



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**Interpretación de pruebas hidráulicas en acuíferos de México,  
por medio de técnicas de análisis derivativo,  
adaptadas de la ingeniería petrolera.**

T E S I S

Que para optar por el grado de  
Maestra en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

**Carmen Gabriela Luna Izazaga**

TUTOR:

Dr. José Antonio Hernández Espriú  
(Facultad de Ingeniería, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dra. Blanca Lucía Prado Pano (Instituto de Geología, UNAM)  
Dr. Eric Morales Casique (Instituto de Geología, UNAM)  
Dr. José Iván Morales Arredondo (Instituto de Geofísica, UNAM)  
Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez (Instituto de Ingeniería Civil, UANL)



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas**

### **Tesis Digitales**

#### **Restricciones de uso**

#### **DERECHOS RESERVADOS ©**

#### **PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

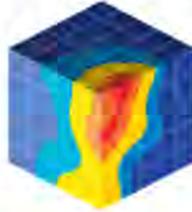
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.*

***Atentamente***

*Carmen Gabriela Luna Izazaga*

*Diciembre, 2017*



The  
HYDRO  
geology  
Group  
FACULTY OF ENGINEERING  
UNAM



## CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la tesis No. 22 del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM), como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

*This master's dissertation represents the Thesis No. 22 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM), as a part of their scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.*

[www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology](http://www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology)

Twitter: @hydrogeologymx

*Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN112815, “Interpretación avanzada de pruebas hidráulicas en acuíferos, integrando técnicas analíticas, modelación numérica y técnicas adaptadas de la Ingeniería Petrolera”, a cargo del Dr. José Antonio Hernández Espriú.*

*“Que el cuerpo haga lo que quiera.  
Yo no soy el cuerpo, yo soy la mente”*

*Rita Levi-Montalcini*

## *Dedicatoria*

*A mi madre, Carmen, a quien debo y dedico todo lo que soy.*

*¡Te amo inmensamente!*

*A mi familia: David, Lucero, Vanessa y Javier,*

*y especialmente a mi tío Ignacio.*

*A mi novio y mejor amigo, Edgar.*

*¡Gracias por tanto!*

*A todos quienes amo.*

## *Agradecimientos*

*A mi Alma Máter, la UNAM.*

*Al programa de becas para estudios de Posgrado CONACYT.*

*A mi tutor y estimado amigo, el Dr. Antonio Hernández Espriú, de quien he aprendido tanto los últimos seis años. Gracias por siempre impulsar mi desarrollo profesional Toño, ha sido todo un privilegio tener la oportunidad de aprender de ti.*

*A los miembros de mi jurado: Dr. Eric Morales, Dr. Iván Morales, Dra. Blanca Prado y Dr. Juan Manuel Rodríguez, cuyos enriquecedores consejos fueron de gran importancia para la conclusión y mejoramiento del presente trabajo.*

*Al Ing. Gabriel Salinas, Ing. Israel Castro, Ing. Alberto Arias y a todos los miembros del proyecto PAPIIT IN112815, con quienes desarrollé este proyecto. Gracias por el apoyo, el consejo y las facilidades otorgadas para la realización de mi trabajo de tesis.*

*Al Dr. Luis Marín, Dr. Erick Luna y Maestro David Velázquez, cuya guía académica fue una pieza clave durante el proceso de escritura de este trabajo.*

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Capítulo 1: Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	6
1.3 Objetivos	6
<b>Capítulo 2: Marco teórico</b>	<b>8</b>
2.1 Pruebas hidráulicas en acuíferos	8
2.2 Pruebas de presión en yacimientos petroleros	13
2.3 Interpretación por medio de análisis derivativo	14
2.4 Analogías entre pruebas hidráulicas y pruebas de presión	20
<b>Capítulo 3: Métodos</b>	<b>26</b>
3.1 Recopilación, análisis y depuración de la información	26
3.2 Proceso de reinterpretación	28
<b>Capítulo 4: Resultados y discusión</b>	<b>31</b>
4.1 Ejemplo del proceso de interpretación usando curvas diagnóstico	31
4.2 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en la zona de Baja California	36

4.3 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en el Bajío mexicano	51
4.4 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en la Cuenca de México	66
4.5 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en el Noreste de México	80
4.6 Aspectos finales	95
<b>Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras de investigación</b>	<b>101</b>
5.1 Conclusiones	101
5.2 Líneas futuras de investigación	105
<b>Referencias citadas</b>	<b>108</b>

## Resumen

La respuesta derivativa de la presión/abatimiento, comúnmente utilizada en la ingeniería de gas y petróleo, se ha convertido en la herramienta estándar para el análisis del comportamiento de los reservorios y pozos de extracción los últimos 30 años. Recientemente, los llamados gráficos diagnóstico han sido probados efectivamente en acuíferos. Sin embargo, esta poderosa técnica sigue siendo poco utilizada entre los profesionales de las aguas subterráneas. En este trabajo, se presenta la reinterpretación de 71 pruebas de bombeo a tasa constante, en entornos hidrogeológicos diversos, dentro de los principales acuíferos de México. Para ello, se llevó a cabo una integración de análisis con curvas tipo, gráficos diagnóstico y una adaptación general de soluciones analíticas para sistemas de petróleo y gas.

La reinterpretación consistió en tres etapas: [1] evaluación de las geometrías de flujo, con base en el análisis de la pendiente de la respuesta derivativa, además del cálculo de la dimensión de flujo, [2] estimación paramétrica, mediante el uso de gráficos especializados y ecuaciones adaptadas de la ingeniería de petróleo y gas, y [3] análisis convencional por medio curvas tipo y procedimientos de ajuste. Adicionalmente, se exploraron los efectos sobre la curva derivativa con la aplicación de diferentes intervalos de suavizamiento, utilizando el algoritmo de [Bourdet et al. \(1989\)](#).

Los resultados muestran que la respuesta derivativa del abatimiento es una técnica poderosa, que permite la identificación de geometrías de flujo, fronteras, daños y almacenamiento en el pozo de bombeo, simplificando la identificación del mejor modelo conceptual del acuífero, proporcionando así elementos de diagnóstico adicionales para realizar el procedimiento de ajuste. Esto, por ejemplo, puede ser resolutivo en la conocida cuestión de la no-unicidad del modelo de ajuste durante el análisis de pruebas en pozos, cuando se carece de pozos de observación.

## Abstract

The pressure/drawdown derivative analysis response, commonly used in the oil and gas engineering, has become the standard tool in reservoir and well behavior since the last 30 years. Recently, the so-called diagnostic plots have been effectively tested in aquifer; however, this powerful technique remain underused among groundwater professionals. In this work, the reinterpretation of 71 constant-rate pumping tests in dissimilar hydrogeological environments within the main aquifers of Mexico, is presented. For this purpose, an integration of type-curve analysis, diagnostic plots and overall adaptation of analytical solutions for oil and gas systems, was carried out.

The reinterpretation consisted of three steps: [1] the assessment of flow geometries through by evaluating the slope-based derivative signal and further flow dimension computation, [2] parametric estimation, by the use of specialized plots and equations adapted from the oil and gas engineering, and [3] conventional type-curve analysis and matching procedures. In addition, the effects on the derivative curve with the application of different smoothing intervals, using the [Bourdet et al. \(1989\)](#) algorithm was explored.

The results show that the drawdown derivative response is a powerful technique, allowing the identification of flow geometries, boundaries, damages and well storage in the pumping well, thus simplifying the identification of the best aquifers conceptual model, thus providing further diagnosis elements to perform the matching procedure. This, for instance, can be resolute in the well-known issue of the non-unicity matching model in well test analysis, particularly, whereas observation wells are lacking.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

Las pruebas hidráulicas en acuíferos (también llamadas pruebas o ensayos de bombeo), representan una parte fundamental en la planeación, gestión y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento del agua subterránea y en las estrategias de remediación de acuíferos. Su interpretación permite obtener aproximaciones de las propiedades de la unidad hidrogeológica en estudio y además es útil para realizar inferencias con relación al comportamiento hidráulico de dicha unidad (Renard, 2005), lo que ayuda para desarrollar modelos de producción de pozos de agua potable para el abastecimiento humano.

El fundamento de estas pruebas puede ser explicado en el contexto de la teoría de señales (Gringarten, 2008), donde una señal,  $I$ , es impuesta al sistema,  $S$ , para obtener una señal de salida,  $O$ . El planteamiento anterior es conocido como problema inverso y puede ser explicado mediante una función de transferencia,  $S=O/I$  (Bourdet, 2002).

El principio básico de las pruebas hidráulicas en acuíferos es análogo a las pruebas de presión para la caracterización dinámica de yacimientos de gas y aceite, realizadas en la industria petrolera (Spañe y Wurstner, 1993). Para ambos casos, las pruebas en pozos tienen su origen en la hidrogeología, con el desarrollo matemático de la ecuación de flujo en estado estacionario (Dupuit, 1863) y su posterior aplicación para el cálculo de propiedades de los acuíferos (Thiem, 1870).

Theis (1935) inicia la interpretación transitoria de pruebas hidráulicas por medio del análisis con curvas tipo, con la solución de flujo en estado transitorio para acuífero confinado, homogéneo e isótropo. Esta solución fue retomada por Cooper y Jacob

(1946), quienes la simplificaron e implementaron el método de la línea recta en gráficos semilogarítmicos.

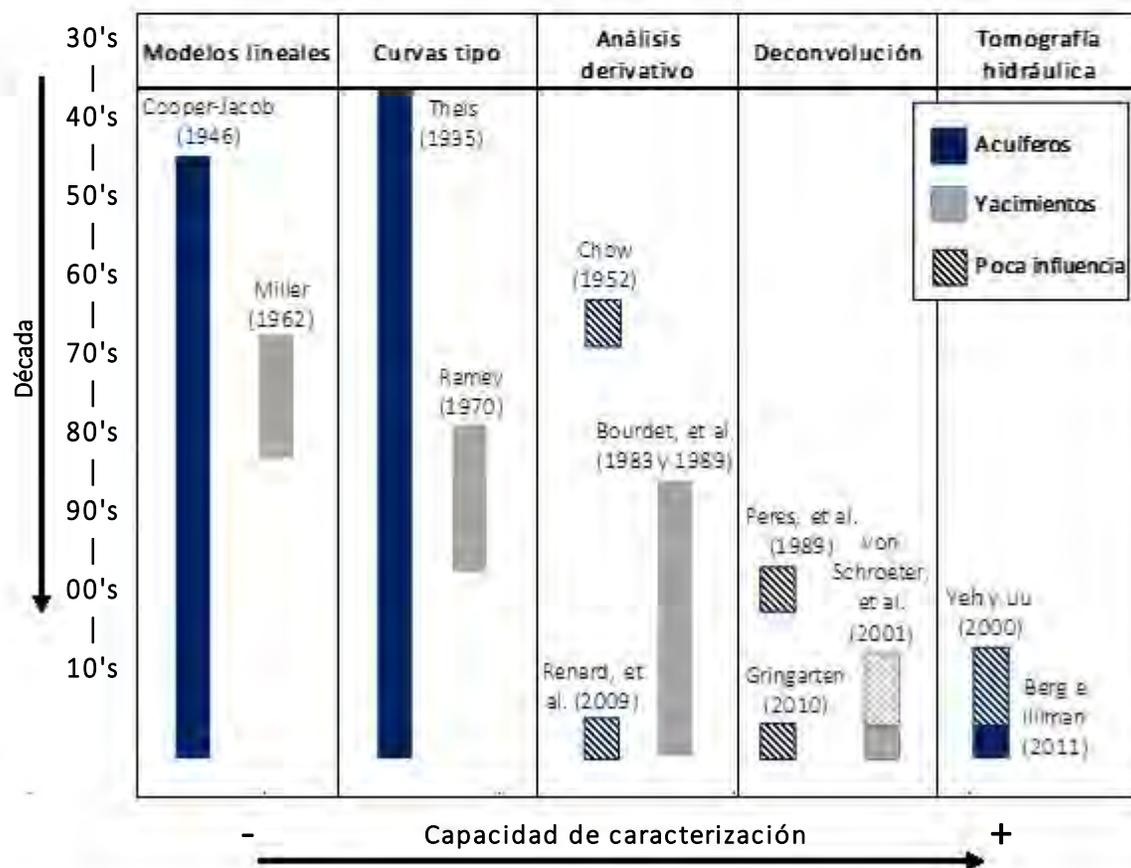
Chow (1952) propone el uso del concepto de derivada en la interpretación de pruebas en pozos, demostrando que, la transmisividad de un acuífero confinado ideal es proporcional al producto de la tasa de bombeo por la derivada logarítmica del abatimiento en tiempos tardíos de la prueba. Sin embargo, este descubrimiento no tuvo un gran impacto en la época.

Bourdet et al. (1983; 1989) retoman el concepto de la derivada logarítmica para su aplicación en ingeniería de yacimientos, revolucionando por completo las metodologías de interpretación y convirtiéndolo en un método estandarizado de análisis de pruebas de presión en toda la industria petrolera. Esta técnica permite modelar el flujo en el yacimiento e identificar fácilmente heterogeneidades, fronteras, geometrías de flujo y daños en el pozo, mediante el análisis simultáneo de la curva del decremento de la presión y su respectiva derivada (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008). Uno de los problemas más comunes es el ruido de la señal, el cual puede ser producto del error humano en las mediciones o en equipos electrónicos durante las pruebas de presión, que es amplificado por la derivada logarítmica. Por esta razón, ha sido necesario desarrollar algoritmos de suavizamiento que permiten atenuar el ruido producido por la aplicación de la derivada a los datos (Renard et al., 2009).

La aplicación de la derivada de la carga hidráulica como auxiliar en la interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos fue introducida nuevamente por Karasaki et al. (1988), y retomada posteriormente por Spane y Wurstner (1993). En el contexto global, a partir del año 2000 se tienen algunas referencias al análisis derivativo con aplicación hidrogeológica, especialmente después de la publicación de Renard et al. (2009), a partir de la cual ha ido en aumento la implementación de gráficos diagnóstico para la interpretación de pruebas hidráulicas, como se observa en la tabla 1.1. Sin embargo, su uso como herramienta de diagnóstico en hidrogeología ha sido comparativamente escaso, con respecto a los estudios realizados en la ingeniería de yacimientos en el ámbito petrolero o incluso en la caracterización dinámica de yacimientos geotérmicos.

En el ámbito hidrogeológico, en años recientes se han generado avances en materia de interpretación de pruebas hidráulicas, como son la deconvolución y la tomografía hidráulica, las cuales han tenido una mayor influencia en la última década. Sin embargo, los métodos convencionales (p.e. curvas tipo o modelos lineales) son los que más siguen prevaleciendo (Renard, 2005) (figura 1.1).

En el escenario nacional, el uso del análisis derivativo en hidrogeología es prácticamente nulo. Aunado a este hecho, se presenta la recurrente realización de pruebas de calidad deficiente, ejecutadas por medio de sondas, con intervalos muy amplios de tiempo entre mediciones e información incompleta del diseño constructivo de los pozos. Actualmente, la CONAGUA no reporta el uso de ninguna prueba interpretada con curvas-diagnóstico en sus documentos publicados de disponibilidad medial anual de acuíferos y unidades hidrogeológicas en México.



1.1. Línea temporal de evolución y aplicación de los métodos de interpretación de pruebas en pozos (Tomado de Hernández-Espino et al., 2015).

Estudio	País	Metodología	Contribución	Pruebas de bombeo	Pruebas slug
1. Barker, 1988	Reino Unido	Dimensión de flujo	Diseño de un modelo de flujo radial generalizado, para la interpretación de pruebas de bombeo en unidades hidrogeológicas con doble porosidad.	No	No
2. Karasaki et al., 1988	EUA	Derivada del abatimiento	Desarrollo de modelos con curvas tipo para la interpretación de pruebas slug.	No	No
3. Spane y Wurstner, 1993	EUA	Análisis derivativo	Interpretación de pruebas hidráulicas y pruebas slug, y desarrollo de un algoritmo de suavizamiento.	6	2
4. Singh, 2001	India	Derivada del abatimiento	Desarrollo de una metodología para la estimación de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados.	3	No
5. van Tonder et al., 2001	Sudáfrica	Dimensión de flujo	Análisis del comportamiento del cono de abatimiento, flujo en fracturas y dimensión de flujo, durante la ejecución de pruebas de bombeo escalonadas.	4	No
6. Beauheim et al., 2004	EUA/Canadá	Curvas diagnóstico y dimensión de flujo	Aplicación de la segunda derivada del abatimiento para el análisis del problema de la no unicidad en la interpretación de pruebas de bombeo.	No	No
7. Renard, 2005	Suiza	Derivada del abatimiento, curvas diagnóstico y dimensión de flujo	Aplicación de la derivada del abatimiento como herramienta para la identificación del modelo más apropiado para la interpretación de pruebas de bombeo.	No	No

**Tabla 1.1.** Resumen de los principales artículos de enfoque hidrogeológico, con aplicación de las técnicas de análisis derivativo para el cálculo de propiedades de los acuíferos.

8. Renard et al., 2009	Suiza/España	Derivada del abatimiento y curvas diagnóstico	Presentación de un catálogo de curvas diagnóstico teóricas para la interpretación de pruebas de bombeo y desarrollo de una ecuación para el cálculo de la transmisividad en regímenes radiales.	No	No
9. Straface, 2009	Italia	Derivada del abatimiento	Estimación de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de un acuífero, en pruebas de bombeo de corta duración	No	No
10. Avcı et al., 2013	Turquía	Derivada del abatimiento y curvas diagnóstico	Desarrollo de una metodología complementaria para la estimación de parámetros hidráulicos en pruebas de bombeo que no se ajustan a modelos conocidos (curvas tipo).	No	No
11. Ji et al., 2014	Corea del Sur	Derivada del abatimiento	Identificación y caracterización de fracturas conductivas en un acuífero heterogéneo	Sí (# no especificado)	No
12. Xiao y Xu, 2014	Sudáfrica	Derivada del abatimiento	Propuesta de una metodología para la derivación e identificación de patrones de flujo en el análisis de pruebas de bombeo, en ambientes hidrogeológicos diversos	3	No
13. Sun et al., 2015	Sudáfrica	Curvas diagnóstico	Aplicación de curvas diagnóstico como herramienta para la identificación de regímenes de flujo, efectos de frontera y selección del modelo apropiado para la interpretación de pruebas de bombeo en un acuífero artesiano	2	No

**Tabla 1.1.** Continuación.

## **1.2 Justificación**

Se considera que la aplicación de las técnicas de análisis derivativo en el ámbito de la hidrología subterránea en México traerá las siguientes contribuciones: [1] se mejorará el análisis paramétrico y no paramétrico de los modelos teóricos de flujo en la República Mexicana, [2] se analizará con más detalle el estado y comportamiento hidráulico de los pozos que abastecen a la población, [3] se identificarán fronteras en acuíferos limitados, teniendo como resultado, inferencias más precisas del comportamiento hidráulico de las unidades hidrogeológicas estudiadas, así como del volumen de agua disponible en las mismas, y [4] a largo plazo se generarán líneas secundarias de investigación de impacto nacional que fusionarán a la ingeniería petrolera y la hidrogeología, trayendo consigo mayor eficiencia en la administración de este recurso.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Explorar a nivel nacional la aplicabilidad de las curvas diagnóstico, basadas en la respuesta derivativa del abatimiento en pozos de extracción de agua subterránea, para interpretar pruebas de bombeo en algunos acuíferos representativos de México.

### **1.3.2 Objetivos particulares**

- A. Establecer el estado del arte en la interpretación de pruebas hidráulicas en acuíferos y de presión en yacimientos petroleros, usando curvas diagnóstico.

- B. Explorar la aplicabilidad del método de análisis derivativo en ambientes hidrogeológicos diversos de la República Mexicana.
- C. Probar la eficiencia del análisis derivativo en la interpretación de pruebas de bombeo de calidad deficiente.
- D. Realizar una comparación de la respuesta obtenida en la caracterización de acuíferos en México con los métodos tradicionales y las técnicas adaptadas de la ingeniería petrolera, para identificar las ventajas y limitaciones que presenta cada una, y explorar la posibilidad de diseñar una metodología que integre ambas técnicas.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1 Pruebas hidráulicas en acuíferos

Una prueba de bombeo es un procedimiento de análisis de los pozos de extracción de agua subterránea y del acuífero en que se encuentran. Su metodología consiste en extraer agua, a caudal constante o variable, cuantificando periódicamente la evolución del nivel piezométrico (o nivel dinámico) debida al bombeo, en el pozo de extracción y en pozos de observación cercanos a éste (Villanueva e Iglesias, 1984).

El análisis de pruebas de bombeo toma como base soluciones analíticas de la ecuación general de flujo, mostrada a continuación para un medio poroso 3D, isotrópico y homogéneo, en estado transitorio:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} + \frac{F}{K} = \frac{S_s}{K} \frac{\delta h}{\delta t} \dots \dots \dots (2.1),$$

donde:  $h$ : carga hidráulica;  $F$ : recarga;  $K$ : conductividad hidráulica;  $S_s$ : almacenamiento específico;  $t$ : tiempo.

Diferentes trabajos han reportado soluciones particulares de la ecuación 2.1, cuyos aspectos más relevantes se mostrarán a continuación.

### 2.1.1 Interpretación por métodos convencionales

El abatimiento en la vecindad de un pozo es directamente proporcional al caudal de bombeo y al tiempo desde que éste inició, e inversamente proporcional a la transmisividad, al coeficiente de almacenamiento y al cuadrado de la distancia del pozo a cualquier punto del cono de abatimiento (Fletcher, 1996). El desarrollo matemático de esta relación da como resultado modelos que permiten conocer el valor de los parámetros hidráulicos del acuífero, categorizados principalmente, según el tipo de funcionamiento (libre, semiconfinado, confinado) y el régimen (estacionario, transitorio) en el sistema.

Para su validez, los métodos de interpretación de pruebas de bombeo toman en consideración las siguientes aseveraciones: [1] el agua contenida en la formación tiene viscosidad y densidad constantes, [2] el acuífero es horizontal y de extensión infinita, [3] es homogéneo e isótropo, [4] su espesor es constante en toda el área de influencia de la prueba, [5] previo al inicio del bombeo, la superficie potenciométrica es horizontal, [6] todos los cambios del nivel piezométrico se deben al bombeo, [7] el o los pozos poseen un diámetro infinitesimal, y [8] el agua que se bombea produce un inmediato descenso del nivel dinámico y no regresa al acuífero (Fetter, 2000; Delleur, 2006).

### 2.1.2 Método de Dupuit-Thiem

Dupuit (1863) desarrolló la ecuación base para la interpretación de pruebas de bombeo, válida únicamente para acuíferos confinados en estado estacionario, posteriormente modificada y aplicada para el cálculo de la transmisividad por Thiem (1906). La expresión resultante se conoce como fórmula de Dupuit-Thiem (Sánchez-Sau Román, 2012), y refleja la forma del cono de abatimiento en función de la distancia al pozo en dos puntos de observación,  $r_1$  y  $r_2$ , y sus respectivos abatimientos,  $s_1$  y  $s_2$ , mediante la expresión:

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} \dots \dots \dots (2.2),$$

donde:  $s_1, s_2$ : abatimiento en los puntos de observación;  $Q$ : caudal de extracción;  $T$ : transmisividad;  $r_1, r_2$ : distancia entre el pozo y los puntos de observación.

### 2.1.3 Método de Theis

La primera ecuación matemática que refleja la forma del cono de abatimiento para acuíferos confinados en régimen transitorio se debe a Charles Vernon Theis. La ecuación de [Theis \(1935\)](#) permite calcular el valor del abatimiento,  $s$ , a cualquier distancia del pozo de bombeo,  $r$ , y la transmisividad del acuífero,  $T$ , por medio de las expresiones:

$$T = \frac{QW(u)}{4\pi st} \dots \dots \dots (2.3),$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \dots \dots \dots (2.4),$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \dots \dots \dots (2.5),$$

donde:  $T$ : transmisividad;  $s$ : abatimiento;  $r$ : distancia al pozo de bombeo;  $S$ : coeficiente de almacenamiento;  $t$ : tiempo.

La concepción del estado transitorio permitió la incorporación del concepto de coeficiente de almacenamiento de un acuífero,  $S$ :

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \dots \dots \dots (2.6).$$

### 2.1.4 Método de Cooper y Jacob

Cooper y Jacob (1946) desarrollaron una simplificación de la solución de Theis (1935), planteando que, debido a que la integral exponencial de  $W(u)$  se aproxima por medio de una serie de Taylor, cuando el valor del tiempo,  $t$ , tiende a infinito (a tiempos tardíos de la prueba de bombeo), el valor de  $u$  es tan pequeño que la serie puede ser truncada. Para este caso el abatimiento en el acuífero para un tiempo dado se calcula como:

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \text{Log} \frac{2.25Tt}{r^2 S} \dots \dots \dots (2.7).$$

Cooper y Jacob (1946) implementaron el método de la línea recta, que consiste en representar en un gráfico semilogarítmico los datos de tiempo y abatimiento del nivel dinámico, para posteriormente trazar una recta que pasa a través de la serie de puntos y que se extiende hasta cortar al eje de las abscisas en cierto valor de tiempo,  $t_0$ . El valor del abatimiento por ciclo logarítmico se obtiene al calcular la pendiente de la recta,  $m$ . (Fletcher, 1996; Fetter, 2000).

Para el cálculo del coeficiente de almacenamiento con esta metodología, es necesario contar con el registro del abatimiento en un pozo de observación, situado a una distancia conocida,  $r$ . Los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero se calculan empleando las ecuaciones:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \dots \dots \dots (2.8),$$

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \dots \dots \dots (2.9).$$

Esta metodología, se ha convertido en la opción más utilizada para interpretar pruebas hidráulicas (ver, p.e. [Halford et al., 2006](#)), sin embargo, su aplicación se encuentra limitada a la ocurrencia de periodos de flujo radial, para garantizar que el flujo hacia el pozo sigue un modelo theisiano. Actualmente, una gran cantidad de pruebas hidráulicas se interpretan con el método de [Cooper y Jacob \(1946\)](#), independientemente de las geometrías de flujo presentes, restando confiabilidad a los resultados. Como se discutirá más adelante, una de las grandes ventajas de la derivada del abatimiento, es que permite identificar con facilidad periodos de flujo radial infinito.

[Hantush y Jacob \(1955\)](#) introducen una nueva variable a la interpretación de pruebas de bombeo, el factor de goteo del acuitardo al acuífero, con lo cual inicia el desarrollo de métodos para el análisis de acuíferos semiconfinados. Posteriormente, [Neuman y Witherspoon \(1970\)](#) implementan la primera metodología para la interpretación de ensayos en acuíferos libres, introduciendo el concepto de rendimiento específico de un acuífero,  $S_y$ .

Consecutivamente, se desarrollaron numerosas variantes de estos métodos, aplicables para condiciones específicas del acuífero y su entorno, por ejemplo, acuíferos con diversos patrones de fracturas ([Gringarten y Witherspoon, 1972](#); [Gringarten y Ramcy, 1974](#); [Moench, 1984](#); [Barker, 1988](#)), acuíferos heterogéneos ([Butler, 1988](#)), fracturas de conductividad infinita ([Daviau, 1985](#)), y fronteras de flujo y no flujo ([Moench, 1985](#)). No obstante, prácticamente todos estos trabajos provinieron de desarrollos petroleros (p.e. [Gringarten et al., 1974](#); [Cinco-Ley et al., 1978](#); [Cinco-Ley y Samaniego, 1981](#)).

