

# Desarrollo e integración de **Modelos Capacitivos Resistivos** en un simulador analítico de mallas de inyección

Por *María Sol Fraguó*, *Alejandro Lacivita* y *Jorge Valle* (Interfaces S.A.) y *Mario Storti* (Cimec - Conicet-UNL)

Se describe aquí una integración de modelos en el simulador de mallas de inyección con un método basado en el historial de caudales de proyectos de recuperación secundaria, recomendable en los casos en que la producción provenga de campos multicapa o no hay información suficiente para una simulación numérica.



Este trabajo propone la integración de Modelos Capacitivos Resistivos (CRMs) en el simulador de mallas de inyección de Sahara con el objetivo de mejorar el cálculo de los coeficientes de distribución de la inyección por medio de un método que utiliza la historia de los caudales en proyectos de recuperación secundaria. Las conectividades definidas para CRMs, como la fracción del caudal de inyección de un pozo inyector fluyendo hacia un pozo productor, son interpretadas como los coeficientes de distribución de la inyección por capa en el simulador de recuperación secundaria multicapa basado en mallas de inyección. El mismo es especialmente útil cuando la producción proviene de campos multicapa o para obtener resultados de campos donde la información no es suficiente para realizar simulaciones numéricas. El mismo ha sido ampliamente utilizado en cuencas de nuestro país y América latina en los últimos quince años. Este trabajo permitirá aumentar la potencialidad del simulador, ya que propone una solución a una limitación para el potencial del mismo.

## Modelos Capacitivos Resistivos (CRMs)

Los CRMs permiten cuantificar la comunicación entre pozos productores e inyectores durante operaciones de recuperación secundaria al proveer importante información sobre canales preferenciales de transmisibilidad y barreras de flujo, basándose solamente en datos de caudal de producción y de inyección de los pozos involucrados. Además, los CRMs son capaces de modelar el retraso en la respuesta de un productor provocado por el impulso inducido en el pozo inyector. Son modelos de procesamiento de señales donde los caudales de inyección son interpretados como la señal de entrada y la producción total representa la respuesta del reservorio o la señal de salida. Muchos autores han estudiado el tema desde la primera propuesta de Albertoni (2002) y Albertoni & Lake (2003). Ellos presentaron un método estadístico que utilizaba regresiones múltiples para obtener los coeficientes de conectividad entre inyectores y productores. El método predecía los caudales de producción de líquido de un pozo utilizando un modelo lineal que asumía una combinación lineal de caudales de inyección de cada inyector del campo. Además, fue tomada en cuenta la atenuación del medio entre pares productor inyector al utilizar lo que los autores denominaron filtros de difusividad. Los filtros eran aplicados a los caudales de inyección. Yousef *et al.* (2005) presentaron un nuevo modelo, actualmente conocido como CRM (*Capacitance Resistive Model*), para cuantificar la comunicación entre pozos basado en los caudales de inyección y producción, que tenía en cuenta efectos capacitivos (compresibilidad) y resistivos (transmisibilidad). Este modelo provee parámetros que indican la atenuación y el retraso en la respuesta entre pares productor inyector sin necesidad de filtrado. Por cada par productor inyector se determinan dos parámetros: uno, cuantifica la conectividad; y otro, cuantifica el grado de almacenamiento de fluido entre pozos (constantes de tiempo). Los coeficientes de conectividad en CRMs representan la fracción de agua inyectada en estado estacionario que contribuye a la producción en cada productor conectado. A partir de la introducción de los CRMs, los mismos han sido estudiados por diversos au-

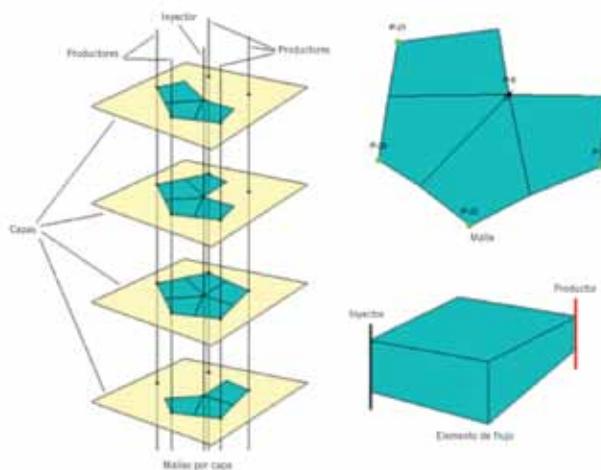


Figura 1. Esquema multicapa de mallas y elementos de flujo del simulador analítico de mallas de inyección.

