

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA DEFINICIÓN DE FUNCIONES SIMPLES DE AJUSTE PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD RELATIVA EN SISTEMAS DE AGUA-PETRÓLEO

Ricardo A. Prado¹, Esteban L. González¹

1: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina

ricardo.prado@fain.uncoma.edu.ar, esteban.gonzalez@fain.uncoma.edu.ar

Palabras clave: Sistema Agua - Petróleo, Estado no Estacionario, Permeabilidad Relativa, Ajustes Simples, Linealización, Sensibilidad

ABSTRACT

Sensitivity analysis when defining simple fitting functions in order to determine the relative permeability in water-oil systems.

In the present work, the experimental curves from the flow core test are fitted by means of simple functions previously proposed that are linearized in order to find new relationships between parameters. A Least Square Method leads to a simplified methodology for obtaining the unknown fitting coefficients. A sensitivity analysis is carried out on those coefficients in order to show their influence on the determination of relative permeability curves in water-oil systems by the unsteady method, either at a constant flow pressure, or at a constant injected flow. This technique shows its simplicity, accuracy and speed of calculation.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una extensión de las publicaciones presentadas en congresos del IAPG (González y Prado 2014, 2016) donde se exponían las técnicas de ajuste para curvas experimentales con el fin de determinar permeabilidades relativas en sistemas agua-petróleo por el método no estacionario, tanto a gradiente de presión de flujo constante como a caudal de inyección constante. Se presentará una simplificación en la determinación de los parámetros de ajuste para la obtención de las funciones que aproximan a las curvas experimentales. Asimismo, se realizará un análisis de sensibilidad de estas funciones de ajustes para evaluar la influencia de la variación de sus parámetros sobre la determinación de las curvas de permeabilidad relativa.

Según Crotti (2004), una posible curva de ajuste a los resultados experimentales de los ensayos de barrido tendría la forma general de la ecuación polinómica de grado n ,

$$Y = c_n X^n + c_{n-1} X^{n-1} + \dots + c_1 X^1 + c_0 \quad X = (t+a)^b \quad (1)$$

donde a y b son parámetros de ajuste, al igual que los coeficientes c_n de la expresión polinómica, y t representa el tiempo. Por experiencia de uso, se ha comprobado que este método de ajuste implica generalmente la utilización de polinomios de grado 5 o superior, lo que determina entonces que la cantidad de parámetros a ajustar resulte de, al menos, 8 por cada curva experimental. Esto conlleva mucho trabajo y tiempo de cálculo debido a que los ajustes matemáticos provistos por estos polinomios no son monótonos.

Con la finalidad de subsanar las desventajas indicadas previamente, se propuso una metodología simplificada de ajuste para la determinación de las funciones requeridas para la obtención de las curvas de permeabilidades relativas.

Procedimiento 1: proceso a gradiente de presión constante

En un proceso de barrido a gradiente de presión constante, se propuso el ajuste a los resultados experimentales correspondiente a la variación con el tiempo, t , del volumen de agua inyectada, v_w , mediante la aproximación (González y Prado 2014),

$$v_w(t) = V_{ini} + [s \cdot (t - T_{ini}) - d] + d \cdot \exp[-(t - T_{ini})/A] \quad t \geq T_{ini} \quad (2)$$

donde V_{ini} es el primer volumen de agua inyectada medido, al tiempo T_{ini} . El coeficiente A es el único valor necesario para ajustar los valores de la discrepancia entre los valores experimentales dado que s y d representan, respectivamente, la pendiente y el término independiente de la recta de ajuste a los valores finales del ensayo de barrido.

Por otra parte, el ajuste propuesto para los resultados experimentales de variación temporal del volumen de petróleo barrido, v_o , se desarrolla en la ecuación (3), (González y Prado 2014). Este ajuste es válido a partir del tiempo de ruptura, TPR , tiempo cuando rompe el frente de agua en la cara de salida de la muestra,

$$v_o(t) = V_o - (V_o - V_{PR}) \exp\left\{-[(t - T_{PR})/B]^N\right\} \quad t \geq T_{PR} \quad (3)$$

En la ecuación (3), V_o representa el volumen total de petróleo producido, V_{PR} es el volumen de petróleo producido en el tiempo de ruptura, TPR . El coeficiente B y el exponente N serían los únicos valores necesarios para el ajuste. Dada la solicitud de monotonía de la derivada temporal de la ecuación (3), se requiere que $0 < N \leq 1$. Como puede observarse para el ajuste de estas dos curvas experimentales sólo es necesario la determinación de tres parámetros de ajustes (A , B y N), los cuales pueden obtenerse por mínimos cuadrados y si fuese necesario se pueden reajustar manualmente.

Procedimiento 2: proceso a caudal de inyección constante

En un proceso de barrido a caudal de inyección de agua constante se propuso (González y Prado 2016) que el ajuste para el volumen obtenido de petróleo sea el mismo que el dado por la expresión del Procedimiento 1, ecuación (3), mientras que para el ajuste de la variación temporal de la presión, p , se propuso la aproximación

$$p(t) = P - (P - P_{PR}) \exp\left\{-[(t - T_{PR})/C]^M\right\} \quad t \geq T_{PR} \quad (4)$$

En la ecuación (4), la constante P representa la presión final del ensayo cuando se ha dejado de producir petróleo, P_{PR} es la presión de flujo en la cara de entrada de la muestra en el tiempo de ruptura, T_{PR} . El coeficiente C y el exponente M serían los únicos valores necesarios para ajustar las mediciones experimentales. Dada la solicitud de monotonía de la derivada temporal de la ecuación (4), se requiere que $0 < M \leq 1$. En este procedimiento es necesario determinar dos parámetros de ajuste para cada una de las curvas experimentales (B y N , C y M).

A partir de estas aproximaciones y de sus derivadas temporales, se lleva a cabo la obtención de las curvas de permeabilidad relativa mediante el procedimiento detallado por Jones y Roszelle (1978).

Metodología

A continuación se analiza un proceso de regresión lineal genérico y la linealización de las ecuaciones de ajuste (2), (3) y (4) con la finalidad de obtener relaciones funcionales entre los parámetros de ajuste y simplificar su posible obtención analítica y facilitar asimismo el posterior análisis de sensibilidad de los resultados al cambio de estos parámetros.

AJUSTE MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL POR MÍNIMOS CUADRADOS

Sea, en general, un proceso de ajuste a una serie de resultados, por ejemplo pares (x_k, y_k) , mediante una regresión lineal, donde se propone un ajuste de la forma

$$y = \alpha x + \beta \quad (5)$$

con α y β parámetros a determinar.