Es habitual que más de un modelo matemático pueda satisfacer la interpretación de una prueba hidráulica, por lo que resulta imperativo integrar cuidadosamente la información geológica e hidrogeológica disponible, con la finalidad de descartar opciones y llegar, si es posible, a una solución única. La no-unicidad en pruebas en pozos, es un tópico documentado y discutido en la literatura ([Gringarten, 2008](#)). Para estos casos, el empleo de metodologías derivativas (primera y segunda derivada) ha representado una herramienta auxiliar de utilidad (ver, p.e. [Beauheim et al., 2004](#)).

## 2.2 Pruebas de presión en yacimientos petroleros

La respuesta de la presión en una formación productora ante la extracción de hidrocarburos, refleja la geometría y las propiedades del flujo en el sistema. Con base en este hecho, se han desarrollado modelos matemáticos (mencionados anteriormente) que relacionan los parámetros del yacimiento con la respuesta de la presión en el pozo, en consecuencia, al cotejar la respuesta del modelo con la respuesta medida en el yacimiento, es posible inferir que los parámetros del modelo son iguales a los del sistema real. A este proceso se le denomina caracterización dinámica y se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Esquema de la representación matemática de una prueba de presión (Modificado de Escobar-Macualó, 2003).

Las pruebas de presión tienen como fundamento causar perturbaciones en la presión interna del sistema, al someter al o los pozos de extracción a un impulso, inducido mediante un cambio en el gasto de producción de hidrocarburos, y así medir la respuesta de las variaciones en la presión de fondo del yacimiento.

Las pruebas de presión se realizan con propósitos variados: [1] determinar la capacidad del reservorio para producir hidrocarburos, [2] identificar la presencia de daño a la formación y cuantificarlo, [3] reconocer posibles contactos geológicos, [4] establecer las fronteras (estratigráficas y/o estructurales) del yacimiento, [5] encontrar heterogeneidades en la formación, y [6] detectar comunicaciones entre pozos productores.

Las pruebas de un solo pozo (decremento, incremento, inyección, decaimiento y gasto variable) permiten evaluar el modelo de flujo de hidrocarburos dentro del yacimiento y calcular los parámetros asociados a dicho modelo, así como las condiciones de eficiencia de la terminación del pozo (factor de daño). Por otro lado, las pruebas multipozo (interferencia, pulsos) proporcionan información con relación al grado de conectividad entre diversas zonas del yacimiento y la capacidad de almacenamiento de la formación.

### 2.3 Interpretación por medio de análisis derivativo

La geometría de flujo en un yacimiento puede seguir diversos patrones, que se presentan en intervalos aislados o como una combinación de dos o más de ellos, dependiendo de la manera en que esté terminado el pozo, de los elementos que limiten al medio geológico y de las heterogeneidades y discontinuidades (estructurales o estratigráficas) presentes, como fallas, anisotropía, acuíferos, fracturas y doble o triple porosidad (Gómez, et al. 2014).

El análisis derivativo, popularizado a partir de los trabajos de Bourdet et al. (1983, 1989), permite la identificación de todos los regímenes de flujo en una sola gráfica, llamada curva diagnóstico, por medio del reconocimiento de pendientes características de cada uno de dichos regímenes, lo cual provee una valoración no paramétrica completa del comportamiento del yacimiento y facilita la identificación de un modelo conceptual adecuado para la posterior interpretación paramétrica. Debido a su impacto, el análisis derivativo ha sido catalogado como el desarrollo más significativo en la historia de las pruebas de presión en pozos petroleros (Hosseinpour-Zonoozi, et al. 2006).

En una curva diagnóstico se grafican de manera simultánea el abatimiento de la presión o carga hidráulica en un reservorio y su respectiva derivada logarítmica, como una función del tiempo (Bourdet et al., 1983; Renard et al., 2009), que se obtiene como una aproximación en diferencias finitas:

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_i = \frac{P_{i+1}-P_{i-1}}{d(t_{i+1})-d(t_{i-1})} \dots \dots \dots (2.10),$$

$$\frac{dP}{d \ln t} = \frac{t dP}{dt} \dots \dots \dots (2.11),$$

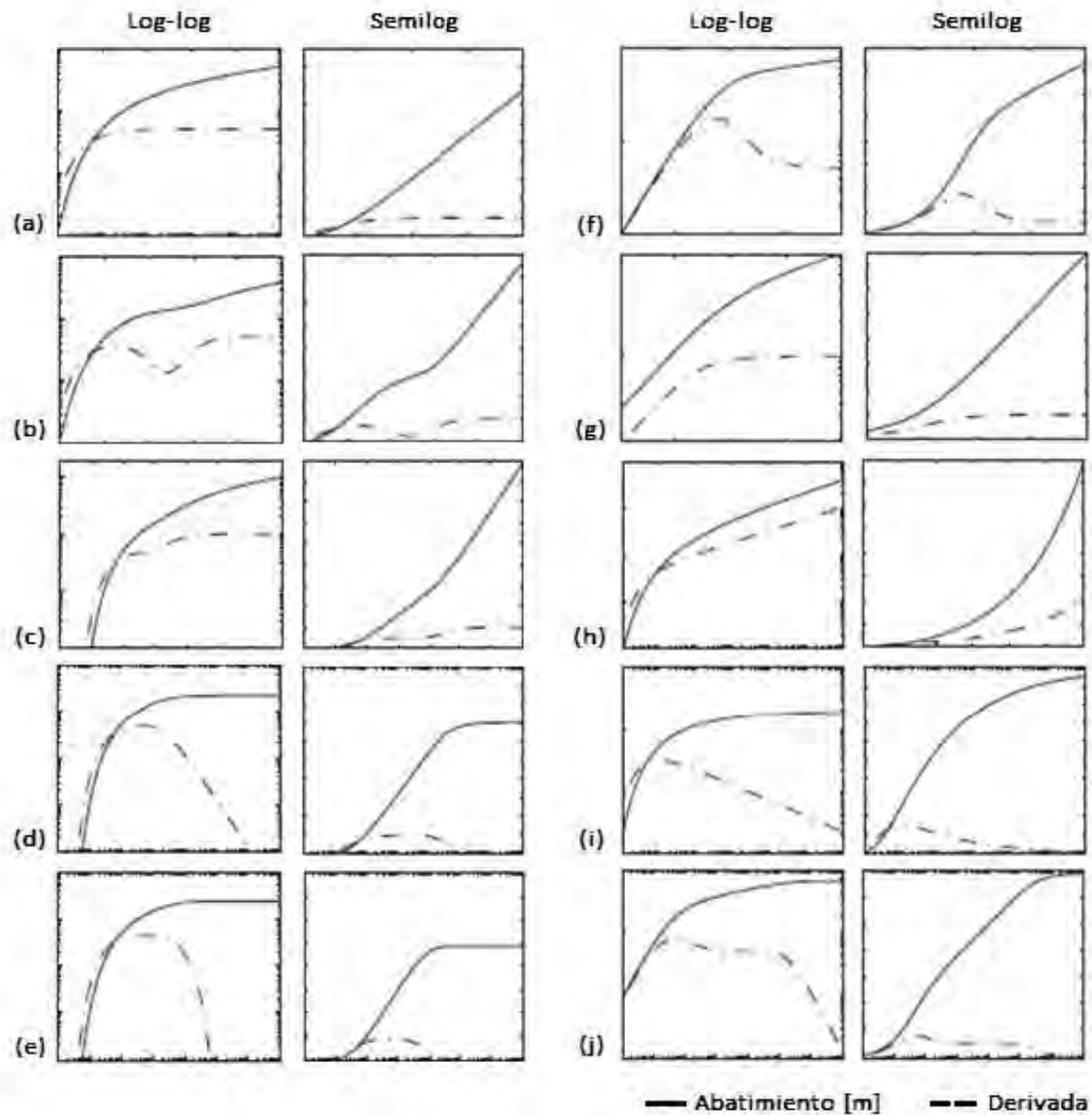
donde:  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_i$ : valor de la derivada de la presión en el punto  $i$ ;  $P_{i+1}$ : presión en el tiempo  $i+1$ ;  $P_{i-1}$ : presión en el tiempo  $i-1$ ;  $t_i$ : tiempo en el punto  $i$ ;  $\frac{dP}{d \ln t}$ : valor del logaritmo de la derivada.

Con base en la identificación de regímenes de flujo, se debe realizar una interpretación paramétrica de las geometrías presentes durante la prueba, con la finalidad de calcular el valor de los parámetros característicos del yacimiento o acuífero, para ello se recurre al uso de gráficos especializados. En un gráfico especializado, se aplica una transformación al eje temporal,  $t$ , la cual depende del régimen de flujo a evaluar, según el o los patrones de flujo identificados en la curva diagnóstico. En la tabla 2.1 se muestran las transformaciones que deben aplicarse al eje temporal para cada una de las geometrías de flujo, así como las pendientes características de cada una de estas geometrías, los parámetros calculables y la interpretación geológica para cada caso.

[Renard et al. \(2009\)](#) generan un catálogo de curvas diagnóstico teóricas para el ámbito de la hidrología subterránea, que se muestra en la figura 2.2.

Régimen	Pendiente de la derivada	Gráfico especializado	Parámetros calculables	Interpretación geológica
Almacenamiento de pozo	1	t	Coefficiente de almacenamiento de pozo ( $C$ )	Almacenamiento en el pozo
Flujo radial	0	log(t)	Transmisividad ( $T$ ) Factor de daño en el pozo ( $\sigma$ ) Pérdidas de carga ( $s_{\sigma}$ ) Eficiencia del pozo ( $E$ )	Flujo radial; condiciones válidas de Theis y Cooper y Jacob
Flujo lineal	1/2	(t) <sup>1/2</sup>	Ancho de canal o fractura ( $x_f$ )	Fractura de conductividad infinita, fallas paralelas o acuífero-canal
Flujo bilineal	1/4	(t) <sup>1/4</sup>	Conductividad hidráulica de la fractura ( $k_f w_f$ )	Fractura de conductividad finita o existencia de dos regímenes de flujo lineal que se superponen perpendicularmente
Flujo esférico	-0.5	(t) <sup>-1/2</sup>	Conductividad hidráulica esférica ( $k_s$ ) Tasa de anisotropía ( $k_v/k_h$ )	Pozo parcialmente penetrante
Estado pseudoestacionario	1	t	Área de drenaje ( $A$ )	Sistema cerrado
Estado estacionario	-1(-∞)	log(t)	Distancia a la frontera más cercana ( $L$ )	Frontera de carga constante

**Tabla 2.1.** Pendiente característica, gráfico especializado y parámetros calculables de los regímenes de flujo que se presentan durante las pruebas en pozos (Modificado de Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Renard et al., 2009; Pérez-Márquez, 2016).



**Figura 2.2.** Curvas diagnóstico en acuíferos, donde: a) acuífero confinado ideal (modelo de Theis) con flujo radial infinito; b) acuífero no confinado o doble porosidad, con flujo radial infinito en tiempos tardíos de la prueba; c) acuífero confinado con una frontera de no flujo; d) acuífero confinado con una frontera de carga constante; e) acuífero semiconfinado; f) abaqueamiento de pozo de diámetro grande, y posibles efectos de piel de pozo, con flujo radial infinito en tiempos tardíos de la prueba; g) fractura vertical de extensión finita y conductividad infinita; h) modelo general de flujo radial con dimensión de flujo  $n < 2$ ; i) modelo general de flujo radial con dimensión de flujo  $n > 2$ ; j) abaqueamiento de pozo, flujo radial infinito y frontera de carga constante (Tomado de Renard et al., 2009).

De la figura 2.2 se puede apreciar que en el modelo de [Theis \(1935\)](#), la derivada logarítmica se estabiliza a tiempos tardíos de la prueba. Esto se debe a que dicho modelo tiende al modelo asintótico de [Cooper-Jacob \(1946\)](#), como se muestra en la siguiente ecuación ([Renard et al., 2009](#)):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \left( \frac{2.25tT}{r^2 S} \right) \dots \dots \dots (2.12),$$

donde: *s*: abatimiento; *t*: tiempo; *Q*: caudal de extracción; *T*: transmisividad; *r*: distancia del pozo de bombeo al pozo de observación; *S*: coeficiente de almacenamiento.

Por otra parte, al realizar el cálculo de la derivada logarítmica de la asíntota de [Cooper-Jacob \(1946\)](#), se obtiene un valor constante. Por lo tanto, es posible deducir que, cuando la solución de [Theis \(1935\)](#) alcanza la asíntota de [Cooper y Jacob \(1946\)](#), la derivada logarítmica se convierte en constante. Con base en esto, [Renard et al. \(2009\)](#) proponen una ecuación para el cálculo de la transmisividad haciendo uso del valor de la derivada logarítmica, *d*, en un periodo de flujo radial, de la siguiente manera:

$$T = \frac{Q}{4\pi d} \dots \dots \dots (2.13).$$

### 2.3.1 Dimensión de flujo

De acuerdo con la estructura del acuífero, el flujo hacia el pozo puede ser predominantemente unidimensional, bidimensional o tridimensional, según el número de componentes espaciales que presente. Este número de componentes, también llamado dimensión de flujo, corresponde a la o las direcciones que el fluido adopta para desplazarse durante hacia el pozo, de tal manera que, para los casos de flujo lineal,

radial y esférico, la dimensión de flujo será 1, 2 y 3, respectivamente (Barker, 1988; Beauduin et al., 2004), como se observa en la figura 2.3.

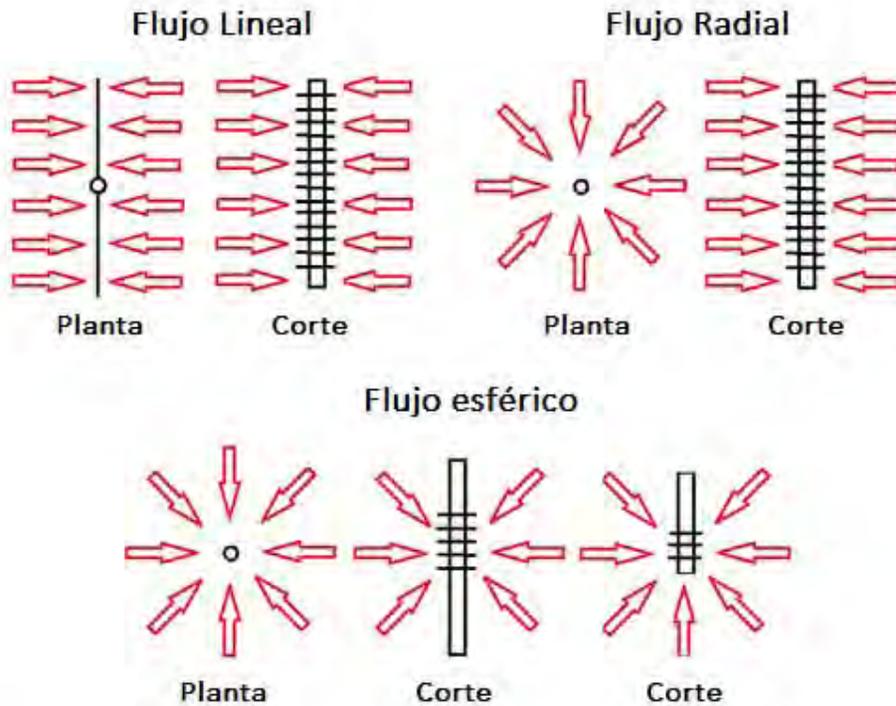


Figura 2.3. Componentes espaciales del flujo lineal, radial y esférico.

Barker (1988) determinó que al igual que las geometrías de flujo, la dimensión de flujo guarda una relación directa con la pendiente de la derivada de la presión/abatimiento,  $m$ , durante el periodo en que se presenta cierto régimen de flujo (ecuación 2.14). Con base en esta relación, desarrolló el Modelo Generalizado de Flujo Radial, *GRF* (*Generalized Radial Flow Model, por sus siglas en inglés*), que hoy en día es una herramienta simple y efectiva para la interpretación de pruebas en pozos.

$$m = 1 - \frac{n}{2} \dots \dots \dots (2.14),$$

donde:  $m$ : pendiente de la derivada;  $n$ : dimensión de flujo.

### 2.3.2 Ruido en la derivada y suavizamiento de los datos

Debido a errores sistemáticos y ambientales en la toma de datos y a la naturaleza misma del subsuelo, es habitual que las mediciones durante una prueba de pozo no se ajusten a una tendencia perfecta, presentando cambios abruptos en la pendiente entre un punto y otro, característica que se exalta al realizar el proceso de derivación, ya que se expresa a los datos en función de sus pendientes. Esto ocurre principalmente cuando las lecturas se registran a una velocidad de muestreo alta o cuando las variaciones en la presión en el yacimiento se aproximan a la resolución del sensor (Bourdet et al., 1989). Visto desde el contexto global del conjunto de datos, este hecho induce ruido en los valores de salida, lo que resulta en una curva con puntos dispersos que, en ocasiones, no puede ser utilizada para el análisis, por lo que es necesario aplicar un algoritmo de suavizamiento que reduzca dicho ruido y facilite el procedimiento de interpretación.

Los efectos de ruido se reducen al elegir los puntos donde la derivada se calcula lo suficientemente lejos del punto  $i$ . Bourdet et al. (1989) introducen el concepto de ventana de derivación,  $L$ , correspondiente a la fracción de ciclo logarítmico de separación que se dejará hacia la izquierda y hacia la derecha, a partir del punto  $i$ , para realizar la derivación.

De forma recomendable, la ventana de derivación debe tomar valores de 0.1 a 0.5, ya que, si los puntos de derivación se vuelven demasiado distantes del punto  $i$ , la forma original de la curva podría distorsionarse y enmascarar efectos reales de la prueba.

## 2.4 Analogías entre pruebas hidráulicas y pruebas de presión.

Debido al principio básico que comparten las pruebas de pozos en acuíferos y en yacimientos petroleros, es posible establecer analogías entre los parámetros

característicos de ambas disciplinas, como se muestra en la tabla 2.2, permitiendo la incorporación de dichos parámetros en las ecuaciones de pruebas de presión para el análisis de pruebas hidráulicas, y viceversa. La tabla 2.3 muestra el resultado de las ecuaciones de ingeniería de yacimientos adaptadas a términos hidrogeológicos. Como se puede observar, la transformación de la ecuación 2.17 para flujo radial, resulta en el modelo de *Cooper y Jacob (1946)* (ecuación 2.8), evidenciando la bidireccionalidad en la correspondencia de las ecuaciones de ambas áreas.

Una correcta correlación implica la identificación de variables homólogas entre ambas disciplinas, así como la transformación de las constantes implicadas, por medio del cálculo de equivalencias entre unidades de medición de los sistemas inglés e internacional.

Ingeniería de yacimientos			Hidrología subterránea		
Variable		Unidades	Variable		Unidades
Presión	$P$	[psi]	Abatimiento	$s$	[m]
Parámetro		Unidades	Parámetro		Unidades
Gasto	$q$	[bpd]	Caudal de extracción	$Q$	[m <sup>3</sup> /d]
Permeabilidad	$k$	[md]	Conductividad hidráulica	$K$	[m/d]
Espesor del yacimiento	$b$	[m]	Espesor saturado del acuífero	$b$	[m]
Compresibilidad total	$C_t$	[1/psi]	Almacenamiento específico	$S_s$	[1/m]
Viscosidad	$\mu_o$	[cps]	Viscosidad del agua	$\mu_w$	[cps]
Factor volumétrico del aceite	$\beta_o$	[bls <sub>v</sub> /bls <sub>s</sub> ]	Factor volumétrico del agua	$\beta_w$	[m <sup>3</sup> <sub>a</sub> /m <sup>3</sup> <sub>s</sub> ]
Porosidad	$\phi$	[adim]	Rendimiento específico	$S_y$	[adim]

**Tabla 2.2.** Variables y parámetros utilizados en la ingeniería de yacimientos y sus parámetros homólogos en hidrología subterránea, nomenclatura de los parámetros y unidades de medida.

Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: [1] el valor de viscosidad del agua,  $\mu_w$ , siempre será 1, en condiciones isotérmicas, y, [2] al ser un líquido incompresible, se le asignará un valor de 1 al factor volumétrico del agua,  $\beta_w$ .

Ecuación original	Ecuación adaptada
<b>Almacenamiento de pozo</b>	
$C = \frac{q\beta_o}{24m_{WBS}} \dots (2.15)$	$C = \frac{Q}{m_{WBS}} \dots (2.16)$
<b>Flujo radial</b>	
$T = 162.6 \frac{q\beta_o}{m} \dots (2.17)$	$T = 0.183 \frac{Q}{m} \dots (Jacob - Cooper)$
$k = \frac{T\mu_o}{b} \dots (2.18)$	$K = \frac{T}{b} \dots (2.19)$
$\sigma = 1.15 \left[ \frac{\Delta P_{1hr}}{m} - \log \frac{k}{\Phi\mu_o C_t r_w^2} + 3.23 \right] \dots (2.20)$	$\sigma = 1.15 \left[ \frac{s_{1hr}}{m} - \log \frac{T}{S r_w^2} \right] \dots (2.21)$
$\Delta P_\sigma = 0.89m\sigma \dots (2.22)$	$s_\sigma = 0.89m\sigma \dots (2.23)$
$E = \frac{\Delta P - \Delta P_\sigma}{\Delta P} 100\% \dots (2.24)$	$E = \frac{s - s_\sigma}{s} 100\% \dots (2.25)$
<b>Flujo lineal</b>	
$x_f = 8.12 \frac{q\beta_o}{bm_{LF}} \sqrt{\frac{\mu_o}{\Phi C_t k}} \dots (2.26)$	$x_f = 0.5641 \frac{Q}{Tm_{LF}} \sqrt{\frac{T}{S}} \dots (2.27)$
<b>Flujo bilineal</b>	
$k_f w_f = 1944.8 \sqrt{\frac{1}{\Phi\mu_o C_t k} \left( \frac{q\beta_o \mu_o}{bm_{BLF}} \right)^2} \dots (2.28)$	$K_f b = 0.1552 \sqrt{\frac{b}{SK} \left( \frac{Q}{bm_{BLF}} \right)^2} \dots (2.29)$
<b>Flujo esférico</b>	
$k_s = \left( 2452.9 q\beta_o \mu_o \frac{\sqrt{\Phi\mu_o C_t}}{m_{SPH}} \right)^{2/3} \dots (2.30)$	$K_s = 0.128 \left( Q \frac{\sqrt{S_s}}{m_{SPH}} \right)^{2/3} \dots (2.31)$

**Tabla 2.3.** Correspondencia de ecuaciones (Modificado de [Gómez-Espinosa, 2017](#)).

$\frac{k_v}{k_h} = \left(\frac{k_s}{k_h}\right)^3 \dots (2.32)$	$\frac{K_v}{K_h} = \left(\frac{K_s}{K_h}\right)^3 \dots (2.33)$
<b>Frontera de carga (o presión) constante</b>	
$L = 0.01217 \sqrt{\frac{k\Delta t_x}{\Phi\mu_o C_t}} \dots (2.34)$	$L = 0.744 \sqrt{\frac{T\Delta t_x}{S}} \dots (2.35)$
<b>Estado pseudoestacionario (acuífero o yacimiento cerrado)</b>	
$A = 0.234 \frac{q\beta_o}{C_t\Phi b m^*} \dots (2.36)$	$A = \frac{Q}{S m^*} \dots (2.37)$
<b>Todas las geometrías</b>	
$r_i = 0.029 \sqrt{\frac{kt}{\Phi\mu_o C_t}} \dots (2.38)$	$r_i = 1.5 \sqrt{\frac{Tt}{S}} \dots (2.39)$

**Tabla 2.3.** Continuación.

Donde:

$A$ : Área de drene [ $m^2$ ]

$b$ : Espesor saturado del yacimiento/acuífero [ $m$ ]

$\beta_o$ : Factor volumétrico del aceite [ $b_{lsy}/b_{ls_s}$ ]

$C$ : Almacenamiento de pozo [ $m^3/m$ ], [ $L/m$ ]

$C_t$ : Compresibilidad total del aceite [ $1/psi$ ]

$d$ : Valor promedio de la derivada del periodo de flujo radial [ $m$ ]

$\Delta P$ : Caída de presión [ $psi$ ]

$\Delta P_\sigma$ : Caída de presión por efectos de daño al pozo [ $psi$ ]

$\Delta_{thr}$ : Caída de presión después de una hora del inicio del flujo radial [ $psi$ ]

$\Delta t$ : Tiempo transcurrido hasta el final del periodo de flujo [d]

$\Delta t_x$ : Punto de transición de la derivada [d]

$E$ : Eficiencia del pozo de bombeo [%]

$k$ : Permeabilidad [md]

$K$ : Conductividad hidráulica [m/d]

$k_{fWf}$ ;  $K_{fb}$ : Conductividad hidráulica de la fractura [md\*ft], [(m/d)m]

$k_s$ ;  $K_s$ : Conductividad hidráulica esférica [md], [m/d]

$k_v/k_h$ ;  $K_v/K_h$ : Tasa de anisotropía [adimensional]

$L$ : Distancia a la frontera [ft], [m]

$m$ : Valor de la pendiente durante el periodo de flujo radial [m/ciclo]

$m_{BLF}$ : Valor de la pendiente durante el periodo de flujo bilineal [m/ciclo]

$m_{LF}$ : Valor de la pendiente durante el periodo de flujo lineal [m/ciclo]

$m_{SPH}$ : Valor de la pendiente durante el periodo de flujo esférico [m/ciclo]

$m_{WBS}$ : Valor de la pendiente durante el periodo de almacenamiento de pozo [m/ciclo]

$m^*$ : Valor de la pendiente durante el periodo en estado pseudoestacionario [m/ciclo]

$\mu_o$ : Viscosidad del aceite [cps]

$P$ : Presión [psi]

$q$ : Gasto [bpd]

$Q$ : Caudal [m<sup>3</sup>/d]

$r_i$ : Radio de influencia de la prueba [ft], [m]

$r_w$ : Radio del pozo [ft], [m]

$s$ : Abatimiento del nivel dinámico [m]

$s_{1hr}$ : Abatimiento después de 1 hora de inicio del periodo de flujo radial [m]

$S$ : Almacenamiento [adimensional]

$Ss$ : Almacenamiento específico [ $m^{-1}$ ]

$s_{\sigma}$ : Pérdidas de carga hidráulica por efectos de daño al pozo [m]

$\sigma$ : Factor de daño al pozo [adimensional]

$t$ : Tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo [d]

$T$ : Transmisividad [ $m^2/d$ ]

$x_f$ : Ancho de fractura o acuífero canal [ft], [m]

## Capítulo 3

### Métodos

#### 3.1 Recopilación, análisis y depuración de la información

Se realizó una recopilación de pruebas hidráulicas ejecutadas en la República Mexicana, para ser reinterpretadas por medio de la integración de metodologías habituales y análisis derivativo. Dichas pruebas fueron extraídas de estudios hidrogeológicos y de actualización, publicados por la Comisión Nacional del Agua, así como de la base de datos del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Para la zonificación de las áreas de estudio se analizaron datos de los 653 acuíferos de la República Mexicana, la selección se sujetó a tres criterios: [1] productividad, priorizando los acuíferos que abastecen una mayor población y/o área geográfica, [2] variabilidad geológica, con el objetivo de poner a prueba la aplicabilidad del análisis derivativo en ambientes hidrogeológicos diversos, e [3] información disponible, debido a que en la mayoría de los estudios publicados no se incluyen las tablas de datos de tiempo-abatimiento de las pruebas de bombeo realizadas, ni el diseño constructivo de los pozos analizados. La tabla 3.1, muestra las cuatro zonas definidas y las características principales de las pruebas reinterpretadas.