tores (Sayarpour, 2008; Weber, 2009, Nguyen, 2011) y se han propuesto distintos tipos de soluciones para las ecuaciones diferenciales originales en sus diferentes versiones según el volumen de control estudiado (CRMP: volumen de drenaje alrededor de un pozo productor; CRMIP: volumen de drenaje entre pozo inyector y productor). La mayoría de los autores han utilizado los CRMs para estudiar cualitativamente el reservorio como sistemas monocapa y así detectar distintos grados de conectividades y fallas, con el objetivo de redistribuir la inyección de agua y así mejorar la producción de petróleo en proyectos de recuperación secundaria. Weber (2009) tuvo en cuenta por primera vez que, a lo largo de la vida del reservorio, los pozos productores e inyectores se abren, se cierran o se reconvierten, además de restringir el número de pares de pozos por distancia con el objetivo de reducir el número de parámetros por identificar. Moreno (2013) resolvió el sistema teniendo en cuenta que las conectividades debían ser dinámicas y determinó el modelo para un sistema de tres capas.

## Simulador analítico de mallas de inyección

El simulador de Sahara consta de un sistema de mallas de inyección. Cada malla de inyección se compone de una serie de elementos de flujo que conectan cada pozo inyector con los productores vecinos en cada capa. Un elemento de flujo es el volumen de reservorio, donde se produce el barrido desde el pozo inyector hasta el pozo productor. La forma de los elementos de flujo debería reflejar las líneas de flujo para cada par productor inyector. La figura 1 muestra un esquema de las mallas y elementos de flujo.

Los elementos de flujo en cada malla son creados o destruidos según el estatus de los pares de pozos. El mismo puede cambiar en el tiempo dados que los pozos o capas se abren y se cierran y los pozos se reconvierten a lo largo de la vida de un proyecto. Cuando un elemento es creado, este es proyectado en el tiempo mientras que el estatus de los pozos involucrados no cambie. La figura 2 muestra dos estados en el tiempo para la misma capa de un proyecto de recuperación secundaria.

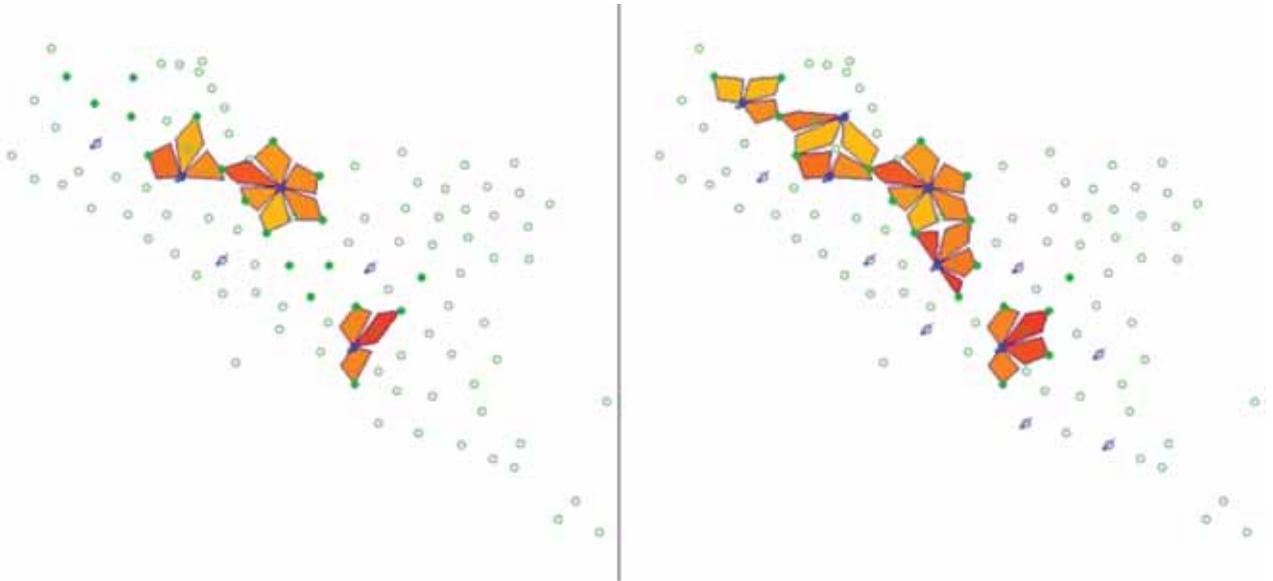


Figura 2. Distribución de mallas para dos momentos diferentes en la misma capa en un proyecto de recuperación secundaria.

