



Optimización de espaciamiento entre pozos mediante la utilización de trazadores. Aplicación en PAD

Por **Adrián Giachino**, **Sebastián Olmos** (Tecpetrol);
Zaque Araujo (UERJ) y **Sebastián Basualdo** (Tracerco)

Este trabajo fue premiado como 1º Mejor Trabajo Técnico del 7º Congreso de Producción y Desarrollo de Reservas, realizado por el IAPG en noviembre de 2019 (Mar del Plata).

Las nuevas tecnologías pueden ayudar a comprender los comportamientos del reservorio, entre ellos, el uso de trazadores químicos líquidos de gas, petróleo y agua, que permitirán comprender mejor el sistema reservorio, estimulación y PAD.

En un PAD con pozos horizontales y con multifracturas que navegan dentro de una formación no convencional, como el *shale*, surgen varios interrogantes:

- ¿Qué etapas son las que están produciendo?
- ¿Cuál es el porcentaje de contribución de cada una a la producción total?
- ¿Qué porcentaje del agua producida es inyectada?

La utilización de nuevas tecnologías puede ayudarnos a comprender los comportamientos del reservorio y, en este sentido, el uso de trazadores químicos líquidos de gas, petróleo y agua nos permitirá comprender mejor el sistema reservorio, estimulación y PAD.

Comprender el proceso de limpieza en los pozos de *shale gas* de forma de garantizar su optimización a lo largo de su vida es todo un desafío, por ello es importante conocer el proceso en todas las etapas donde se encuentra la zona de interés.

La limpieza de los pozos del PAD durante el *flowback* y la cronología de apertura de chokes en un pozo de gas fueron analizados con la utilización de trazadores específicos e individuales diseñados para acompañar la fase gas.

Este trabajo presenta el estudio de caso de un PAD de tres pozos de gas horizontales no convencionales perforados en la formación Vaca Muerta. Debido a cuestiones operativas, en dos de los pozos se trazaron 3 etapas de 20 en cada uno y, en el tercero, 19 etapas de 20. En cada una de las etapas trazadas se utilizaron trazadores de agua, de agua global y de gas, todos diferentes entre sí.

Se evaluó la limpieza del pozo en relación con la en-

trada en producción de cada una de las etapas estimuladas hidráulicamente en el tiempo y se verificaron los comportamientos ante los cambios de orificio del choke.

Los trazadores utilizados, tanto para la fase gas como para la fase agua, permitieron identificar el proceso gradual de entrada en producción de las zonas del pozo de interés y ayudaron a entender cómo las diferentes variables operativas influyen en la dinámica de limpieza de las distintas etapas.

Introducción

La cuenca neuquina, una de las mayores productoras de hidrocarburos en la porción austral de América del Sur, está localizada al este de los Andes, en el norte de la Patagonia. Cubre un área de más de 120.000 km² en el oeste central de la Argentina y contiene un registro estratigráfico de 6.000 m de espesor, con edades que van desde el Triásico al Paleógeno (Vergani *et al.*, 1995).

El Campo Fortín de Piedra hoy es el principal productor de gas natural en la Argentina y se considera un proyecto emblemático para el desarrollo de los recursos no convencionales de la Argentina. Vaca Muerta es una formación sedimentaria depositada en un mar de edad jurásica, que cubre casi en su totalidad el subsuelo de la cuenca neuquina, a profundidades que varían entre los 2000 m y 3000 m (Figura 1).

En este informe se muestran los resultados y las conclusiones de un estudio de trazadores de gas y de agua inyectados en un PAD de tres pozos perforados en un mismo intervalo de navegación de Vaca Muerta. Además de identificar la contribución relativa de gas y el *flowback* de agua etapa por etapa, reconocer las etapas más productivas y

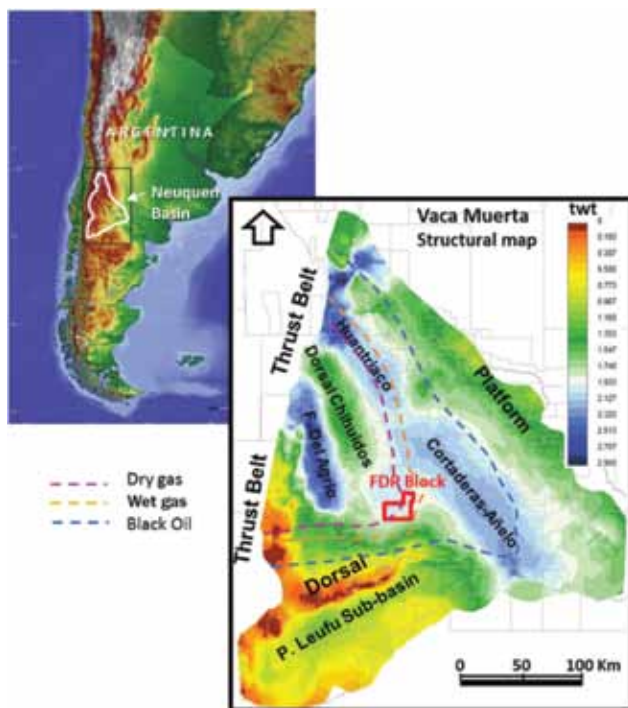


Figura 1. Ubicación de Fortín de Piedra (FDP) Block en la cuenca neuquina. Se pueden observar los límites de las ventanas de hidrocarburos para el gas seco, el gas húmedo y el petróleo.

observar la comunicación entre estos pozos, los resultados observados contribuyeron a comprender mejor y avanzar en la búsqueda del espaciamiento óptimo entre pozos.

Referencias y antecedentes

La inyección de trazadores químicos por la compañía Tracerco en la formación Vaca Muerta se vienen utilizando como una importante metodología para identificar y cuantificar contribuciones de HC y agua, muchos trabajos ya fueron publicados con el titulado *The Design and Implementation of Multiple Tracer Program for Multifluid, Multiwell Injection Projects* (Wagner, Baker, Gordon, Scott, 1974).