El problema de ajustar una recta óptima de mínimos cuadrados a un conjunto de n pares de datos (x_k, y_k) , corresponde a reducir a un mínimo la expresión (Burden y Faires 1998; Chapra y Canale 1999)

$$L = \sum_{k=1}^n [y_k - (\alpha x_k + \beta)]^2 \quad (6)$$

con respecto a los parámetros α y β de la recta de ajuste. La ecuación (6) representa la sumatoria de las discrepancias al cuadrado entre los valores y_k , y los correspondientes valores de ajuste para y , de acuerdo a la ecuación (5). Para que ocurra un mínimo, es necesario que

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \quad (7)$$

resultando

$$\alpha = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k - \bar{x} \cdot \bar{y} \right)}{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k - \bar{x} \cdot \bar{x} \right)} \quad \beta = \bar{y} - \alpha \bar{x} = \frac{\left[\left(\sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k \right) \bar{y} - \left(\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k \right) \cdot \bar{x} \right]}{\left[\left(\sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k \right) - n \bar{x} \cdot \bar{x} \right]} \quad (8)$$

donde

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \quad (9)$$

Si el ajuste tuviera una forma tal que

$$\beta = 0 \Rightarrow y = \alpha x \quad (10)$$

entonces,

$$\alpha \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k - \bar{x} \cdot \bar{x} \right) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k - \bar{x} \cdot (\alpha \bar{x}) \quad (11)$$

y resolviendo para el parámetro α , siendo $\beta = 0$, resulta

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k}{\sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k} \quad (12)$$

Consecuentemente, la recta de regresión resulta

$$y = \alpha x = \frac{\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k}{\sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k} x \quad (13)$$

expresión que representa el mejor ajuste lineal cuando el parámetro β es nulo.

Por su parte, según Chapra y Canale (1999), el coeficiente de correlación del ajuste, r , es

$$r = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k \right) - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \cdot x_k \right) - \bar{x} \cdot \bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n y_k \cdot y_k \right) - \bar{y} \cdot \bar{y}}} \quad (14)$$

mientras que r^2 representa el denominado coeficiente de determinación del ajuste. Ambos coeficientes caracterizan la bondad del ajuste.

Como lo establecen Chapra y Canale (1999), “se pueden usar transformaciones para expresar los datos en una forma que sea compatible con la regresión lineal”. Dicho proceso va a ser aplicado en la siguiente sección.

LINEALIZACIÓN DE LOS AJUSTES A LAS CURVAS EXPERIMENTALES DE BARRIDO

Volumen de agua inyectada: Procedimiento 1 (proceso a gradiente de presión constante).

Reescribiendo la expresión de ajuste para el volumen de agua (w) inyectada

$$v_w(t) = V_{ini} + [s \cdot (t - T_{ini}) - d] + d \cdot \exp[-(t - T_{ini})/A] \quad t \geq T_{ini} \quad (2)$$

despejando la función exponencial de (2)

$$\frac{(v_w(t) - V_{ini}) - [s \cdot (t - T_{ini}) - d]}{d} = \exp[-(t - T_{ini})/A] \quad (15)$$

aplicando el logaritmo natural a la expresión (15)

$$\ln \left\{ \frac{(v_w(t) - V_{ini}) - [s \cdot (t - T_{ini}) - d]}{d} \right\} = -\frac{(t - T_{ini})}{A} \quad (16)$$

y denominando

$$y_w = \ln \left\{ \frac{(v_w(t) - V_{ini}) - [s \cdot (t - T_{ini}) - d]}{d} \right\} \quad a = -\frac{1}{A} \quad x_w = t - T_{ini} \quad (17)$$

resulta la ecuación linealizada de la forma

$$y_w = a x_w \quad (18)$$

Comparando la ecuación (18) con la (13), y dada (12), resulta entonces

$$a = \frac{\sum x_w \cdot y_w}{\sum (x_w)^2} = -\frac{1}{A} \quad \Rightarrow \quad A = -\frac{\sum (x_w)^2}{\sum x_w \cdot y_w} \quad (19)$$

y, consecuentemente,

$$A = -\frac{\sum_k (t_k - T_{ini})^2}{\sum_k \left\{ (t_k - T_{ini}) \cdot \ln \left[\frac{[v_w(t_k) - V_{ini}] - [s \cdot (t_k - T_{ini}) - d]}{d} \right] \right\}} \quad (20)$$

Así, la ecuación (20) representa una posible expresión para la determinación del parámetro A, siendo $k = 1, 2, \dots, n$ el número de valores empíricos con que se cuenta.

Volumen de petróleo producido: Procedimientos 1 y 2 (procesos a gradiente de presión constante y a caudal constante)

Reescribiendo la expresión de ajuste para el volumen de petróleo (o) obtenido

$$v_o(t) = V_o - (V_o - V_{PR}) \exp \left\{ -[(t - T_{PR})/B]^N \right\} \quad t \geq T_{PR} \quad (3)$$

despejando la función exponencial de (3)

$$\frac{v_o(t) - V_o}{(V_{PR} - V_o)} = \exp \left\{ -\left(\frac{1}{B}\right)^N (t - T_{PR})^N \right\} \quad (21)$$

aplicando el logaritmo natural a la expresión (21)

$$\ln \left\{ \frac{v_o(t) - V_o}{(V_{PR} - V_o)} \right\} = -\left(\frac{1}{B}\right)^N (t - T_{PR})^N \quad (22)$$

definiendo las variables

$$y_o = \ln \left\{ \frac{v_o(t) - V_o}{(V_{PR} - V_o)} \right\} \quad b = -\left(\frac{1}{B}\right)^N \quad x_o = (t - T_{PR})^N \quad (23)$$

resulta la expresión linealizada

$$y_o = b x_o \quad (24)$$

Comparando la ecuación (24) con la (13), resulta la forma general

$$b = \frac{\sum x_o \cdot y_o}{\sum (x_o)^2} = -\frac{1}{B^N} \quad B = \sqrt[N]{-\frac{\sum (x_o)^2}{\sum x_o \cdot y_o}} \quad (25)$$

y, consecuentemente,

$$B(N) = \sqrt[N]{-\left\{\frac{\sum_k [(t_k - T_{PR})^{2N}]}{\sum_k \left\{ (t_k - T_{PR})^N \cdot \ln \left[\frac{V_o(t_k) - V_o}{(V_{PR} - V_o)} \right] \right\}}\right\}} \quad (26)$$

La ecuación (26) desarrolla una posible expresión para la determinación del parámetro B como función del exponente N, siendo $k = 1, 2, \dots, n$ el número de valores empíricos con que cuenta el ensayo de barrido.

Variación de presión: Procedimiento 2 (proceso a caudal constante).

Reescribiendo la expresión de ajuste para la variación de la presión (p) durante el barrido,

$$p(t) = P - (P - P_{PR}) \exp\left\{-[(t - T_{PR})/C]^M\right\} \quad t \geq T_{PR} \quad (4)$$

despejando la función exponencial de (4)

$$\frac{p(t) - P}{(P_{PR} - P)} = \exp\left\{-\left(\frac{1}{C}\right)^M (t - T_{PR})^M\right\} \quad (27)$$

aplicando el logaritmo natural a la expresión (27)

$$\ln\left\{\frac{p(t) - P}{(P_{PR} - P)}\right\} = -\left(\frac{1}{C}\right)^M (t - T_{PR})^M \quad (28)$$

definiendo las variables como

$$y_p = \ln\left\{\frac{p(t) - P}{(P_{PR} - P)}\right\} \quad c = -\left(\frac{1}{C}\right)^M \quad x_p = (t - T_{PR})^M \quad (29)$$

se obtiene la expresión linealizada

$$y_p = c x_p \quad (30)$$

Comparando la ecuación (30) con la (13) y dada la expresión (12), resulta entonces la representación general

$$c = \frac{\sum x_p \cdot y_p}{\sum (x_p)^2} = -\frac{1}{C^M} \quad C = \sqrt[M]{-\frac{\sum (x_p)^2}{\sum x_p \cdot y_p}} \quad (31)$$

y, consecuentemente

$$C(M) = \sqrt[M]{\frac{\sum_k [(t_k - T_{PR})^{2M}]}{\sum_k \left\{ (t_k - T_{PR})^M \cdot \ln \left[\frac{p(t_k) - P}{(P_{PR} - P)} \right] \right\}}} \quad (32)$$

De la aplicación de la ecuación (32) resulta una posible expresión para la determinación del parámetro C como función del exponente M, siendo $k = 1, 2, \dots, n$ el número de valores empíricos con que cuenta el ensayo de barrido.