La metodología de cálculo del simulador se basa en la distribución areal de la inyección de agua de cada pozo inyector en cada capa y en el modelo de cálculo seleccionado. Una vez definidas las mallas de inyección mediante los elementos de flujo que las componen, es posible distribuir arealmente la inyección del mismo en cada capa mediante coeficientes de prorrateo.

Cada elemento de flujo, considerado como estanco y caracterizado por su volumen poral y su saturación de petróleo móvil, puede ser barrido por el agua inyectada en la capa distribuida arealmente hacia cada pozo productor de la malla. En estas condiciones, es posible calcular los caudales de petróleo y agua erogados del elemento por el pozo productor, a partir de la inyección de agua que recibe de cada elemento de flujo. El procedimiento general de cálculo se puede esquematizar de la siguiente forma:

1. Para cada capa o región y para cada elemento de flujo, calcula los parámetros generales de acuerdo con el método de cálculo seleccionado (volúmenes porales, saturaciones, parámetros PVT).
2. Para cada elemento de flujo, calcula las saturaciones iniciales y cada mes lee la inyección de capa correspondiente al pozo inyector y la multiplica por el coeficiente que le corresponde a ese elemento en ese mes y obtiene el volumen de agua que se debe inyectar en el mismo.
3. Si es necesario aplica el retraso de respuesta.

Para cada elemento, se suma el volumen obtenido en el punto 2 al inyectado previamente y lo divide por el volumen poral del elemento para obtener el Wid (acumulada de agua inyectada en volúmenes porales). De acuerdo con el modelo de cálculo seleccionado (Flujo Segregado, Buckley Leverett, Craig, Geffen y Morse, Curva Característica, Método WOR), obtiene el Npd (acumulada de petróleo producida en volúmenes porales). Con el Npd, calcula la saturación media de petróleo del elemento al final del mes. Una vez terminado el proceso para cada elemento de cada capa, Sahara calcula, con el empleo de las saturaciones de los elementos, la producción de capa de secundaria

de cada pozo y la correspondiente producción asociada de cada inyector. La suma de los caudales producido por cada elemento de flujo, en cada pozo, en cada capa permite obtener la curva de producción de cada pozo, que luego podrá ser comparada con la historia de producción del mismo al sumarle las producciones de primaria definidas por el usuario. El proceso de *History Matching* se realiza modificando los parámetros correspondientes al modelo analítico de cálculo elegido y los coeficientes de distribución areal de la inyección. La figura 3 muestra un esquema de la secuencia de pasos e implicancias en cada uno para completar una simulación con el simulador de mallas de inyección.

La figura 3, junto con la explicación anterior, ponen de manifiesto la importancia que los datos ingresados tienen sobre el resultado de la simulación. Cada uno de los parámetros de entrada tiene su propio grado de incertidumbre e incide diferente sobre los resultados de la simulación. El problema de la incertidumbre asociada a los parámetros geológicos y parámetros PVT (paso 3 de la figura 3) fue

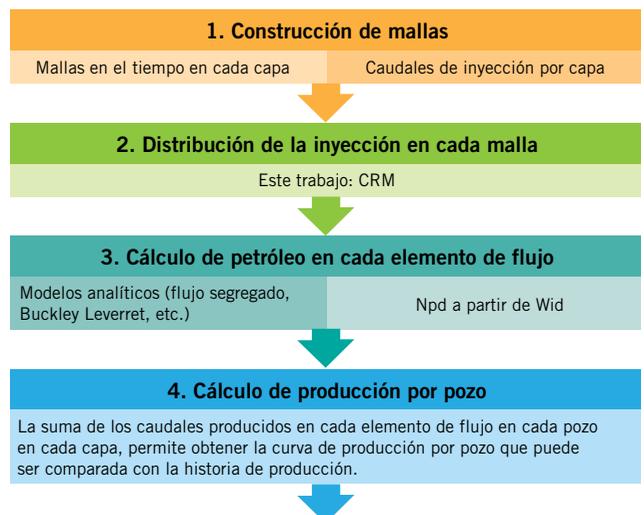


Figura 3. Secuencia de pasos para realizar una simulación con el simulador analítico de mallas de inyección.

acotada con el desarrollo de un módulo que realiza simulaciones de Montecarlo asociado al simulador de mallas de inyección. El mismo permite asignar distribuciones de probabilidad a los parámetros de entrada de cada modelo de cálculo y así obtener resultados probabilísticos de las producciones.