Inyección de trazadores

Descripción de la operación

El trazador de agua se inyecta directamente en la tolva y se aplica a lo largo de toda la estimulación a una concentración constante.

Se utilizaron bombas peristálticas de alta precisión para controlar el caudal de trazador de agua a lo largo del trabajo. El caudal es ajustado para garantizar la concentración constante de trazador en el fluido de estimulación bombeado.

El trazador en base hidrocarburo se inyecta en la entrada (baja presión) de los camiones de fractura.

Una cantidad fija de trazador de base hidrocarburo (petróleo o gas) se comienza a bombear junto con la arena en los primeros dos tercios del tratamiento. Esto se hace de la misma manera en todas las etapas para que la comparación sea efectiva.

Debido al modo como se inyectan los trazadores, interpretamos que los trazadores de agua estarán distribuidos en toda el área alcanzada por la fractura hidráulica, mientras que los trazadores de hidrocarburos estarán solo en la parte de la fractura que fue alcanzada por el propante.



Descripción técnica

Este trabajo se realizó en un PAD de tres pozos horizontales navegados en un mismo intervalo de Vaca Muerta. Los pozos tienen ramas laterales de 1500 m de longitud completadas con 20 etapas de fractura (el pozo del medio tiene 19 etapas debido a que la etapa 5 no se pudo realizar por problemas operativos).

En el pozo central se inyectó un trazador global de agua (mismo trazador en todas las etapas) y trazadores individuales de agua y gas en cada etapa. Se inyecta un trazador diferente en cada etapa, en algunos casos dos etapas comparten un mismo trazador, debido a la cantidad de trazadores disponibles.

Pozo A		Tracer time		Tracer ID		
Date	Stage	Start	Finish	Gas	Water	Global Water
-	1	-	-	-	-	W-01
-	2	-	-	-	-	W-01
7/6/17	3	22:20	23:25	G-02	W-05	W-01
-	4	-	-	-	-	W-01
-	5	-	-	-	-	W-01
-	6	-	-	-	-	W-01
-	7	-	-	-	-	W-01
-	8	-	-	-	-	W-01
-	9	-	-	-	-	W-01
16/6/17	10	15:00	16:25	G-09	W-12	W-01
-	11	-	-	-	-	W-01
-	12	-	-	-	-	W-01
-	13	-	-	-	-	W-01
-	14	-	-	-	-	W-01
-	15	-	-	-	-	W-01
-	16	-	-	-	-	W-01
22/6/17	17	15:45	16:48	G-13	W-18	W-01
-	18	-	-	-	-	W-01
-	19	-	-	-	-	W-01
-	20	-	-	-	-	W-01

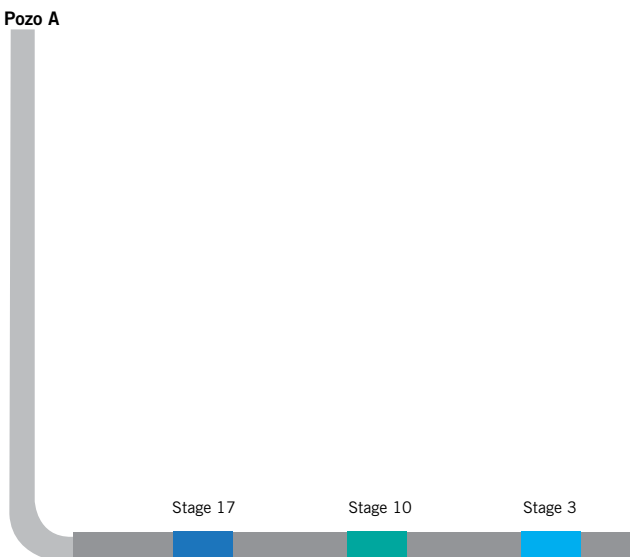


Figura 2. Tiempos de inyección y ubicación de trazadores en el pozo A.

Pozo B		Tracer time		Tracer ID		
Date	Stage	Start	Finish	Gas	Water	Global Water
6/6/17	1	14:40	15:41	G-01	W-04	W-03
7/6/17	2	14:12	15:18	G-01	W-01	W-03
8/6/17	3	8:35	9:32	G-04	W-07	E-03
9/6/17	4	3:18	4:30	G-04	W-07	W-03
-	5	-	-	-	-	-
11/6/17	6	8:31	9:52	G-06	W-09	W-03
11/6/17	7	0:10	1:40	G-05	W-08	W-03
22/6/17	8	15:55	17:22	G-05	W-08	W-03
15/6/17	9	20:15	21:40	G-07	W-10	W-03
16/6/17	10	20:10	21:35	G-07	W-13	W-03
18/6/17	11	17:45	18:58	G-10	W-14	W-03
19/6/17	12	9:15	10:17	G-10	W-14	E-03
20/6/17	13	3:20	4:45	G-11	W-15	W-03
20/6/17	14	21:40	23:05	G-11	W-16	W-03
21/6/17	15	16:10	17:24	G-12	W-17	W-03
22/6/17	16	9:20	10:33	G-12	W-17	W-03
23/6/17	17	0:50	2:55	G-15	W-20	W-03
23/6/17	18	18:45	19:51	G-15	W-21	W-03
24/6/17	19	12:11	13:20	G-16	W-22	W-03
25/6/17	20	4:44	6:09	G-16	W-23	W-03

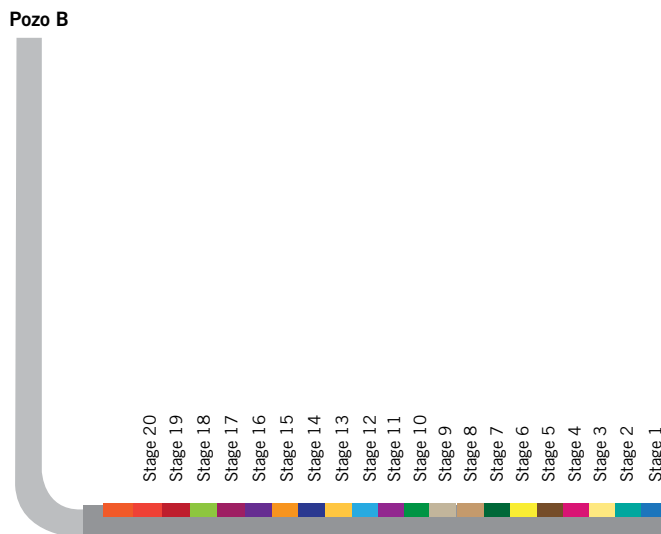


Figura 3. Tiempos de inyección y ubicación de trazadores en el pozo B.

