

EMPLEO DE RADIOTRAZADORES EN LA EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN YACIMIENTO DE PETRÓLEO VISCOSO.

Humberto L. Najurieta¹ y Guillermo E. Maggio²

Pan American Energy^{1*} y Noldor² S.R.L. *Ahora en UNC.

ABSTRACT

The flow behavior of the injected water in a multilayer, heterogeneous, viscous oil reservoir is being studied using a radiotracer (tritium). The interpretation method is based in simple graphing techniques that gives direct information on the main flow characteristics of the injected water in the reservoir. The study shows that the injected water tends to flow preferentially in the high permeability channels of the reservoir. The flow also tends to be parallel to the existing faults. However, the faults are not impermeable and there are cases of flow through two faults. The obtained data is being used to optimize the waterflooding operation and to monitor two Enhanced Oil Recovery Pilots.

RESUMEN

Se presenta el empleo de un radiotrazador (agua tritiada) en la evaluación de las características principales de flujo de un yacimiento en proceso de inyección de agua. (Yacimiento Piedra Clavada, Provincia de Santa Cruz, República Argentina). El yacimiento estudiado posee un alto grado de heterogeneidad, tanto en sus características ambientales como en la variedad de los petróleos producidos (Paradiso (1987), Kejner (1995), Malone (1995), Najurieta (1995)).

Se presentan ejemplos de aplicación de una técnica que permite cuantificar la distribución de la producción del agua inyectada en los pozos productores vecinos y el tiempo de tránsito del agua en las direcciones principales de flujo. Se presentan también ejemplos para estudiar fallas geológicas y diagnosticar su rol en los patrones de flujo resultantes.

La interpretación de las mediciones es en este trabajo eminentemente práctica, evitándose el empleo de modelos analíticos, debido a la complejidad del yacimiento estudiado. Las mediciones son representadas gráficamente de modo de facilitar la interpretación directa de las mediciones y permitiendo la toma de decisiones operativas inmediatas.

Se concluye que la información obtenida mediante estas técnicas constituye un aporte único, no comparable con otras tecnologías y que por lo tanto resulta de gran utilidad complementaria en estudios interdisciplinarios de yacimientos.

INTRODUCCION

El empleo de trazadores brinda una información de inestimable valor respecto al comportamiento dinámico del agua de inyección en yacimientos que operan bajo recuperación secundaria. La información que surge de su aplicación no puede ser obtenida por medio de otras técnicas, por lo que constituye la mejor opción cuando se trata de valorar fenómenos tales como la influencia ejercida sobre la recuperación de hidrocarburos por la habilitación o cierre de pozos inyectoros, existencia de heterogeneidades en el reservorio, tales como canalizaciones o fallas (Najurieta (1994, 1995 y 1999)), o comunicaciones verticales entre estratos. Existen varios antecedentes de aplicaciones en la literatura (Wagner (1974), D'Hooge (1979), Lichtenberger (1991), Hutchins (1991) y otros).

La operación consiste en la dosificación de una solución acuosa del trazador en el agua de inyección, en una capa previamente aislada. Mediante un plan de muestreo en los pozos productores circundantes se generan gráficos representativos de las curvas de respuesta o funciones de transferencia inyector-productor y a partir de ellas, es posible evaluar diversos parámetros o características del arreglo, tales como:

- detectar canales de alta permeabilidad, barreras y fracturas;
- detectar comunicaciones entre capas;
- evaluar la fracción de agua de inyección que alcanza cada pozo productor;
- determinar los tiempos de residencia;
- encontrar estratos de distinta permeabilidad pertenecientes a una misma capa;
- determinar direcciones preferenciales de flujo.

Dentro de este contexto, resulta especialmente ventajoso el empleo de trazadores radioisotópicos siendo, entre ellos, el tritio el de más amplia utilización a nivel mundial en razón de 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 extremadamente bajas;
- comportamiento ideal por tratarse de un isótopo del hidrógeno y, en consecuencia, formar parte de la molécula de agua.

Si bien el peligro de irradiación con agua tritiada es muy bajo, deberá cumplirse con las normas descriptas en el Apéndice 1, sobre Seguridad Radiológica.

INYECCION

Se han propuesto y utilizado diversas técnicas destinadas a la incorporación del trazador en la capa de estudio (ver por ejemplo INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry** (1991)).

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. Este requisito se cumple fácilmente en el caso de un radiotrazador debido al pequeño volumen a inyectar (aproximadamente un litro).

MUESTREO

El muestreo es una operación simple que normalmente la realiza el 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 hasta llegar, por ejemplo a una muestra mensual luego de transcurrido un año. El motivo de la alta frecuencia inicial es la posibilidad de que exista una canalización a través de la cual el trazador emerja 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.

CURVAS DE RESPUESTA

La medición de concentración de tritio se efectúa mediante la técnica conocida como de centelleo líquido. En esta técnica se mide la actividad de la muestra, que es la velocidad con la que una sustancia radiactiva desintegra y que es también proporcional a su masa. La unidad de medición de actividad es el Becquerel que equivale a una desintegración por segundo ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ d/s}$). En la práctica suele utilizarse otra unidad más antigua, llamada Curio ($1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$).

Conocido el volumen de la muestra puede calcularse la concentración de actividad expresada en Bq/L o, bien, en el caso particular del tritio, en unidades de tritio equivalentes a una concentración de un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de hidrógeno común (^1H) o, lo que es lo mismo, $1 \text{ U.T.} = 0,118 \text{ Bq/L}$.

A partir de estos resultados, la función de transferencia obtenida en un pozo productor como consecuencia de una inyección instantánea de tritio está dada por la representación de la concentración de actividad presente en el agua producida por ese pozo en función del tiempo. De ella, mediante un proceso de integración numérica puede calcularse la actividad de trazador recuperado en función del tiempo, expresada como una fracción de la cantidad inyectada.

Los resultados así obtenidos permiten efectuar un análisis en tres niveles de complejidad. En primera instancia es factible, en forma rápida, efectuar el cálculo de los tiempos de tránsito mínimo, medio y máximo entre el inyector y cada productor (Apéndice 2). También se calcula el factor de reparto del agua de inyección entre los distintos pozos productores. Con esta información se puede inferir la presencia de canalizaciones preferenciales, barreras impermeables y la existencia de estratos de distinta permeabilidad dentro de una misma capa. En segunda instancia, es posible evaluar parámetros del reservorio mediante el ajuste de las curvas medidas con modelos matemáticos analíticos y simuladores numéricos simples como los empleados habitualmente en estudios de hidrología (Zuber (1983)).