Las ecuaciones (20), (26) y (32) demuestran que, en principio, sería necesario ajustar solamente los coeficientes N y M, ya que los coeficientes A, B y C quedarían determinados por los valores experimentales, estando B y C también definidos a partir de los valores propuestos de N y M, respectivamente. Por su parte, N y M pueden ajustarse manualmente u obtenerse mediante la utilización de los propios solvers con que cuentan las planillas electrónicas de cálculo.

Como esta metodología es esencialmente matemática, se requiere evaluar la calidad de los ajustes con respecto a los valores experimentales (proceso generalmente realizado en forma gráfica) y reajustar estos coeficientes conforme con la física del problema. De todas formas, los coeficientes obtenidos a partir de (20), (26) y (32) pueden resultar los puntos de partida para procedimientos de ajuste manual o que impliquen la utilización de solvers.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LOS PARÁMETROS DE AJUSTE

Como lo establecen Juan y Faulín (2005), el Análisis de Sensibilidad “estudia cómo afectaría a la solución óptima obtenida y a la función objetivo el cambio (dentro de un rango predeterminado) de uno de los parámetros, manteniendo fijos los restantes”.

Por otra parte, como lo reconocen Kendall y Kendall (1997), la manera más simple de identificar una tendencia es por juicio gráfico, mediante la simple observación de una representación gráfica, y su utilidad se debe a la habilidad para realizar análisis de sensibilidad mediante la utilización de planillas electrónicas de cálculo. Análogamente, Juan y Faulín (2005) observan la íntima relación de este tipo de análisis con el uso de las hojas de cálculo, metodología también utilizada en el presente trabajo.

Debido al análisis previo, se considera solamente la sensibilidad del método a las variaciones de los parámetros A, N y M. Se establece una variación de $\pm 30\%$ para cada uno de ellos con respecto a los valores obtenidos como ajustes optimizados, recordando que tanto M como N no deben superar la unidad. Por otra parte, en el caso de las aproximaciones mediante una ecuación polinómica, el ajuste muchas veces lleva a funciones no monótonas y es difícil visualizar la dependencia de dichas funciones con cada parámetro.

Resultados

A continuación se presentan las tablas resumen, las curvas de ajuste de los resultados experimentales y las consecuentes curvas de permeabilidad relativa para cuatro casos de análisis.

Los valores de los coeficientes de correlación, r , de todos los ajustes resultan negativos dado que las pendientes de las expresiones linealizadas, ecuaciones (18), (24) y (30), son negativas ($a < 0$, $b < 0$, $c < 0$). Esto es así dado que tanto A , B como C deben tomar valores positivos pues son coeficientes de una función exponencial necesariamente decreciente, según las definiciones del modelo utilizado en el presente trabajo, ecuaciones (2), (3) y (4).

Con la sola excepción del ajuste de la variación temporal de la presión de barrido en el caso de la Berea 8, las restantes aproximaciones mostraron elevados coeficientes de determinación de los ajustes, r^2 , (próximos a la unidad). De esta forma, de los ocho ajustes que se debieron realizar, siete se pudieron hacer analíticamente, según la opción 1 (minimizando el funcional L y resolviendo solo para N y/o M , según corresponda), ajustando eficientemente al modelo físico. En el caso de la Berea 8, se debió reajustar teniendo en cuenta el comportamiento físico del barrido. Se probaron otros ajustes, como ser la opción 2 (minimizando el funcional L , pero resolviéndolo para el coeficiente B independientemente del valor de N) y la opción 3 (maximizando el valor de r^2 , y resolviéndolo para el coeficiente B independientemente del valor de N). Lo expuesto es presentado en las Tablas 1 y 2 (las opciones seleccionadas están coloreadas) y representado gráficamente en las Figs. 1 y 2. Como puede observarse, en el caso del ajuste del volumen de petróleo las tres metodologías llevan a resultados prácticamente idénticos, no así para el caso del ajuste de la presión de entrada, donde la opción 2 muestra un mejor ajuste físico a pesar de presentar un bajo valor del coeficiente r^2 .

Tabla 1. Opciones de ajuste de coeficientes para el volumen de petróleo obtenido, Berea 8.

	opción	N	B	r	r^2	L
1	L mínimo, $B=B(N)$	0,824	23.634	-0,9926	0,9852	0,1516
2	L mínimo, (B,N) indep.	0,787	24.764	-0,9913	0,9827	0,1312
3	máximo r^2	0,931	23.261	-0,9941	0,9882	0,3538

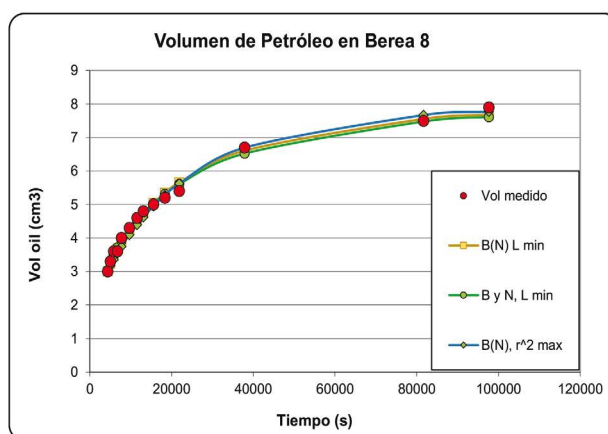


Figura 1. Comparación de opciones de ajuste para la variación del volumen de petróleo, Berea 8.

Tabla 2. Opciones de ajuste de coeficientes para la variación de la presión de barrido, Berea 8.

	opción	M	C	r	r^2	L
1	L mínimo, $C=C(M)$	0,850	14,514	-0,344	0,118	16,562
2	L mínimo, (C,M) indep.	0,850	2,945	-0,344	0,118	0,597
3	máximo r^2	0,1883	258,05	-0,693	0,480	4,970

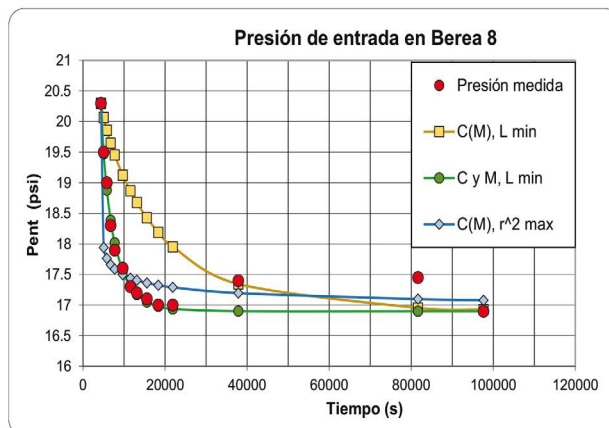


Figura 2. Comparación de opciones de ajuste para la variación de la presión de barrido, Berea 8.

Los casos analizados corresponden a ensayos de barrido ya presentados (González y Prado, 2014, 2016), correspondiendo a dos procedimientos a gradiente de presión constante (CASO I: muestra 8-20-6S y CASO II: muestra 4-10-18) y a dos procedimientos a caudal de inyección constante (CASO III: Berea 8 y CASO IV: Berea 27).