El paso 2 de la figura 3 consume mucho tiempo, y gran parte de la incertidumbre del proceso de *History Matching* es asociado a la asignación de estos coeficientes de distribución areal de la inyección, lo cual representa una limitación para el potencial del simulador.

Además, como este es un simulador analítico donde la respuesta en los pozos productores es inmediata, existen dos opciones que permiten simular la demora que ocurre en los proyectos reales: constante (número entero en meses luego del cual se alcanzará la meseta de producción) y ponderado por volumen poral, donde el valor ingresado se divide por el volumen poral de cada elemento resultando en un número de meses de retraso.

Es en este contexto donde los modelos capacitivos resistivos aparecen como una solución natural al problema de la asignación de los coeficientes de distribución de la inyección a lo largo del tiempo. Las conectividades de los CRMs pueden ser interpretadas como los coeficientes de distribución en el tiempo de nuestro simulador de mallas de inyección y solo se requieren los datos de inyección y producción como datos de entrada. Además, las constantes de tiempo de los CRMs simulan el retraso en la respuesta en el productor debido a la inyección. De esta manera, podemos obtener simultáneamente los coeficientes de distribución areal de la inyección y una estimación del tiempo de respuesta, basados en la historia de producción.

## Metodología implementada

Una de las principales limitaciones de los CRMs es el proceso inverso no lineal que requiere la identificación

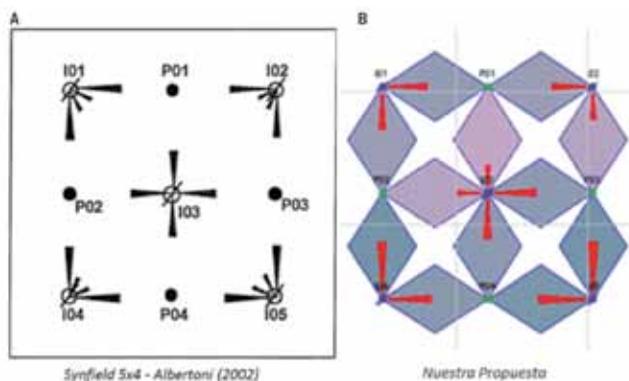
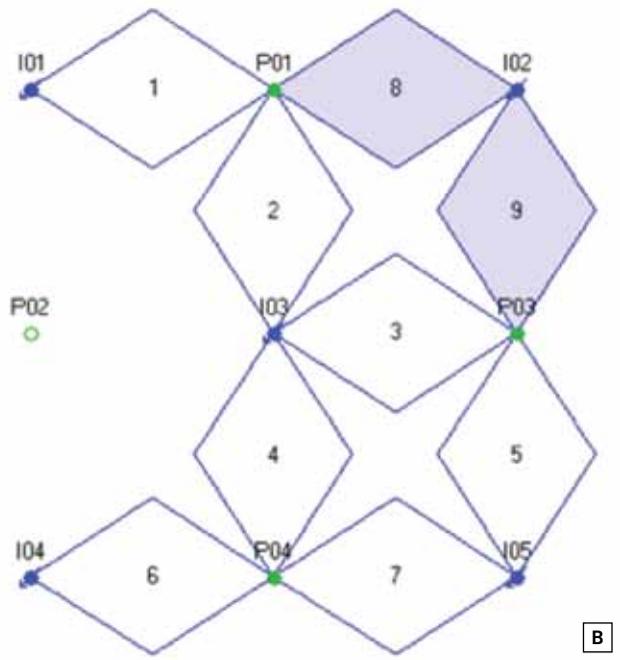
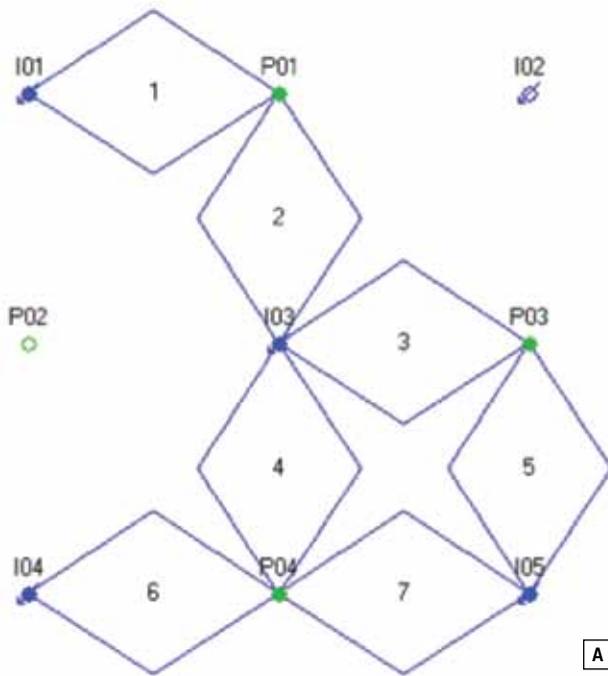