Finalmente, un tercer nivel de análisis se basa en modelos matemáticos o numéricos de mayor complejidad que consideren la presencia de más de una fase, relaciones de movilidad no unitarias y el conocimiento de diversos parámetros del reservorio, que es considerado heterogéneo (Abbaszadeh (1984), Allison (1991), Zemel (1995), Pérez Cárdenas (1986), Dourado (1996), y Ramírez (1995)). En la Ref. 19 se puede encontrar un ejemplo de aplicación al estudio de un yacimiento naturalmente fracturado. Esta etapa escapa al propósito de este trabajo en el que sólo se pretende demostrar la utilidad de los trazadores para la rápida obtención de resultados cualitativos y semicuantitativos que ayuden a comprender la dinámica del reservorio.

Dentro del segundo nivel de complejidad, se ha aplicado a las respuestas de los pozos pertenecientes a diversos arreglos del Yacimiento Piedra Clavada, el modelo presentado por A. Lenda y A. Zuber (Zuber (1983)). Su utilización ha permitido la descomposición de curvas complejas con múltiples máximos relativos en una sumatoria de funciones simples que facilitan la interpretación del comportamiento del trazador. En efecto, para cada curva individual pueden determinarse los tiempos de medios de residencia y evaluar la cantidad de trazador recuperada y asignar estos valores a estratos de distinta permeabilidad constitutivos de la misma capa (Apéndice 3).

Presentación de Resultados de Medición.

La experiencia obtenida hasta el momento muestra que con dos tipos de presentaciones gráficas es posible obtener una visión del avance del agua en el reservorio. El primer tipo de gráfico consiste en la superposición de los resultados de producción acumulada de agua tritiada y tiempo de arribo del trazador en un mapa isopáquico del área en estudio. El mapa presenta también las fallas geológicas de acuerdo a la última interpretación realizada. Las Figuras 1, 4 y 6 son ejemplos de estas gráficas. La producción acumulada se presenta en esta gráfica como un círculo en el pozo productor de área proporcional a la misma.

Asimismo, se indican las direcciones de flujo a partir del inyector estudiado. Para distinguir los pozos muestreados de los no muestreados en el estudio se los identifica con un color más intenso.

El otro tipo de gráfica (Figuras 2, 3, 5, 7 y 8) es la presentación de la concentración instantánea del trazador en las muestras recogidas en los pozos de la malla estudiada. Esta gráfica es una presentación en función del tiempo y permite apreciar los volúmenes relativos de agua producida por los pozos

Aplicaciones al Yacimiento Piedra Clavada. Resumen de Resultados.

Hasta la fecha (Diciembre de 1998) se ha inyectado agua tritiada en un total de 20 pozos. Cada inyección se realizó aislando la capa en estudio. El muestreo del trazador se realizó en los pozos circundantes al inyector y en ocasiones el seguimiento del avance del agua tritiada se realizó hasta a dos distanciamientos del mismo.

Grado de Canalización (Anisotropía): El análisis de las gráficas de concentración instantánea y de los mapas de distribución areal del trazador ha permitido conocer que en el yacimiento predomina el flujo canalizado. Este flujo canalizado en una dirección preferencial se presenta en un 86% de los casos. Sólo en dos casos se ha observado una distribución algo homogénea con un reparto similar al presentado en la malla del PC-1209 (Capa 81, Figura 1).

Agua Recuperada: Al finalizar las primeras mediciones o al cumplirse más de un año de muestreo (14 casos), se observó que el promedio del agua tritiada recuperada es del 54.7%, con un máximo de agua recuperada del 69% para la malla del PC-1108 (Capa 81, Figura 1) y un mínimo del 10% para el caso de la malla del inyector PC-1209 (Capa 81, Figura 1).

Tiempos de Arribo: Los tiempos de arribo del agua tritiada (tiempo en el que el tritio comienza a ser detectado, después de la inyección) fueron muy variables, desde un mínimo de un día a más de dos años.

En una dirección fuertemente canalizada (PC-1004 al PC-1276, Capa 42) el agua inyectada recorrió 250 metros en un día.

En una malla canalizada (por ejemplo la del inyector PC-1188, Capa 81, Figs. 1 y 2) el tiempo de arribo promedio es del orden de 90 días, con un mínimo de 64 días y un máximo de 131 días.

En una malla poco canalizada como la del inyector PC-1209 (Figs 1 y 3), el tiempo promedio de arribo fue de 157 días, a pesar de que en la dirección Sur - Oeste el tiempo de arribo fue de sólo 27 días (pero con baja acumulada) y con un máximo de 300 días en la dirección menos permeable, hacia el Sur.

Zonas Barridas: en oportunidades el agua inyectada recorre distancias grandes, arribando a más de un distanciamiento entre pozos (Figs. 4 y 5).

Caracterización y Localización de Fallas: La presencia de fallas geológicas en las capas no significa necesariamente que resulten hidráulicamente impermeables. Un ejemplo característico es el caso de la malla del inyector PC-51 (Capa 110, Figuras 6 y 7) en el que el agua inyectada atraviesa dos fallas en las direcciones Norte y Oeste. Con la información obtenida hasta Junio/97 se logró caracterizar cuatro fallas como no impermeables y se verificó la presencia de una zona impermeable en el Bloque del PC-1267, Zona IXX N. Esta última información ayudó a mejorar los ajustes de simulación numérica del bloque mediante la introducción de una nueva barrera impermeable en esa zona.

Optimización de la Inyección: La información ha sido empleada para decidir el cierre de capas canalizadas y cambios en los caudales de inyección. Asimismo se utiliza para predecir el tiempo de espera de procesos de recuperación terciaria mediante inyección de químicos o procesos térmicos como la inyección de agua caliente.

Simulación Numérica: como se mencionó anteriormente, la historia de concentración del trazador se emplea para calibrar los datos a suministrar a simuladores numéricos. El simulador Eclipse-100 posee la Opción Trazadores, que permite simular la inyección y realizar el cálculo de la dispersión del trazador. Esta

técnica se utilizó para ajustar los valores de permeabilidad y porosidad en el Bloque del PC-1222, en donde se está inyectando agua caliente desde Dic/1997 y se planea realizar un Piloto de Recuperación Terciaria con inyección de productos químicos.