Para homogeneizar la nomenclatura de las pruebas, se asignó una clave interna a cada pozo, compuesta por dos dígitos que corresponden al número de zona y a la ubicación geográfica del mismo (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo). La información completa de las pruebas analizadas se encuentra disponible en el capítulo de resultados.

Zona geográfica	Acuíferos contenidos	Geología dominante	No. de pruebas	Caudal de extracción [m <sup>3</sup> /d]	Duración [hrs]
Baja California	Valle de Guadalupe Valle Colonia Vicente Guerrero Valle de San Quintín Valle de Santo Domingo Valle de Santiago Valle de San José del Cabo	Rellenos aluviales y depósitos fluviales, intercalados con rocas volcánicas fracturadas.	18	432-9504	2.5-96
Bajío	Valle de Aguascalientes Valle de León Valle de Pénjamo-Abasolo Irapuato-Valle de Santiago Valle de Celaya	Rocas volcánicas fuertemente fracturadas, intercaladas con depósitos sedimentarios.	18	602-5702.4	1.8-9
Cuenca de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca Valle de Tecocomulco Valle de Apán Valle de Alto Atoyac Valle de la ZMCM Valle de Texcoco Valle de Soltepec	Intercalación de depósitos aluviales y fluviales con rocas ígneas extrusivas.	18	259.2-5443.2	4-18
Noreste	Valle de Palestina Valle de Allende-Piedras Negras Valle de Monclova Valle de Saltillo-Ramos Arizpe Valle de Saltillo Sur	Calizas, areniscas y lutitas plegadas.	16	345.6-8035.2	2-46
Total de pruebas reinterpretadas			70		

**Tabla 3.1.** Zonas definidas y generalidades de las pruebas de bombeo reinterpretadas en cada una de ellas.

## 3.2 Proceso de reinterpretación

El diagrama de flujo de la figura 3.1 ilustra el proceso de reinterpretación de las pruebas hidráulicas analizadas, el cual se desglosa a continuación:

Inicialmente, las pruebas de bombeo extraídas de reportes impresos fueron digitalizadas por medio del software Surfer (Golden Software, 2016), para recuperar las tablas de datos de tiempo-abatimiento, que posteriormente fueron importadas a MS Excel (Microsoft Office, 2010).

Posteriormente, se obtuvo la curva derivativa del abatimiento del nivel y se realizó el suavizamiento de los datos mediante la aplicación del algoritmo de [Bourdet et al. \(1989\)](#). Este proceso se realizó iterativamente, probando distintas ventanas de derivación y analizando el resultado en gráficos logarítmicos, hasta que la curva tuviese la mínima distorsión por ruido, para permitir la identificación de pendientes características.

La primera fase de la reinterpretación se realizó por medio de análisis derivativo, que consistió en dos etapas:

[1] Interpretación no paramétrica, por medio de la identificación de pendientes características de la respuesta derivativa del abatimiento, para el reconocimiento de las geometrías de flujo presentes durante el tiempo de las pruebas de bombeo.

[2] Interpretación paramétrica, con el uso de gráficos especializados y la aplicación de las ecuaciones adaptadas a partir del análisis derivativo en pruebas de presión (tabla 2.3).

Con la información de la identificación de geometrías de flujo y apoyándose en la geología del subsuelo reportada para cada zona, se eligieron los modelos teóricos con mejor ajuste para cada prueba y se procedió al análisis con curvas tipo, por medio de AQTESOLV (HydroSOLVE Inc., 2016), que es un software especializado para el diseño y análisis de pruebas en acuíferos, y cuenta con una amplia variedad de modelos disponibles ([Theis, 1935](#); [Cooper-Jacob, 1946](#); [Hantush, 1960](#); [Neuman, 1974](#)), con lo cual se obtuvieron parámetros hidráulicos generales. En los resultados

se reportan los modelos teóricos utilizados durante el ajuste para cada una de las pruebas. En las fuentes originales, los parámetros de todas las pruebas fueron obtenidos por medio del modelo de [Cooper-Jacob \(1946\)](#), a excepción de las pruebas ubicadas en los valles de León e Irapuato (Bajío), para las cuales se empleó el modelo de [Neuman \(1974\)](#).

Para asegurar la confiabilidad de los parámetros obtenidos, se calculó el Error Cuadrático Medio o Desviación Estándar, *RMSE (Root Mean Squared Error, por sus siglas en inglés)* del ajuste, con respecto al modelo teórico seleccionado, por medio del lenguaje de programación R (R Development Core Team, 2016), entorno que permite el análisis estadístico de datos.

En los casos en que se detectó un régimen radial durante el tiempo de la prueba, se realizaron dos cálculos adicionales del valor de transmisividad, el primero se llevó a cabo por medio del método de la línea recta de [Cooper-Jacob \(1946\)](#) (ecuación 2.8), mientras que para el segundo se empleó la ecuación 2.13, propuesta por [Renard et al. \(2009\)](#).

No fue posible el cálculo del coeficiente de almacenamiento en ninguna de las pruebas analizadas, a causa de la falta de registros en pozos de observación, por lo tanto, para los cálculos se emplearon los valores promedio de cada zona reportados, en las fuentes originales de las pruebas y estudios publicados por CONAGUA.

Finalmente, se realizó la integración de cada una de las etapas de interpretación, con el objetivo de tener una estimación completa de los parámetros del acuífero durante el tiempo de duración de cada una de las pruebas, y de inferir los modelos teóricos de flujo de las zonas analizadas.

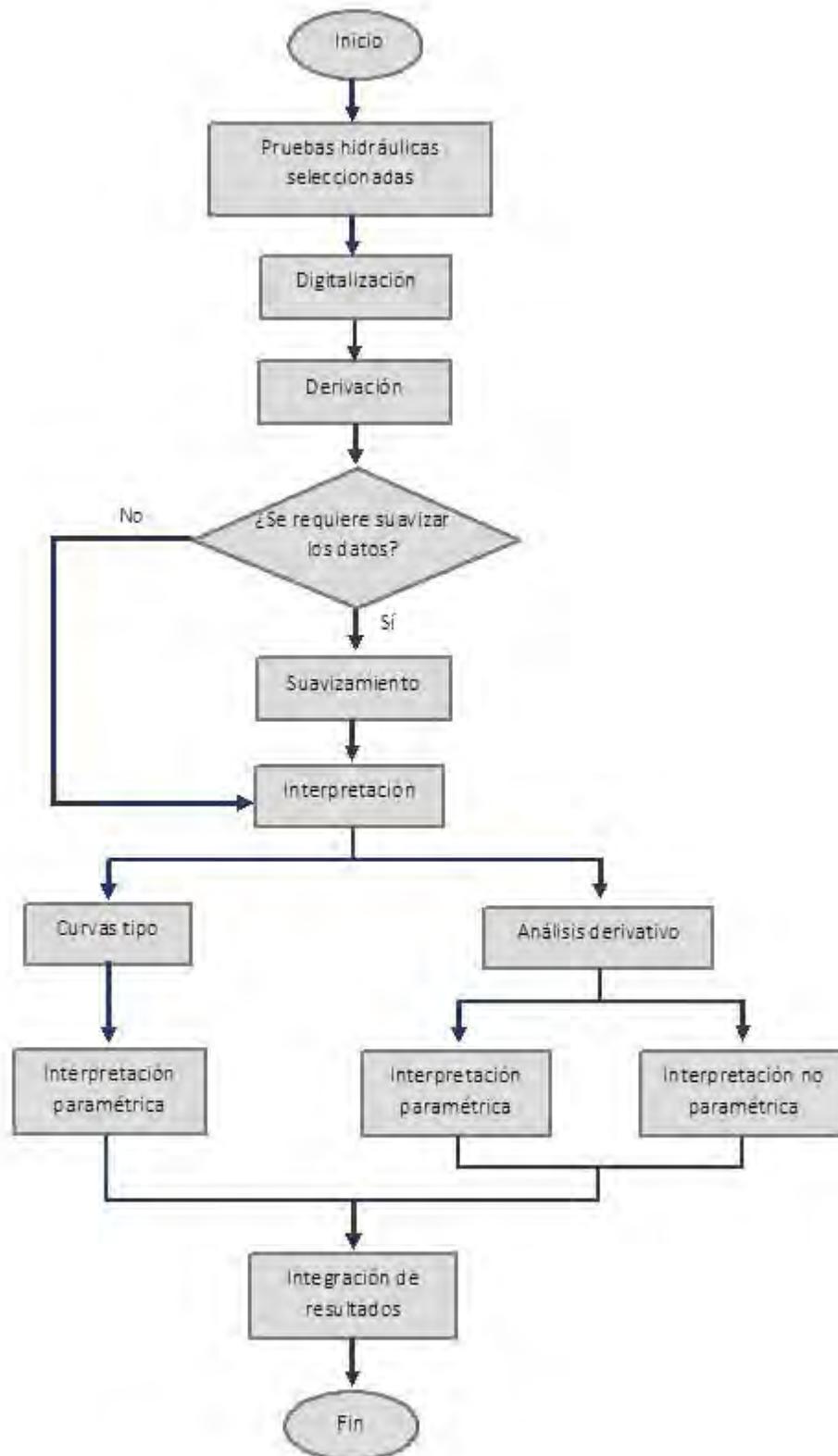


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de reinterpretación de las pruebas hidráulicas analizadas.

## Capítulo 4

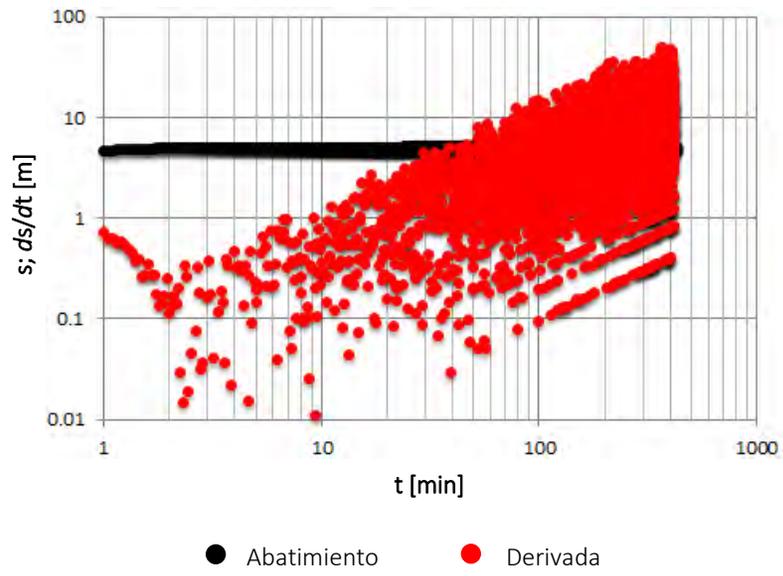
### Resultados y discusión

#### 4.1 Ejemplo del proceso de interpretación usando curvas diagnósticas

Se realizó la interpretación de una prueba de bombeo ejecutada en el pozo BR- 3 en Boca del Río, Veracruz, ubicado en el acuífero granular Costera de Veracruz, de tipo libre. Dicha prueba se realizó en el año 2015, por el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM). En esta zona, la unidad hidrogeológica en explotación, se clasifica como gravas y arenas con porosidad primaria y transmisividad variable, dependiente del contenido de arcilla y el grado de compactación del material (CONAGUA, 2015).

El descenso del nivel piezométrico fue medido con transductor Solinst cada 0.05 minutos, durante las 7 horas que duró la extracción, la cual se realizó a una tasa constante de 1019.52 m<sup>3</sup>/día. El radio del pozo de bombeo y del ademe tuvieron valores de 0.2032 y 0.1016 metros, respectivamente. En ausencia de pozos de observación, se utilizó un valor de coeficiente de almacenamiento 0.0004 (CONAGUA, 2015) para realizar los cálculos.

Debido a las constantes variaciones en la presión atmosférica durante la toma de datos y a la propia resolución del transductor, los puntos de la curva presentaron una alta dispersión, como se muestra en la figura 4.1, por lo cual fueron aplicados distintos valores de suavizamiento haciendo uso del algoritmo de Bourdet et al. (1989). La figura 4.2 muestra la curva del abatimiento y su respectiva derivada con distintas ventanas de derivación,  $L$ . Finalmente, se empleó una ventana de 0.5 para la identificación de tendencias en los datos. Se detectó que con ventanas de derivación mayores a 0.5, la armonía en los datos ya no presenta mejoras significativas.



**Figura 4.1.** Dispersión de los datos, debida a efectos de la presión atmosférica detectados por el transductor durante la toma de datos, en un rango de 1 a 420 minutos.

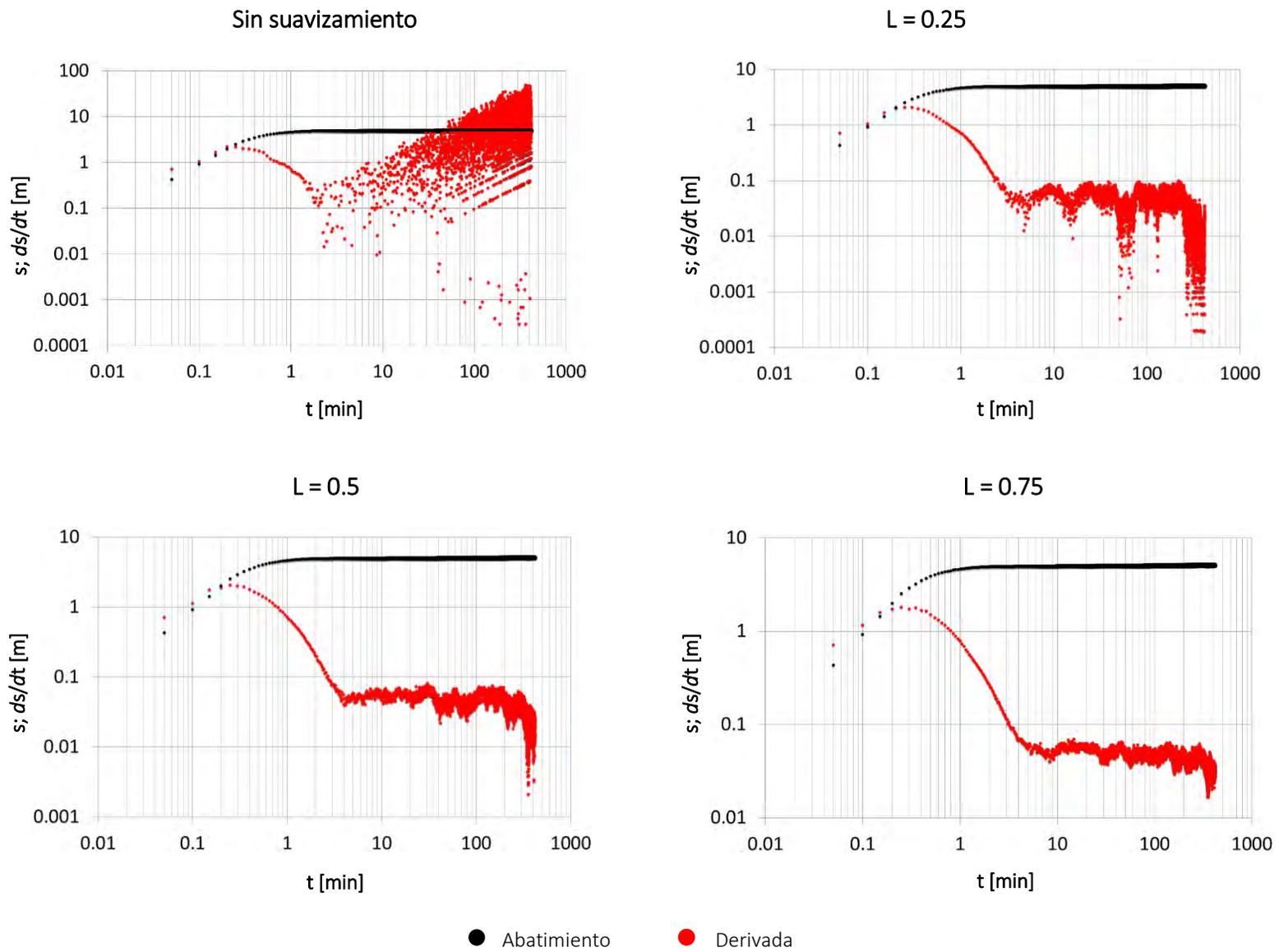
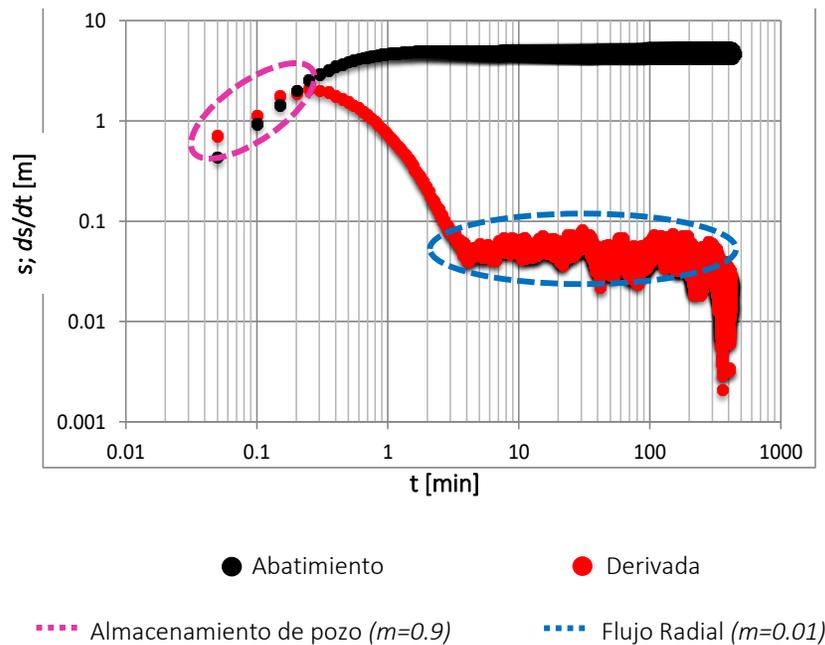


Figura 4.2. Ventanas de derivación aplicadas para el suavizamiento de los datos.

Mediante la identificación de regímenes de flujo de la prueba (figura 4.3), se determinó que durante los primeros 0.2 minutos se presentan efectos de almacenamiento de pozo, que se manifiestan con una pendiente unitaria y paralelismo en las curvas de abatimiento y derivativa. La tasa de almacenamiento durante este periodo fue de 67.78 L/m de abatimiento en el pozo de bombeo (ecuación 2.16).

Posterior al almacenamiento de pozo, la curva derivativa se encorva, indicando efectos de daño en el pozo, seguido por un periodo de transición que se prolonga hasta los 5 minutos, a partir del cual se presenta una geometría radial de flujo, como expresión de la naturaleza sedimentaria del acuífero y la penetración total del pozo de bombeo. En los últimos minutos de la prueba, la pendiente cae abruptamente, por efectos del ruido en los datos.

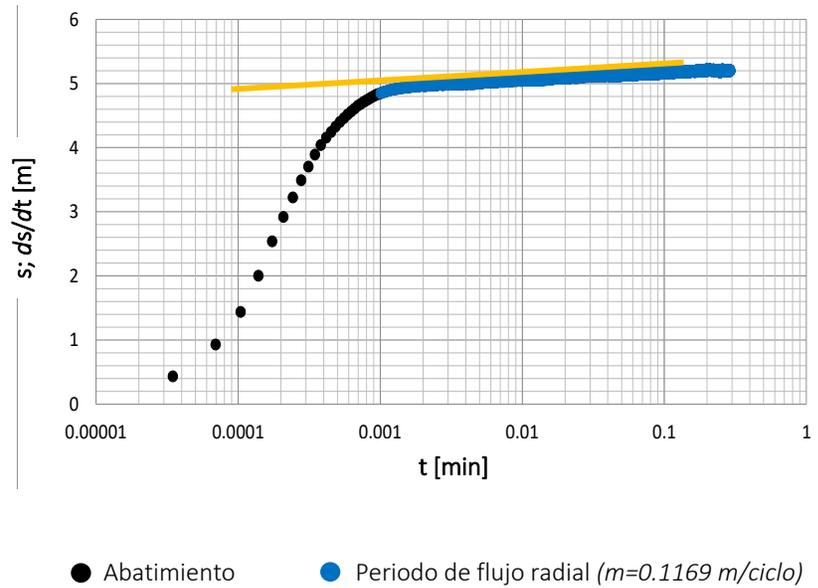


**Figura 4.3.** Análisis no paramétrico del pozo BR-3.

Posterior a la interpretación no paramétrica, se recurrió al uso de un gráfico especializado de flujo radial (figura 4.4), para medir la pendiente correspondiente a este régimen, cuyo valor fue de 0.1169, y que se incorporó a la ecuación de [Renard](#)

et al. (2009) (ecuación 2.13) para el cálculo del valor de transmisividad del acuífero, el cual fue de 1785.58 m<sup>2</sup>/día.

El factor de daño en el pozo presentó un valor positivo, este daño provoca la reducción de la eficiencia del pozo al 17%. Finalmente, se realizó el cálculo de la dimensión de flujo del régimen radial, la cual tomó un valor de 1.98, coherente con el régimen presente.



**Figura 4.4.** Gráfico especializado correspondiente al periodo de flujo radial, coincidente con el gráfico de la línea recta de Cooper-Jacob (1946).

Debido a que el acuífero es de tipo libre y a que presenta flujo radial infinito, se eligió el modelo de Cooper-Jacob (1946) (ecuación 2.8) para la interpretación con curvas tipo, con el cual se definió una transmisividad promedio de 1596 m<sup>2</sup>/día. El valor del RMSE del ajuste fue de 0.011, es decir, los resultados son confiables.

## 4.2 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en la zona de Baja California

Los estados de Baja California y Baja California Sur se localizan en el extremo noroccidental de la República Mexicana, limitan al norte con los Estados Unidos de Norteamérica (California), al este con el Golfo de California y al suroeste con el Océano Pacífico.

En el estado de Baja California el registro geológico va desde el periodo Paleozoico hasta el Cuaternario, las unidades litológicas tienen disposición en franjas paralelas a la orientación de la península, con rumbo norte-noroeste. Las rocas más antiguas afloran hacia el Golfo de California y las más jóvenes hacia el Océano Pacífico, y se clasifican en rocas prebatolíticas (ígneas volcanoclásticas, sedimentarias y metamórficas, del Paleozoico y Mesozoico inferior), batolíticas (ígneas intrusivas de composición granítica y cuarzodiorítica, de edad cretácica media) y postbatolíticas (sedimentarias clásticas y volcánicas, pertenecientes al Cretácico superior, Terciario y Cuaternario). Todos los acuíferos en actual explotación en el estado forman parte de las secuencias postbatolíticas antes descritas ([Gordon-Gastil et al., 1973](#); [Lesser y asociados, 2013](#); [CONAGUA, 2015](#)) (figura 4.5).

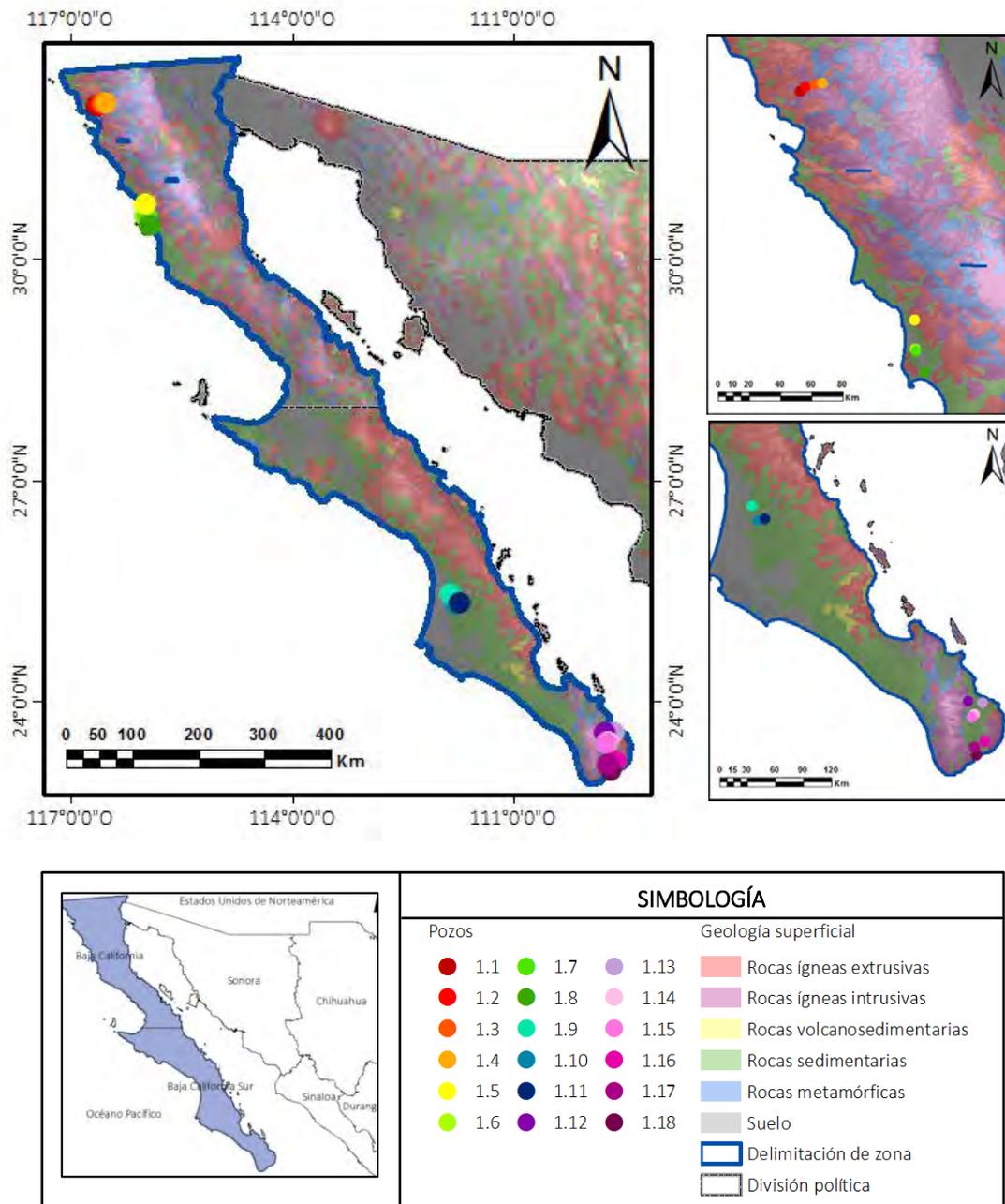
En el estado de Baja California Sur existe una gran diversidad de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, que forman un registro geológico que va del Triásico al Reciente ([Hausbaek, 1984](#); [Martínez y Días, 2011](#); [CONAGUA, 2015](#)) (figura 4.5).

La totalidad de los acuíferos de la zona se encuentran alojados en secuencias granulares, la mayoría con un funcionamiento hidráulico de tipo libre. La profundidad del nivel estático varía de 0.5 a 80 metros, sus valores más bajos se ubican en la porción norte del área de estudio, y se manifiestan por medio de un representativo manantialismo. Esta profundidad tiende a aumentar hacia la zona centro de la región, donde alcanza un valor predominante de 15 metros o menos ([Lesser y asociados, 2013](#); [CONAGUA, 2015](#)).