Figura 4. (A) Caso sintético 5x4 (Synfield 5x4) presentado por Albertoni (2002) que muestra los resultados obtenidos para los coeficientes de conectividad, en los que cada uno de los cinco inyectores está conectado a los cuatro productores. (B) Synfield 5x4 utilizando el modelo de conectividad por elementos de flujo propuesto en este trabajo.

de sus parámetros a partir de los datos de producción. En nuestro caso, nos encontramos en el desafío de tener que resolver problemas reales de gran cantidad de incógnitas, dado que en nuestro modelo cada capa de un inyector es interpretada como un pozo inyector capa con sus correspondientes parámetros por identificar, con lo cual la cantidad de conectividades puede ser grande para algunos proyectos. Partimos de las ecuaciones diferenciales presentadas por Sayarpour (2008) y desarrollamos nuestro propio método para inferir los parámetros del modelo (conectividades y constantes de tiempo). Comenzamos utilizando el área drenada alrededor de cada pozo productor como volumen de control (modelo CRMP). Adicionalmente, la suma de los coeficientes de distribución por capa debe ser menor o igual que uno, lo cual implica resolver el sistema con restricciones. Este trabajo fue realizado en colaboración con el CIMEC (Centro de Investigación de Métodos Computacionales, CONICET, UNL).



La primera diferencia con una implementación tradicional de CRM es que en nuestro modelo, las conexiones son impuestas por los elementos de flujo previamente generados. De esta manera, el número de incógnitas se reduce considerablemente a la vez que respeta las barreras de flujo. La figura 4 muestra, a la izquierda, la típica interconexión de pozos de CRM en un campo sintético presentado por Albertoni (2002); a la derecha, la interconectividad planteada mediante elementos de flujo en este trabajo. La forma de los elementos de flujo es arbitraria y los mismos solo indican conectividad entre pozos.

Los coeficientes cambian en el tiempo cuando varían las mallas de inyección independientemente de la razón del cambio. Las figuras 5 A, B y C muestran una secuencia y explican gráficamente cómo quedan los pozos conectados en nuestro modelo de elementos de flujo según el estado de los pozos y cómo cambian en el tiempo los coeficientes de inyección.

La figura 5 (A) describe una condición inicial donde tres productores (P01, P03 y P04) y cuatro inyectores (I01, I03, I04 y I05) están abiertos en la única capa del proyecto. En esta situación, siete elementos de flujo son construidos y, por lo tanto, se definen siete coeficientes iniciales. En un segundo paso, se abre otro inyector en la misma capa (I02). Se construyen dos nuevos elementos y, como consecuencia, dos nuevos coeficientes. Los siete coeficientes iniciales no se ven alterados por la generación de los nuevos elementos. Si luego P02 es abierto en la capa, el cambio en las mallas de inyección se muestra en la figura 5 (C). Aparecen tres nuevos elementos y sus coeficientes asociados, pero los coeficientes correspondientes a los inyectores vecinos a los productores que cambian de estatus también son afectados, debido a que el agua debe ser redistribuida en esas mallas. Resumiendo, en este ejemplo, los coeficientes 1 a 6 viven durante los pasos uno y dos, los coeficientes 8 y 9 viven en los pasos dos y tres, los

coeficientes 10 a 17 viven en el paso 3 y los coeficientes 5 y 7 viven durante toda la historia de este ejemplo. En este ejemplo se pone de manifiesto la complejidad de la asignación de coeficientes de distribución en un escenario de muchos pozos y capas que cambian de estado a lo largo de la vida del proyecto y las causas por las cuales este proceso requiere gran parte del esfuerzo durante el proceso de ajuste de una simulación.