Conclusiones.

1. La aplicación de radiotrazadores para estudiar las características de flujo del agua inyectada en el Yacimiento Piedra Clavada ha permitido mejorar la comprensión de sus características y propiedades, dando una información de difícil o imposible obtención con otras técnicas.
2. Se ha confirmado que el flujo predominante en el yacimiento es canalizado, en direcciones preferencialmente paralelas a las fallas geológicas principales.
3. Se ha verificado que las fallas geológicas existentes son parcialmente permeables. El grado de sello de las mismas es variable, existiendo también fallas impermeables.
4. Una estadística realizada sobre la aplicación de trazador en ocho zonas del yacimiento muestra que en promedio un ochenta por ciento del agua inyectada se dirige preferencialmente en una dirección.
5. Aproximadamente el cincuenta por ciento del trazador inyectado no es recuperado en los pozos productores. Este volumen no recuperado es una medida de la efectividad del agua inyectada en barrer los fluidos del yacimiento y en aumentar la presión del sistema.
6. Los modelos analíticos y de simulación numérica existentes no resultaron prácticos para la interpretación rigurosa y formal de las mediciones. Esto se debe a la complejidad del yacimiento estudiado y a la diversidad de datos no conocidos requeridos en el cálculo.
7. Se recomiendan los métodos de interpretación directa presentados en este trabajo.

Agradecimientos.

Se agradece el apoyo dado a este proyecto y las numerosas contribuciones realizadas por la Dra. Patricia Porcelli y el Ing. Hugo Elías, quienes dieron un gran impulso al mismo. Se agradece al Geólogo Lic. Carlos Acuña por el apoyo prestado durante la etapa de interpretación de los resultados y ubicación de fallas. Se agradece la labor realizada por Roberto Rodríguez, quien fue el responsable de la coordinación en campo de las tareas de muestreo y a Humberto Próstamo por el procesamiento de los datos.

Referencias.

- ABBASZADEH M., W.E. BRIGHAM. Analysis of Well-to-Well Tracer Flow to Determine Reservoir Layering. Journal of Petroleum Technology, October, 1984.
- ALLISON S.B., G.A. POPE, K. SEPEHRNOORI. Analysis of Field Tracers for Reservoir Description. Journal of Petroleum Science and Engineering 5, 1991.
- D'HOOGE J.A., C.Q. SHEEL, B.J. WILLIAMS. Interwell Radiative Tracers - an Effective Reservoir Evaluation Tool : West Sumatra Field Results. Society of Petroleum Engineers Paper Nr. 8434, 1979.
- DOURADO A. F. et Al: Tracer Injection Simulations by Finite Element Methods. III LACPEC SPE, Vol I, p.403.
- HUTCHINS R.D., H.T. DOVAN, B.B. SANDFORD. Aqueous Tracers for Oilfield Applications. Society of Petroleum Engineers 21049, 1991.
- KEJNER W., J. VALLE, C. PONCE, A. LÓPEZ ANGRIMAN. Simulador Numérico Para Recuperación Secundaria. 2º Simposio de Producción de Hidrocarburos. Mendoza, 12/16 de Junio de 1995. Tomo II, p.73.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry. Technical Reports Series N° 316 (Sec. 6.4.1.1), Vienna, 1990.
- LICHTENBERGER G. J. Field Applications of Interwell Tracers for Reservoir Characterization of Enhanced Oil Recovery Pilot Areas. Society of Petroleum Engineers Paper Nr. 21652, 1991.
- MALONE P. Aplicación del Mapeo por Computadora en el Análisis Estratigráfico del Yacimiento Piedra Clavada. 2º Simposio de Producción de Hidrocarburos. Mendoza, 12/16 de Junio de 1995. Tomo II, p.1.
- NAJURIETA H. A New Interference Test Method for High Precision Diffusivity Distribution Measurement. SPE Paper 28379 Presented at the 69th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans 25-28 Sept., 1994.
- NAJURIETA H. Efectos de la Temperatura en la Productividad de Petróleos Viscosos. Estudios en el Yacimiento Piedra Clavada. Trabajo presentado en el IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG Mar del Plata Bs. As. Argentina. (18-21/Abril/99).
- NAJURIETA H. Técnicas de Medición Para la Optimización de la Recuperación Secundaria". 2º Simposio de Producción de Hidrocarburos. Mendoza, 12/16 de Junio de 1995. Tomo II, p.245.
- NAJURIETA H., R. DURÁN, F. SAMANIEGO-V., A. RODRIGUEZ, R. MARTINEZ-ANGELES Y C. PEREZ ROSALES. Transmissivity and Diffusivity Mapping From Interference Test Data: A Field Example. SPE Formation Evaluation Sept, 1995.
- PARADISO A., A.GIL Y G. FEDOROWITZ. Simulación del Comportamiento de la Recuperación

Secundaria en Piedra Clavada. Jornadas de Informática Aplicada a la Producción de Hidrocarburos. Bs As, Julio de 1987.

PÉREZ CÁRDENAS F.C. Dispersión de Trazadores en Medios Porosos Fracturados. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F. (1986).

RAMIREZ-S. J., F. SAMANIEGO-V., F. RODRIGUEZ, AND J. RIVERA-R. Tracer-Test Interpretation in Naturally Fractured Reservoirs. SPE Formation Evaluation, September 1995.

WAGNER O.R., L.E. BAKER, G.R. SCOTT. The Design and Implementation of Multiple Tracer Program for Multifluid, Multiwell Injection Projects. Society of Petroleum Engineers Paper Nr. 5125, 1974.

ZEMEL B.: Tracers in the Oil Field. Developments in Petroleum Science, 43. Elsevier Science, Amsterdam, 1995.

ZUBER A. Models for Tracer Flow. International Atomic Energy Agency TECDOC-291, Vienna, 1983.

APÉNDICE 1. SEGURIDAD RADIOLOGICA

Antes de efectuar una experiencia que implique el empleo de trazadores radiactivos, tanto por personal de instituciones oficiales como de empresas habilitadas para su uso, debe gestionarse la correspondiente autorización ante la Autoridad Regulatoria Nuclear.