En los pozos de los extremos (pozos A y C) se inyectó un trazador global de agua (mismo trazador en todas las etapas del pozo) y trazadores individuales de agua y gas en tres etapas de cada pozo, etapas 3, 10 y 17, respectivamente.

Luego, durante la etapa de producción se tomaron muestras de agua y gas de los tres pozos durante un período de unos 4 meses desde la puesta en marcha del PAD.

A continuación, se presenta un detalle de la operación en los tres pozos donde se realizaron las inyecciones de trazadores químicos líquidos.

Pozo A

- Las etapas 3, 10 y 17 fueron marcadas con trazadores individuales de agua y gas y, todas las etapas de este pozo fueron marcadas con el trazador global.
- Se tomaron 46 muestras de agua y 47 muestras de gas (Figura 2).
- Agua: 30/7/2017 al 22/11/2017.
- Gas: 30/7/2017 al 21/11/2017.

Pozo B

- Las 19 etapas de este pozo fueron marcadas con trazadores individuales de agua y gas y con el trazador global.
- Se tomaron 45 muestras de agua y 44 muestras de gas (Figura 3).
- Agua: 12/8/2017 al 18/11/2017.
- Gas: 12/8/2017 al 18/11/2017.

Pozo C

- Las etapas 3, 10 y 17 fueron marcadas con trazadores individuales de agua y gas y todas las etapas de este pozo fueron marcadas con el trazador global (Figura 4).
- Se tomaron 47 muestras de agua y 45 muestras de gas.
- Agua: 5/8/2017 al 10/11/2017.
- Gas: 5/8/2017 al 31/10/2017.

Pozo C		Tracer time		Tracer ID		
Date	Stage	Start	Finish	Gas	Water	Global Water
-	1	-	-	-	-	W-02
-	2	-	-	-	-	W-02
8/6/17	3	3:20	4:34	G-03	W-06	W-02
-	4	-	-	-	-	W-02
-	5	-	-	-	-	W-02
-	6	-	-	-	-	W-02
-	7	-	-	-	-	W-02
-	8	-	-	-	-	W-02
-	9	-	-	-	-	W-02
16/6/17	10	8:15	9:40	G-08	W-11	W-02
-	11	-	-	-	-	W-02
-	12	-	-	-	-	W-02
-	13	-	-	-	-	W-02
-	14	-	-	-	-	W-02
-	15	-	-	-	-	W-02
-	16	-	-	-	-	W-02
22/6/17	17	30:30	21:55	G-14	W-19	W-02
-	18	-	-	-	-	W-02
-	19	-	-	-	-	W-02
-	20	-	-	-	-	W-02

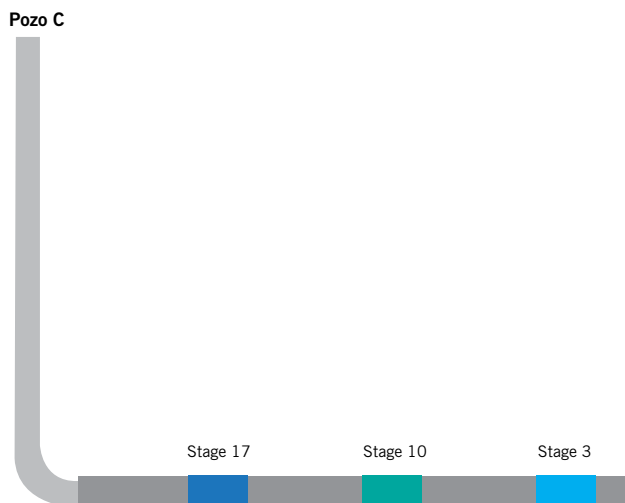


Figura 4. Tiempos de inyección y ubicación de trazadores en el pozo C.