Con el objetivo de validar el algoritmo de identificación desarrollado se generaron diferentes casos de estudio de distinta complejidad que sirvieron para validar el pro-

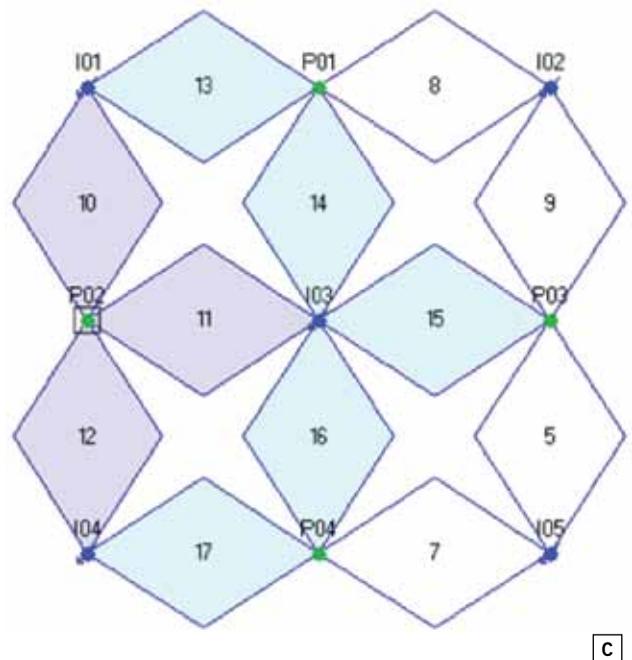


Figura 5. Período de vida de coeficientes en una capa a medida que se abren pozos productores e inyectores en tres etapas.