La transmisividad en la zona de estudio es muy variable, oscila de los 100 m<sup>2</sup>/día en las rocas ígneas del valle de San José del Cabo, al sur del área de estudio, hasta los 5000 m<sup>2</sup>/día en el valle de Guadalupe, en el extremo norte, conformado por rellenos aluviales, conglomerados y rocas volcánicas fracturadas (Lesser y asociados, 2013; CONAGUA, 2015).

En la zona de estudio se tiene un estimado de 10694 pozos que extraen aproximadamente 3.5\*10<sup>12</sup> litros de agua por año, de los cuales, el 80% se utiliza para fines agrícolas, el 5% para abastecimiento público y el resto para actividades industriales (CONAGUA, 2015; 2016).

Se realizó la reinterpretación de 18 pruebas en esta zona, de las cuales 8 se ubican en el estado de Baja California y 10 en Baja California Sur. La figura 4.5 muestra la ubicación de cada una de las pruebas, mientras que la tabla 4.1 detalla el nombre oficial de los pozos de bombeo, sus coordenadas UTM, el estado de la República y el acuífero donde se ubican, así como la fuente original de los datos.



**Figura 4.5.** Ubicación de pruebas hidráulicas reinterpretadas en la zona de Baja California (Geología tomada de [CONABIO, 2012](#)).

Clave interna de la prueba	Nombre oficial del pozo de bombeo	UTM X	UTM Y	Estado	Acuífero	Fuente original
		[m]	[m]			
		WGS84				
1.1	41	535311	3546936	Baja California	Valle de Guadalupe	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1977
1.2	137	538242	3550026	Baja California	Valle de Guadalupe	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1977
1.3	189	542862	3551455	Baja California	Valle de Guadalupe	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1977
1.4	274	547000	3552301	Baja California	Valle de Guadalupe	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1977
1.5	CNA90	598419	3401557	Baja California	Valle Colonia V. Guerrero	Lesser y asociados, 2013
1.6	105	599340	3383124	Baja California	Valle de San Quintín	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.7	130	599652	3381644	Baja California	Valle de San Quintín	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.8	349	604828	3368071	Baja California	Valle de San Quintín	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.9	556	415438	2815951	Baja California Sur	Valle de Santo Domingo	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1978
1.10	503	420566	2799933	Baja California Sur	Valle de Santo Domingo	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1978
1.11	607	427748	2801913	Baja California Sur	Valle de Santo Domingo	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1978
1.12	57	626191	2608389	Baja California Sur	Valle de Santiago	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.13	54	640323	2606323	Baja California Sur	Valle de Santiago	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.14	64	632435	2594313	Baja California Sur	Valle de Santiago	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.15	68	630408	2590808	Baja California Sur	Valle de Santiago	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.16	45	634090	2565017	Baja California Sur	Valle de San José del Cabo	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.17	162	632808	2559595	Baja California Sur	Valle de San José del Cabo	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974
1.18	136	635305	2550735	Baja California Sur	Valle de San José del Cabo	Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974

**Tabla 4.1.** Datos generales de las pruebas de bombeo reinterpretadas en la zona de Baja California.

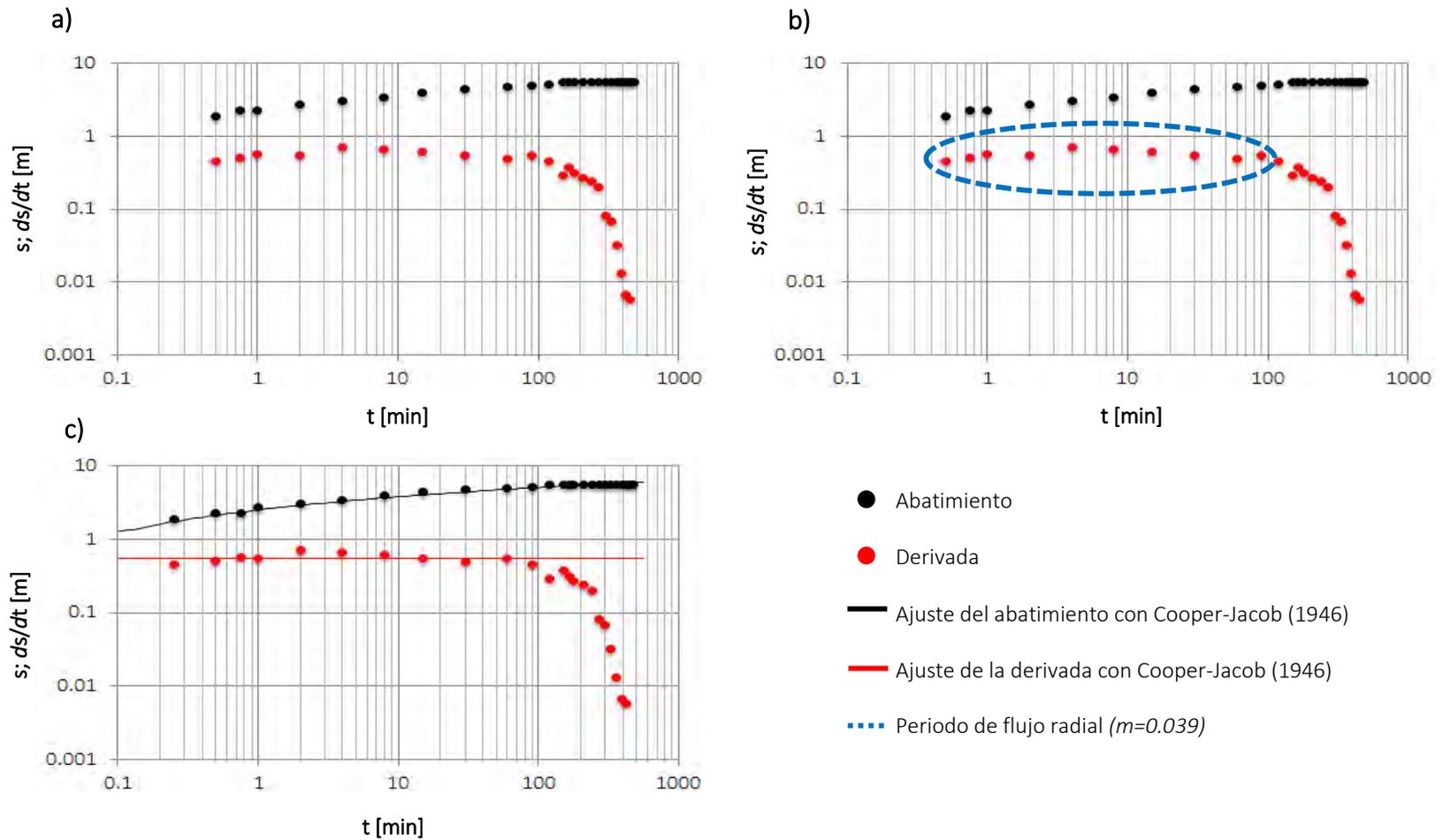
### 4.2.1 Reinterpretación de una prueba de hidráulica en la zona

Se presenta la interpretación detallada de la prueba 1.10, realizada en el pozo 503, ubicado en el municipio Las Flores, Baja California Sur, en el acuífero heterogéneo valle de Santo Domingo, de tipo libre. En esta zona, el agua se desplaza en un medio poroso constituido por la formación Salada, que incluye arenas y gravas redondeadas y bien clasificadas, con un espesor saturado de 60 metros en promedio (CONAGUA, 2015). La fuente original de la prueba (Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1978) reporta un valor de transmisividad de 708.48 m<sup>2</sup>/día para esta zona.

La prueba duró 8 horas, en las cuales se extrajo un caudal constante de 6048 m<sup>3</sup>/día de agua. La figura 4.6a muestra el abatimiento en el pozo y su curva derivativa, cuyo suavizamiento se realizó con una ventana de 0.7, por medio del algoritmo de Bourdet et al. (1989).

Mediante la interpretación con análisis derivativo (figura 4.6b), se determinó que, durante los primeros 90 minutos de la prueba se presenta una geometría radial de flujo, habitual para zonas aledañas a pozos perforados en medios detríticos. El valor de transmisividad obtenido durante este periodo de tiempo, por medio del método de Renard et al. (2009) (ecuación 2.13) fue de 860.24 m<sup>2</sup>/día. A partir de los 90 minutos, el abatimiento en el pozo se estabiliza. El factor de daño al pozo presentó un valor de -1.3, lo que sugiere que las pérdidas de carga son despreciables. El radio de investigación de la prueba fue de 80 metros.

Tomando en consideración la información obtenida por medio de la identificación de geometrías de flujo y la geología del subsuelo en el área, se empleó el modelo de Cooper-Jacob (1946) para la interpretación con curvas tipo (figura 4.6c). Dicho modelo presenta un buen ajuste con los datos de la prueba, con un valor de RMSE de 0.12 y varianza de 0.0144. El valor de transmisividad obtenido fue de 864.2 m<sup>2</sup>/día, consistente con el resultado del análisis derivativo (Renard et al., 2009) y el valor registrado en la fuente original (Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1978).



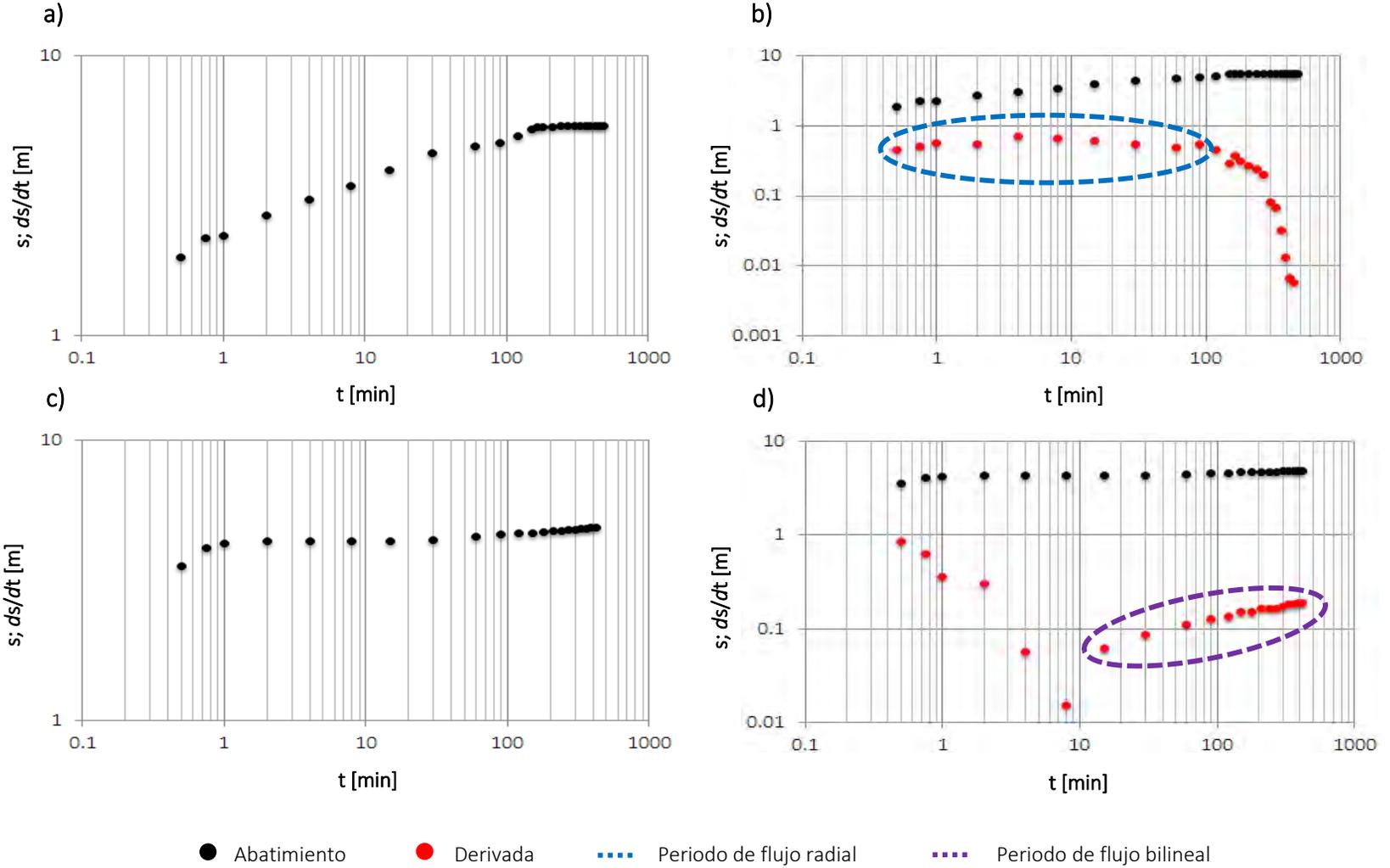
**Figura 4.6.** Gráficos logarítmicos de la prueba 1.10, donde: a) abatimiento y curva derivativa con un valor de suavizamiento de 0.7; b) identificación de geometrías de flujo; c) ajuste del modelo de Cooper-Jacob (1946).

Las bondades del análisis derivativo se evidencian al realizar una comparación de la curva de abatimiento de la prueba 1.10, recién descrita, con los descensos medidos en otros pozos de la zona. Para este caso se eligió la prueba 1.13, ubicada en el valle de Santiago, de tipo libre, conformado rocas sedimentarias bien graduadas, cuyo espesor varía de 65 a 160 metros. El valor de transmisividad en esta zona alcanza valores de hasta 3500 m<sup>2</sup>/día (CONAGUA, 2015).

Como se puede apreciar en la figura 4.7, al comparar las curvas de abatimiento de los niveles dinámicos, no se observan diferencias significativas, y resulta complicado inferir un modelo conceptual para cada una de ellas. En esas condiciones, la opción más viable es realizar una interpretación por el método de Cooper-Jacob (1946), para obtener el valor de la transmisividad, teniendo dicho cálculo como alcance único de la interpretación.

Al realizar la derivación de los valores del abatimiento y comparar las curvas, las diferencias en los efectos de cada una de las pruebas se vuelven evidentes. En la prueba 1.10 se tiene un acuífero libre con flujo radial, mientras que en la prueba 1.13 se presenta un flujo controlado por fracturas de conductividad finita, en un acuífero libre con régimen bilineal principalmente.

Para la prueba 1.13, se estimó una transmisividad promedio de la matriz de 874.8 m<sup>2</sup>/día, por medio de un ajuste con el modelo de Moench (1997) para acuíferos libres, mientras que para la zona fracturada se calculó una conductividad hidráulica 965 (m/día)m, mediante uso de curvas diagnóstico.



**Figura 4.7.** Gráficos logarítmicos de las pruebas 1.10 y 1.13. En color negro se muestran los datos de abatimiento y en rojo la derivada, donde: a) abatimiento de la prueba 1.10; b) identificación de geometrías de flujo en la curva derivativa del pozo 1.10; c) abatimiento de la prueba 1.13; d) identificación de geometrías de flujo en la curva derivativa del pozo 1.13.

## 4.2.2 Resultados integrales de la zona

En la zona de estudio se identificaron flujos con geometría radial (pruebas 1.1, 1.2, 1.10 y 1.18) y bilineal (pruebas 1.7, 1.13, 1.16 y 1.17) principalmente, así como regímenes esféricos ocasionados por la penetración parcial de los pozos de bombeo (pruebas 1.1, 1.3, 1.4, 1.9, 1.12, 1.14 y 1.15). En la tabla 4.2 y figura 4.8 se pueden observar las geometrías de flujo detectadas para cada una de las pruebas analizadas en esta zona, así como los periodos de tiempo en que se presentan.

En el estado de Baja California se cuantificaron transmisividades medias a bajas, con un promedio de  $300 \text{ m}^2/\text{día}$  en las zonas de Guadalupe (pruebas 1.1 a 1.4) y San Quintín (pruebas 1.6 a 1.8), cuya geología se conforma por rocas volcánicas y rellenos aluviales y fluviales con un alto contenido de arcilla, el cual disminuye la porosidad eficaz del acuífero (Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974; Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1977), como se muestra en la tabla 4.3. Estos valores resultan congruentes con los calculados por CONAGUA (2015), que reporta una transmisividad promedio de  $1000 \text{ m}^2/\text{día}$  en la zona norte y de  $150 \text{ m}^2/\text{día}$  al sur del estado.

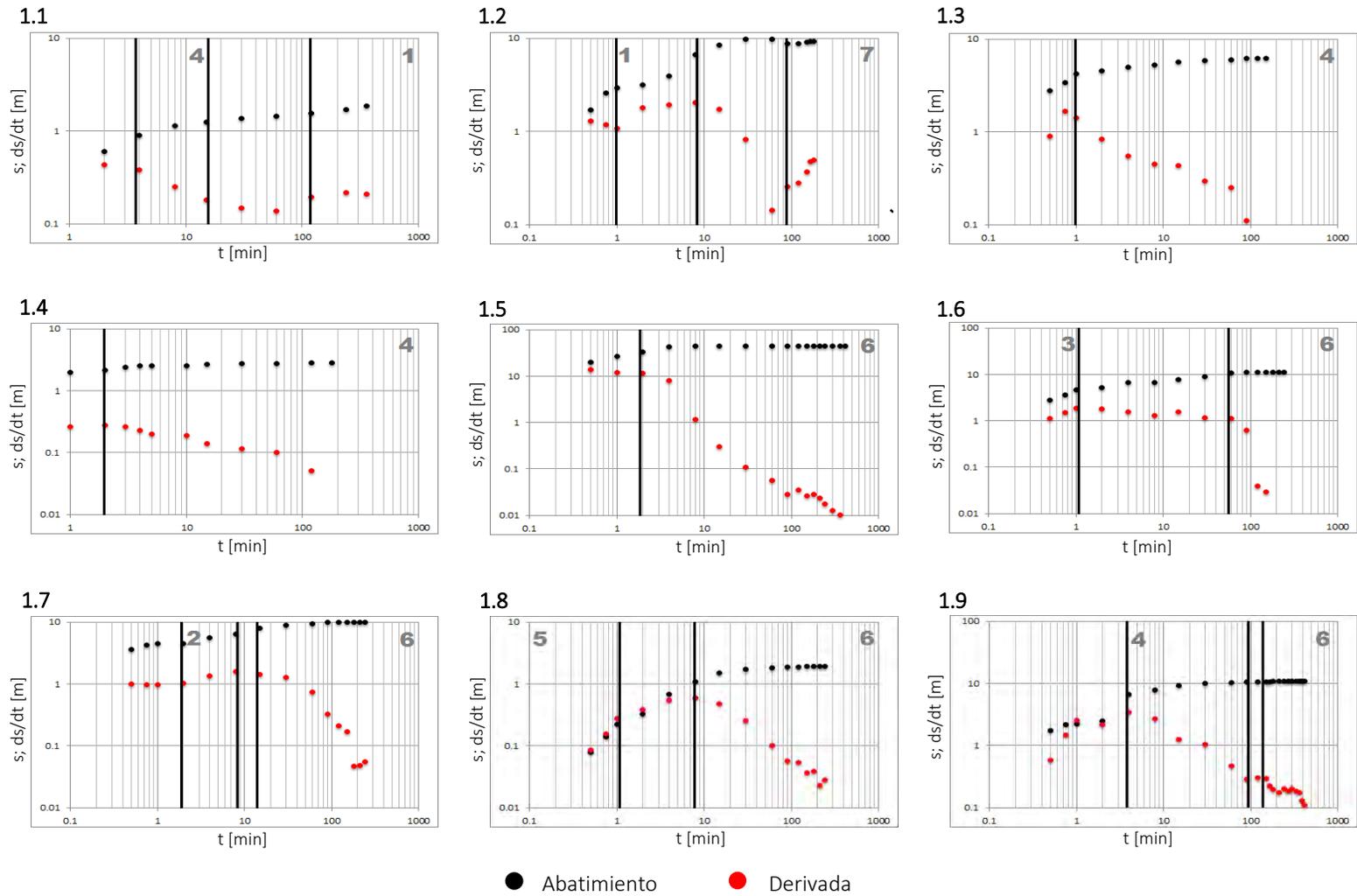
En la zona norte del estado de Baja California Sur se presentan transmisividades de  $370$  a  $870 \text{ m}^2/\text{día}$ , correspondientes a las gravas y arenas bien clasificadas que conforman el valle de Santo Domingo (pruebas 1.9 a 1.11). Dicha transmisividad aumenta hacia el sur, tomando valores de hasta  $13000 \text{ m}^2/\text{día}$  en los valles de Santiago (pruebas 1.12 a 1.15) y San José del Cabo (pruebas 1.16 a 1.18), conformados por rocas sedimentarias e ígneas fracturadas, respectivamente (Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1974; Técnicas modernas de Ingeniería, S.A., 1978), como se aprecia en la tabla 4.3. Para estos tres acuíferos, CONAGUA (2015) reporta valores de  $300$  a  $3600$ ,  $3500$ , y  $100$  a  $16500 \text{ m}^2/\text{día}$ , respectivamente, consistentes con los obtenidos en la reinterpretación.

Como se observa en la figura 4.9, del total de pruebas analizadas, el 50% presenta valores de transmisividad menores a  $500 \text{ m}^2/\text{día}$ , el 27% oscila entre  $500$  y  $1000$

m<sup>2</sup>/día, y el resto presenta valores mayores a 1000 m<sup>2</sup>/día, con valores atípicos de hasta 13600 m<sup>2</sup>/día.

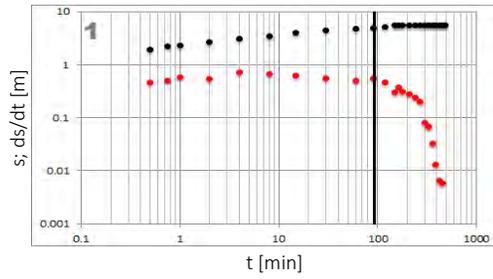
Clave interna de la prueba	Datos de la prueba			Geometrias de flujo						
	PT	Q	Duración	AP	FR	FB	FL	FE	FCC	EP
	[m]	[m <sup>3</sup> /día]	[hrs]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
1.1	19.6	864.0	6.0		120-360			4-15		
1.2	52.0	587.5	3.0		1-8					90-180
1.3	21.5	4017.2	2.5					1-150		
1.4	24.0	1036.8	3.0					2-180		
1.5	90.0	432.0	7.0						1-420	
1.6	50.3	518.4	4.0				0-1		30-240	
1.7	48.8	872.6	4.0			1-4			15-240	
1.8	15.1	1857.6	4.0	0-2					8-240	
1.9	100.0	4320.0	7.0					2-165	180-420	
1.10	100.0	6048.0	8.0		0.25-90					
1.11	85.0	3456.0	8.0						60-480	
1.12	64.0	9245.0	8.0					0.25-360		
1.13	29.0	2332.8	7.0			8-360				
1.14	150.0	9504.0	8.0					0.25-120	180-480	
1.15	14.0	864.0	8.0					4-30	90-480	
1.16	14.9	864.0	6.0			0.25-4			15-360	
1.17	30.0	8121.6	96.0			480-5760	60-240			
1.18	30.0	2419.2	5.0		2-240					

**Tabla 4.2.** Análisis no paramétrico, donde: *PT*: profundidad total del pozo de bombeo; *Q*: caudal de extracción; *AP*: almacenamiento de pozo; *FR*: flujo radial; *FB*: flujo bilineal; *FL*: flujo lineal; *FE*: flujo esférico; *FCC*: frontera de carga constante; *EP*: estado pseudoestacionario.

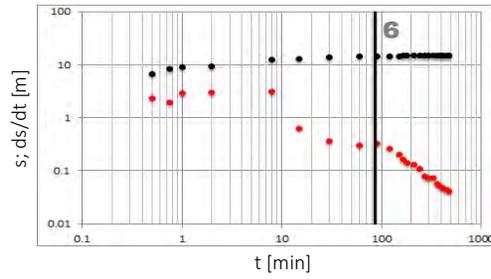


**Figura 4.8.** Gráficos logarítmicos de pruebas reinterpretadas en la zona de Baja California. Las líneas negras dividen a las zonas en que presentan las diferentes geometrías de flujo, donde: 1: *flujo radial*; 2: *flujo bilineal*; 3: *flujo lineal*; 4: *flujo esférico*; 5: *almacenamiento de pozo*; 6: *frontera de carga constante*; 7: *estado pseudoestacionario*.

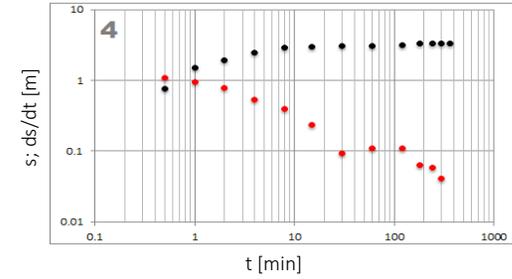
1.10



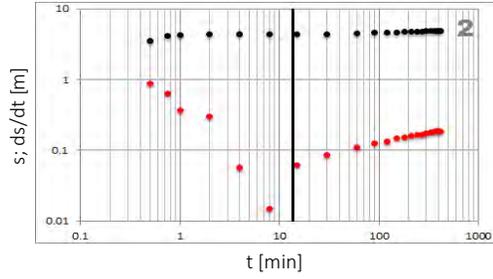
1.11



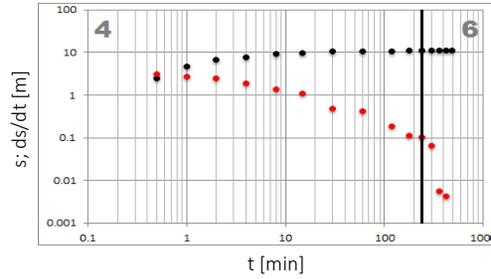
1.12



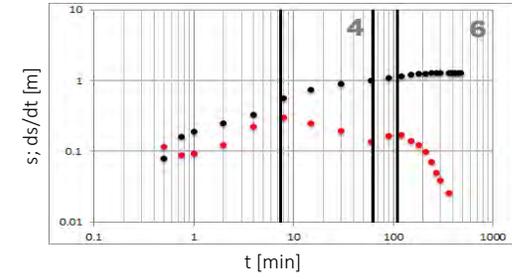
1.13



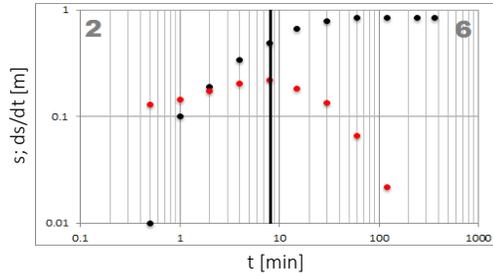
1.14



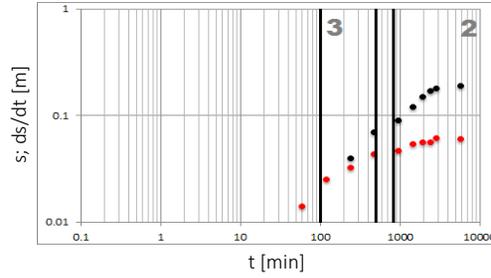
1.15



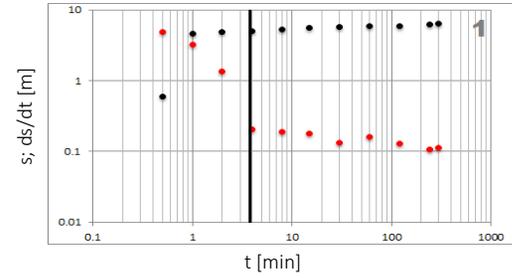
1.16



1.17



1.18



● Abatimiento      ● Derivada

Figura 4.8. Continuación.