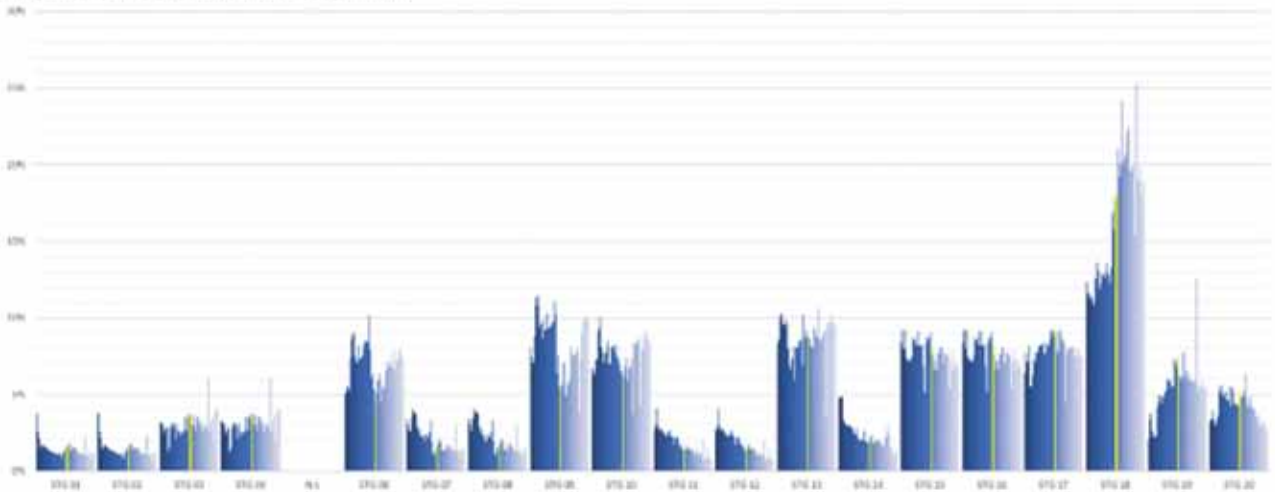


Figura 5. Gráfico del % contribución de agua de cada etapa en el período estudiado para el pozo B.

Resultados en el pozo B (pozo del medio)

Resultados de agua

Como se mencionó, las 19 etapas de este pozo fueron marcadas con trazadores individuales de agua y con trazador global.

En la figura 5 se observa el aporte relativo de agua estimado de cada etapa a partir de la concentración de cada trazador individual de agua detectada en las muestras de

agua analizadas de este pozo. Para cada etapa, las diferentes barras indican la concentración del trazador individual de esa etapa medida en las sucesivas muestras analizadas.

Resultados de gas

Las 19 etapas de este pozo fueron marcadas con trazadores individuales de gas.

De la misma manera que para el caso del agua, en la figura 6 se observa el aporte relativo de gas de cada etapa

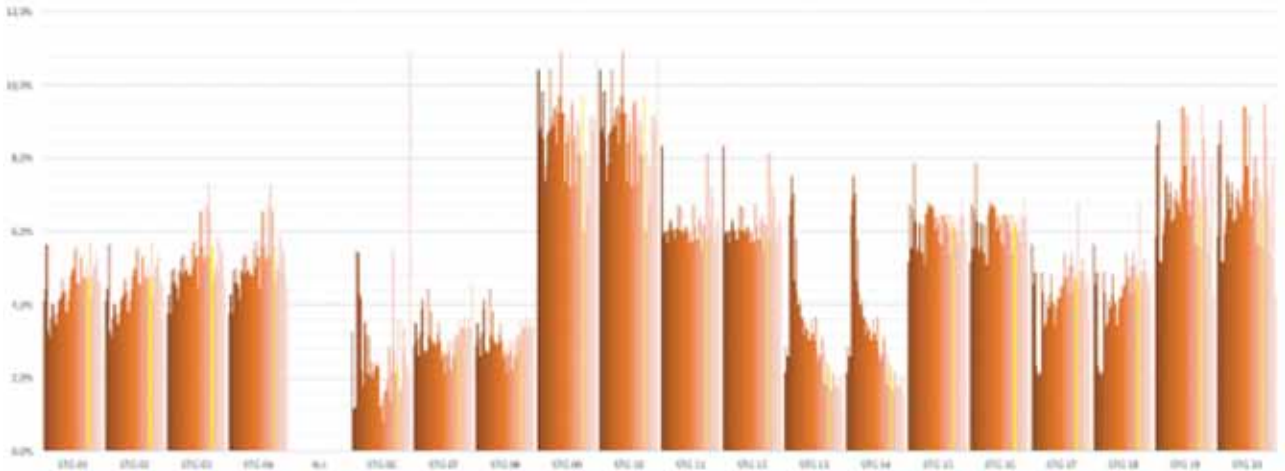


Figura 6. Gráfico del % contribución de gas de cada etapa en el período estudiado para el pozo B.

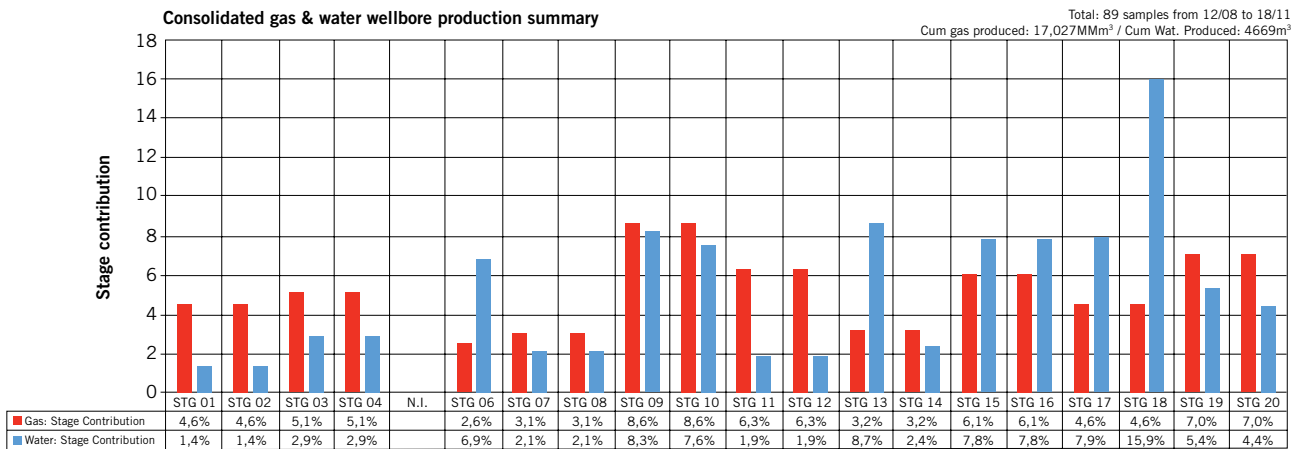


Figura 7. Resultado comparativo de la producción de agua y gas % para el pozo B.

estimado a partir de la concentración de cada trazador individual de gas detectada en las muestras de gas analizadas.