En la obtención de los parámetros de ajuste se utilizó siempre la opción 1, salvo el caso previamente comentado. El análisis de sensibilidad se realizó mediante el uso de una planilla de Excel, estableciéndose que la “variación tolerable” (Juan y Faulín 2005) de los coeficientes de ajuste sea del $\pm 30\%$ y teniendo en cuenta que los coeficientes N y M no pueden superar la unidad.

En las Tablas 3 a 6, se presentan estos parámetros de ajuste, los coeficientes que miden la bondad de dichos ajustes y los extremos de variación de los parámetros con la finalidad de interpretar su influencia en los cálculos de las permeabilidades relativas.

En las Figs. 3, 5, 7 y 9, se presentan los gráficos de ajuste optimizados y de análisis de sensibilidad mediante la variación de parámetros, para cada uno de los cuatro casos. En los casos I y II el análisis de sensibilidad se realizó sobre los coeficientes A y N , mientras que en los casos III y IV los coeficientes sobre los cuales se efectuó el análisis de sensibilidad fueron N y M .

En las Figs. 4, 6, 8 y 10 se presentan las curvas de permeabilidades relativas obtenidas por el método de Jones y Roszelle (1978). Se comparan las curvas calculadas con los valores optimizados (representadas en los gráficos por los “marcadores”) y las correspondientes a los valores extremos. Aún con la gran variación propuesta para los parámetros de ajuste, puede observarse en los gráficos de permeabilidad relativa que sus valores no discrepan apreciablemente, salvo en algunos casos en el extremo de saturación de agua irreducible, lo que no representa un problema ya que dicho valor se determina en forma experimental durante el barrido y no presenta mayores dificultades el modificarlo en el gráfico (esto no se realizó en este trabajo, pues el fin es mostrar la discrepancia con el valor optimizado).

Tabla 3. Procedimiento a gradiente de presión constante – Ajustes optimizados.

CASO	muestra	A	N	B	$r(A)$	$r^2(A)$	$r(N,B)$	$r^2(N,B)$
I	8-20-6S	39.343	0,858	16.879	-0,9776	0,9557	-0,9991	0,9982
II	4-10-18	29.146	0,820	45.600	-0,9850	0,9703	-0,9849	0,9701

Tabla 4. Procedimiento a gradiente de presión constante – Variación de parámetros.

CASO	muestra	A	N	B	A mín	A máx	N mín	N máx
I	8-20-6S	39.343	0,858	16.879	27.540	51.145	0,600	1,000
II	4-10-18	29.146	0,820	45.600	20.400	37.890	0,574	1,000

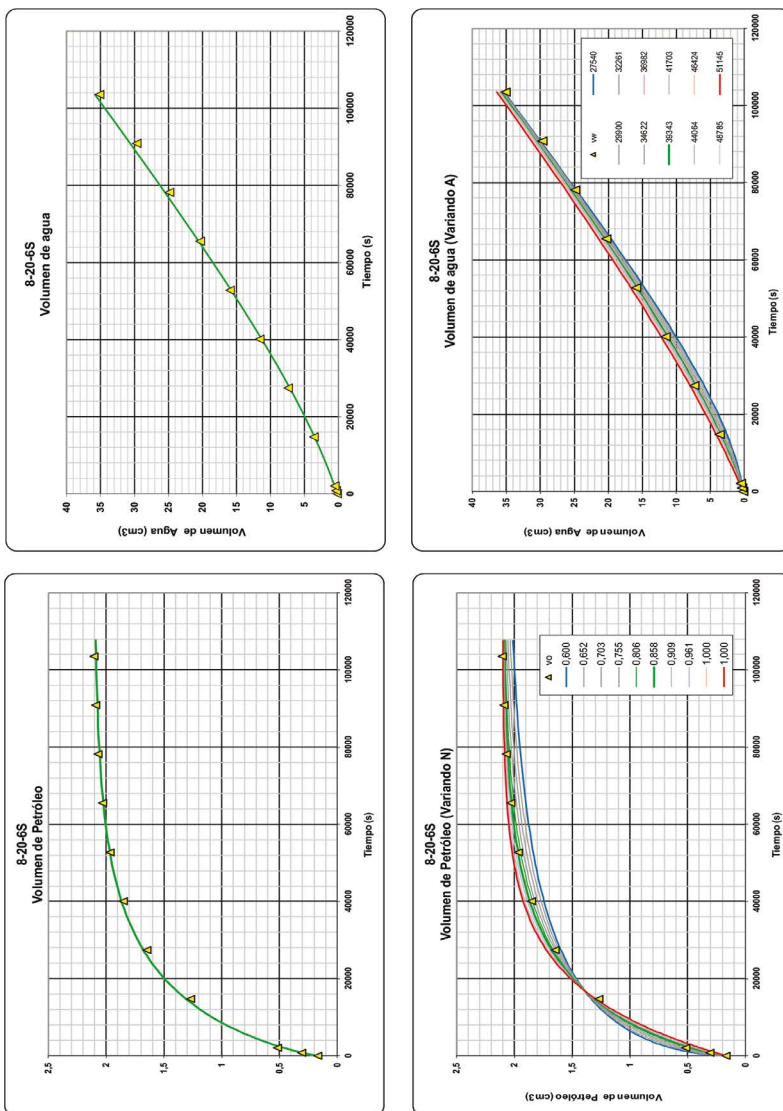
Tabla 5. Procedimiento a caudal constante – Ajustes optimizados.

CASO	muestra	N	B	M	C	$r(N,B)$	$r^2(N,B)$	$r(M,C)$	$r^2(M,C)$
III	Berea 8	0,824	23.634	0,850	2.945	-0,9926	0,9852	-0,344	0,118
IV	Berea 27	0,658	60.434	1,000	14.417	-0,9908	0,9818	-0,8793	0,7732