Clave interna de la prueba	Modelo conceptual inferido	Modelo de ajuste	L de Bourdet	Parámetros					
				T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	RMSE	Otros parámetros calculados
				[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]		
1.1	Libre con doble porosidad y pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	--	537.41	285.90	339.95	329.07	0.16	K <sub>s</sub> =26.67 m/día; K <sub>v</sub> /K <sub>h</sub> =0.25
1.2	Libre con pozo parcialmente penetrante	Neuman (1974)	0.70	34.13	14.64	17.48	24.85	0.52	A=955.54 m <sup>2</sup>
1.3	Libre con pozo parcialmente penetrante	Tartakovsky-Neuman (2007)	--	2291.33	514.50			0.29	K <sub>s</sub> =44.56 m/día; K <sub>v</sub> /K <sub>h</sub> =0.33
1.4	Libre con pozo parcialmente penetrante	Tartakovsky-Neuman (2007)	0.45	908.50	410.80			0.14	K <sub>s</sub> =36.69 m/día; K <sub>v</sub> /K <sub>h</sub> =0.5

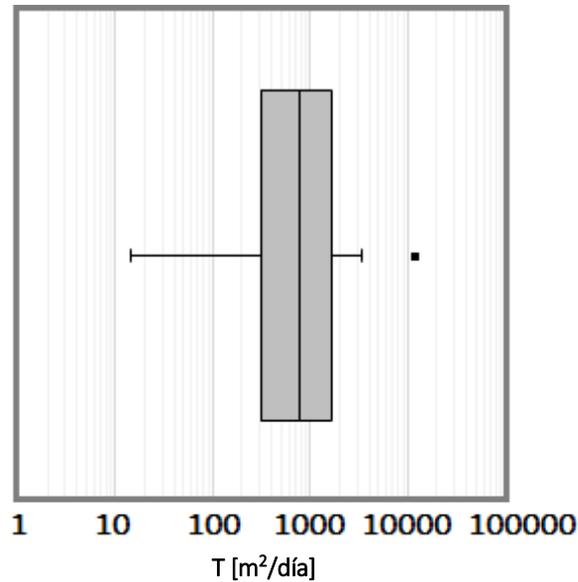
**Tabla 4.3.** Análisis paramétrico, donde: T<sub>1</sub>: transmisividad previa reportada en la fuente original de la prueba (ver tabla 4.1); T<sub>2</sub>: transmisividad resultante del ajuste con curvas tipo; T<sub>3</sub>: transmisividad de Cooper-Jacob (1946) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.8); T<sub>4</sub>: transmisividad obtenida por el método de Bourdet et al (2000) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.13); RMSE: valor del error de ajuste de los datos del abatimiento con curvas tipo; A: área de drenaje; C: coeficiente de almacenamiento de pozo; K<sub>b</sub>: conductividad hidráulica de la fractura; K<sub>s</sub>: conductividad hidráulica esférica; K<sub>v</sub>/K<sub>h</sub>: tasa de anisotropía; L: distancia a la frontera más cercana; x<sub>f</sub>: ancho de fractura; r<sub>i</sub>: radio de investigación de la prueba.

1.5	Semiconfinado con frontera de carga constante y pozo parcialmente penetrante	Moench (1985)	0.40	80.00	21.05			0.70	
1.6	Libre	Neuman (1974)	0.70	28.77	21.28			0.49	$x_t=0.8$ m
1.7	Libre con fracturas de conductividad finita	Moench (1997)	0.70	28.77	42.05			0.27	$K_{fb}=3.53$ (m/d)m
1.8	Libre con almacenamiento de pozo	Moench (1997)	0.40	226.71	1408.50			0.41	$C=3678.5$ L/m
1.9	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.50	207.36	696.70			0.39	$K_s=12.24$ m/día
1.10	Libre con flujo radial	Cooper-Jacob (1946)	0.70	708.48	864.2	826.14	860.24	0.12	$r_1=80$ m
1.11	Libre	Moench (1997)	0.65	155.52	370.00			0.08	$L=5.76$ m
1.12	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.70	3369.60	2963.70			0.18	$K_s=76.63$ m/día; $r_1=66$ m

**Tabla 4.3.** Continuación.

1.13	Libre con doble porosidad y fracturas de conductividad finita	Moench (1997)	--	1219.71	874.80			0.02	$K_{fb}=965.54 \text{ (m/d)m}$
1.14	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.80	12960.00	1087.90			0.04	$K_s=33.23 \text{ m/día; L}=15.9 \text{ m}$
1.15	Libre con doble porosidad	Moench (1997)	--	151.20	399.70			0.03	$K_s=14.84 \text{ m/día}$
1.16	Libre	Moench (1997)	--	191.55	411.50			0.07	$K_{fb}=625.53 \text{ (m/d)m; L}=3.29 \text{ m}$
1.17	Libre fracturado	Tartakovsky-Neuman (2007)	0.80	13633.90	12540.00			0.005	$K_{fb}=275887 \text{ (m/d)m}$
1.18	Libre con flujo radial infinito	Cooper-Jacob (1946)	0.70	762.91	897.00	730.06	1262.15	0.63	

**Tabla 4.3.** Continuación.



**Figura 4.9.** Gráfico de caja de las transmisividades calculadas en la zona de Baja California por medio del ajuste con curvas tipo. La línea central representa el valor de la media, mientras que el punto negro representa un valor atípico de la muestra de datos.

### 4.3 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en el Bajío mexicano

El Bajío mexicano forma parte de una cuenca sedimentaria continental ubicada en la porción central del país. Se caracteriza por tener topografía relativamente baja con respecto a sus alrededores. Su origen se encuentra asociado con la formación de la falla del Bajío, que constituye el límite entre la Faja Volcánica Transmexicana y la Mesa Central (Botero-Santa et al., 2015).

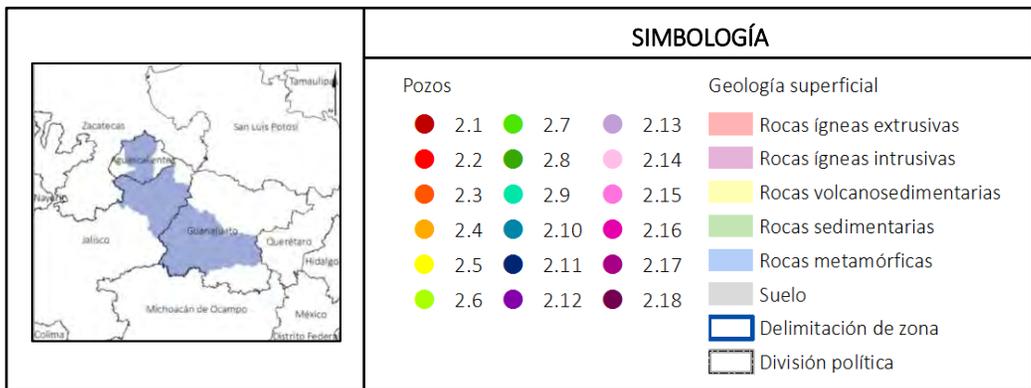
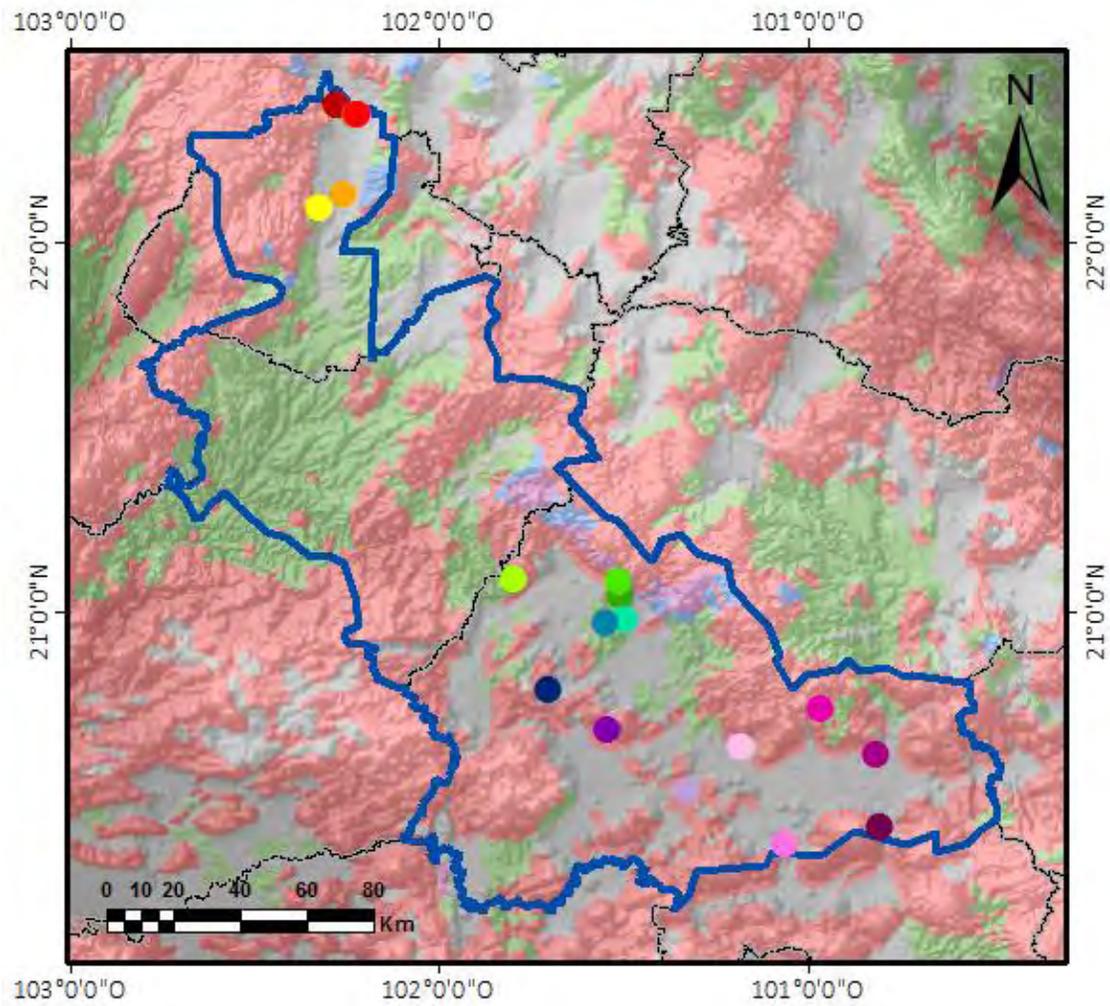
La historia geológica de la zona de estudio comprende eventos volcanosedimentarios, sedimentarios e ígneos intrusivos y extrusivos, que representan un tiempo geológico que va del periodo Triásico al Cuaternario, con un registro de más de 200 millones de años. Las rocas más antiguas se encuentran al norte de la zona de estudio, en el estado de Jalisco, y corresponden a esquistos ubicados en la zona de Lagos de Moreno (CONAGUA, 2009) y lutitas marinas encontradas en el valle de León (Geofísica de

Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998), ambas de edad triásica, seguidas por depósitos sedimentarios y volcanosedimentarios marinos y continentales de edad jurásica, cubiertos por rocas sedimentarias continentales y marinas cretácicas en la porción centro-norte de la zona de estudio. En la región también se presentan rocas ígneas intrusivas y extrusivas paleocénicas, así como rocas ígneas extrusivas de edad neógena, que representan eventos volcánicos episódicos que tuvieron lugar dentro de la cuenca (Botero-Santa et al., 2015) (figura 4.10).

La transmisividad en la zona de estudio varía de 100 a 300 m<sup>2</sup>/día (Proyesco, S.A., 1982; CONAGUA, 2015). Generalmente, los sectores de mayor relevancia para la extracción de agua se ubican a profundidades menores de 500 metros, en rocas ígneas y sedimentarias, cuyo espesor saturado varía de los 25 metros en los flancos de los valles hasta 350 metros en sus zonas centrales (Consultores, S.A., 1981; Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998; Ingeniería Geológica Computarizada, 1999). Muchos de los acuíferos de la zona eran originalmente confinados, pero cambiaron su comportamiento hidráulico a libre como consecuencia de la sobreexplotación. Un ejemplo del problema antes mencionado es el valle de Irapuato, en el estado de Guanajuato, donde la extracción de agua ha provocado tasas de subsidencia del terreno de hasta 6 centímetros por año (Garduño et al., 2000).

En la zona de estudio se tienen más de 15000 pozos que extraen aproximadamente 4.1\*10<sup>12</sup> litros de agua por año, de los cuales, el 85% se destina a fines agrícolas, el 13% para consumo humano y el resto para actividades industriales (CONAGUA, 2014; 2015).

Se realizó la reinterpretación de 18 pruebas hidráulicas en el Bajío, de las cuales 5 se encuentran en el estado de Aguascalientes y 13 en Guanajuato, cuyas ubicaciones se observan en la figura 4.10. La tabla 4.4 muestra el nombre oficial del pozo de bombeo, las coordenadas UTM, el estado y el acuífero donde se ubica el pozo de bombeo, y la fuente original de los datos.



**Figura 4.10.** Ubicación de pruebas hidráulicas reinterpretadas en la zona del Bajío (Geología tomada de CONABIO, 2012).

Clave interna de la prueba	Nombre oficial del pozo de bombeo	UTM X	UTM Y	Estado	Acuífero	Fuente original
		[m]	[m]			
		WGS84				
2.1	41	780699	2476478	Aguascalientes	Valle de Aguascalientes	Consultores, S.A., 1981
2.2	190	786463	2473994	Aguascalientes	Valle de Aguascalientes	Consultores, S.A., 1981
2.3	184	785911	2473737	Aguascalientes	Valle de Aguascalientes	Consultores, S.A., 1981
2.4	494	783417	2449471	Aguascalientes	Valle de Aguascalientes	Consultores, S.A., 1981
2.5	712	776684	2445680	Aguascalientes	Valle de Aguascalientes	Consultores, S.A., 1981
2.6	L0488	209886	2334459	Guanajuato	Valle de León	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.7	L0033	239241	2333611	Guanajuato	Valle de León	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.8	L0018	239461	2328862	Guanajuato	Valle de León	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.9	L0130	240594	2321785	Guanajuato	Valle de León	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.10	L141	235537	2320949	Guanajuato	Valle de León	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.11	L1327	218993	2300878	Guanajuato	Valle de León	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.12	IGC-373	295349	2288522	Guanajuato	Valle de Pénjamo-Abasolo	Ingeniería Geológica Computarizada, 1999
2.13	1158	257732	2270191	Guanajuato	Irapuato-V. de Santiago	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.14	163	273011	2282967	Guanajuato	Irapuato-V. de Santiago	Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., 1998
2.15	IGC-1880	285148	2253883	Guanajuato	Valle de Celaya	Ingeniería Geológica Computarizada, 1999
2.16	IGC-1403	295784	2294057	Guanajuato	Valle de Celaya	Ingeniería Geológica Computarizada, 1999
2.17	IGC-1149	311050	2280356	Guanajuato	Valle de Celaya	Ingeniería Geológica Computarizada, 1999
2.18	IGC-1446	311715	2258341	Guanajuato	Valle de Celaya	Ingeniería Geológica Computarizada, 1999

**Tabla 4.4.** Datos generales de las pruebas de bombeo reinterpretadas en la zona del Bajío.

### 4.3.1 Reinterpretación de una prueba hidráulica en la zona

Se presenta la reinterpretación de la prueba 2.12, realizada en el pozo IGC-373, ubicado a las afueras del municipio Chamacua, estado de Guanajuato. El pozo fue perforado en una alternancia de depósitos aluviales, sedimentos lacustres y derrames lávicos, con intercalaciones de horizontes arcillosos, en el valle de Pénjamo-Abasolo. (CONAGUA, 2015). Para esta prueba, se reportó una transmisividad previa de 3.47 m<sup>2</sup>/día (Ingeniería Geológica Computarizada, 1999).

La prueba tuvo una duración de 4.75 horas a un caudal constante de 1382.4 m<sup>3</sup>/día. Debido al ruido que presentaban los datos, fue necesario aplicar varias ventanas de suavizamiento (figura 4.11), con valores entre 0.1 y 1. Finalmente, la interpretación se realizó aplicando una ventana de 0.8, mediante el algoritmo de Bourdet et al. (1989) (figura 4.12a).

Por medio del análisis derivativo (figura 4.12b) fue posible determinar que, debido a efectos de almacenamiento, durante el primer minuto de la prueba el agua se extrae directamente del pozo de bombeo, a una tasa de 43.8 L/m. Después del primer minuto se presenta un periodo de flujo radial local, para el cual se calculó un valor de transmisividad de 6.4 m<sup>2</sup>/día por medio del método de Renard et al. (2009). Posteriormente, se observa una caída abrupta de la curva derivativa que se recupera de forma casi inmediata, sugiriendo efectos de doble porosidad en la formación. Finalmente, el flujo en el acuífero se somete a un régimen lineal durante el resto de la prueba.

Con base en la geología del subsuelo de la zona (Lesser-Illades y González-Posadas, 1998; CONAGUA, 2015) y la identificación de geometrías de flujo, se eligió el modelo de Moench (1997) para acuíferos libres, para el ajuste de los datos y la obtención de los parámetros hidráulicos asociados a la prueba, como se muestra en la figura 4.12c. El valor de transmisividad obtenido por este método fue de 28.28 m<sup>2</sup>/día, con un RMSE de 0.38 y varianza de 0.1444, debido a algunas inconsistencias en los intervalos de 0.25 a 1, 12 a 40 y 120 a 200 minutos, por efectos de almacenamiento de pozo y doble porosidad, no considerados en el modelo.

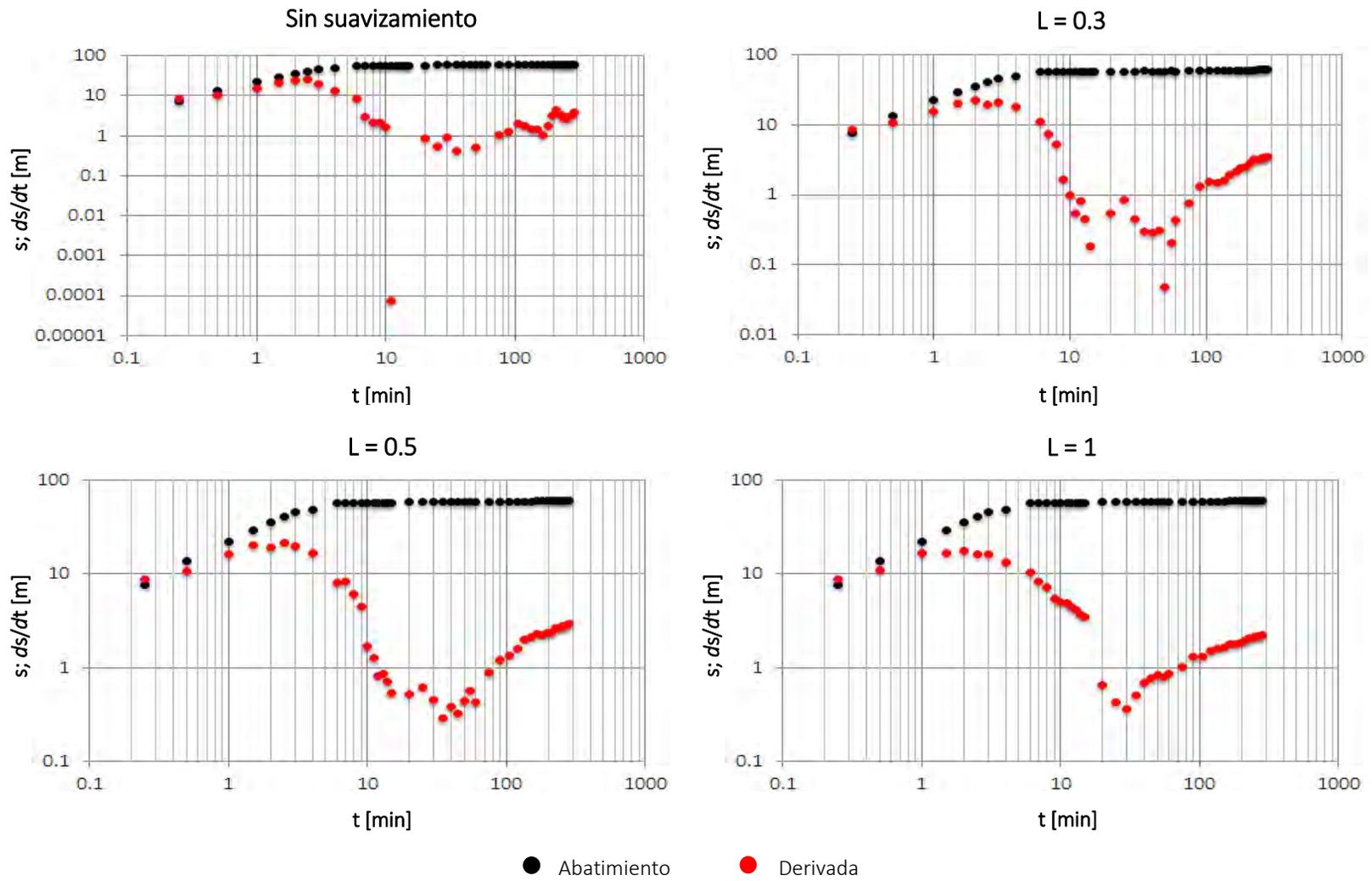
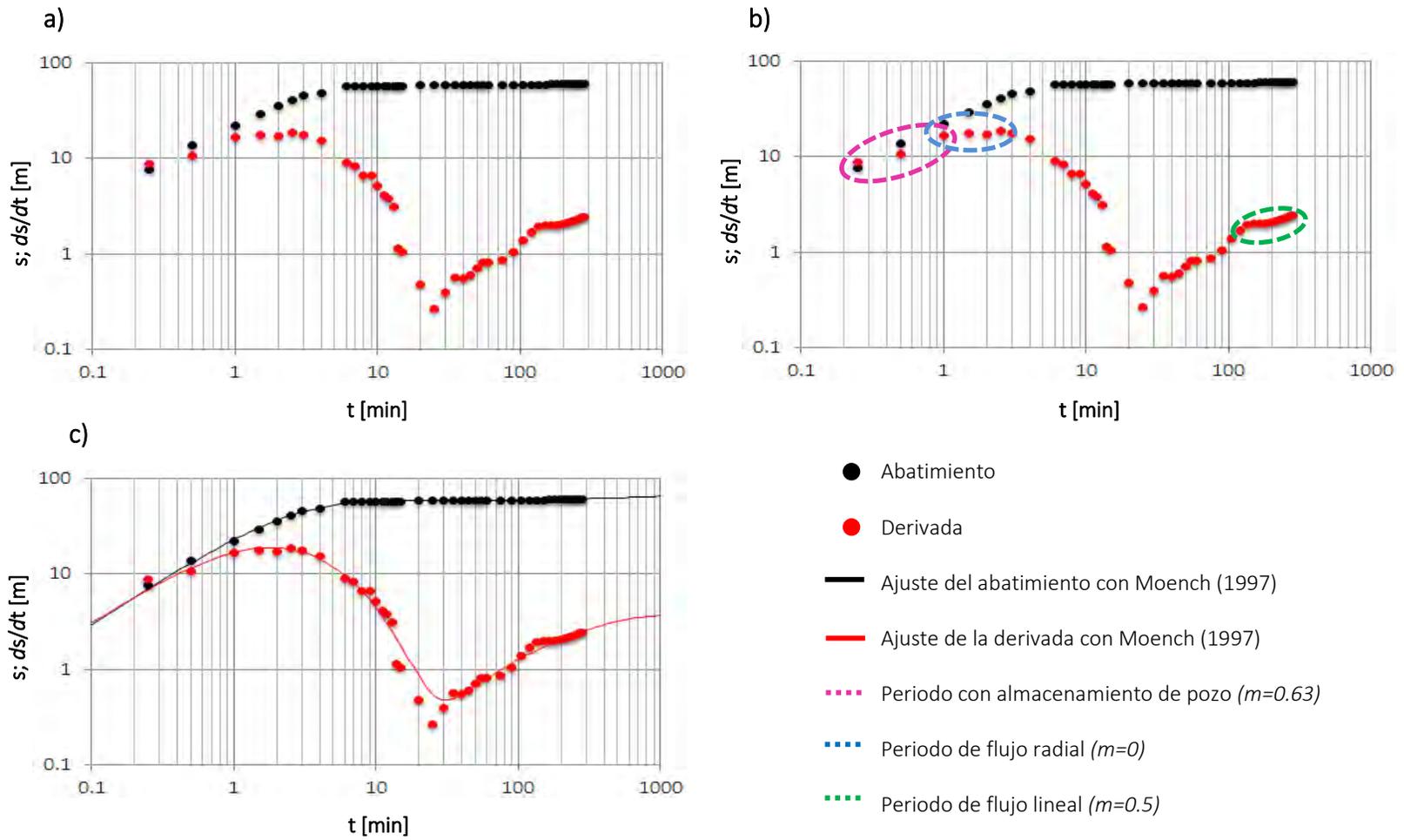


Figura 4.11. Suavizamiento de los datos. En color negro se muestra el abatimiento del nivel dinámico y en color rojo su respectiva derivada.



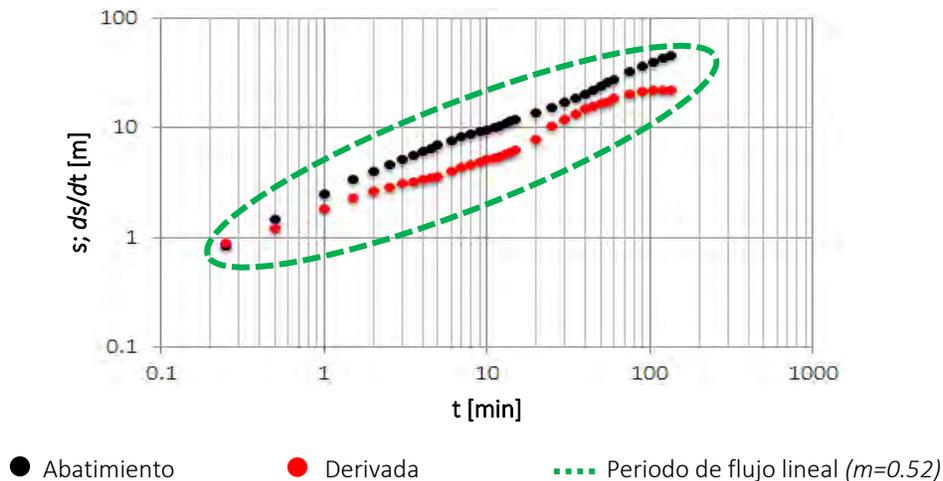
**Figura 4.12.** Gráficos logarítmicos de la prueba 2.12, donde: a) abatimiento y curva derivativa con un valor de suavizamiento de 0.8; b) análisis no paramétrico; c) ajuste del modelo de Moench (1997).

El Bajío mexicano forma parte de un acuífero regional de composición heterogénea, donde se extrae agua de un medio sedimentario granular, como es el caso de la prueba 2.12, recién analizada, y también de un medio donde el flujo se encuentra controlado por fracturas en rocas basálticas y riolíticas. Con la aplicación del análisis derivativo fue posible determinar cuáles de las pruebas analizadas se desarrollaron en medio granular, y cuáles en medio fracturado, como se observa en la prueba 2.16 (figura 4.13), ubicada en el valle de Celaya, Guanajuato, dentro del mismo acuífero regional.

Para la interpretación mediante análisis derivativo se aplicó una ventana de suavizamiento de 0.8 a los datos, con lo que fue posible determinar que la totalidad del flujo se presenta en un régimen lineal, es decir, se encuentra controlado por fracturas.