En la figura 7 se observa que no hay una relación directa entre la producción de agua y de gas y que el aporte de gas por etapa es mucho más homogéneo a lo largo del pozo comparado al agua.

Resultados de interferencias y comunicación entre pozos

Los tres pozos fueron abiertos secuencialmente. Se tomaron muestras de agua y gas de los tres pozos durante los primeros 4 meses de producción, luego fueron analizadas en laboratorio para identificar la producción de los trazadores inyectados. Se observó comunicación entre los pozos tanto mediante la detección de trazadores de un pozo en las muestras de pozos vecinos como por la comunicación de presión medida con sensores de fondo.

Interferencias de agua
Resultados de interferencias con trazadores globales de agua

En las figuras 8, 9, 10 y 11 se presentan los resultados observados de los trazadores de agua.

En la figura 8 se muestra la producción total del trazador global inyectado en cada pozo, detectada en las muestras del propio pozo y de los pozos vecinos. El trazador global de cada pozo fue detectado en las muestras de los pozos vecinos observándose comunicación incluso entre los pozos extremos del PAD.

La mayor cantidad observada en el pozo A de los trazadores globales inyectados en los pozos B y C puede tener

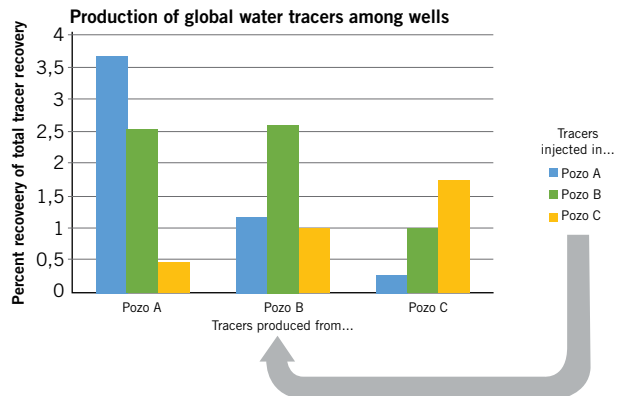


Figura 8. Interferencias con trazadores globales.

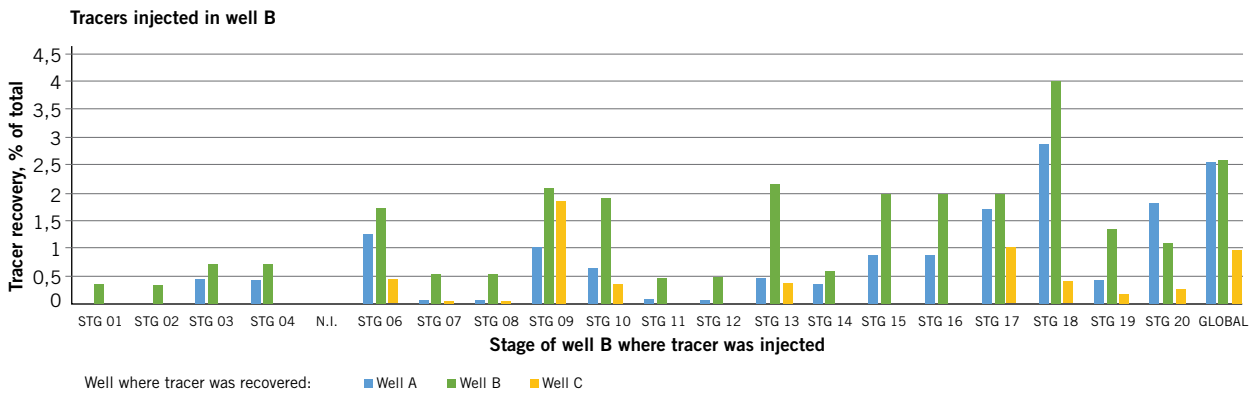


Figura 9. Interferencia de todos los trazadores de agua del pozo B.

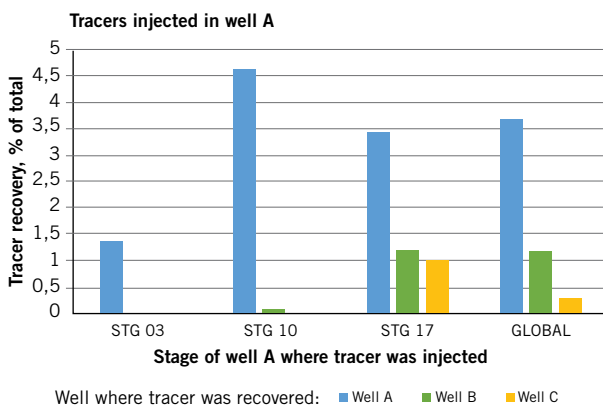


Figura 10. Interferencias de los trazadores de agua del pozo A.

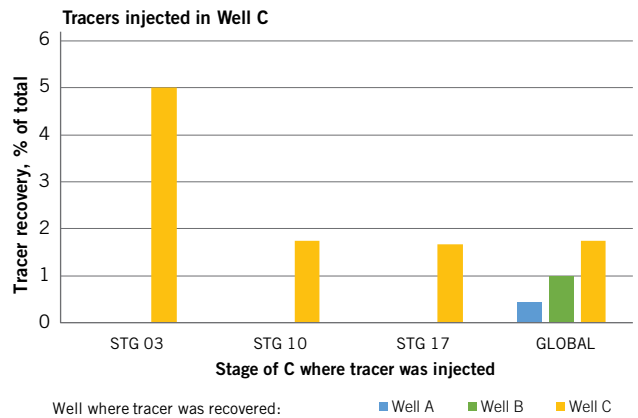


Figura 11. Interferencias de los trazadores de agua del pozo C.

como explicación la secuencia de inicio de producción de los pozos (el pozo A fue el primero en abrirse).