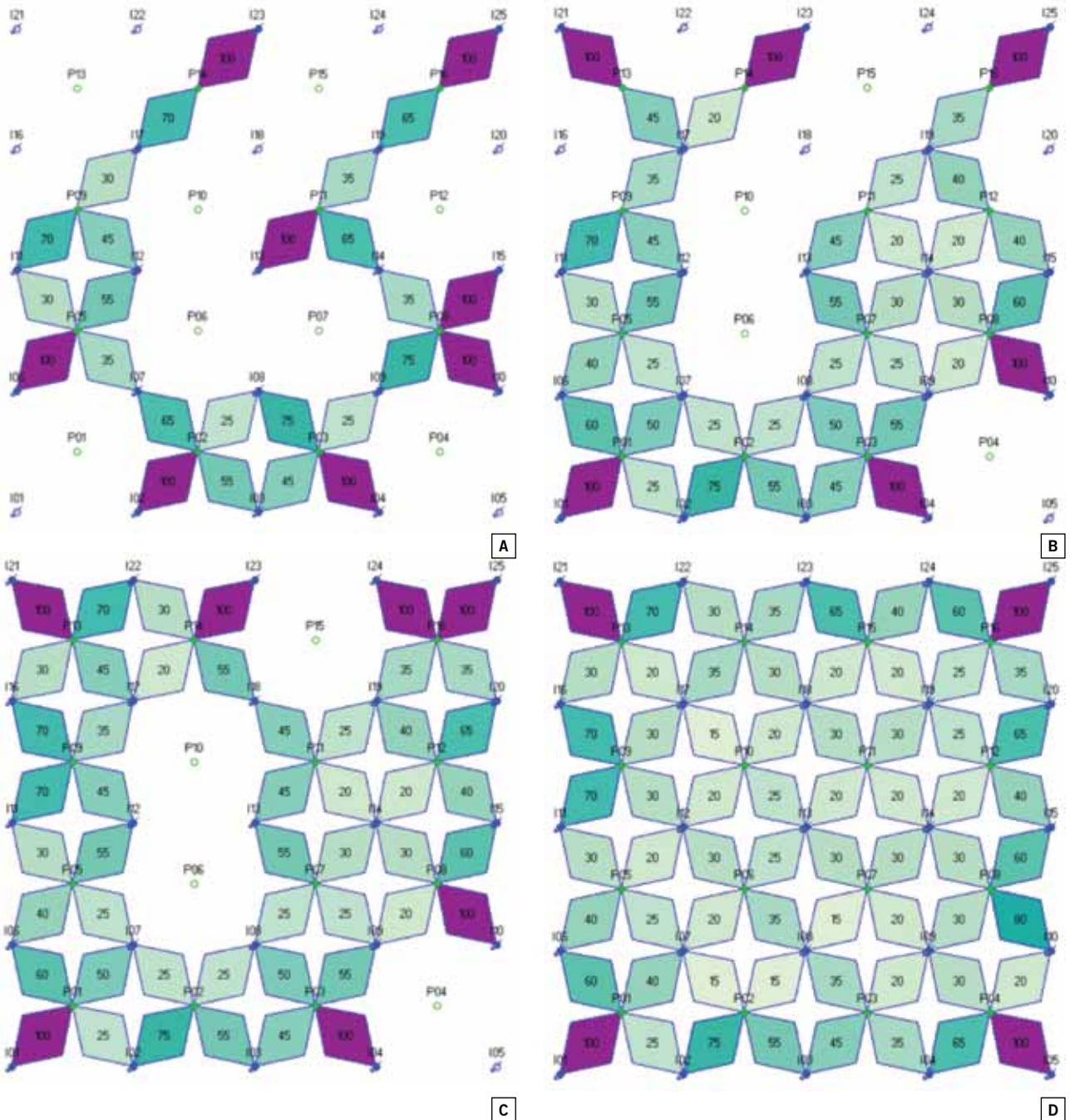


Figura 6. Pozos productores e inyectores en cuatro etapas de apertura para la capa 1. El valor de los coeficientes es representado en escala de verdes. Valores extremos (100% de la inyección) representados en violeta. Fecha inicial para cada etapa: (A) 1/1960, (B) 1/1970, (C) 1/1980, (D) 10/1993. Fin de la inyección/historia de producción 11/1994.

ceso de identificación de parámetros y generar casos de testeo basados en el modelo CRMP. La figura 6 muestra un caso de 25 inyectores y 16 productores (basado en el ejemplo *Synfield 25x16* de Albertoni, 2002) en versión dos capas y cuatro etapas de apertura de pozos. Basado en este esquema, se generaron caudales sintéticos. Los caudales de inyección fueron generados aleatoriamente en rangos típicos de inyección. En nuestro modelo, la inyección en cada capa es considerada como un pozo individual denominado inyector capa, por lo tanto, nuestro modelo estaría compuesto por 16 productores y 50 inyectores. Las

constantes de tiempo fueron impuestas para cada pozo productor y los coeficientes de inyección para cada par productor-inyector capa. El estado de capa es el mismo en ambas capas, pero los coeficientes impuestos difieren.

La figura 7 muestra las producciones generadas en forma sintética utilizando el modelo y las reconstruidas a partir de los parámetros identificados utilizando el algoritmo desarrollado y los caudales de inyección. Se observa que las dos curvas coinciden perfectamente tanto para la sumatoria de los caudales de todos los pozos como para los pozos individuales mostrando que el algoritmo de identificación

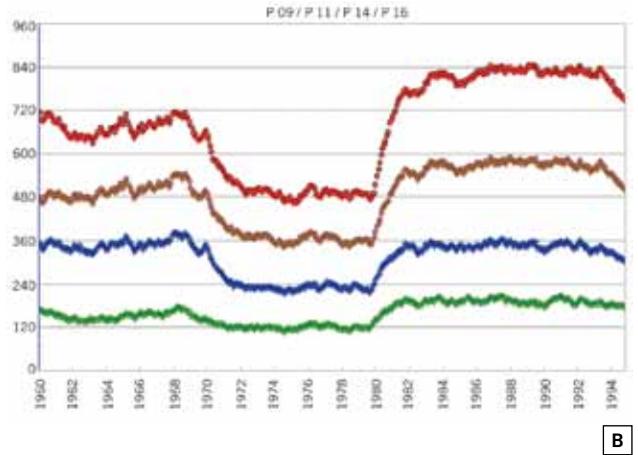
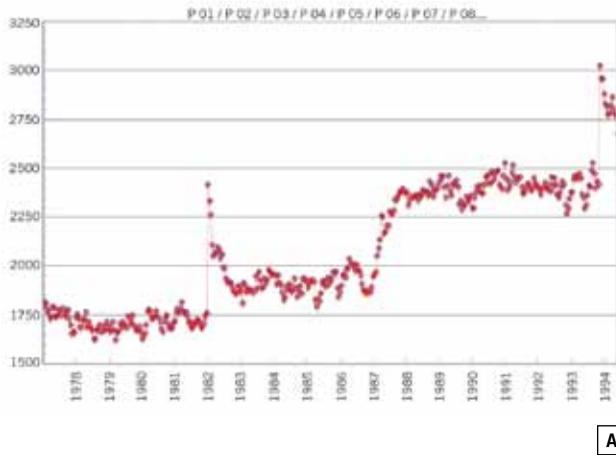