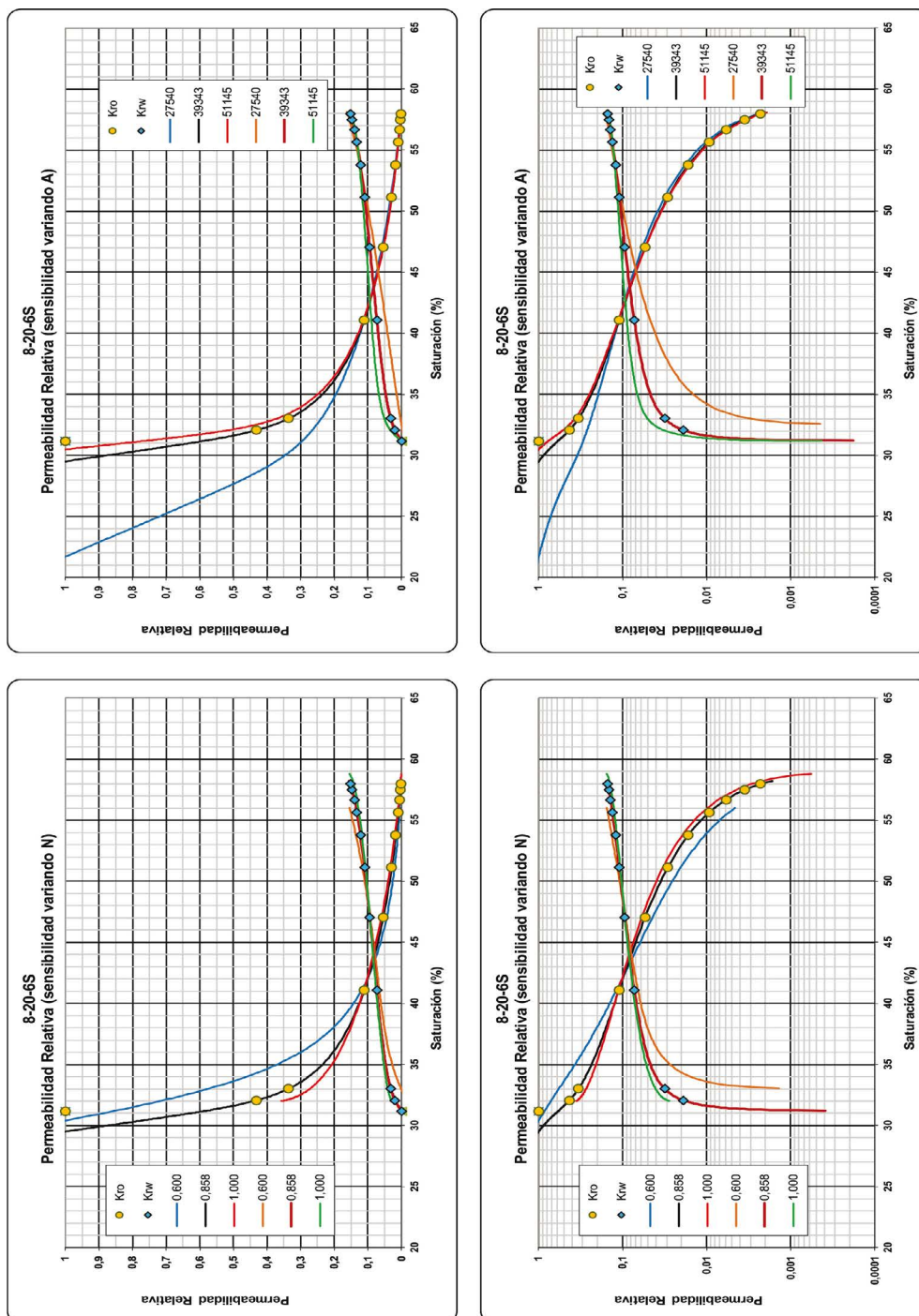
Tabla 6. Procedimiento a caudal constante – Variación de parámetros.

CASO	muestra	N	B	M	C	N mín	N máx	M mín	M máx
III	Berea 8	0,824	23.634	0,850	2.945	0,577	1,000	0,595	1,000
IV	Berea 27	0,658	60.434	1,000	14.417	0,461	0,856	0,700	1,000

CASO I (Muestra 8-20-6S) – procedimiento a gradiente de presión constante

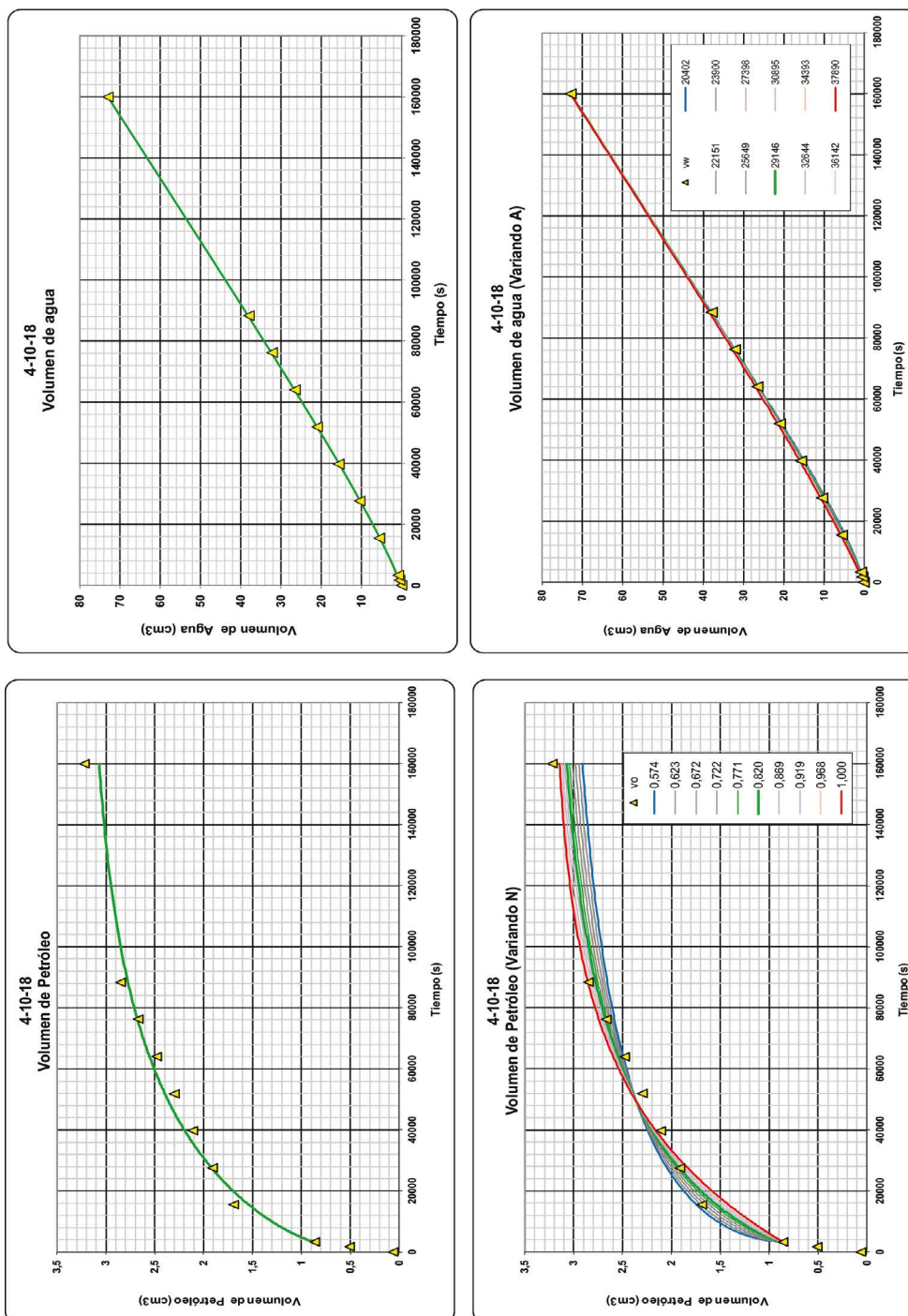


Figuras 3. Ajuste optimizado y con variación de parámetros, CASO I.