Resultados de interferencias con trazadores individuales de agua del pozo B

En la figura 9 se muestra la cantidad recuperada del trazador individual de agua inyectado en cada etapa del pozo central, en el propio pozo y en los pozos vecinos. De la misma forma que con trazadores globales, hay una fuerte comunicación de los trazadores individuales inyectados en el pozo B hacia los pozos vecinos. Si bien, la mayoría de los trazadores fueron detectados en los pozos vecinos se observa que la comunicación es más evidente en algunas etapas destacándose el *heel en el pozo A*.

Interferencia de los pozos A y C con los pozos vecinos

En las figuras 10 y 11 se muestran la cantidad recuperada de los trazadores individuales y trazador global inyectados en los pozos de los extremos del PAD. A pesar de haberse observado comunicación entre los pozos mediante el trazador global, muy pocos trazadores individuales fueron detectados en los pozos vecinos.

En la figura 10 se muestran las producciones de los trazadores de agua inyectados en el pozo A en el propio pozo y en los pozos vecinos.

En la figura 11 se muestran las producciones de los trazadores de agua inyectados en el pozo C en el propio pozo y en los pozos vecinos.

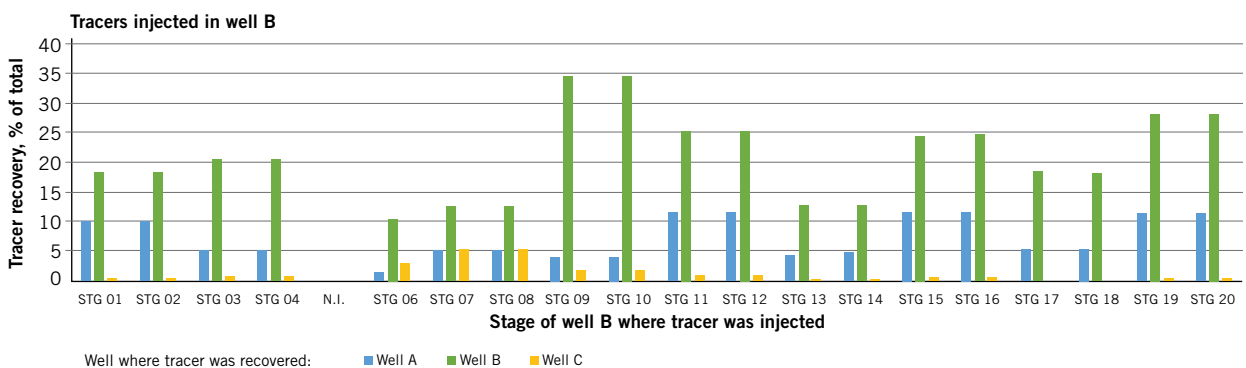


Figura 12. Trazadores inyectados en el pozo B.

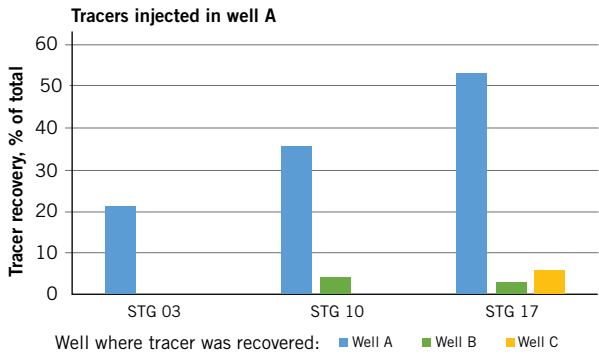


Figura 13. Trazadores inyectados en el pozo A.

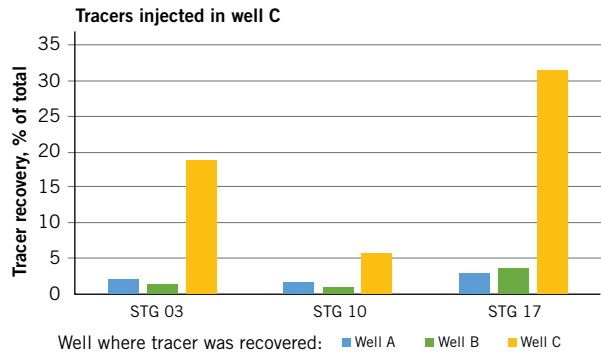


Figura 14. Trazadores inyectados en el pozo C.

Interferencias de gas

En las figuras 12, 13 y 14 se presentan los resultados observados de los trazadores de gas.

Interferencia del pozo B con los pozos vecinos

En la figura 12 se muestra la cantidad recuperada del trazador individual de gas inyectado en cada etapa del pozo central (pozo B) en el propio pozo y en los pozos vecinos. Si bien la mayoría de los trazadores fueron detectados en los pozos vecinos, se observa que la comunicación es más evidente en algunas etapas. También se observa que se recupera mayor cantidad de los trazadores del pozo B en el pozo A (primer pozo del PAD en ponerse en producción) que en el pozo C.

Interferencia de los pozos A y C con los pozos vecinos

En las figuras 13 y 14 se muestra la cantidad recuperada de los trazadores individuales de gas inyectados en

los pozos de los extremos del PAD. Se observa una mayor comunicación desde el pozo C hacia el pozo A, esto puede estar relacionado con la secuencia de apertura.

Evolución de la concentración de trazadores en la producción en función de la secuencia de apertura

Los pozos de este PAD se abrieron en forma secuencial y resulta llamativa la evolución de trazador detectado en función de la secuencia de apertura de los pozos. La evolución de la concentración de trazadores de los pozos detectada en los pozos vecinos según la secuencia de apertura de estos contribuyeron a comprender mejor ubicación del propante dentro de la red de fracturas generada y a validar el espaciamiento entre los pozos a pesar de la comunicación detectada mediante trazadores y presión de fondo.

