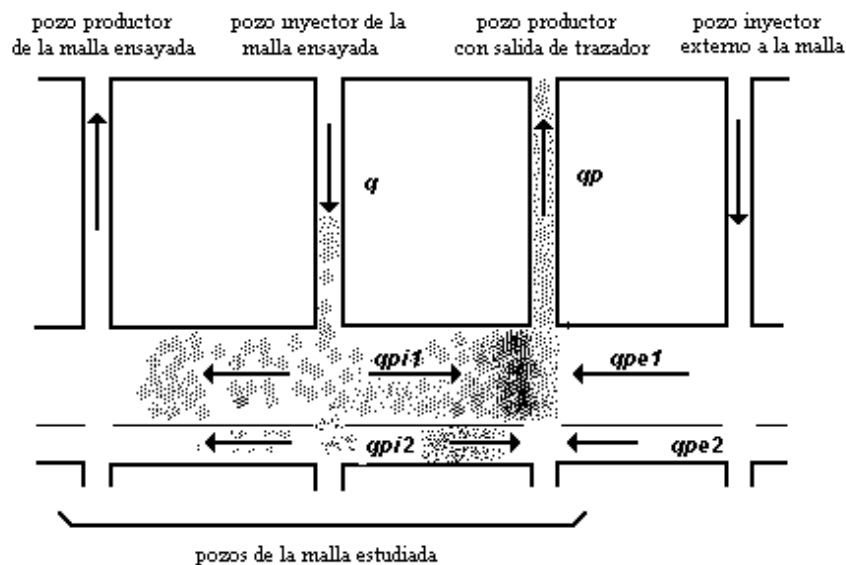


Figura 13. Formación con mas de una capa aportando agua.

presenta una situación en la cual una formación de dos capas, produce trazador solo desde una (capa 1). En la capa 2 el trazador aún está viajando hacia el pozo productor. Mediante la realización del ensayo IBIP el trazador de la capa 1 puede invadir los sectores externos a la malla de las capas 1 y 2, pero difícilmente el sector interno de la capa 2. En tal situación repitiendo la metodología propuesta en el apartado anterior, se arribaría a una relación de concentraciones:

$$r = \frac{C_{sf}}{C_{si}} = \frac{q_p - q_{pi2}}{q_{pi1}} \quad (37)$$

Mediante un análisis comparativo de las Ecs.34 y 37 se puede concluir que en formaciones multicapa con alguna capa aportando agua limpia, la utilización de la Ec.34 sobrestimaría el caudal producido desde el interior de la malla, por la capa con arribo de trazador (q_{pi1}). Esta aparente falencia puede corregirse ya que las Ecs.9 y 10 permiten la estimación del caudal q_{pi1} , mediante la integración de la curva de salida de trazador. Entonces podrían obtenerse los aportes de agua limpia de otra u otras capas, mediante

$$q_{pi2} = q_p - r q_{pi1} \quad (38)$$

Así podemos finalmente estimar cuanto caudal proveniente del inyector de la malla, no hemos detectado aún.

Ensayo de campo IBIP

Se realizó un ensayo IBIP, en el pozo productor 46 del sector de yacimiento de la Fig.14. El caudal de agua inyectada en el pozo 88 es $q_i = 100 \text{ m}^3/\text{día}$, mientras el producido de agua en el 46 es $q_p = 30 \text{ m}^3/\text{día}$. Se ignoraba el aporte de agua al 46, desde los inyectores 48 y 42.

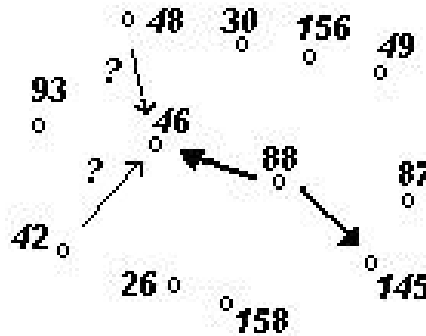


Figura 14. Sector del yacimiento donde se desarrolló el ensayo de trazadores

Inicialmente se habían inyectado 10 Ci de Tritio como agua tritiada en el pozo inyector 88. Hasta el momento se ha detectado trazador solo en los pozos 46 y 145 mediante centelleo líquido.