Para ello debe elaborarse un detallado informe, denominado Procedimiento en el que se justifique el empleo de radiotrazadores en lugar de otras técnicas. Además debe presentarse un cálculo de las dosis estimadas a ser recibidas tanto por los operadores como por el público y detallar las medidas de protección radiológica que se tomarán durante el desarrollo de las tareas. En el Procedimiento deben incluirse aspectos vinculados, no sólo con las tareas de campo, sino también con el transporte de los materiales radiactivos. Con esta información, personal de la citada Autoridad efectúa un balance de riesgos y beneficios involucrados en el empleo de radioisótopos y, eventualmente, emitirá la correspondiente autorización. Una vez finalizadas las tareas deberá presentarse un informe evaluativo de seguridad radiológica.

Por otra parte, cuando se manipulan radioisótopos existen dos tipos de riesgos: irradiación y contaminación. La primera significa que un individuo se vio sometido a un haz de radiaciones y la segunda que tomó contacto físico con una sustancia radiactiva ya sea por tacto, inhalación o ingestión. En este aspecto, el único riesgo que implica el uso del tritio, aún en elevadas concentraciones es la contaminación.

Ahora bien, puede existir peligro de contaminación sólo en dos instantes: durante la inyección y durante el muestreo siendo obvio que el riesgo será mucho mayor durante la etapa de inyección dado que el trazador no ha sufrido todavía ningún tipo de dilución. Esta operación es efectuada, en todos los casos, por personal especializado con utilización de medidas de seguridad apropiadas tales como empleo de guantes plásticos, barbijos, telepinzas y material de laboratorio descartable y un estricto control de los residuos radiactivos. Además, la inyección es una operación que sólo se realiza una vez y no demanda más de una hora de trabajo. En lo que respecta al muestreo, deben tenerse en cuenta los límites de ingestión anual establecidos por la International Commission on Radiological Protection (ICRP) a nivel internacional y la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) a escala nacional. Considerando un estudio con tritio en un arreglo típico, deberían extraerse unas setenta muestras anuales por productor. La actividad manipulada en este caso a lo largo de un año tendría un valor que resultaría ser tres órdenes de magnitud inferior al mencionado límite anual de ingestión para tritio. Es decir que, desde el punto de vista radiológico, un operador podría beber todas las muestras extraídas sin que ello le ocasionara daño alguno.

APÉNDICE 2. Información obtenida rápidamente de la función de transferencia

La información más importante que puede obtenerse a partir de la representación de la concentración de trazador en función del tiempo es la función de recuperación de masa o actividad de trazador. Esta nueva curva representa la cantidad de trazador recuperada en el pozo productor en función del tiempo.

Para un instante dado t_i la ordenada de la función acumulativa está dada por la siguiente expresión:

$$A(t_i) = \int_0^{t_i} q(t) C(t) dt$$

Siendo:

$A(t_i)$: actividad de trazador recuperada hasta t_i (Bq)

$q(t)$: caudal de producción agua del pozo en función del tiempo (m^3 / día)

$C(t)$: concentración de trazador en función del tiempo (Bq / m^3)

t_i : tiempo transcurrido desde la inyección (días).

De la curva de respuesta temporal puede extraerse fácilmente el tiempo de arribo del trazador, definido como el instante en el que la concentración de trazador en el agua extraída del pozo productor supera el límite de detección de la técnica utilizada para medición de las muestras (centelleo líquido para el caso de tritio). Otro valor importante es el tiempo medio de residencia del agua de inyección, definido en forma similar que para los estudios de procesos es decir como la relación entre el volumen involucrado en el mismo (V) y el caudal que lo alimenta (Q), pero que, a partir de los datos experimentales, puede obtenerse a través del cálculo del baricentro de la respuesta temporal.

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

Finalmente, también puede determinarse el tiempo final, a partir del instante en el que la respuesta cae por debajo del mencionado límite de detección. Sin embargo, el muestreo suele ser interrumpido antes de que se alcance este punto y por ello se hace necesario extrapolar la cola de la respuesta mediante una función exponencial y, a partir de ella, calcular el instante en que la respuesta finaliza.

Conociendo la distancia entre los pozos inyector y productor y a partir de los tiempos de arribo, medio y final pueden obtenerse las velocidades máxima, media y mínima de desplazamiento del agua inyectada.

La recuperación total de trazador en cada pozo se determina extrapolando a tiempo infinito la respuesta acumulada, tomando como base la aproximación exponencial de la función que representa la concentración de trazador en función del tiempo, según se indicó más arriba. El cociente entre la cantidad de trazador recuperada en el pozo considerado y la inyectada representa la fracción del agua de inyección que alcanza dicho pozo.

APÉNDICE 3. Modelo de Lenda y Zuber.

La expresión matemática de este modelo es la siguiente :

$$C(x,t) = C_{REF} \frac{1}{\sqrt{4\pi \frac{D_I}{v} t_N^3}} e^{-\frac{(1-t_N)^2}{4 \frac{D_I}{vx}}}$$

Siendo :

$C(x,t)$: concentración del trazador en función del tiempo y de la distancia (Bq / L)

t_N : tiempo normalizado calculado como el cociente entre el tiempo real y el tiempo medio de residencia del trazador (adimensional)

D_I : dispersividad intrínseca del medio (m^2 / día)

v : velocidad de desplazamiento (m / día)

x : distancia desde el punto de inyección (m)

El factor C_{REF} representa una concentración de referencia; por lo general el cociente entre la actividad inyectada y el volumen total de agua marcada (V) suponiendo una dilución uniforme. Para este caso volumen está dado por la siguiente expresión :

$$V = \pi x^2 h \phi S_w$$

Siendo :

h : espesor de la capa inyectada (m)

ϕ : porosidad media de la capa (adimensional)

S_w : saturación de agua (adimensional)

El ajuste se realiza seleccionando valores apropiados de $D_1 / v x$ y del tiempo medio de residencia. Cuando la respuesta presenta varios picos, esos parámetros deben establecerse para distintas curvas, las que luego se suman, afectadas por un factor de peso, para obtener la respuesta total del sistema. Dicho factor puede considerarse como una modificación del valor C_{REF} para cada curva individual.

Como ejemplo, se presentará el caso del pozo PC-1234 cuya respuesta puede ser reconstituida a partir de la sumatoria de cuatro curvas elementales. Las figuras 8, 9 y 10 muestran la función de transferencia original ante una inyección instantánea de tritio, las curvas de ajuste individuales y su sumatoria en forma conjunta con los datos experimentales.