En la figura 15 se muestra la evolución de la concentración promedio de trazador de gas inyectado en el pozo



Gas rate of the pad wells and presence of gas tracers from well B in samples collected at wells A and B

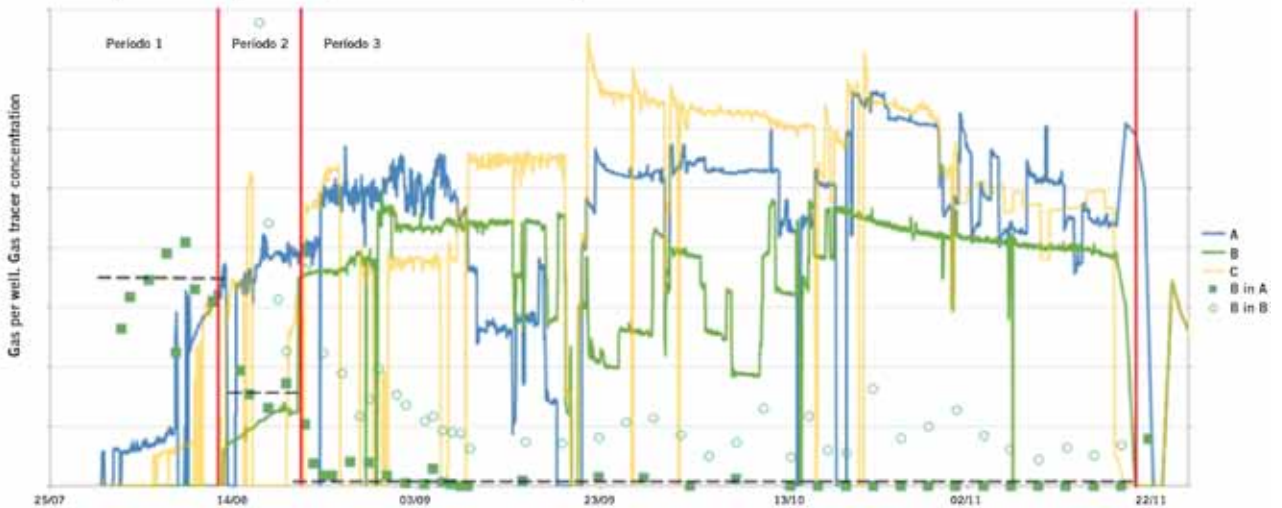


Figura 15. Trazadores de gas inyectados en el pozo B detectados en los pozos A y B.

central, detectada en el propio pozo y en el pozo A que fue el primer pozo del PAD en ponerse en producción. Inicialmente, el trazador de gas es detectado en el pozo A mientras los otros pozos están cerrados (período 1 en la figura). Cuando el pozo B se pone en producción (período 2 en la figura), se reduce la cantidad de trazador detectado en el pozo A y comienza a recuperarse el trazador en las muestras del pozo B. Finalmente, cuando ambos pozos producen caudales parecidos (período 3 en la figura) deja de detectarse el trazador de gas en el pozo A y aumenta la concentración detectada en el pozo B. Algunos meses después, al cerrar el pozo B, vuelve a detectarse trazador en el pozo A.

Cuando analizamos el comportamiento de los trazadores de agua inyectados en el pozo B, inicialmente se detecta trazador en el pozo A cuando es el único pozo del PAD en producción, pero en este caso se sigue detectando trazador del pozo B en el pozo A aun cuando se ponen en producción los otros pozos del PAD (Figura 16).

Interpretación de los resultados

Tanto por los datos de presión como de trazadores identificamos que las redes de fracturas de los tres pozos están comunicadas entre sí. Al abrir el primer pozo (pozo A), el flujo se da desde la red de fracturas hacia este pozo. Cuando se abre el pozo del medio (pozo B), los pozos A y B van a competir por producir los fluidos que se encuentran en la porción de la red de fracturas comprendida entre ambos y va a haber una parte donde el flujo se da hacia el pozo A y en otra hacia el B. Cuando ambos pozos produzcan con caudales similares, la línea divisoria del flujo hacia A o B se va a dar aproximadamente en la mitad del espaciamiento entre ambos pozos y en esta situación cada pozo estaría drenando su box.

En la figura 17 se muestra esta situación en los pozos.

Como se mencionó el trazador de agua se encontraría distribuido en la totalidad de la red de fracturas generada,

Gas rate of the pad wells and presence of global water tracers from well B in samples collected at wells A and B

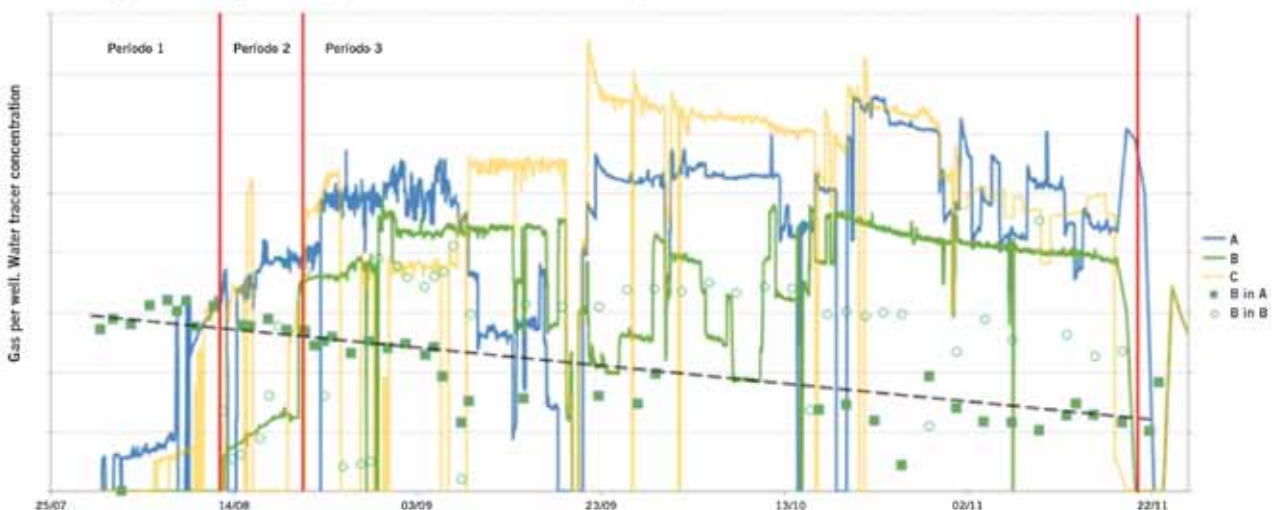


Figura 16. Trazador global de agua inyectado en el pozo B detectado en los pozos A y B.