Se emplearon Elementos Finitos para resolver la Ec.2 siguiendo el procedimiento de Galerkin Standard [5]. Se obtuvo el campo de presiones y luego mediante la Ec.1, el campo de velocidades. Nuevamente se utilizaron Elementos Finitos en la discretización espacial y Diferencias Finitas en la temporal para la resolución de la Ec.6. Se consideró el dominio de la Fig.14, y una inyección tipo impulsiva de trazador. Se obtuvo así la concentración de trazador en función del tiempo, en el pozo de salida.

Situación al completarse el ensayo IBIP

El registro experimental de trazador que se obtuvo en el pozo 46 hasta ese momento, se reproduce en la Fig.15, conjuntamente con el mejor ajuste teórico.

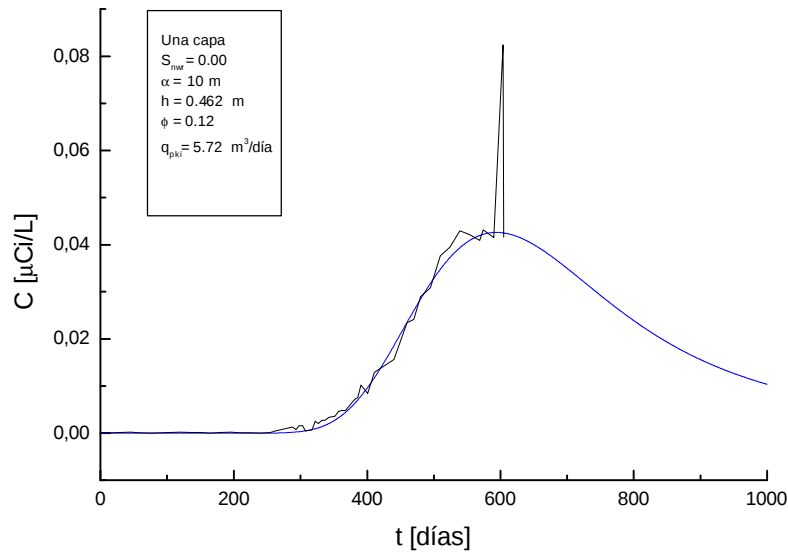


Figura 15. Registro de trazador en el pozo 46, hasta realizado el ensayo IBIP y respuesta teórica de una capa.

En el día 601 se cerró el pozo 46, cuando se detectaban 0.043 uCi/L. Tres días después se reabrió el pozo, registrándose 0.081 uCi/L. Como no se cerraron los inyectores 42 y 48, se supone que no se marcó el agua aportada por otras capas. Por lo tanto :

$$r = \frac{q_{p1}}{q_{pi1}} = 1.893 \quad (39)$$

Como $q_{pi1} = 5.72 \text{ m}^3/\text{día}$ (obtenido por integración de la curva continua de la Fig.15), entonces :

$$q_{p1} = 1.893 \times 5.72 \text{ m}^3/\text{día} = 10.83 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se concluyó en ese momento, que existirían otras capas produciendo agua limpia, aportando la diferencia entre la detectada por el ensayo IBIP para la capa 1 ($10.83 \text{ m}^3/\text{día}$) y la producida por el pozo ($30 \text{ m}^3/\text{día}$), es decir $19.17 \text{ m}^3/\text{día}$.

Se esperaba además que, manteniéndose la misma relación de caudales, de esos $19.17 \text{ m}^3/\text{día}$, $10.12 \text{ m}^3/\text{día}$ deberían provenir desde el 88 y $9.05 \text{ m}^3/\text{día}$ del exterior.

Situación actual

En la Fig.16 se presenta el registro de trazador del pozo 46 transcurridos 1436 días de ensayo, conjuntamente con la respuesta teórica de cinco capas. Es importante destacar la evidente imposibilidad de reproducir aceptablemente la alta variabilidad del registro experimental mediante el modelo de capas homogéneas. Un mejor ajuste obligaría a considerar un número muy grande de capas continuas a lo largo de cientos de metros, con espesores del orden de pocos centímetros (situación difícil de aceptar desde el punto de vista geológico). Los espesores de las cinco capas supuestas están en el rango que va desde los 0.12 a 0.46 m, totalizando un espesor neto de 1.37 m. con porosidad 0.12.