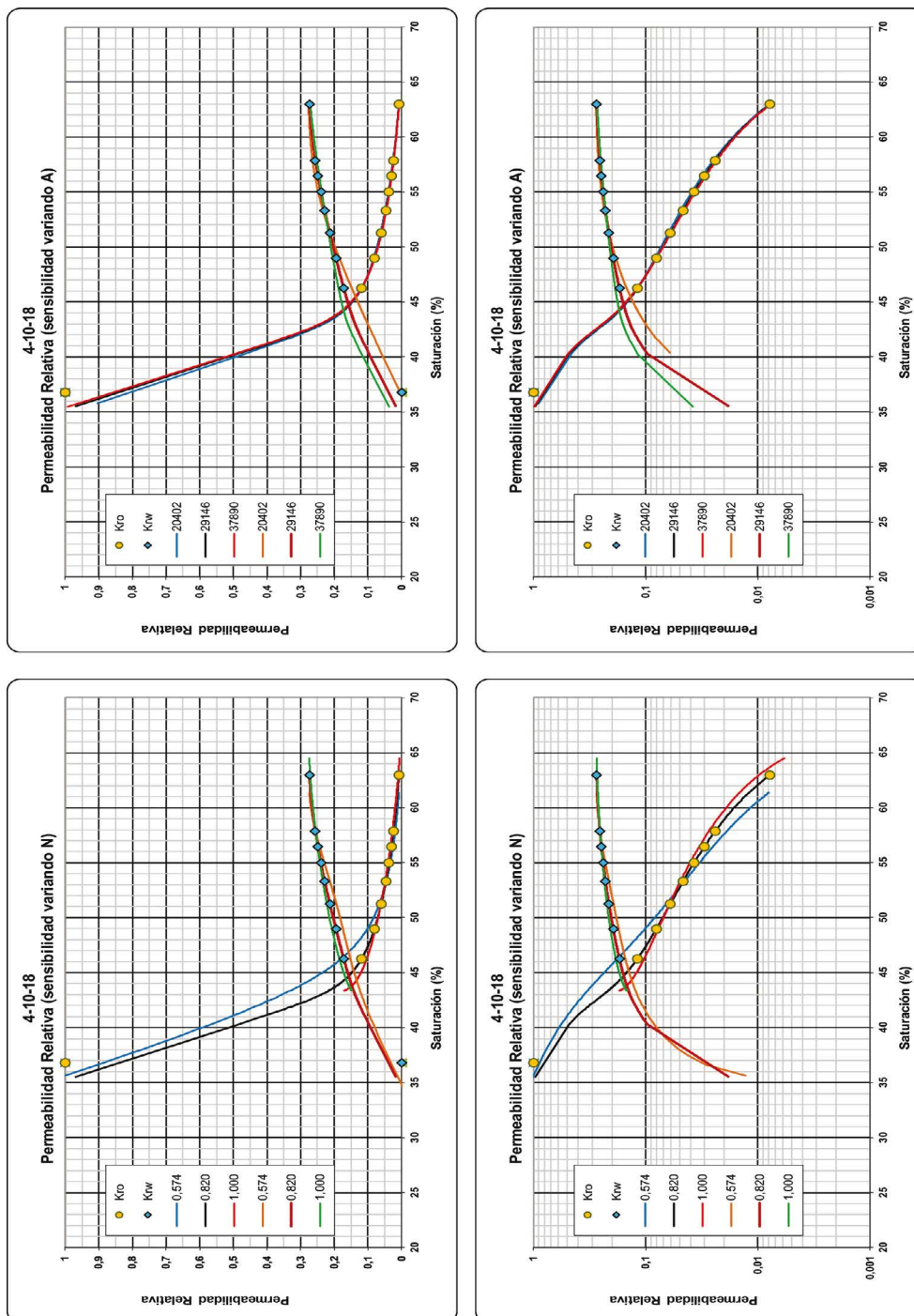


Figuras 4. Permeabilidad relativa vs. Saturación, con variación de parámetros, CASO I.

CASO II (Muestra 4-10-18) – procedimiento a gradiente de presión constante

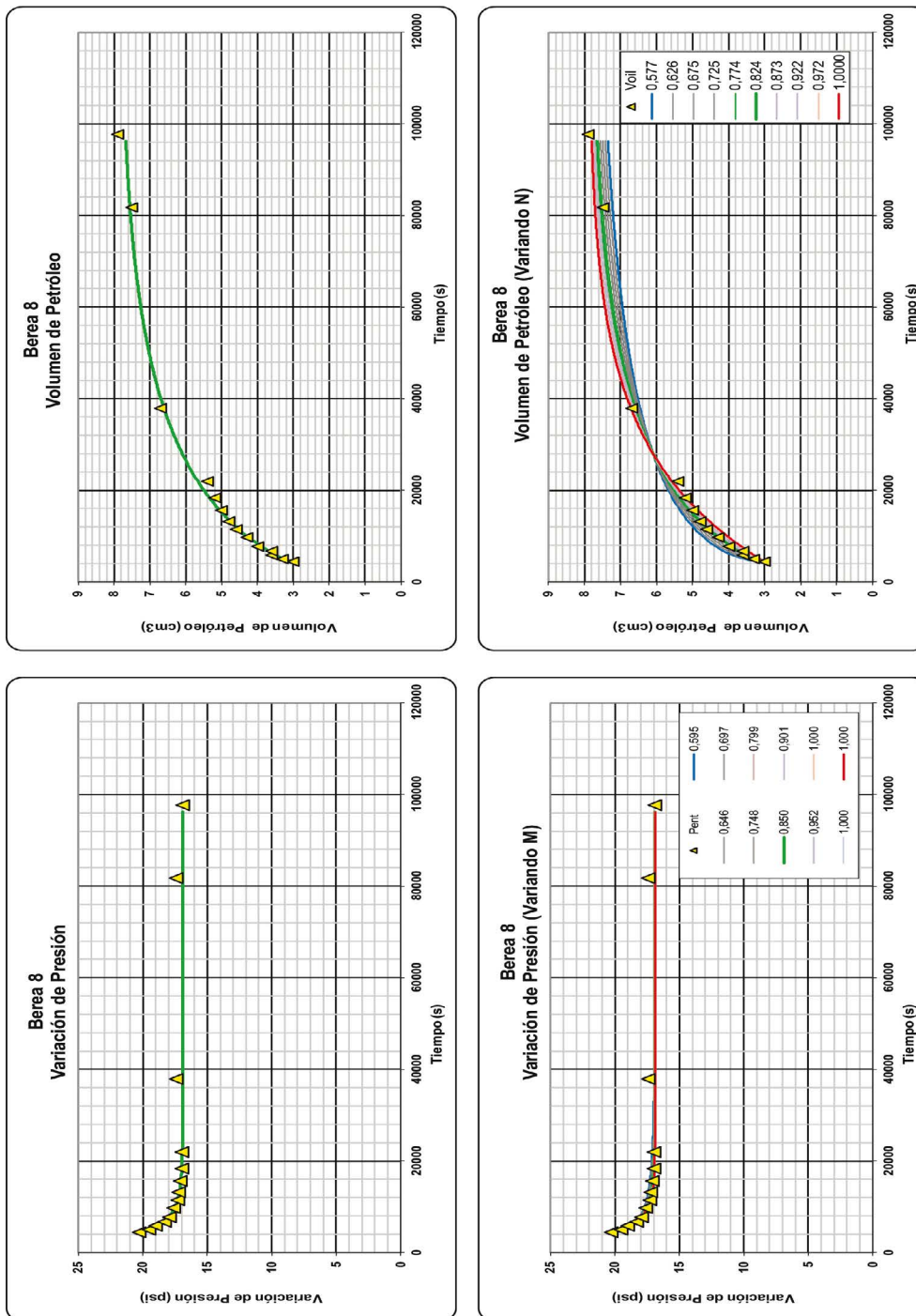


Figuras 5. Ajuste optimizado y con variación de parámetros, CASO II.