El cálculo de la dimensión de flujo del abatimiento (ecuación 2.14) en este periodo tuvo un valor de 0.96, confirmando la presencia del régimen lineal.

Se realizó el ajuste de los datos al modelo de [Gringarten-Ramey \(1974\)](#) para acuíferos fracturados, con lo cual se calculó una transmisividad promedio de 2.66 m<sup>2</sup>/día para la zona fracturada, consistente con la reportada en la fuente original de la prueba, que corresponde a 4.94 m<sup>2</sup>/día ([Ingeniería Geológica Computarizada, 1999](#)).



**Figura 4.13.** Identificación de geometrías de flujo de la prueba 2.16.

### 4.3.2 Resultados integrales de la zona

Las pruebas analizadas en la zona se realizaron a caudales constantes que van de 500 a 5000 m<sup>3</sup>/día, con duraciones entre 2 y 9 horas. La tabla 4.5 y figura 4.14 muestran todas las geometrías de flujo detectadas en cada una de las pruebas que se interpretaron en el Bajío, así como los periodos de tiempo de cada régimen presente. La mayor parte de estas pruebas presentan efectos de almacenamiento de pozo que desaparecen generalmente durante el primer minuto, como se observa en la tabla 4.5 (pruebas 2.1, 2.9, 2.12, 2.15 y 2.17).

En las pruebas 2.5, 2.9, 2.11 y 2.12, la geometría radial de flujo se presenta durante los primeros minutos de bombeo, como expresión a los efectos de la vecindad del pozo.

Se infiere que en las pruebas 2.1, 2.3, 2.7, 2.8, 2.13 y 2.14 el agua se extrae de un medio granular, lo cual se observa por la predominancia de una geometría de tipo radial de flujo hacia el pozo de bombeo. Por otra parte, las pruebas 2.4, 2.6, 2.12, 2.16 y 2.18, fueron realizadas en sectores fracturados del acuífero regional, lo cual se puede saber por el régimen lineal de flujo que se presenta en cada una de éstas. Debido a que la profundidad de los pozos es similar para ambos casos, se infiere que la variación litológica en el acuífero se presenta en interdigitaciones, no de manera lineal. Al ubicar las pruebas recién mencionadas en el mapa de la figura 4.10, se puede ver que la estructura inferida mediante análisis derivativo es concordante con la geología reportada en cada zona.

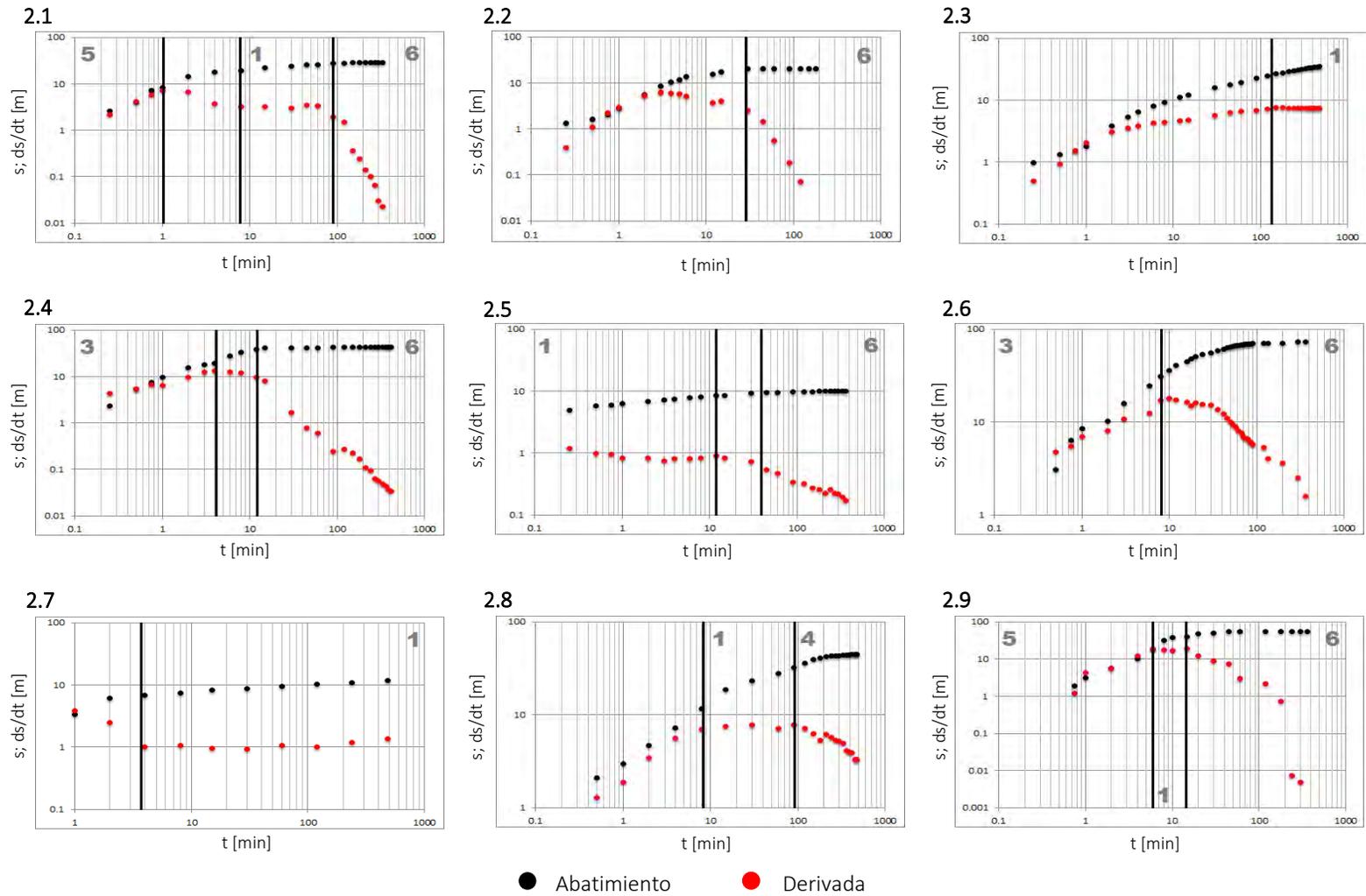
De las 18 pruebas analizadas, 10 de ellas se estabilizan a tiempos tempranos, por medio de una frontera de carga constante local (pruebas 2.1, 2.2, 2.4, 2.6, 2.9, 2.10, 2.11, 2.14, 2.15 y 2.17).

En el 95% de los casos, los valores calculados con el método de [Cooper-Jacob \(1946\)](#) y con análisis derivativo son concordantes con resultados con curvas tipo, lo que aumenta la confiabilidad de los resultados (tabla 4.6).

El análisis por medio de curvas tipo muestra que el 83% de las pruebas muestran una transmisividad menor a 300 m<sup>2</sup>/día, con una media de 80 m<sup>2</sup>/día. El 17% de las pruebas presenta transmisividades mayores a 300 m<sup>2</sup>/día, con valores atípicos de hasta 27300 m<sup>2</sup>/día, en la zona de Baja California Norte (figura 4.15).

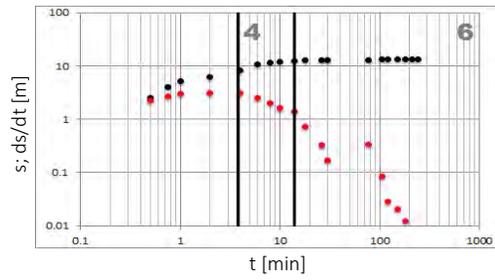
Clave interna de la prueba	Datos de la prueba			Geometrías de flujo				
	PT	Q	Duración	AP	FR	FL	FE	FCC
	[m]	[m <sup>2</sup> /día]	[hrs]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
2.1	180	1728.00	6.0	0-1	8-60			60-360
2.2	150	2596.32	3.0					30-180
2.3	200	1434.24	8.0		150-480			
2.4	200	1728.00	7.0			0-4		12-420
2.5	70	2073.60	6.0		0.5-12		30-360	
2.6	300	1468.80	6.0			0.5-8		8-360
2.7	144	2246.40	8.0		2-480			
2.8	120	602.20	8.0		8-60		60-480	
2.9	180	1296.00	6.0	0.25-4	4-10			10-360
2.10	108	1209.60	4.0				2-10	14-240
2.11	200	5184.00	9.0		0.25-2		2-20	50-540
2.12	150	1382.40	4.8	0-1	1-4	150-285		
2.13	33	2733.70	4.5		4-60		0.25-4	
2.14	150	2073.60	6.0		8-45			90-360
2.15	154	5702.40	2.8	0.25-1			6-15	15-75
2.16	270	1036.80	2.3			0.25-135		
2.17	102	552.96	1.8	0.25-0.5				4-105
2.18	128	639.36	1.8			25-105		

**Tabla 4.5.** Análisis no paramétrico, donde: *PT*: profundidad total del pozo de bombeo; *Q*: caudal de extracción; *AP*: almacenamiento de pozo; *FR*: flujo radial; *FL*: flujo lineal; *FE*: flujo esférico; *FCC*: frontera de carga constante.

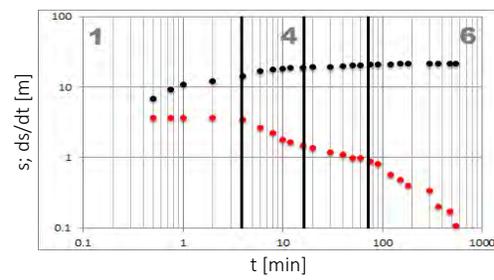


**Figura 4.14.** Gráficos logarítmicos de pruebas reinterpretadas en la zona del Bajío. Las líneas negras dividen a las zonas en que se presentan las diferentes geometrías de flujo, donde: 1: *flujo radial*; 3: *flujo lineal*; 4: *flujo esférico*; 5: *almacenamiento de pozo*; 6: *frontera de carga constante*.

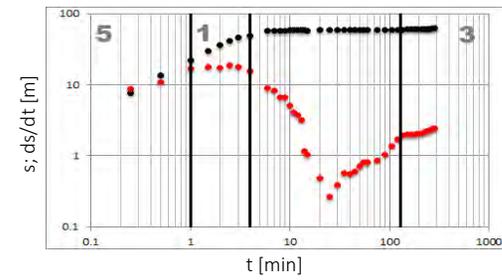
2.10



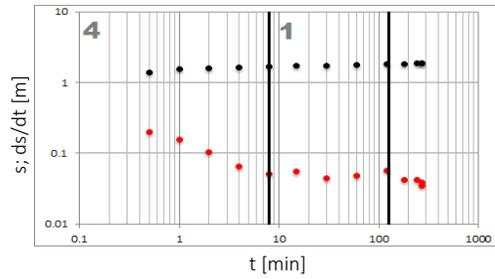
2.11



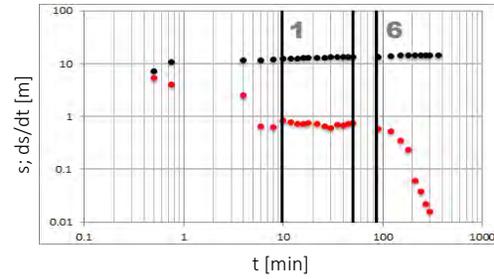
2.12



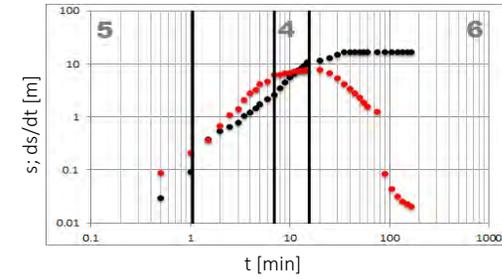
2.13



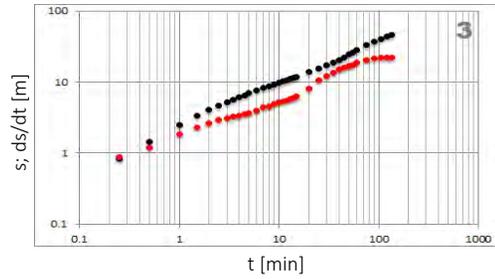
2.14



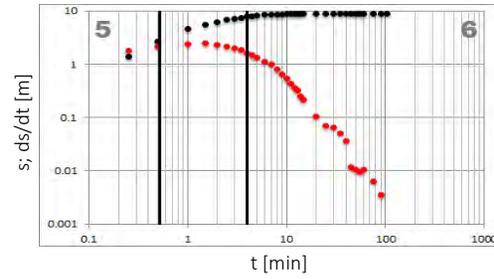
2.15



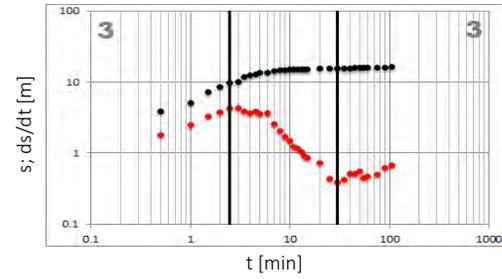
2.16



2.17



2.18



● Abatimiento    ● Derivada

Figura 4.14. Continuación.

Clave interna de la prueba	Modelo conceptual inferido	Modelo de ajuste	L de Bourdet	Parámetros					
				T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	RMSE	Otros parámetros calculados
				[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]		
2.1	Libre con almacenamiento de pozo	Moench (1997)	0.50	198.72	11250.00	42.30	42.30	0.78	C=145.5 L/m
2.2	Libre	Moench (1997)	–	36.29	27340.00			0.66	
2.3	Libre fracturado	Barker (1988)	0.70	152.93	20.32	15.50	15.30	0.20	
2.4	Libre con posible fracturamiento en la vecindad del pozo	Moench (1997)	0.70	0.013	97.11			0.15	x <sub>f</sub> =0.68 m
2.5	Libre con pozo parcialmente penetrante	Tartakovsky-Neuman (2007)	0.60	196.99	203.70	196.00	192.00	0.10	K <sub>s</sub> =5.16 m/día
2.6	Libre	Moench (1997)	0.70	6.42	24.81			0.47	x <sub>f</sub> =1.7 m

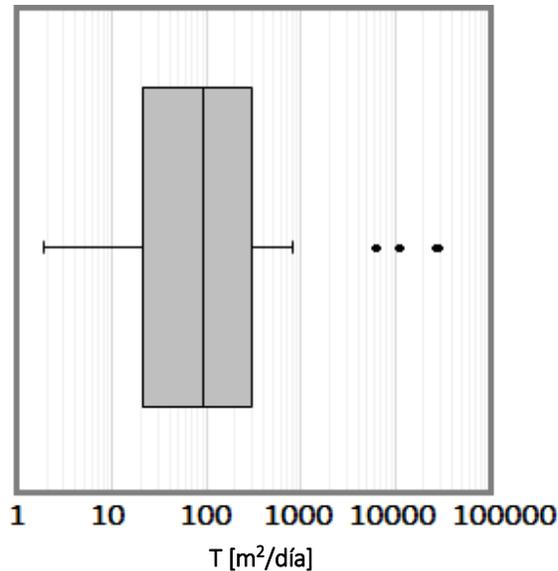
**Tabla 4.6.** Análisis paramétrico, donde: T<sub>1</sub>: transmisividad previa reportada en la fuente original de la prueba (ver tabla 4.4); T<sub>2</sub>: transmisividad resultante del ajuste con curvas tipo; T<sub>3</sub>: transmisividad de Cooper-Taraba (1970) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.8); T<sub>4</sub>: transmisividad obtenida por el método de Horowitz et al. (2000) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.13); RMSE: valor del error de ajuste de los datos del abatimiento con curvas tipo; C: coeficiente de almacenamiento de pozo; E: eficiencia del pozo de bombeo; K<sub>s</sub>: conductividad hidráulica esférica; K<sub>v</sub>/K<sub>h</sub>: tasa de anisotropía; L: distancia a la frontera más cercana; x<sub>f</sub>: ancho de fractura; r<sub>i</sub>: radio de investigación de la prueba.

2.7	Libre con flujo radial infinito	Cooper-Jacob (1946)	0.40	83.60	184.90	166.60	162.60	0.42	
2.8	Libre con pozo parcialmente penetrante	Tartakovsky-Neuman (2007)	0.90	5.63	6.06	7.00	6.40	0.71	$K_s=0.42$ m/día
2.9	Libre con almacenamiento de pozo	Moench (1997)	0.70	1.79	18.50	4.20	5.80	0.52	$C=202.7$ L/m
2.10	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.30	2.20	168.60			0.58	$K_s=4.22$ m/día
2.11	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.70	70.00	214.90	112.50	115.40	0.63	$K_s=8.75$ m/día; $L=4.19$ m
2.12	Libre con doble porosidad y almacenamiento de pozo	Moench (1997)	0.80	3.47	28.28	5.40	6.40	0.38	$C=1133.5$ L/m
2.13	Libre con flujo radial infinito	Cooper-Jacob (1946)	--	65.60	5953.00	4875.90	4254.00	0.16	$K_s=230.42$ m/día; $K_v/K_h=0.022$ ; $E=36.26\%$ ; $r_i=138.77$ m
2.14	Libre	Moench (1997)	0.30	336.00	221.30	237.30	229.80	0.45	$L=9$ m; $E=45.97\%$

Tabla 4.6. Continuación.

2.15	Semiconfinado con almacenamiento de pozo	Hantush (1960)	0.70	46.57	1.87			0.36	C=820.23 L/m; K <sub>s</sub> =3.11 m/día
2.16	Flujo controlado por fracturas	Gringarten-Ramey (1974)	0.80	4.94	2.66			0.31	
2.17	Semiconfinado con frontera de carga constante	Hantush (1960)	0.80	9.85	7.87			0.03	C=76.8 L/m
2.18	Semiconfinado con doble porosidad	Barker (1988)	0.50	14.26	44.79			0.51	x <sub>i</sub> =0.66 m

**Tabla 4.6.** Continuación.



**Figura 4.15.** Gráfico de caja de las transmisividades calculadas en el Bajío mexicano por medio del ajuste con curvas tipo. La línea central representa el valor de la media, mientras que los puntos negros representan valores atípicos de la muestra de datos.

#### 4.4 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en la Cuenca de México

La Cuenca de México es una depresión volcanotectónica ubicada en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana, cuyo origen se encuentra relacionado con el sistema de arco-trinchera propiciado por la subducción de la placa de Cocos con la placa de Norteamérica (Ferrari et al., 1999; Cerca-Martínez et al., 2000). Hidráulicamente, la cuenca es de naturaleza endorreica, y se encuentra rodeada por sierras volcánicas, abanicos y llanuras aluviales.

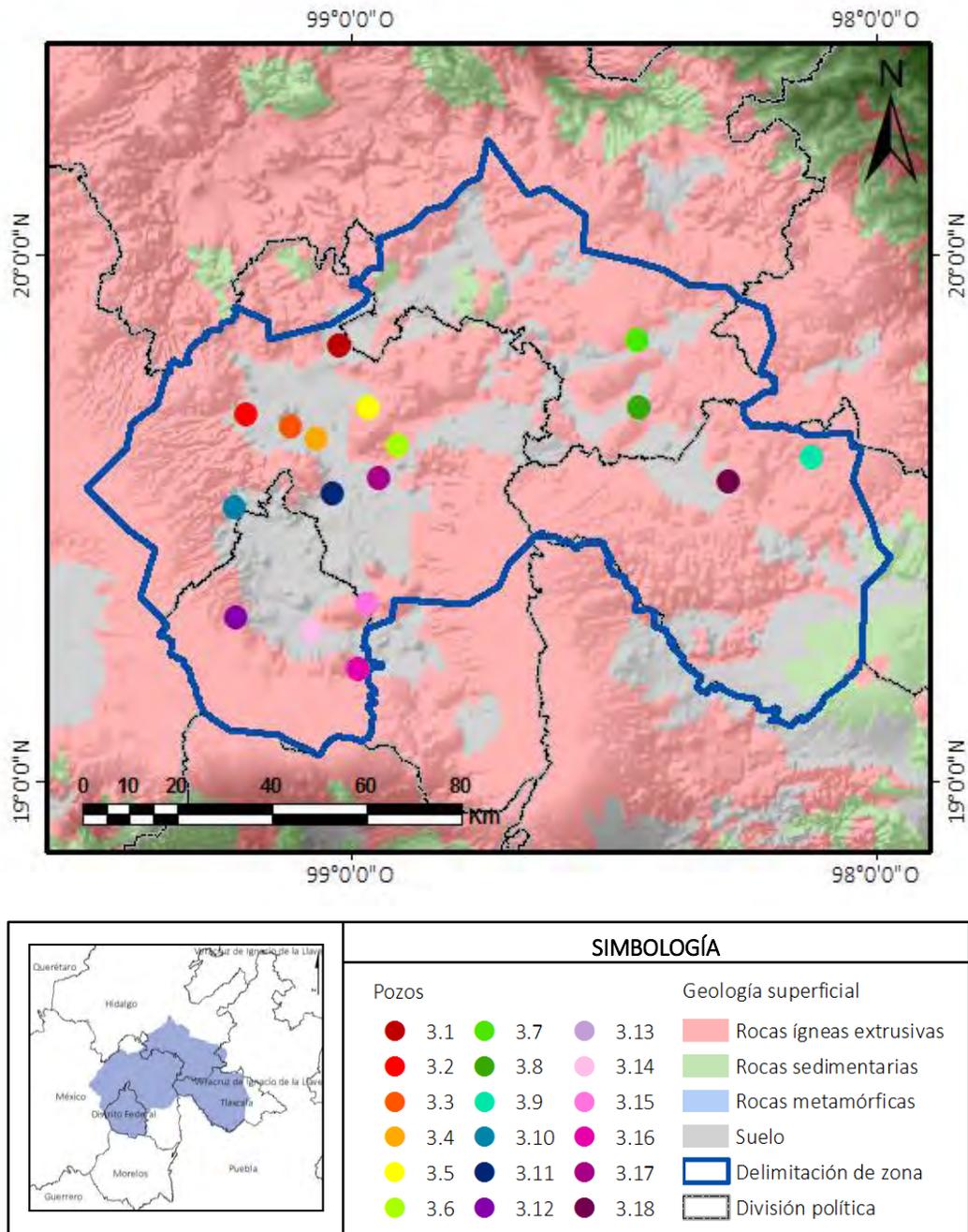
La evolución geológica del acuífero se subdivide en dos episodios magmáticos, que son: [1] el principio de un arco volcánico efusivo de edad miocénica, conformado por andesitas, dacitas, riolitas e ignimbritas, todas de composición intermedia, cuyo espesor aproximado es de 1500 metros y se presenta para la mayor parte de la cuenca; y [2] ubicado en la zona suroeste de la Ciudad de México, un arco formado por estratovolcanes de edad Plioceno-Pleistoceno de notable variabilidad composicional,

cuyas litologías principales son andesitas y andesitas basálticas, con un espesor promedio de 800 metros. En la cima de esta unidad se presenta una capa intermitente de aluvión cuaternario (Ferrari et al., 2012; Arce et al., 2013) (figura 4.16).

Los acuíferos de la zona tienen comportamientos hidráulicos de tipo libre y semiconfinado. La profundidad del nivel estático varía de 60 a 170 metros (año 2010) (Hernández-Espriú et al., 2014), mientras que su espesor saturado supera los 800 metros, siendo de mayor importancia para la extracción de agua los primeros 300 metros (Herrera et al., 1989). La conductividad hidráulica presenta una fuerte anisotropía, variando de  $8.64 \cdot 10^{-8}$  a  $8.64 \cdot 10^3$  m/día, los valores más bajos se ubican en el valle de Chalco-Amecameca, mientras que los más altos se encuentran en los valles de Apán y Tecmulco (Rudolph et al., 1991; CONAGUA, 2007; CONAGUA, 2015).

En la zona existen más de 4500 pozos que extraen anualmente  $2.12 \cdot 10^{12}$  litros de agua, de los cuales, el 20% se utiliza para actividades agrícolas, el 70% para consumo humano y el resto se destina a fines industriales (CONAGUA 2014; 2015).

Se reinterpretaron 18 pruebas en la zona, de las cuales, 9 pozos de bombeo se encuentran en el Estado de México, 2 en Hidalgo, 2 en Tlaxcala y 5 en el Distrito Federal, como se aprecia en la figura 4.16. La tabla 4.7 muestra el nombre oficial de cada pozo de bombeo, el estado de la República y el acuífero que los contiene, las coordenadas UTM y la fuente original de los datos.



**Figura 4.16.** Ubicación de pruebas hidráulicas reinterpretadas en la Cuenca de México (Geología tomada de [CONABIO, 2012](#)).