Figura 7. Caudales de producción reconstruidos en base al modelo CRMP para el caso de testeo de dos capas y cuatro etapas. (A) Suma de la producción de 16 pozos. (B) Algunos productores individuales abiertos en la primera etapa.

desarrollado resuelve el problema con conectividades dinámicas para casos multicapa.

En el ejemplo anterior, los caudales de inyección fueron generados independientemente de forma aleatoria. En problemas reales de ingeniería de reservorios, muchas veces los caudales de inyección por capa no están disponibles a partir de mediciones independientes y deben ser inferidos a partir del caudal en boca de pozo, distribuyendo este caudal en las distintas capas en porcentajes con algún criterio. Estos casos, en los que se distribuye la inyección por capas y los caudales son proporcionales entre sí para las capas de un mismo pozo inyector, se pierde información, las ecuaciones se vuelven linealmente dependientes y el sistema no se puede resolver. Otra situación que genera matrices mal condicionadas que impiden resolver el sistema de ecuaciones ocurre cuando no hay datos suficientes para identificar los coeficientes en alguna etapa. Esto es así cuando los elementos de flujo duran poco tiempo (un mes) o cuando los datos son insuficientes. Para resolver estos casos se adicionaron dos parámetros al algoritmo que permiten corregir malos condicionamientos de la matriz resultante durante la minimización de la función objetivo. Se obtiene así una de las soluciones posibles para los coeficientes respetando el ajuste de los caudales de líquido a nivel de pozo productor. Actualmente se estudia la automatización e incidencia de los mismos sobre los resultados.

## Resumen y trabajo futuro

Los modelos capacitivos resistivos aparecen como una solución natural al problema de la asignación de los coeficientes de distribución de la inyección a lo largo del tiempo en el simulador de mallas de inyección de Sahara. Las conectividades de los CRMs pueden ser interpretadas como los coeficientes de distribución en el tiempo de nuestro simulador y solo se requieren los datos de inyección y producción como datos de entrada. Además, las constantes de tiempo de los CRMs simulan el retraso en la respuesta en el

productor debida a la inyección. De esta manera, podemos obtener simultáneamente los coeficientes de distribución areal de la inyección y una estimación del tiempo de respuesta, basados en la historia de producción.

La implementación del desarrollo presentado actualmente es evaluada en casos sintéticos y distintos proyectos reales de recuperación secundaria con la utilización de producciones mensuales y diarias. ■

## Referencias

- Albertoni, A. (2002), *Inferring Interwell Connectivity Only From Well-Rate Fluctuations in Waterfloods*. M. S. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Albertoni, A. and L. W. Lake (2003), "Inferring Connectivity Only From Well-Rate Fluctuations in Waterfloods", *SPE Reservoir Evaluation and Engineering Journal*, 6 (1): 6-16.
- Moreno A. G. (2013), "Multilayer capacitance resistance model with dynamic connectivities", *Journal of Petroleum Science and Engineering* 109, 298-307.
- Nguyen, A. P.; Lasdon, L. S.; Lake, L. W. and T. F. Edgar (2011), *Capacitance Resistive Model Application to Optimize Waterflood in a West Texas Field*. SPE-146984-MS.
- Sayarpour, M. (2008), *Development and Application of Capacitance-Resistive Models in Water/CO<sub>2</sub> Floods*, Ph. D. Dissertation. The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Weber, D. B. (2009), *The Use of Capacitance-Resistance Models to Optimize Injection Allocation and Well Location in Water Floods*, Ph. D. Dissertation. University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Yousef, A. A.; Gentil, P. H.; Jensen, J. L. and L. W. Lake (2005), *A Capacitance Model to Infer Interwell Connectivity from Production and Injection Rate Fluctuations*. Paper SPE 95322 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 9-12 October.