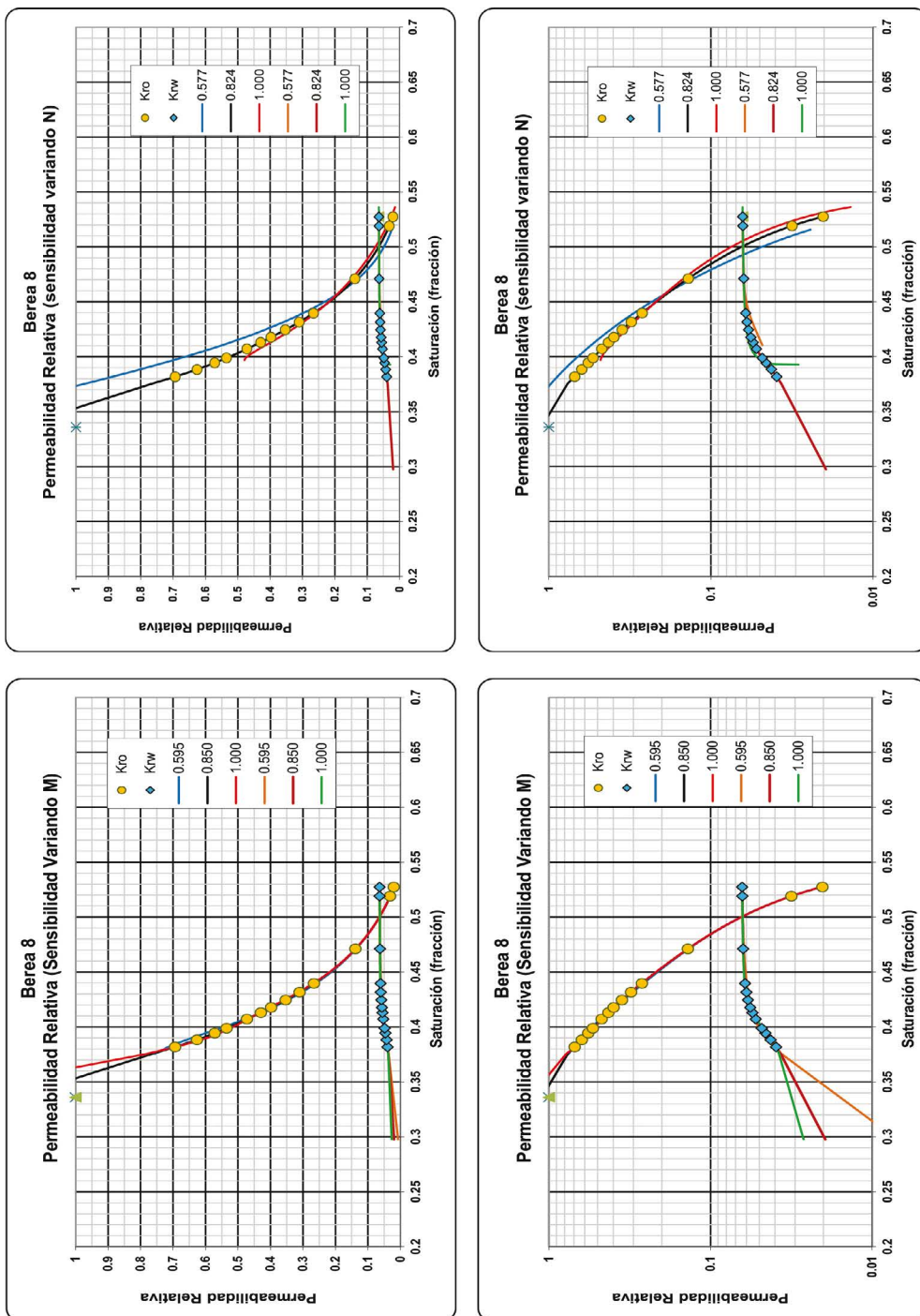


Figuras 6. Permeabilidad relativa vs. Saturación, con variación de parámetros, CASO II.

CASO III (Berea 8) – procedimiento a caudal constante

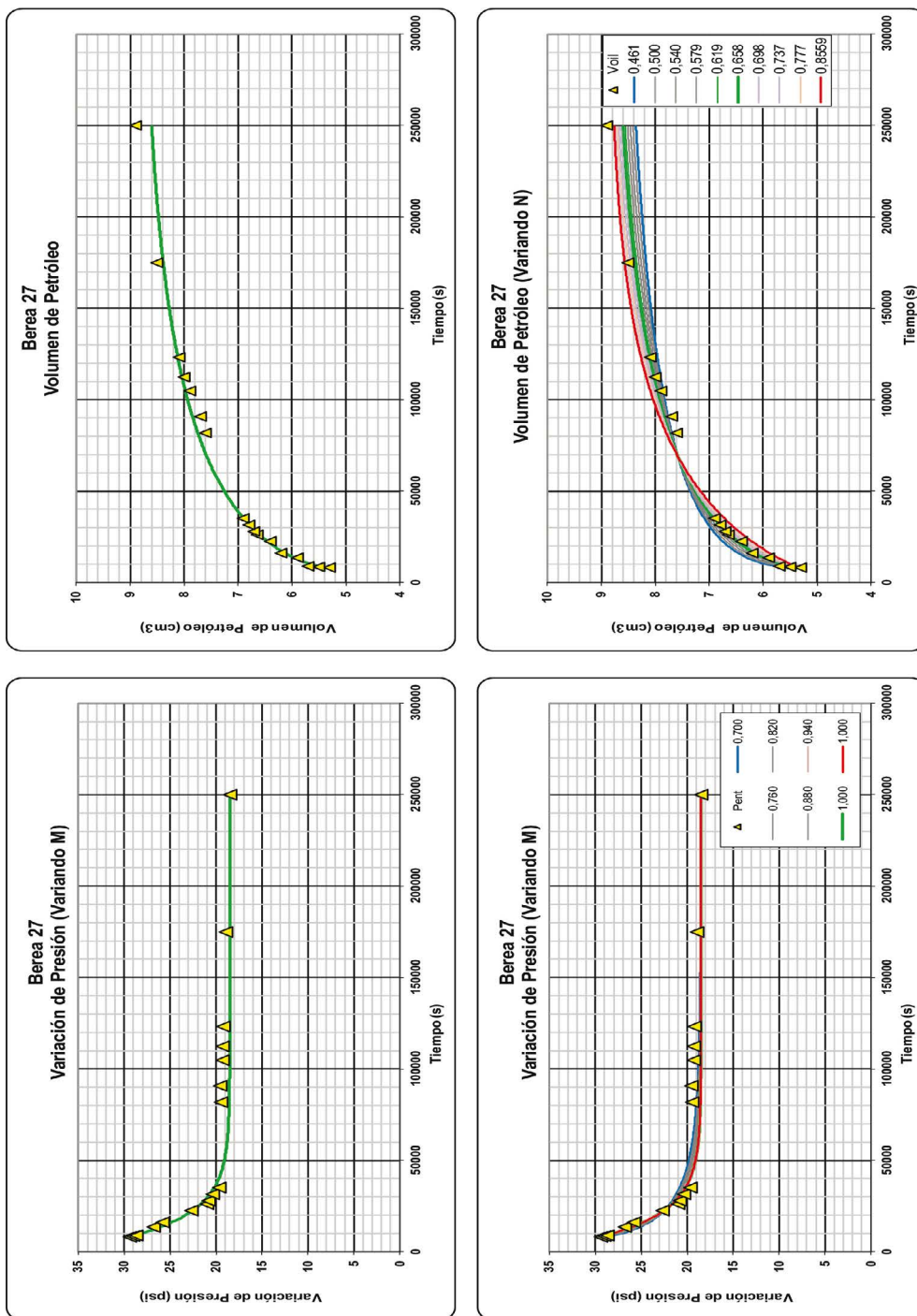


Figuras 7. Ajuste optimizado y con variación de parámetros, CASO III.