Clave interna de la prueba	Nombre oficial del pozo de bombeo	UTM X [m]	UTM Y [m]	Estado	Acuífero	Fuente original
		WGS84				
3.1	38Z Tizayuca Zumpango	497662	2192140	Estado de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.2	11 Ramal Teoloyucan	479340	2177904	Estado de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.3	17Bis Ramal FFC	488124	2175246	Estado de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.4	11 Ramal Ecatepec	493195	2172769	Estado de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.5	4 Cda. Hidalgo Tecámac	503462	2179163	Estado de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.6	460	509375	2171423	Estado de México	Valle de Cuautitlán-Pachuca	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.7	T-9	557035	2193254	Hidalgo	Valle de Tecocomulco	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.8	1 Apán	557296	2179349	Hidalgo	Valle de Apán	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.9	Villas de San Martín	591695	2169120	Tlaxcala	Valle de Alto Atoyac	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.10	760 Viveros-La Loma	476689	2158225	Estado de México	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.11	318 SAPASE	496281	2161084	Estado de México	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.12	5B Pedregal	477035	2135135	Distrito Federal	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.13	Vivero D.F.	492080	2132308	Distrito Federal	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.14	Vivero 1-B	492117	2132124	Distrito Federal	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.15	Ramal Mixquic Sta. Catarina	503297	2138013	Distrito Federal	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.16	Tecómitl	501525	2124056	Distrito Federal	VZMCM	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.17	BV-46	505500	2164544	Estado de México	Valle de Texcoco	Ariel Consultores, S.A., 2007
3.18	Bucnavista	575167	2163854	Tlaxcala	Valle de Soltepec	Ariel Consultores, S.A., 2007

**Tabla 4.7.** Datos generales de las pruebas de bombeo reinterpretadas en la Cuenca de México.

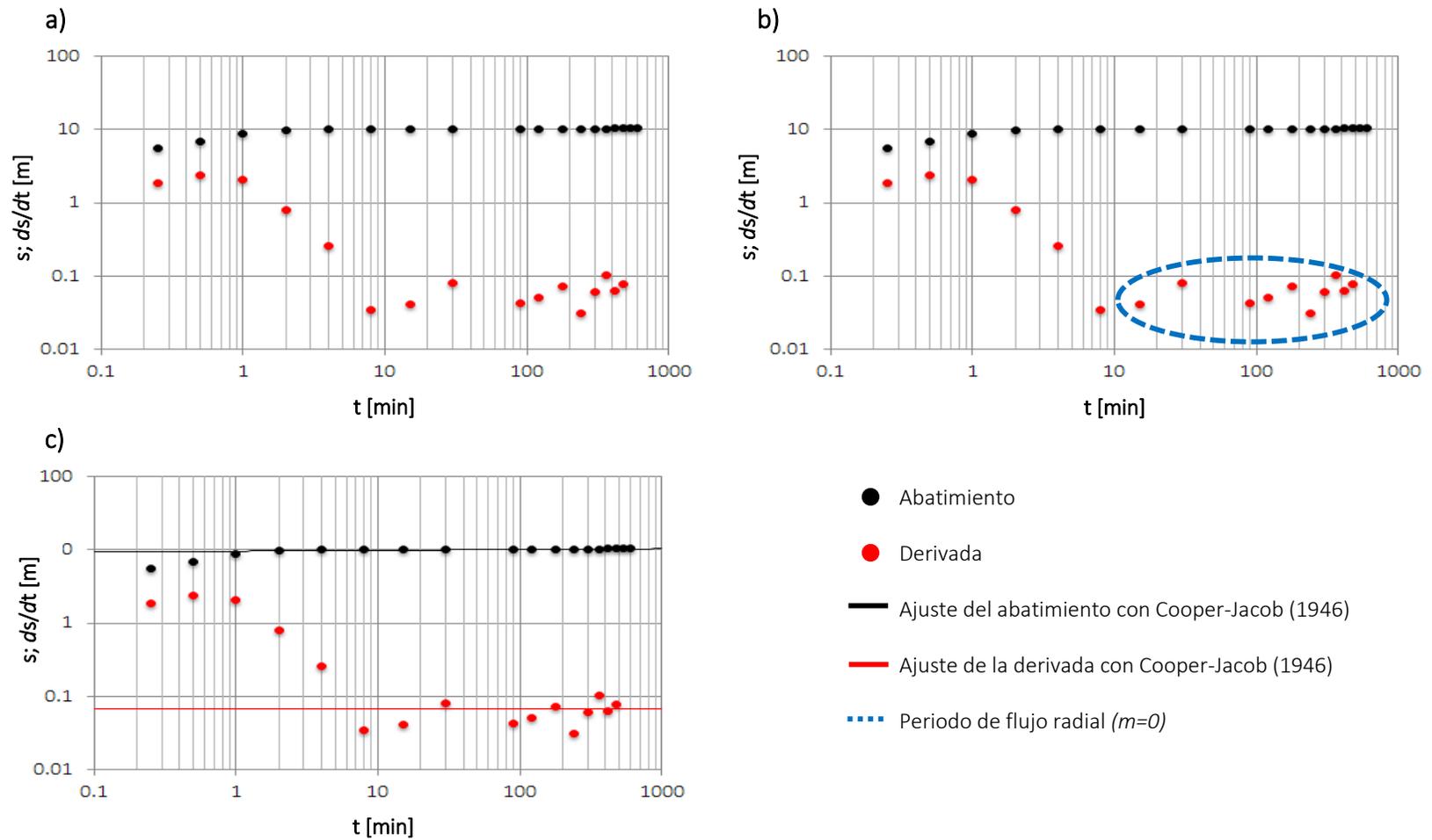
#### 4.4.1 Reinterpretación de una prueba hidráulica en la zona

A continuación, se desarrolla la reinterpretación de la prueba 3.10, realizada en el pozo 760 Viveros La Loma, ubicado en el Estado de México, perteneciente al acuífero del valle de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. La geología del subsuelo en esta zona se conforma por arena fina, mediana y gruesa en los primeros 50 metros, y posteriormente se tienen intercalaciones de arenas y gravas (CONAGUA, 2015). La fuente original de la prueba (Ariel Consultores, S.A., 2007) reporta un valor de transmisividad de  $2000 \text{ m}^2/\text{día}$ .

La figura 4.17a ilustra de manera simultánea la curva de abatimiento del nivel dinámico en el pozo de bombeo y su respectiva derivada, suavizada con una ventana de 0.6 por medio del método de Bourdet et al. (1989).

Durante los primeros 15 minutos de la prueba no fue posible identificar un régimen de flujo, pero sí se observa un decaimiento y recuperación inmediata de la curva derivativa, que puede interpretarse como presencia de porosidad secundaria en el sistema. A partir del minuto 15 se observa una geometría radial de flujo, que predomina hasta el final de la prueba, como expresión a la naturaleza detrítica del acuífero en esta zona (figura 4.17b). La transmisividad obtenida por medio de la ecuación de Renard et al. (2009) para este periodo fue de  $6372.4 \text{ m}^2/\text{día}$ . El radio de investigación de la prueba fue de 187.47 metros.

Debido a la presencia del régimen radial en toda la prueba, se eligió al modelo de Cooper- Jacob (1946) para la interpretación con curvas tipo (figura 4.17c), por medio del cual se obtuvo una transmisividad promedio de  $4874.01 \text{ m}^2/\text{día}$ , con un valor de RMSE de 0.4 y varianza de 0.16.

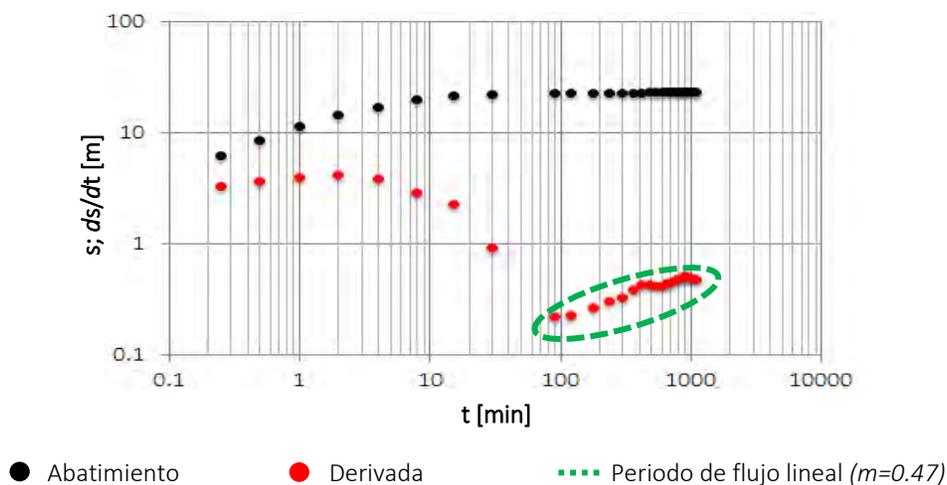


**Figura 4.17.** Gráficos logarítmicos de la prueba 3.10, donde: a) abatimiento y curva derivativa con un valor de suavizamiento de 0.6; b) identificación de geometrías de flujo; c) ajuste del modelo de Cooper-Jacob (1946).

Con la finalidad de poner a prueba el carácter resolutorio del análisis derivativo para la identificación de la estructura de acuíferos heterogéneos, se presenta la interpretación de la prueba 3.16, realizada en el pozo 10 Tecómitl, al oriente de la Ciudad de México (figura 4.16). Esta prueba se ejecutó dentro del mismo acuífero regional, con la diferencia de que el pozo se encuentra situado en una zona montañosa, donde el flujo podría estar controlado por el fracturamiento de las rocas ígneas que afloran en la sierra de Santa Catarina.

El valor de la ventana de suavizamiento aplicado a los datos fue de 0.75, mediante el método de Bourdet et al. (1989). La identificación de geometrías de flujo permitió la detección de un régimen lineal a partir del minuto 120, y que predominó hasta el final de la prueba. Otro argumento para inferir la existencia de fracturamiento es el decaimiento e inmediata recuperación de la derivada en el minuto 90, indicativo de porosidad secundaria (figura 4.18).

Para la interpretación con curvas tipo se empleó el modelo de Hantush-Jacob (1955) para acuíferos semiconfinados, con el cual se obtuvo una transmisividad promedio de 59.89 m<sup>2</sup>/día, con un RMSE de 0.27 y varianza de 0.0729. Cabe mencionar que el ajuste de este modelo fue bueno únicamente para los primeros 100 minutos de bombeo.



**Figura 4.18.** Identificación de geometrías de flujo de la prueba 3.16.

#### 4.4.2 Resultados integrales de la zona

La tabla 4.8 muestra las geometrías de flujo identificadas en las 18 pruebas interpretadas en la zona, así como los periodos de tiempo en que dichas geometrías se presentan. Todas las pruebas analizadas fueron ejecutadas a caudales constantes que varían de 250 a 5300 m<sup>3</sup>/día, con duraciones de 4 a 17 horas. La profundidad de los pozos analizados varía de 75 a 219 metros. Los resultados muestran una fuerte heterogeneidad en el subsuelo, que se refleja en un comportamiento multimodal de geometrías presentes.

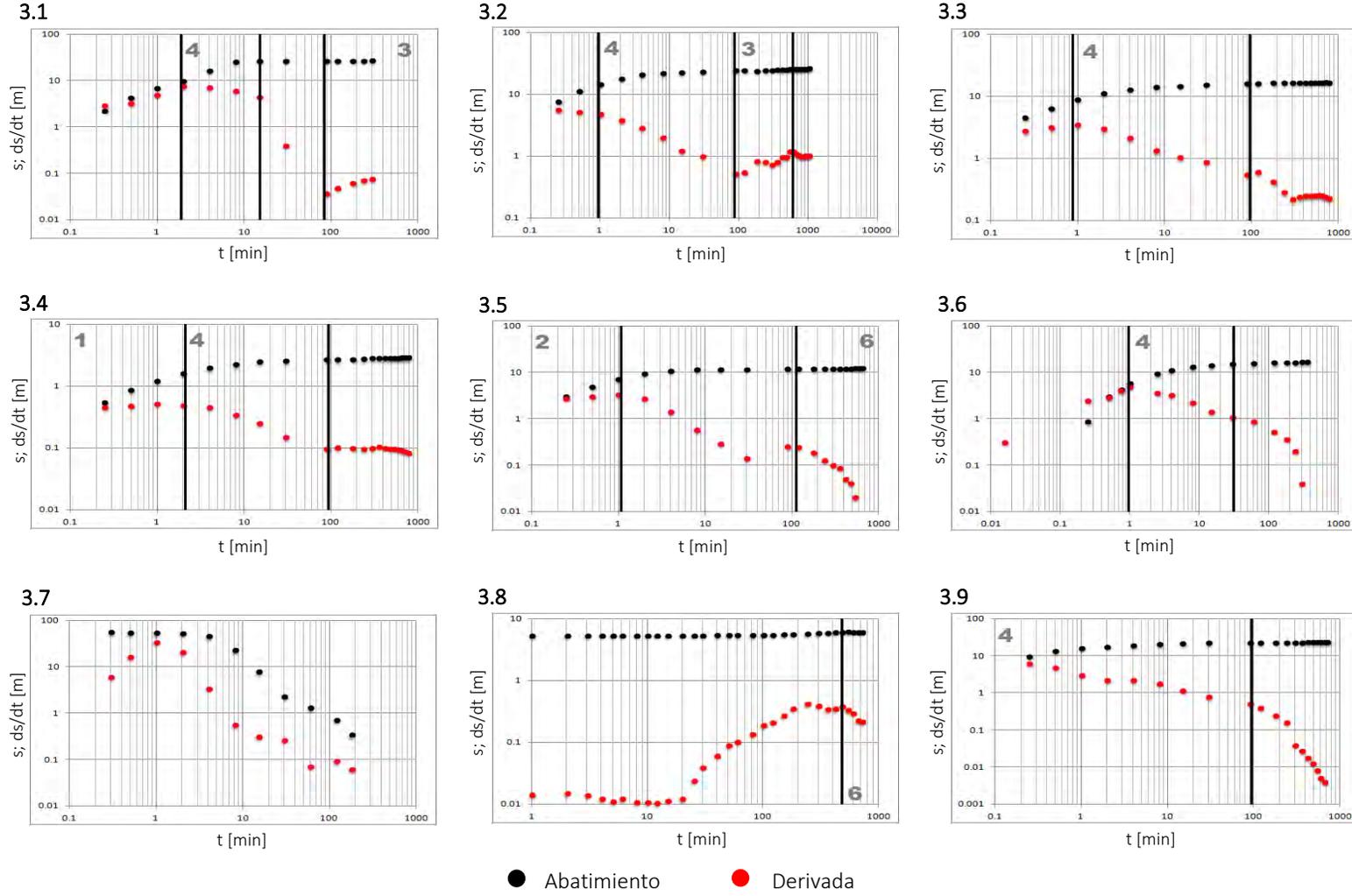
Se presenta de forma recurrente el flujo esférico, expresión de pozos parcialmente penetrantes (pruebas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.6, 3.7, 3.9, 3.12, 3.14 y 3.18), debido a que el espesor saturado en algunas zonas del acuífero alcanza los 800 metros, siendo mucho mayor que la profundidad de los pozos analizados (tabla 4.8 y figura 4.19).

Debido a las intercalaciones de rocas sedimentarias e ígneas fracturadas en la zona de la Cuenca de México, son recurrentes las geometrías radial (pruebas 3.10 y 3.13) y lineal (pruebas 3.1, 3.2, 3.11, 3.12, 3.16 y 3.18), para los pozos perforados en la zona del valle y montañosa, respectivamente. En este caso, el análisis derivativo fue muy útil para conocer de qué zona del acuífero (granular o fracturado) están extrayendo agua los pozos analizados.

La transmisividad calculada para las pruebas de la zona de estudio varía de 5 a  $13 \cdot 10^3$  m<sup>2</sup>/día, de las cuales, el 90% presenta valores menores a 600 m<sup>2</sup>/día, con una media de 150 m<sup>2</sup>/día. El resto de los pozos presenta valores atípicos de transmisividad, que alcanzan los 12800 m<sup>2</sup>/día (figura 4.20).

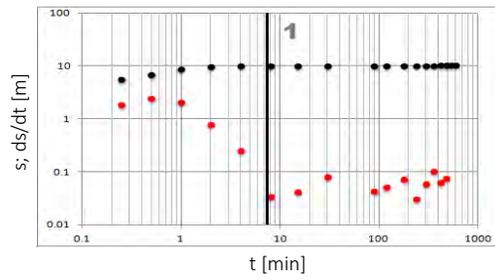
Clave interna de la prueba	Datos de la prueba			Geometrías de flujo						
	PT	Q	Duración	AP	FR	FB	FL	FE	FCC	EP
	[m]	[m <sup>3</sup> /día]	[hrs]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
3.1	201	1555.2	6				90-300	2-15		
3.2	219	4371.8	17				90-540	1-90		
3.3		5184.0	13					1-90		
3.4	140	3222.7	13		0.25-2			4-90		
3.5	150	2419.2	12			0.25-1			120-720	
3.6	180	1036.8	6					1-30		
3.7	200	1555.2	4	0-0.5				8-240		
3.8	150	1762.6	12						480-720	
3.9	200	3888.0	12					0.25-90		
3.10	140	4125.6	10		15-600					
3.11	200	3628.8	12				2-8		300-720	
3.12		3456.0	18				0.25-1	2-1080		
3.13	250	5443.2	8		15-480					
3.14	250	3067.2	12					15-720		
3.15	400	4688.1	15			0.25-2				240-900
3.16	75	3542.4	18				120-1080			
3.17	150	259.2	6	0-1					2-360	
3.18	170	302.4	12				1-8	12-720		

**Tabla 4.8.** Análisis no paramétrico, donde: *PT*: profundidad total del pozo de bombeo; *Q*: caudal de extracción; *AP*: almacenamiento de pozo; *FR*: flujo radial; *FB*: flujo bilineal; *FL*: flujo lineal; *FE*: flujo esférico; *FCC*: frontera de carga constante; *EP*: estado pseudoestacionario.

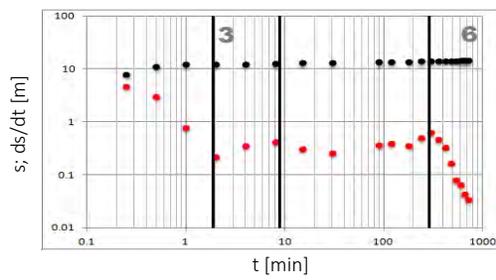


**Figura 4.19.** Gráficos logarítmicos de pruebas reinterpretadas en la Cuenca de México. Las líneas negras dividen a las zonas en que se presentan las diferentes geometrías de flujo, donde: 1: *flujo radial*; 2: *flujo bilineal*; 3: *flujo lineal*; 4: *flujo esférico*; 5: *almacenamiento de pozo*; 6: *frontera de carga constante*; 7: *estado pseudoestacionario*.

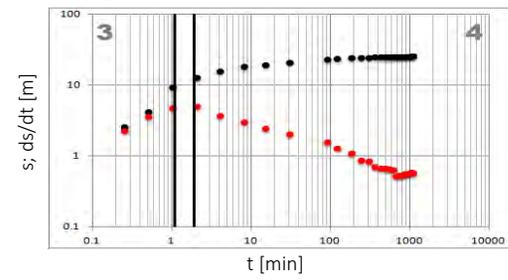
3.10



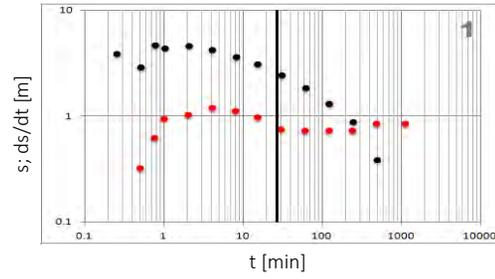
3.11



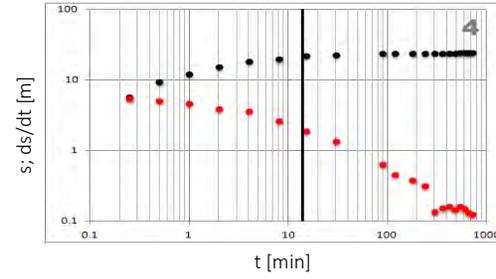
3.12



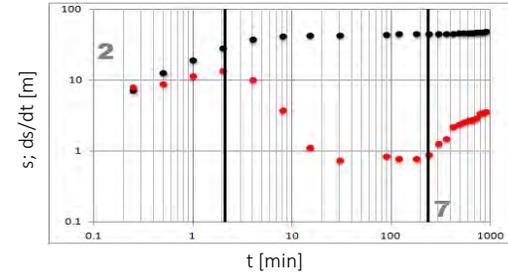
3.13



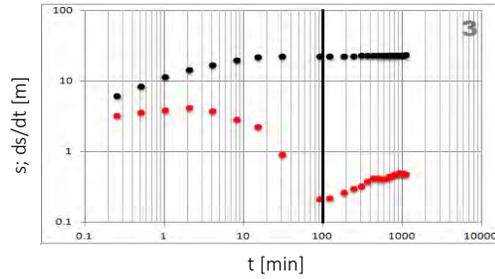
3.14



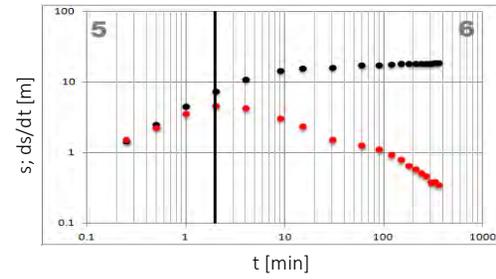
3.15



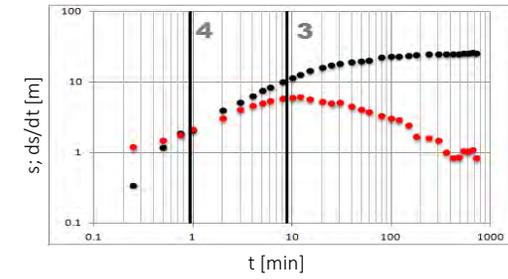
3.16



3.17



3.18



● Abatimiento    ● Derivada

Figura 4.19. Continuación.

Clave interna de la prueba	Modelo conceptual inferido	Modelo de ajuste	L de Bourdet	Parámetros					
				T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	RMSE	Otros parámetros calculados
				[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]		
3.1	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Moench (1985)	0.70	123.00	1.87			0.60	K <sub>s</sub> =1 m/día
3.2	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Moench (1985)	0.80	273.61	117.50			0.66	K <sub>s</sub> =2.31 m/día; r <sub>1</sub> =148.91 m
3.3	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Hantush-Jacob (1955)	0.30	378.84	132.20			0.34	K <sub>s</sub> =3 m/día; r <sub>1</sub> =184.41 m
3.4	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Neuman-Witherspoon (1969)	0.40	1227.88	461.40	500.00	519.70	0.04	K <sub>s</sub> =11.13 m/día; r <sub>1</sub> =143.92 m

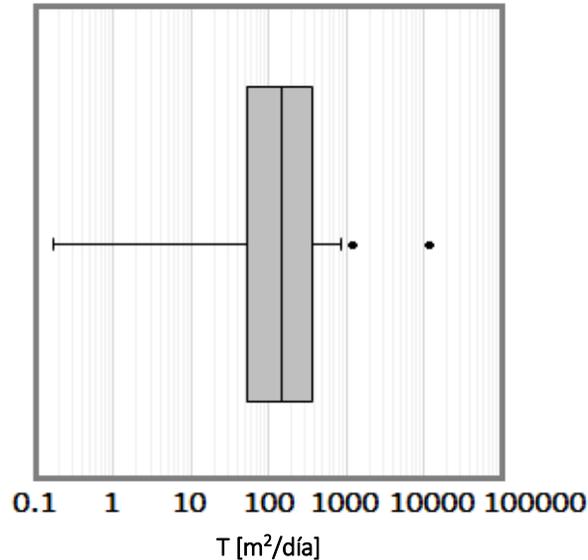
**Tabla 4.9.** Análisis paramétrico, donde: T<sub>1</sub>: transmisividad previa reportada en la fuente original de la prueba (ver tabla 4.7); T<sub>2</sub>: transmisividad resultante del ajuste con curvas tipo; T<sub>3</sub>: transmisividad de Cooper-Jacob (1946) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.8); T<sub>4</sub>: transmisividad obtenida por el método de Renard et al. (2000) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.13); RMSE: valor del error de ajuste de los datos del abatimiento con curvas tipo; A: área de drenaje; C: coeficiente de almacenamiento de pozo; E: eficiencia del pozo de bombeo; K<sub>f</sub>: conductividad hidráulica de la fractura; K<sub>s</sub>: conductividad hidráulica esférica; K<sub>v</sub>/K<sub>s</sub>: tasa de anisotropía; L: distancia a la frontera más cercana; x<sub>f</sub>: ancho de fractura; r<sub>i</sub>: radio de investigación de la prueba.

3.5	Semiconfinado con frontera de carga constante y doble porosidad	Moench (1985)	0.10	346.79	176.40			0.33	$K_f b = 0.7$ (m/día)m; $L = 5.48$ m
3.6	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Moench (1985)	--		53.90			0.33	$K_s = 0.99$ m/día
3.7	No interpretable								$C = 70.35$ L/m
3.8	Libre con flujo radial infinito	Cooper-Jacob (1946)	0.50		12780.00			0.40	$L = 75.29$ m; $r_i = 185.90$ m
3.9	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.50		229.50			0.89	$K_s = 0.87$ m/día; $K_v / K_h = 0.79$
3.10	Semiconfinado	Cooper-Jacob (1946)	0.60	2000.00	4874.01	4890.00	6372.40	0.40	$E = 6.82\%$ ; $r_i = 187.47$ m
3.11	Semiconfinado con frontera de carga constante	Moench (1985)	0.20	386.27	538.50			0.75	$L = 130.5$ m; $r_i = 407.45$ m
3.12	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Neuman-Witherspoon (1969)	0.5	215.36	56.27			0.55	$x_i = 1.64$ m; $K_s = 5.6$ m/día
3.13	Semiconfinado	Hantush-Jacob (1955)	0.40		399.20	588.10	559.50	0.26	$E = 70\%$ ; $r_i = 207.45$ m

Tabla 4.9. Continuación.

3.14	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Neuman-Witherspoon (1969)	0.70	197.88	52.02			0.24	$K_s=4.02$ m/día
3.15	Semiconfinado con doble porosidad	Moench (1997)	0.60	156.47	93.62			0.57	$K_f b=0.22$ (m/día)m; $A=13709.39$ m <sup>2</sup>
3.16	Confinado con pozo parcialmente penetrante	Hantush-Jacob (1955)	0.75	256.97	59.89			0.27	
3.17	Semiconfinado con frontera de carga constante y almacenamiento de pozo	Moench (1985)	0.50		13.35			0.10	$C=42.71$ L/m; $L=0.6$ m
3.18	Libre con pozo parcialmente penetrante	Moench (1997)	0.70		9.01			0.39	$x_f=2.24$ m; $K_s=0.39$ (m/día)m

**Tabla 4.9.** Continuación.



**Figura 4.20.** Gráfico de caja de las transmisividades calculadas en la Cuenca de México, por medio del ajuste con curvas tipo. La línea central representa el valor de la media, mientras que los puntos negros representan valores atípicos de la muestra de datos.

## 4.5 Reinterpretación de pruebas hidráulicas en el Noreste de México

La zona Noreste abarca toda la porción oriental del estado de Coahuila, dentro de la región hidrológica Bravo-Conchos, en la provincia Sierra Madre Oriental, cuya principal característica es la predominancia de rocas mesozoicas de origen sedimentario marino, que fueron sometidas a esfuerzos corticales de tensión y compresión, dando lugar a levantamientos serranos abruptos constituidos por calizas, que se alternan con valles intermontanos, así como lomeríos de pendientes suaves, conformados por lutitas asociadas con calizas y areniscas, todos con orientación noreste-sureste y este-oeste (Flores-López y Zárate-Lupercio, 2005) (figura 4.21).

Los acuíferos de la zona de estudio presentan comportamientos hidrogeológicos variables que van de libre a confinado. La transmisividad en esta área es altamente variable. En las rocas calizas de las sierras que afloran en el sector oriental, se presentan valores de 30 a 60 m<sup>2</sup>/día, hacia la planicie de Allende-Piedras Negras,

existen conglomerados con cavidades de gran tamaño que provocan alta transmisividad, con valores de más de 60 m<sup>2</sup>/día, mientras que al sur de la zona de estudio, en el área de Saltillo-Ramos Arizpe y Saltillo Sur el valor de transmisividad no supera los 4 m<sup>2</sup>/día (Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 2013; CONAGUA, 2015; Elliot-Cruz, 2015).

En la zona de estudio se ubican más de 8500 pozos de bombeo, que extraen anualmente 1.5\*10<sup>12</sup> litros de agua, aproximadamente, de los cuales, el 75% se destina a fines agrícolas, el 12% para consumo humano y el resto para actividades industriales (CONAGUA, 2015; 2016).

Se realizó la reinterpretación de 16 pruebas de bombeo, todas en el estado de Coahuila, como se aprecia en la figura 4.21. La tabla 4.10 muestra el nombre oficial de los pozos de bombeo, el estado de la República y el acuífero en que se encuentran contenidos, sus coordenadas UTM y la fuente oficial de las pruebas de bombeo.