Los parámetros seleccionados para cada función están resumidos en la tabla siguiente:

AJUSTE POR MEDIO DE FUNCIONES DE LENDA – ZUBER			
Curva	D_1 / vx	t_{medio} (días)	f_i
Curva 1	0,020	87	0,292
Curva 2	0,004	120	0,105
Curva 3	0,020	190	0,384
Curva 4	0,008	300	0,219

Una interpretación de este ajuste podría indicar que el trazador se desplaza desde el inyector hacia este productor a través de cuatro estratos de distinta permeabilidad. La masa total de trazador recuperada en este pozo fue del 46% de la cantidad inyectada. Los valores f_i tabulados indican la fracción de ese porcentaje aportada por cada uno de los estratos.

El tiempo medio de residencia de la curva compuesta puede hallarse mediante el promedio ponderado de los tiempos medios de cada función elemental. El factor de ponderación es la fracción de la masa del trazador recuperada por cada una de esas funciones, mientras que los tiempos medios de residencia están dados por los valores teóricos seleccionados para el ajuste.

$$\bar{t} = \sum_{i=0}^n \bar{t}_i$$

Para este caso particular, el tiempo medio de residencia calculado a partir de los datos experimentales es de 172 días, muy parecido al determinado por la combinación de las funciones elementales que resulta ser de 177 días.



INDICE DE FIGURAS

Fig. 1- Ejemplo de distribución del agua inyectada en tres mallas del Yacimiento Piedra Clavada.

Fig. 2- Concentración instantánea en los productores del trazador injectado en el Pozo PC-1188, Capa 81

Fig. 3- Concentración instantánea en los productores del trazador inyectado en el Pozo PC-1209, Capa 81

Fig. 4- Distribución del agua inyectada en la malla del PC-1251.

Fig. 5- Concentración instantánea en los productores del trazador inyectado en el Pozo PC-1251, Capa 110.

Fig. 6- Ejemplo de fallas permeables: distribución del agua inyectada en la malla del PC-51

Fig. 7- Concentración instantánea en los productores del trazador inyectado en el Pozo PC-51, Capa 110.

Fig. 8- Concentración instantánea y acumulada, Pozo PC-1234.

Fig. 9- Ejemplo de ajuste múltiple de Landa-Zuber.

Fig. 10- Ejemplo de ajuste múltiple de Landa-Zuber Pozo PC-1234.