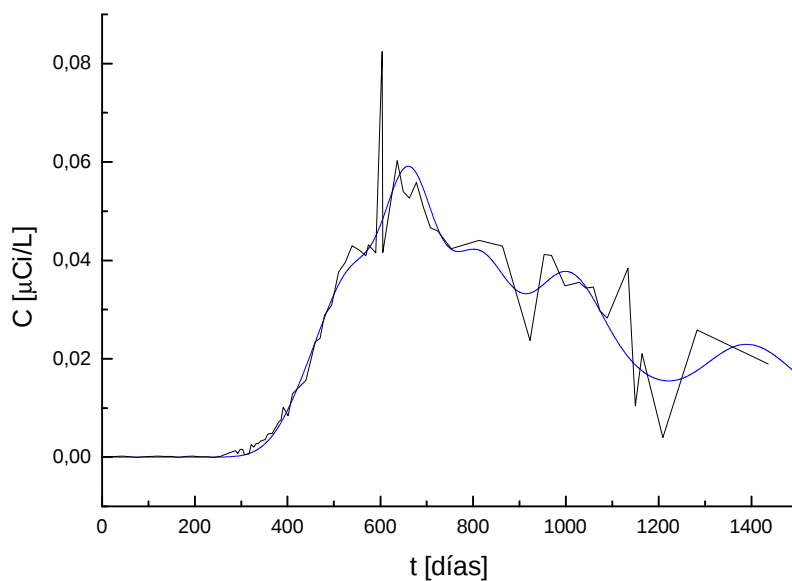


Figura 16. Registro al día 1436 y curva teórica de cinco capas.

Al día 1456 puede asegurarse (por integración del registro de la Fig.16) que $12.14 \text{ m}^3/\text{día}$ (los $5.72 \text{ m}^3/\text{día}$ de la capa 1 ya mencionados, mas $6.42 \text{ m}^3/\text{día}$ de otras cuatro nuevas capas) provienen del inyector 88.

Conclusiones

La evolución de los resultados del ensayo, relativos a la determinación del origen del agua producida por el pozo 46, pueden resumirse en el cuadro siguiente:

Día de ensayo	A_r : actividad recuperada en el pozo [Ci]	q_p : caudal de agua total [m ³ /d]	q_{pi} : caudal de agua desde PI88) [m ³ /d]	q_{pe} : caudal de agua desde fuera de la malla [m ³ /d]
604 (sin IBIP)	0.572	30	5.72	24.28
604 (con IBIP)	1.584 (pred.)	30	15.84 (pred.)	14.16 (pred.)
1436 (sin IBIP)	1.214	30	12.14	17.86

Como conclusiones podemos mencionar:

- El ensayo IBIP predice que aún 3.7 m³/día de agua que actualmente están contabilizados como aportes desde el exterior de la malla provendrían realmente del inyector 88.
- La persistente salida de trazador por el pozo 46 preanuncia la confirmación de tal presunción.
- Esto acordaría con un pronóstico hecho hace 835 días.

La información obtenida mediante el ensayo IBIP es tanto mas importante cuanto mas se demora la salida de trazador. Resulta imprescindible cuando, por el tiempo transcurrido, se reduce la concentración por debajo de los límites de detección (Ej. por decaimiento radiactivo) impidiéndose así el registro de importantes cantidades de trazador. El ensayo IBIP se constituye así como una importante herramienta complementaria para los ensayos convencionales de trazadores.

Referencias

1. Somaruga C. "Flujo de Trazadores en Reservorios de Petróleo Sometidos a Recuperación Secundaria". Tesis (Ms. Ing. Qca.). PLAPIQUI, UNSur. Bahía Blanca, Arg. (1999).
2. Abbaszadeh-Dehghani M. y Brigham W. "Tracer Testing for Reservoirs Description". Journal of Petroleum Technology, N°5, 519-527 (1987).
3. Russell, T. y Fanett Wheeler M. "Finite Element and Finite Difference Methods for Continuous Flows in Porous Media". En "*The Mathematics of Reservoir Simulation*", Richard Ewing (Ed.). SIAM, Philadelphia (1983).
4. Lichtenberger G. J. "Field Applications of Interwell Tracers for Reservoir Characterization of Enhanced Oil Recovery Pilot Areas". SPE paper 21652 (1991).
5. Zienkiewicz O.C. "*Finite Element Method, in Structural and Continuum Mechanics*". McGraw Hill, London, (1967).