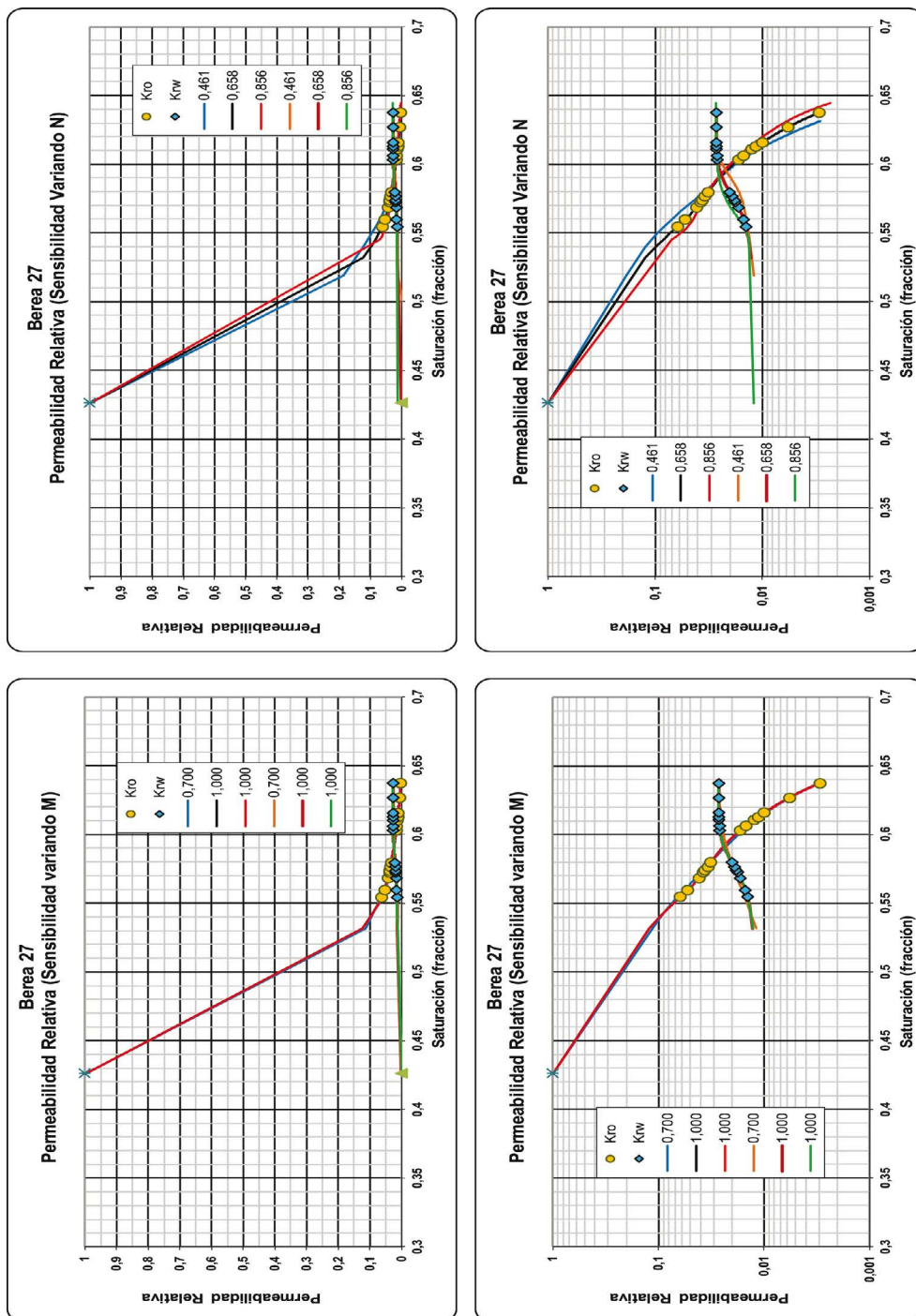


Figuras 8. Permeabilidad relativa vs. Saturación, con variación de parámetros, CASO III

CASO IV (Berea 27) – procedimiento a caudal constante



Figuras 9. Ajuste optimizado y con variación de parámetros, CASO IV.



Figuras 10. Permeabilidad relativa vs. Saturación, con variación de parámetros, CASO IV.

CONCLUSIONES

Con la linealización y el análisis de mínimos cuadrados propuestos, se simplifica aún más el proceso de determinación de los parámetros de ajuste de las curvas de barrido.

Los parámetros independientes resultan ser, uno solo (N) para el procedimiento a gradiente de presión constante y dos (N y M) para el procedimiento de caudal de inyección constante, ya que los restantes parámetros (A y B o B y C) resultan aproximados a partir de los datos experimentales, siendo además $B = B(N)$ y $C = C(M)$. De todas formas, la física del problema podría determinar la necesidad de corregir estos coeficientes, lo que puede realizarse utilizando los solvers incorporados en las planillas de cálculo, procedimiento rápido y simple por la monotonía de las curvas de ajuste.

El análisis de sensibilidad sobre los parámetros A, N y M muestra que aún una variación relativamente importante de dichos coeficientes (considerada del orden del 30%) no influye significativamente en la obtención de las curvas de permeabilidades relativas, demostrando así las bondades de esta metodología.

El procedimiento presentado para la obtención de las curvas de permeabilidades relativas resulta en una metodología mucho más simple cuando se la compara con otros métodos analíticos y/o gráficos más laboriosos, obteniéndose resultados semejantes.

REFERENCIAS CITADAS

- Burden R.L. y J.D. Faires, 1998, "Análisis numérico", 6ª edición, International Thomson Editores, México.
- Chapra S.C. y R.P. Canale, 1999, "Métodos Numéricos para Ingenieros", 3ª edición, McGraw-Hill, México.
- Crotti, M. A., 2004, "Movimiento de fluidos en reservorios de hidrocarburos", 1ª edición, Estudio Sigma S.R.L., Buenos Aires.
- González, E.L. y R.A. Prado, 2014, "Ajustes de curvas experimentales para la determinación de permeabilidades relativas en sistemas agua-petróleo por el método no estacionario, a presión de flujo constante", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos; Tomo: Simposio de Evaluación de Formaciones, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG), CD Trabajos Técnicos, p. 325-343, Mendoza, Argentina.
- González, E.L. y R.A. Prado, 2016, "Funciones simples de ajuste para la determinación de la permeabilidad relativa en sistemas de agua-petróleo bajo condiciones de caudal constante, por el método no estacionario"; 6to. Congreso de Producción y Desarrollo de Reservas, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG), Pendrive Trabajos Técnicos 16 p., San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Jones, S.C. y W.O. Roszelle, May 1978, "Graphical Techniques for Determining Relative Permeability from Displacement Experiments", SPE 6045, J. Pet Tech., p. 807-817.
- Juan A.A. y Faulín J., 2005, "Análisis de Sensibilidad con Excel y LINDO", (Analisis_sensibilidad.pdf www.uoc.edu), Universitat Oberta de Catalunya.
- Kendall K.E. y J.E. Kendall, 1997, "Análisis y Diseño de Sistemas", 3ª edición, Pearson Educación, México.