DISTRIBUCION DE LA INYECCION DE TRITIO 10 31/08/98 **INYECTORES PC-1188-1108-1209 - CAPA 81**

Espe
6m
util

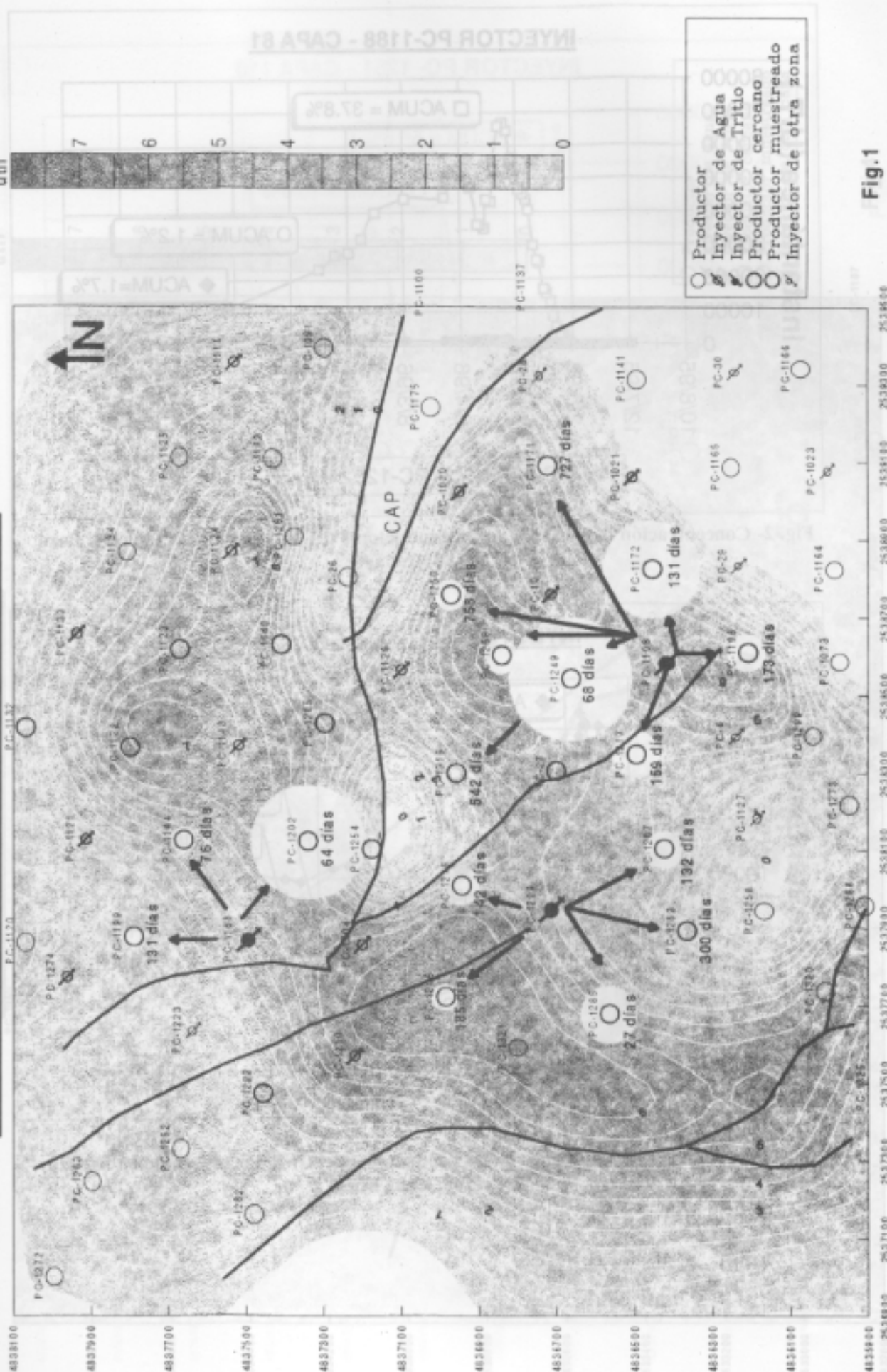


Fig.1

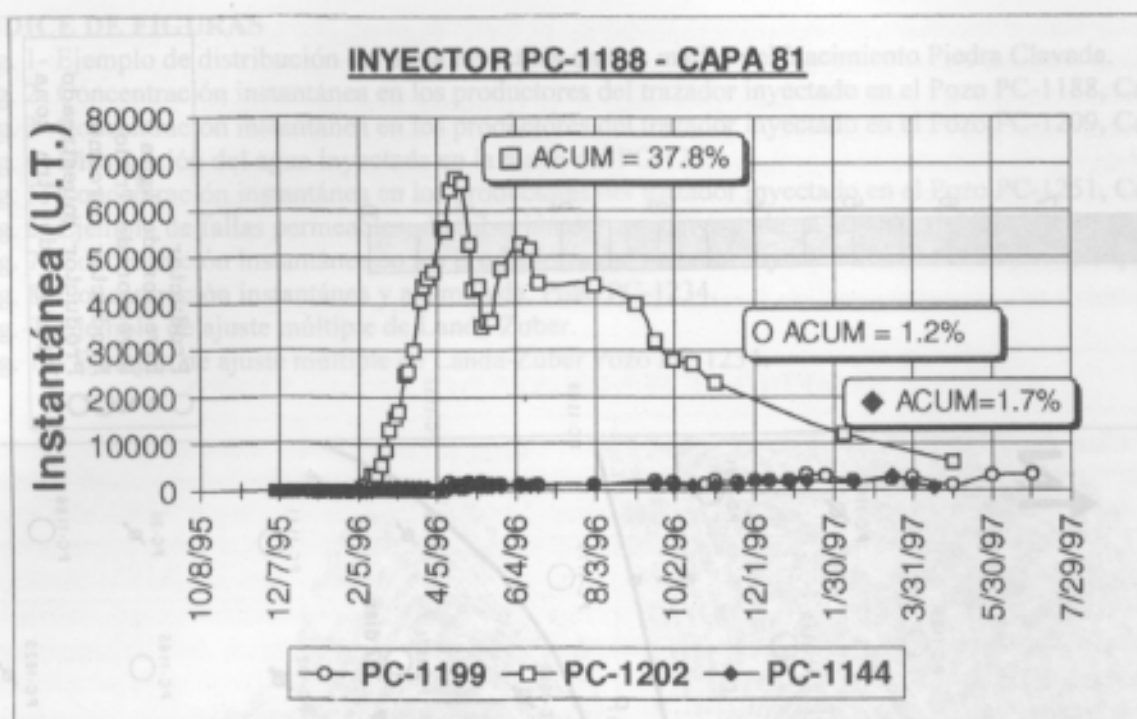


Fig. 2- Concentración instantánea en los productores del trazador injectado en el Pozo PC-1188, Capa 81.

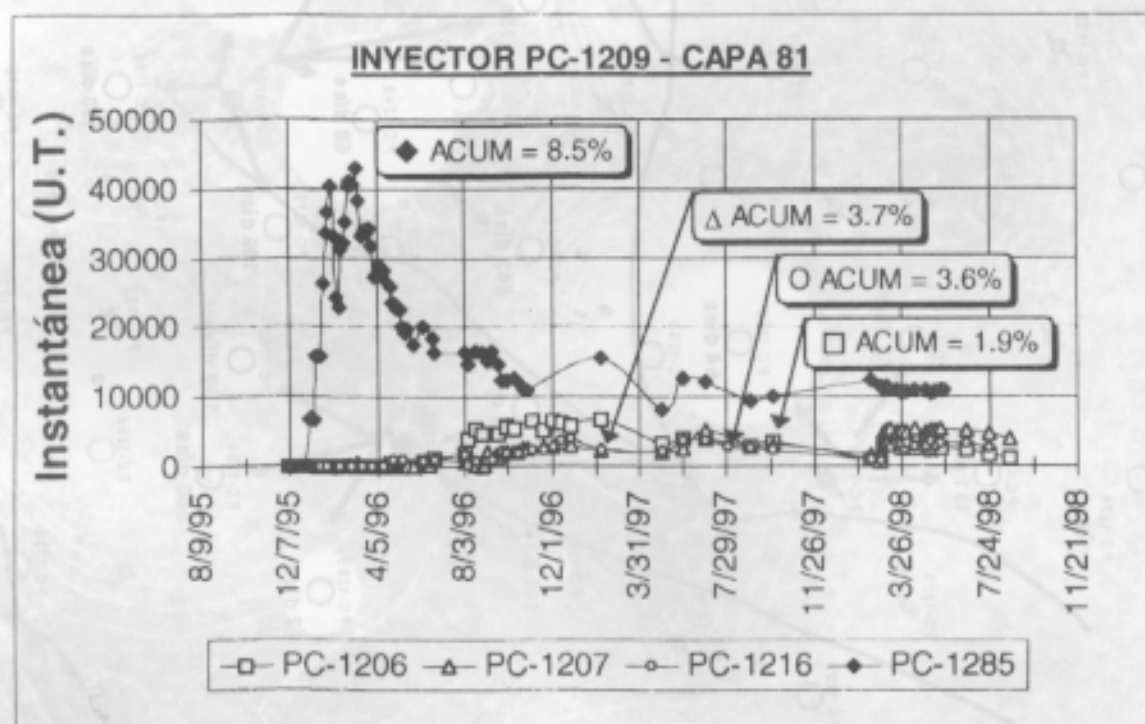


Fig. 3- Concentración instantánea en los productores del trazador injectado en el Pozo PC-1209, Capa 81.