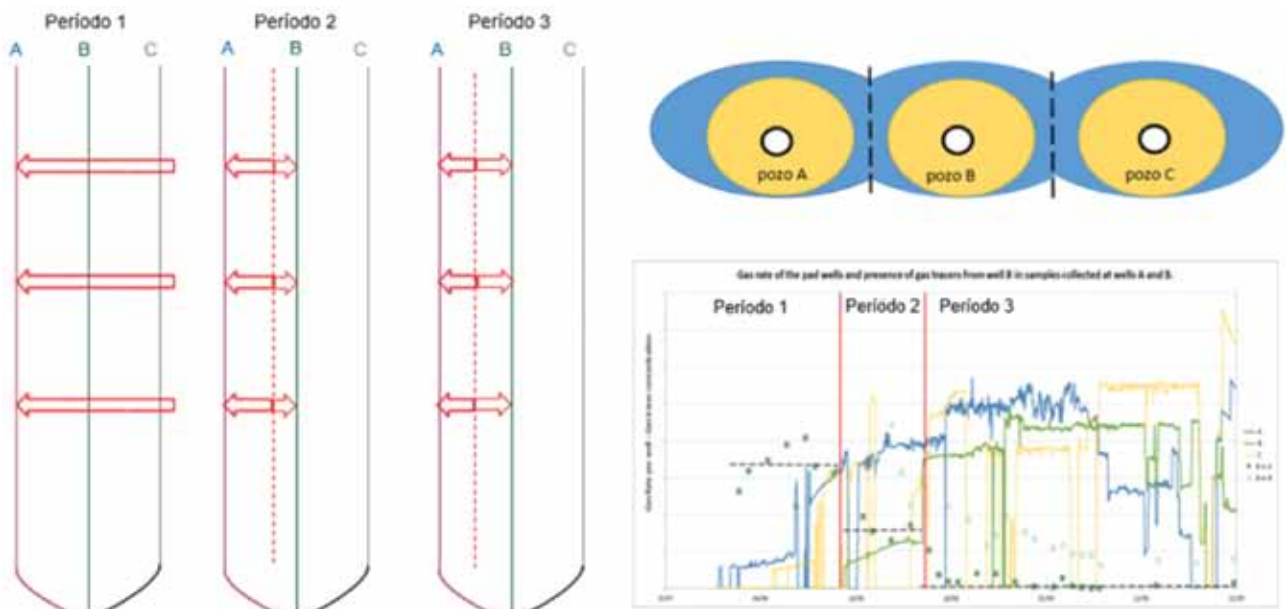


Figura 17. Esquema del flujo dentro de la red de fracturas.

mientras que el trazador de gas solamente en la parte alcanzada por el propanante.

El hecho de detectar el trazador de gas del pozo B en el pozo A cuando el pozo B está cerrado o con bajo caudal, pero que deja de detectarse al producir ambos pozos a caudales similares nos permite inferir que el propanante del pozo B estaría mayoritariamente ubicado dentro del box del pozo hasta la mitad del espaciamento entre ambos. Asumiendo que la mayor parte de los recursos del pozo serán producidos cerca de las zonas de la red de fracturas alcanzadas por propanante, estos resultados confirman que el espaciamento entre los pozos no es demasiado cercano a pesar de tener las redes de fracturas de los tres pozos conectadas.

En el caso de los trazadores de agua, el comportamiento indicaría que las fracturas hidráulicas crecen más allá del box del pozo y se sigue detectando trazador del pozo B en el pozo A aun cuando ambos pozos producen a caudales similares y cada uno se encuentra drenando su box (Figura 16).

Conclusiones

El trabajo realizado permitió medir el aporte relativo de cada etapa e identificar la comunicación entre las redes de fracturas de los pozos.

La secuencia de apertura y cambio de orificios de los pozos tiene un impacto significativo en la concentración de trazador detectada en las muestras principalmente de gas obtenidas durante el ensayo.

El comportamiento de la concentración de trazador en función de esta secuencia de apertura y cambio de orificio nos permitió concluir que la fractura hidráulica crece más allá de los límites del box del pozo para el espaciamento adoptado, pero que la parte de la red de fracturas que es alcanzada por el propanante se encuentra mayoritariamente dentro del box del pozo.

En base a lo anterior se concluye que las ramas de los

pozos no están demasiado cerca entre sí, a pesar de que se observa comunicación entre las redes de fracturas de tres los pozos detectada en este estudio y ratificada con los datos de presión.

Referencias

- Acevedo, H. y A. Bande, 2018, *Characterization of lower Vaca Muerta at Fortín de Piedra in Neuquén Basin, Argentina*, SEG - Special Section: Latin America.
- Vergani, G. D., A. J. Tankard, H. J. Belotti y H. J. Welsink, 1995, *Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquen Basin, Argentina*, in A. J. Tankard, R. Suárez Soruco, H. J. Welsink, eds., *Petroleum basins of South America*: AAPG Memoir 62, 383-402.
- Wagner, O. R., L. E. Baker, R. S. Gordon y R. Scott, 1974, *The Design and Implementation of Multiple Tracer Program for Multifluid, Multiwell Injection Projects*, Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, 6-9 October, Houston, Texas, <https://doi.org/10.2118/5125-MS>.