DISTRIBUCION DE LA INYECCION DE TRITIO 30/06/98 **INYECTOR PC-1251 - CAPA 110**

Espesor
útil

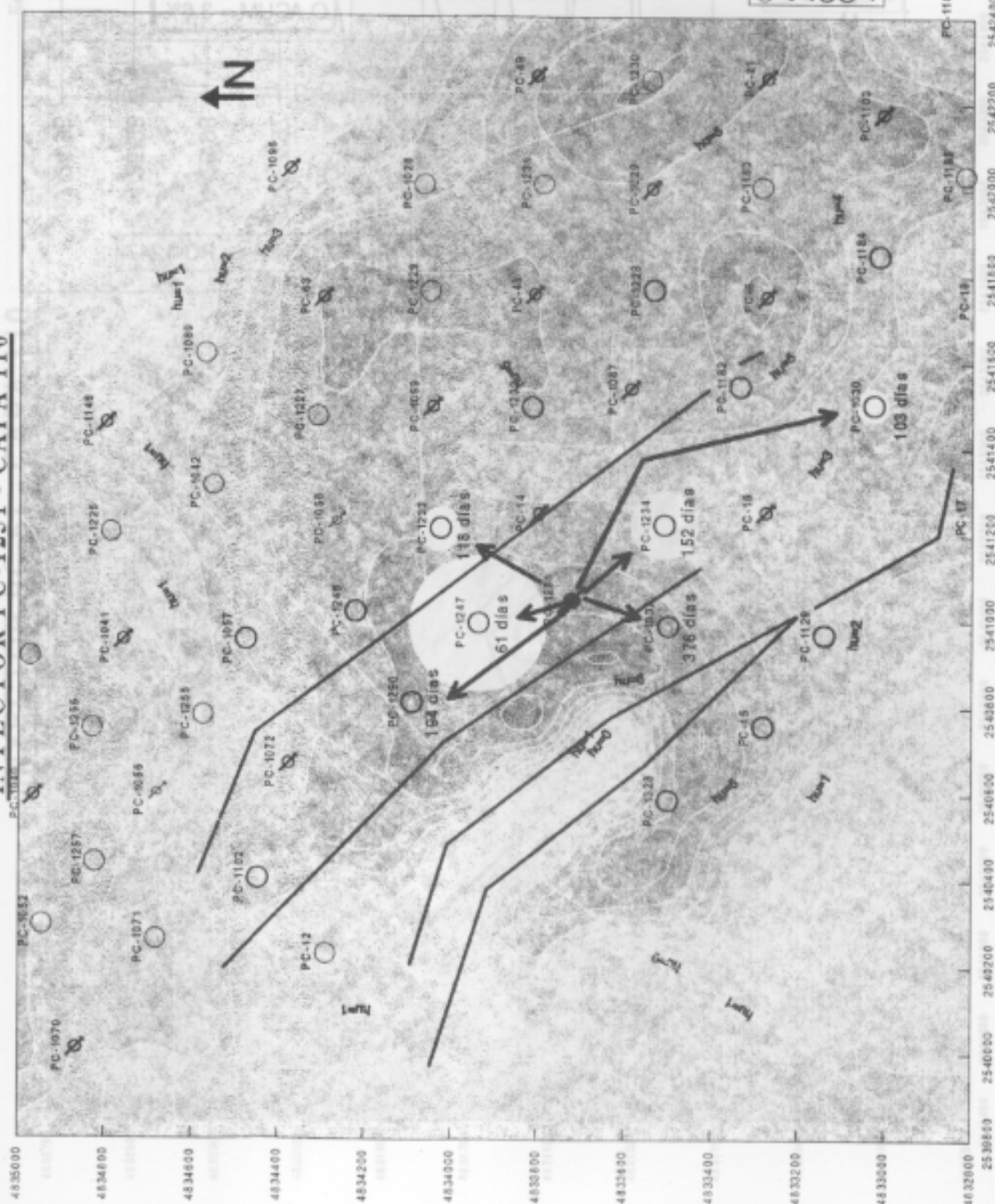
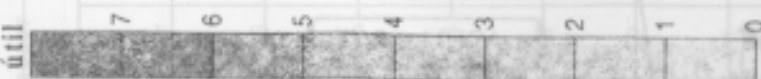


Fig.4

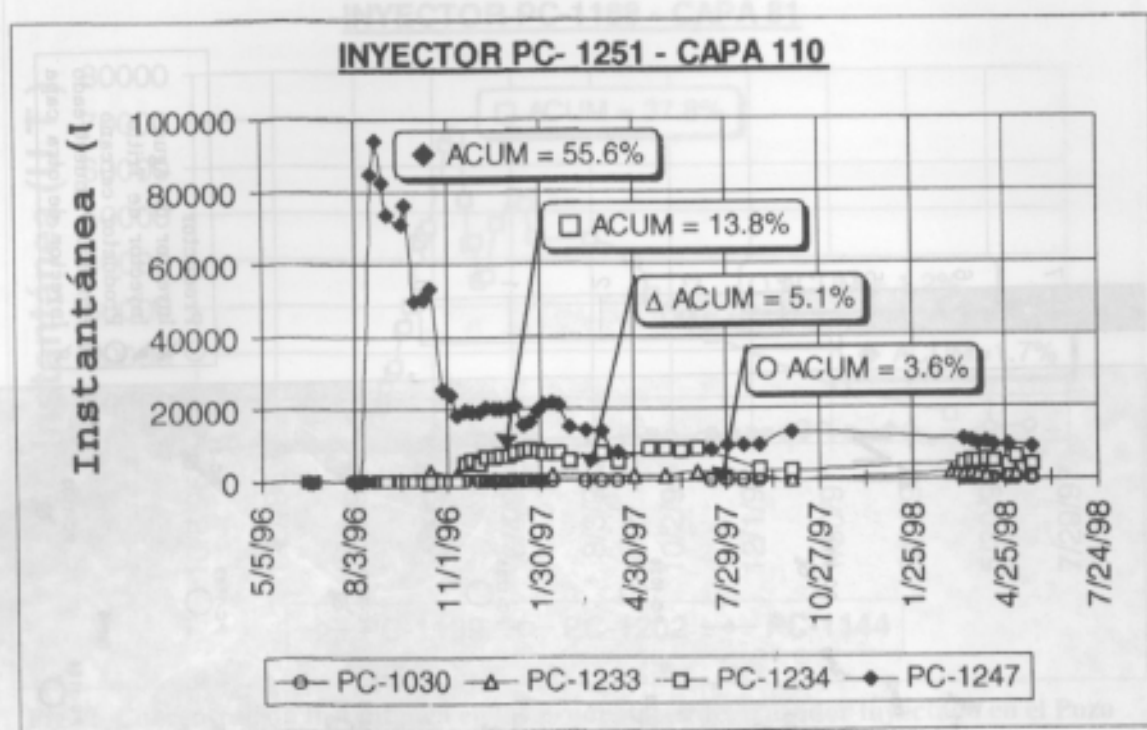
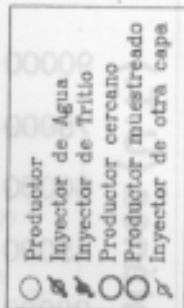


Fig. 5- Distribución del agua inyectada en la malla del PC-1251.



Fig. 3- Concentración instantánea en los productores del trípode asociado al Pozo PC-1209, Capa 81.



0008752

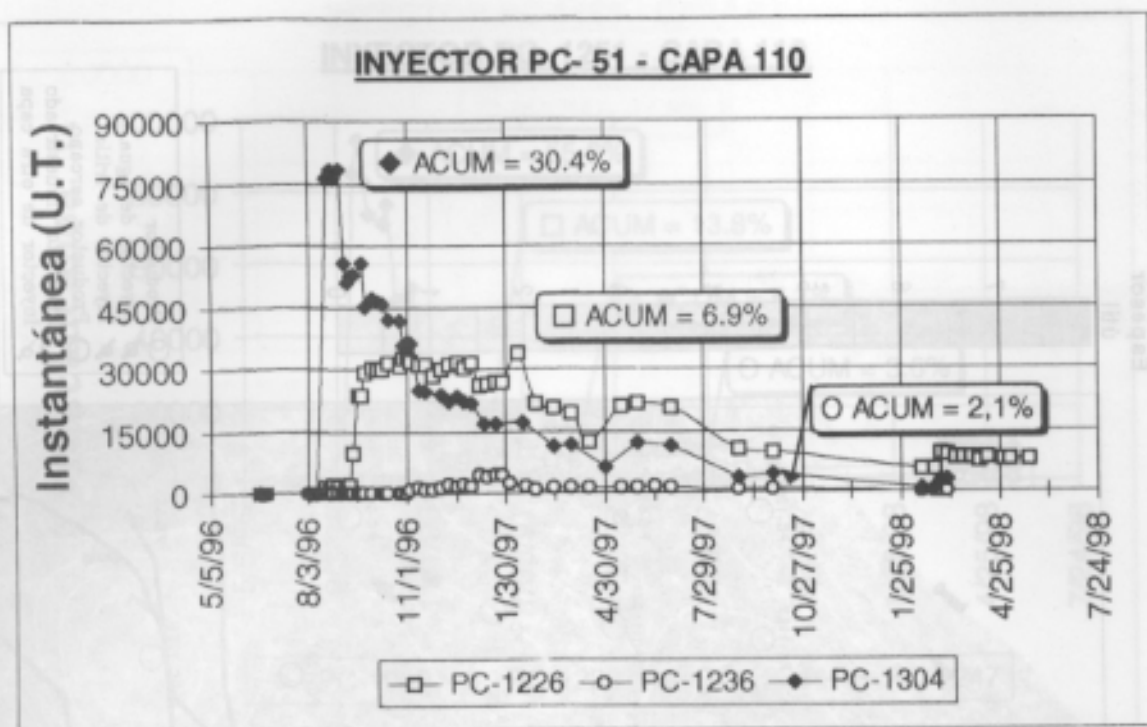


Fig. 7- Concentración instantánea en los productores del trazador inyectado en el Pozo PC-51, Capa 110.

ACUM = 30.4%

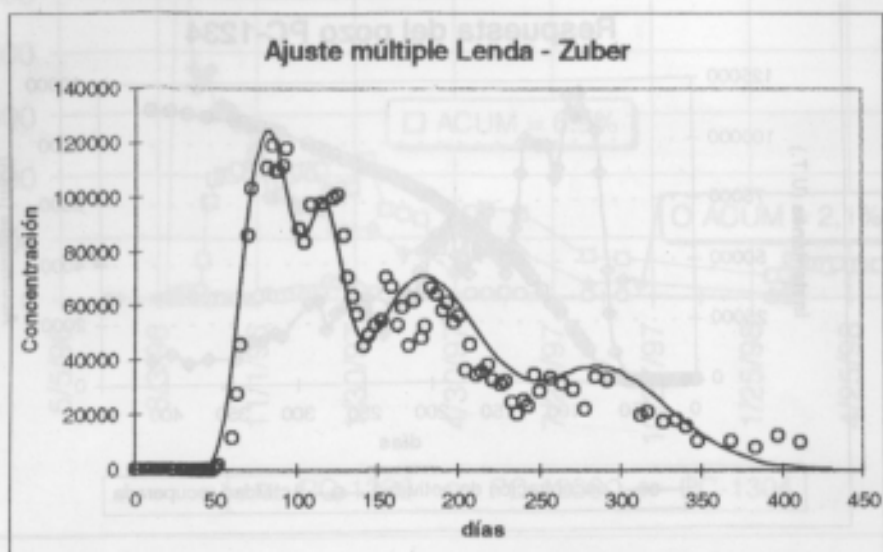


Fig. 10- Ejemplo ajuste múltiple Lenda -Zuber.

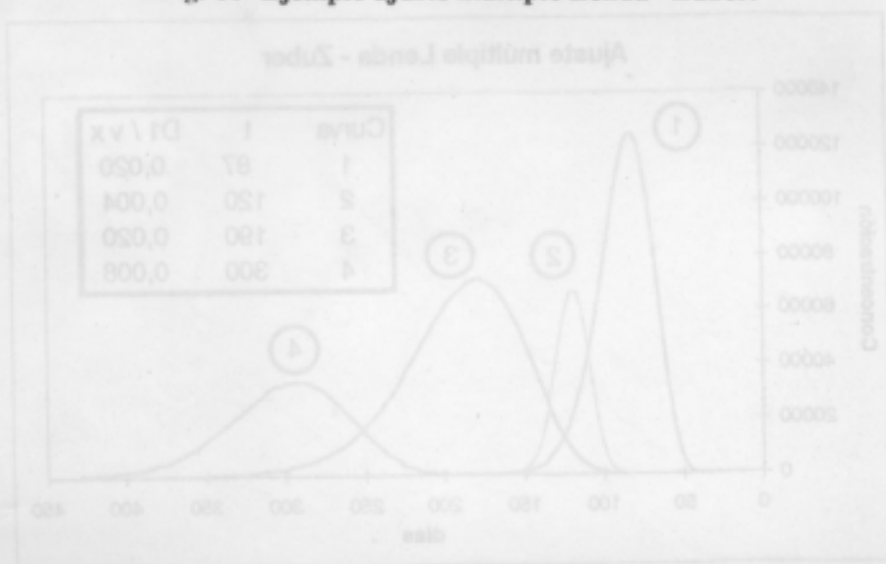


Fig. 9- Ejemplo de ajuste múltiple Lenda - Zuber.