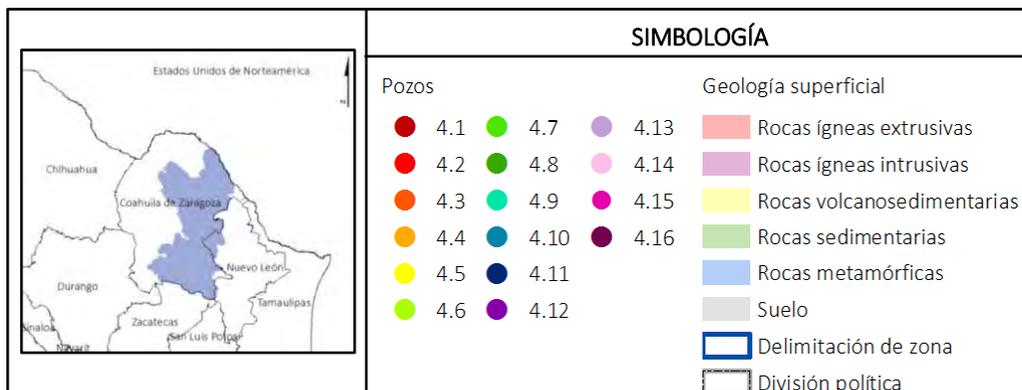
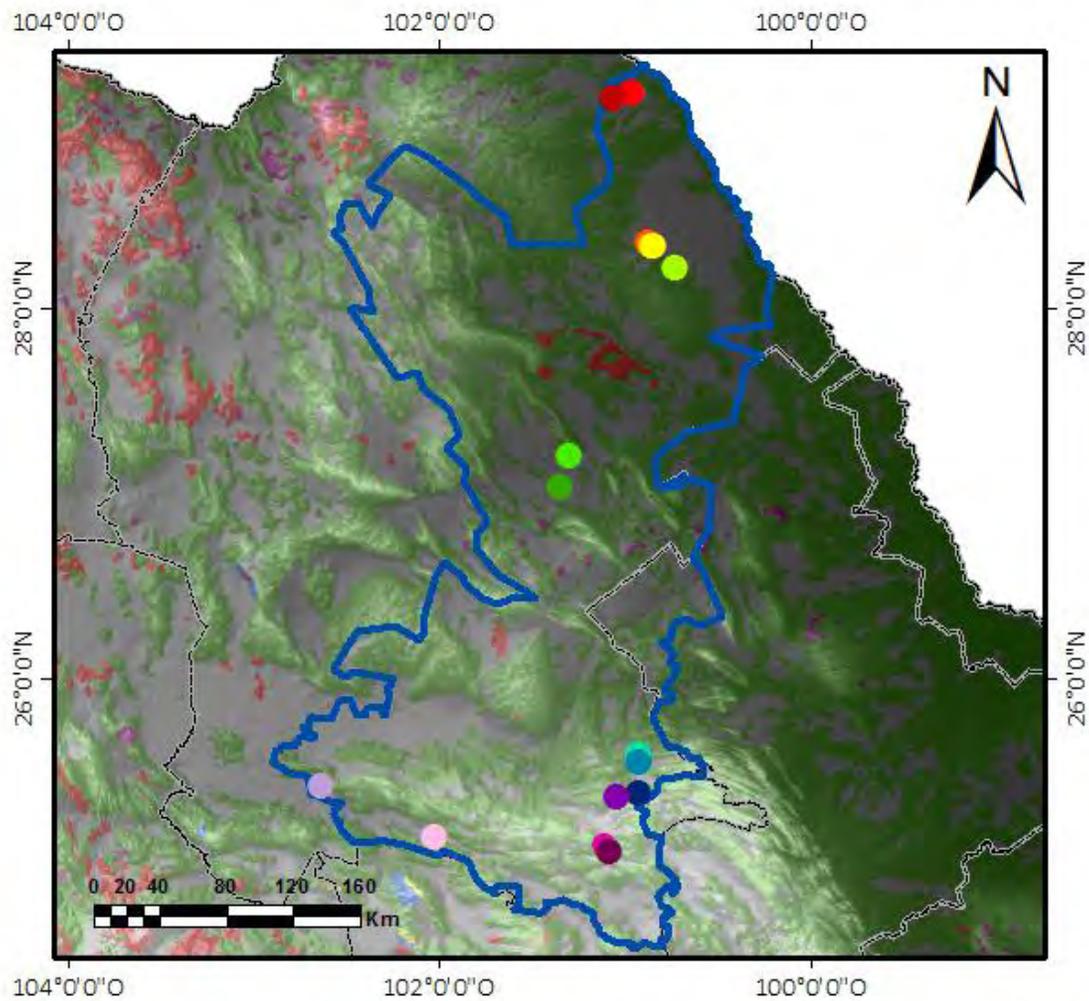


Figura 4.21. Ubicación de pruebas hidráulicas reinterpretadas en la zona Noreste (Geología tomada de CONABIO, 2012).

Clave interna de la prueba	Nombre oficial del pozo de bombeo	UTM X [m]	UTM Y [m]	Estado	Acuífero	Fuente original
		WGS84				
4.1	PAL 103	299482	3224389	Coahuila	Valle de Palestina	Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 2013
4.2	PAL 1	308827	3227209	Coahuila	Valle de Palestina	Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 2013
4.3	429	330075	3155268	Coahuila	Valle de Allende-Piedras Negras	Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 2013
4.4	54	314181	3126843	Coahuila	Valle de Allende-Piedras Negras	Anáhuac Ingenieros, Consultores y Supervisores, S.A. de C.V., 1990
4.5	161	322322	3146084	Coahuila	Valle de Allende-Piedras Negras	Anáhuac Ingenieros, Consultores y Supervisores, S.A. de C.V., 1990
4.6	254	329714	3126426	Coahuila	Valle de Allende-Piedras Negras	Anáhuac Ingenieros, Consultores y Supervisores, S.A. de C.V., 1990
4.7	4787	272506	3010532	Coahuila	Valle de Monclova	ININSA, S.A., 1990
4.8	4804	267257	2992887	Coahuila	Valle de Monclova	ININSA, S.A., 1990
4.9	510-413	306699	2831710	Coahuila	Valle de Saltillo-Ramos Arizpe	Elliot-Cruz, 2015
4.10	510-620	307189	2827241	Coahuila	Valle de Saltillo-Ramos Arizpe	Elliot-Cruz, 2015
4.11	510-015	306630	2809042	Coahuila	Valle de Saltillo-Ramos Arizpe	Elliot-Cruz, 2015
4.12	510-27Bis	295055	2806208	Coahuila	Valle de Saltillo-Ramos Arizpe	Elliot-Cruz, 2015
4.13	521-211	317547	2781493	Coahuila	Valle de Saltillo Sur	FI, UNAM, 2016
4.14	521-235	799934	2784428	Coahuila	Valle de Saltillo Sur	FI, UNAM, 2016
4.15	521-10	287128	2778626	Coahuila	Valle de Saltillo Sur	FI, UNAM, 2016
4.16	521-14	289975	2773538	Coahuila	Valle de Saltillo Sur	FI, UNAM, 2016

**Tabla 4.10.** Datos generales de las pruebas de bombeo reinterpretadas en el Noreste de México.

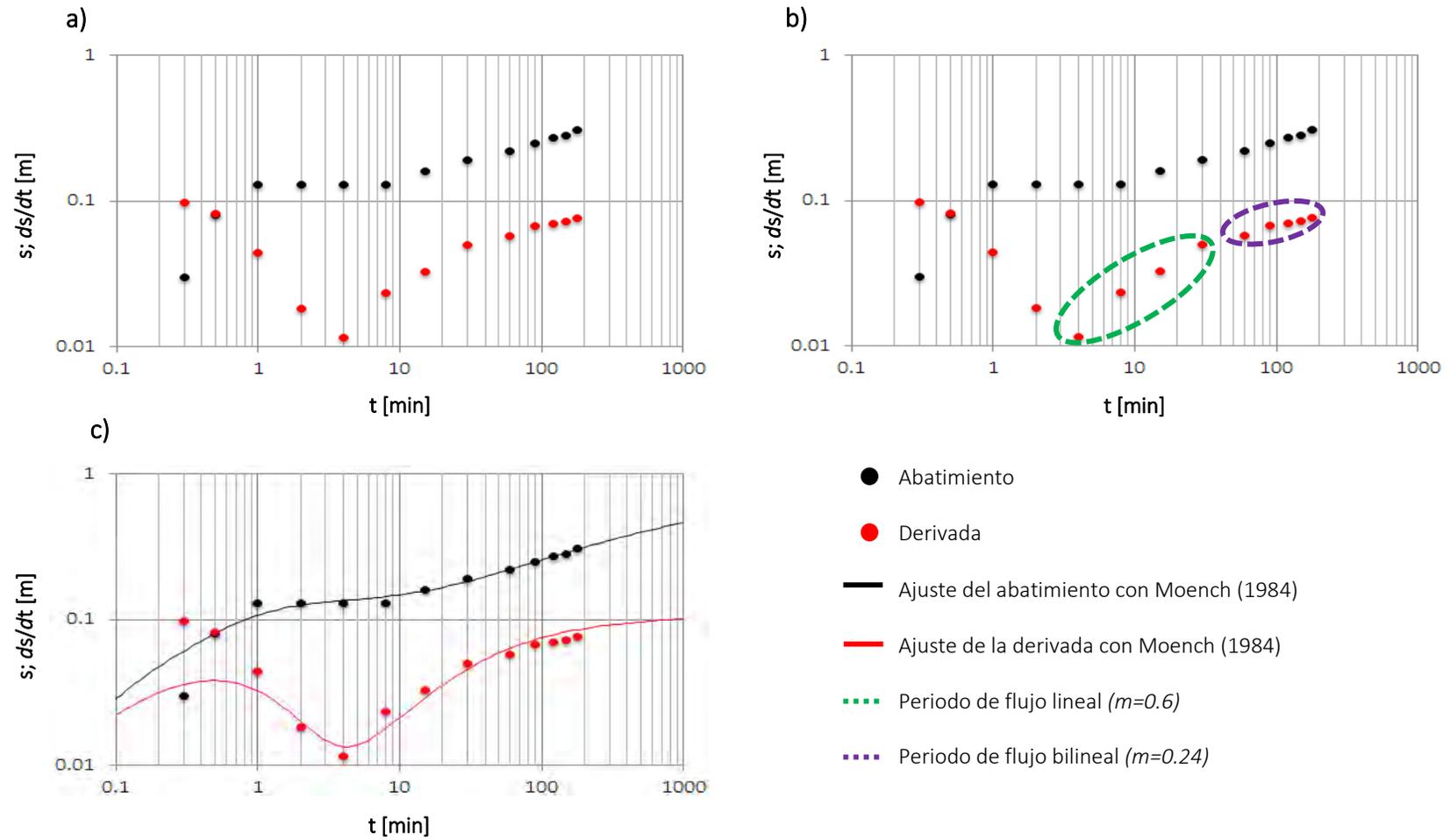
#### 4.5.1 Reinterpretación de una prueba hidráulica en la zona

Se presenta la reinterpretación de la prueba 4.1, realizada en el pozo PAL-103, ubicado al noreste del valle de Palestina, en el estado de Coahuila (figura 4.21), perforado en una intercalación de lutitas y calizas fracturadas. La fuente original de la prueba reportó una transmisividad previa de  $806 \text{ m}^2/\text{día}$  (Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 2013).

La figura 4.22a muestra el comportamiento del abatimiento del nivel dinámico en el pozo y su respectiva derivada, para la cual se utilizó una ventana de suavizamiento de 0.6 por medio del método de Bourdet et al. (1989).

En la curva derivativa (figura 4.22b) se observó que del inicio de la prueba al minuto 4 existe una caída en el valor de la derivada que posteriormente se recupera, lo cual indica porosidad secundaria en el acuífero (fracturamiento). A partir del minuto 8 de la prueba, el flujo en el acuífero sigue un patrón lineal, y en el minuto 30 cambia a bilineal, debido a la existencia de fracturas perpendiculares al flujo, que también sirven como conductos del agua hacia el pozo de bombeo. El abatimiento en el pozo se mantiene en estado transitorio hasta el final de la prueba, debido a la corta duración de la misma, la cual tuvo un radio de influencia de 527 metros.

Debido a las discontinuidades estratigráficas, el fracturamiento reportado en la zona (CONAGUA, 2015), y la identificación de geometrías de flujo, se utilizó el modelo de Moench (1984) (figura 4.22c), para el ajuste de los datos, desarrollado para acuíferos con doble porosidad, debida a patrones regulares de fracturamiento. Este modelo es válido para pozos parcial o totalmente penetrantes, perforados en acuíferos heterogéneos, y contempla en su solución efectos de piel y almacenamiento de pozo. Se determinó que la transmisividad promedio de la zona varía de  $254.14$  a  $525 \text{ m}^2/\text{día}$ , con un RMSE de 0.0118 y desviación estándar de  $2.096 \cdot 10^{-4}$ , que indican un alto grado de confianza en los resultados.



**Figura 4.22.** Gráficos logarítmicos de la prueba 4.1, donde: a) abatimiento y curva derivativa con un valor de suavizamiento de 0.7; b) identificación de geometrías de flujo; c) ajuste del modelo de Moench (1984).

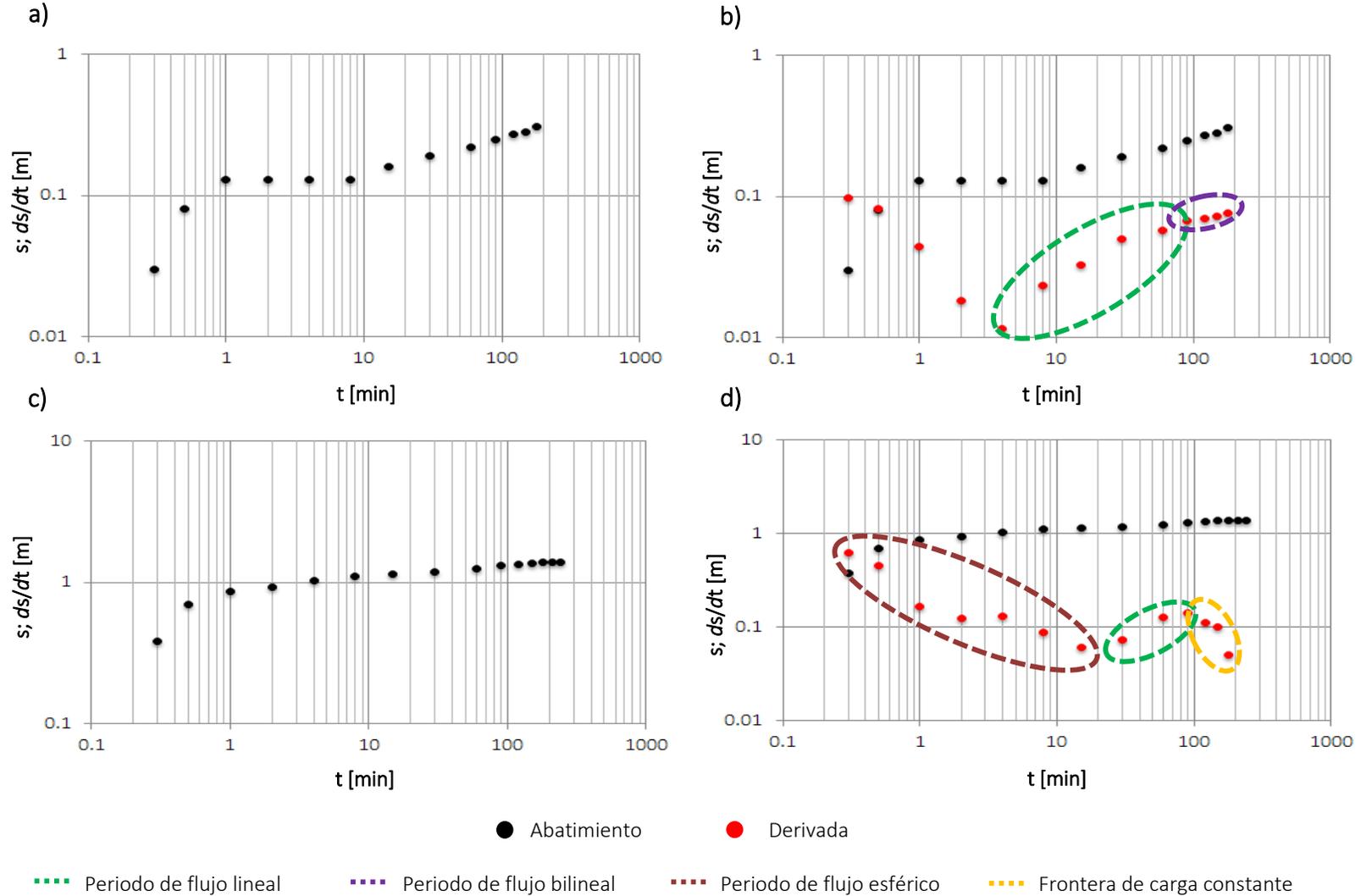
Con la finalidad de detectar una posible conexión hidráulica, se realizó la interpretación de la prueba 4.2, realizada en el pozo PAL-1 ubicado a 300 metros del pozo PAL-103 analizado previamente, ambos en el valle de Palestina.

Al comparar las curvas de abatimiento de ambas pruebas, no se observaron diferencias significativas. Sin embargo, al comparar las curvas derivativas, resaltaron algunas diferencias entre el medio geológico de cada una de ellas (figura 4.23).

No fue necesaria la aplicación de una ventana de suavizamiento a los datos de la prueba 4.2, ya que no presentaron ruido significativo. Durante la identificación de geometrías de flujo fue posible determinar que el pozo se encuentra penetrando solo parcialmente al acuífero, lo que se refleja en el régimen esférico que predomina durante los primeros 15 minutos de la extracción. Posteriormente, el flujo en el acuífero se ve influenciado por fracturamiento, adoptando un régimen lineal hasta los 90 minutos, ya que la prueba se estabiliza por efectos de una frontera de carga constante, situada a 114 metros del pozo de bombeo. El radio de investigación de la prueba fue de 291.04 metros (figura 4.23).

Con base en la identificación de geometrías de flujo, se eligió el modelo de [Moench \(1985\)](#), desarrollado para pozos en acuíferos semiconfinados, con estabilización por efectos de frontera de carga constante. De acuerdo con este ajuste, el valor de la transmisividad promedio de la zona es de 128.9 m<sup>2</sup>/día, con un valor de RMSE de 0.14 y varianza de 0.196.

Al comparar la distancia entre ambos pozos con el radio de influencia obtenido por medio de análisis derivativo para cada uno, es posible deducir que se encuentran conectados hidráulicamente.



**Figura 4.23.** Gráficos logarítmicos de las pruebas 4.1 y 4.2. En color negro se muestran los datos de abatimiento y en rojo la derivada, donde: a) abatimiento de la prueba 4.1; b) identificación de geometrías de flujo en la curva derivativa del pozo 4.1; c) abatimiento de la prueba 4.2; d) identificación de geometrías de flujo en la curva derivativa del pozo 4.2.

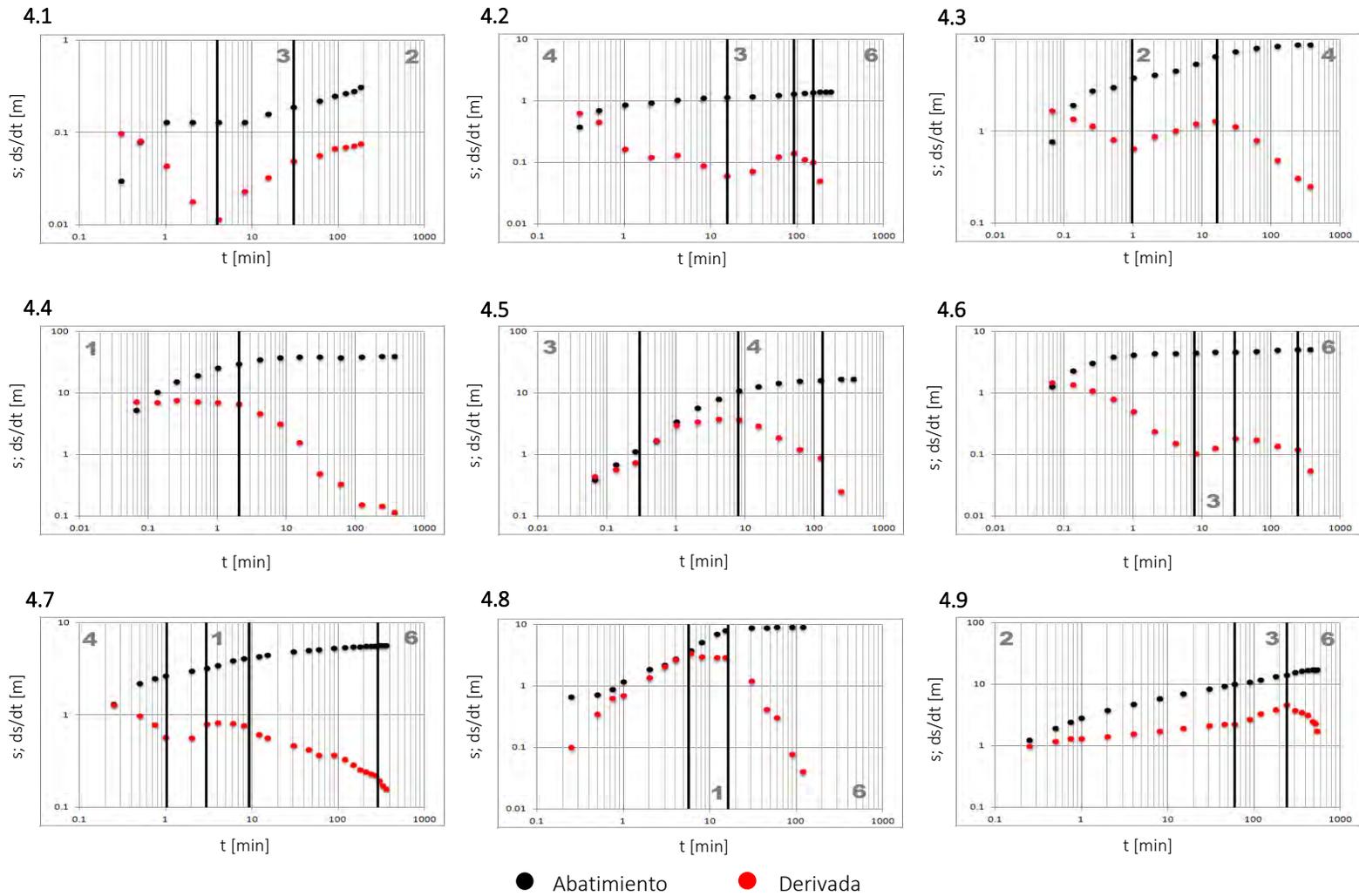
## 4.5.2 Resultados integrales de la zona

Los patrones de flujo predominantes en la zona de estudio son de tipo lineal (pruebas 4.1, 4.2, 4.6, 4.9, 4.10, 4.13, 4.14 y 4.15) y bilineal (4.1, 4.3, 4.9 y 4.16), debido a que la totalidad de los pozos están perforados en intercalaciones de lutitas y calizas, las cuales se encuentran fracturadas como combinación de la baja plasticidad de estas rocas y los esfuerzos corticales de tensión y compresión que dieron origen a las sierras que afloran en toda la porción oriental de la zona de estudio y que conforman la porción norte de la Sierra Madre Oriental (tabla 4.11; figura 4.24).

La transmisividad es altamente variable en toda la zona de estudio, según la densidad, tamaño e interconexión de las fracturas en cada zona, variando de 1 a 6000 m<sup>2</sup>/día en promedio, presentando una mayor heterogeneidad en la zona de Saltillo-Ramos Arizpe (tabla 4.12). De acuerdo con los resultados de la interpretación con curvas tipo, el 87.5% de las pruebas presentan valores de transmisividad menores 500 m<sup>2</sup>/día. El resto de las pruebas presenta valores mayores, que alcanzan más de 68000 m<sup>2</sup>/día (figura 4.25).

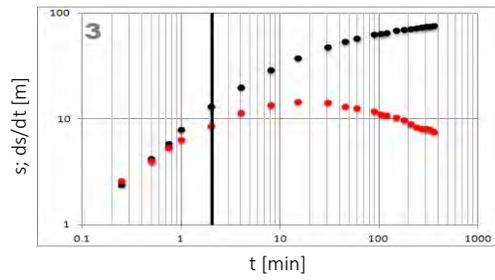
Clave interna de la prueba	Datos de la prueba			Geometrías de flujo					
	PT	Q	Duración	AP	FR	FB	FL	FE	FCC
	[m]	[m <sup>3</sup> /día]	[hrs]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
4.1	100	345.6	3			30-180	8-30		
4.2	120	345.6	3				15-90	0.3-15	150-240
4.3	45.7	4233.6	6			1-15		15-360	
4.4	45.7	3749.8	6		0.066-2				
4.5	41.2	5097.6	6				0.066-0.5	8-120	
4.6	45.7	2427.8	6				8-30		240-360
4.7	80	3931.2	6		3-8			0.25-1	270-360
4.8	35	777.6	2		8-15				15-120
4.9	250	1209.6	9			0.25-60	60-240		240-540
4.10	250	395.7	6				0.25-2		
4.11	500	8035.2	3		8-180				
4.12	400	533.1	6	0-8					45-360
4.13	195	2616.2	24		20-480		1.45-20		480-1440
4.14	250	397.4	13				480-780		
4.15	600	4653.5	46				0.5-5		1200-2760
4.16	500	3840.5	46		0.083-10	10-2760			

**Tabla 4.11.** Análisis no paramétrico de la zona Noroeste, donde: *PT*: profundidad total del pozo de bombeo; *Q*: caudal de extracción; *AP*: almacenamiento de pozo; *FR*: flujo radial; *FB*: flujo bilineal; *FL*: flujo lineal; *FE*: flujo esférico; *FCC*: frontera de carga constante.

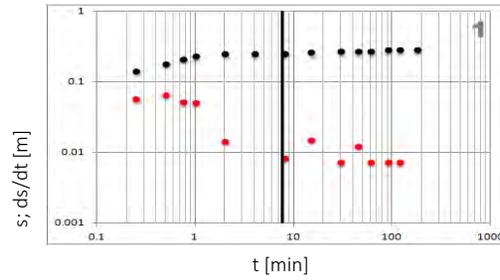


**Figura 4.24.** Gráficos logarítmicos de pruebas reinterpretadas en la zona Noreste. Las líneas negras dividen a las zonas en que se presentan las diferentes geometrías de flujo, donde: 1: *flujo radial*; 2: *flujo bilineal*; 3: *flujo lineal*; 4: *flujo esférico*; 5: *almacenamiento de pozo*; 6: *frontera de carga constante*.

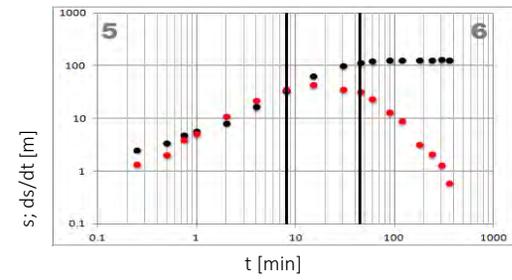
4.10



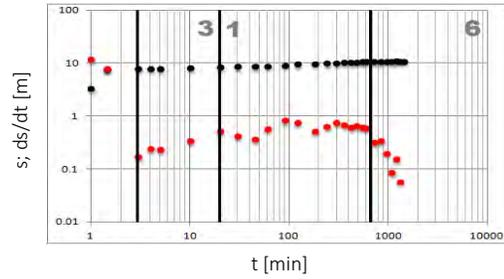
4.11



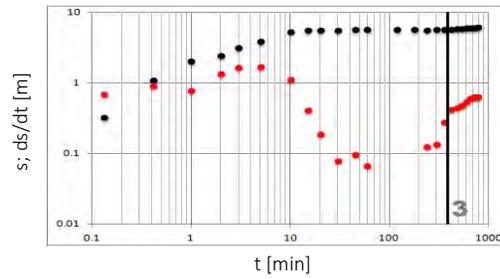
4.12



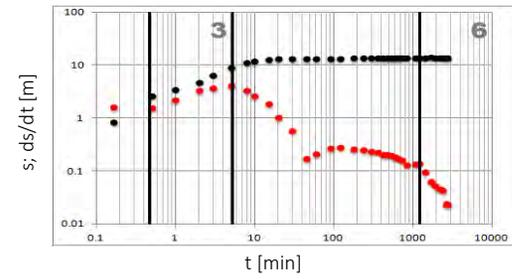
4.13



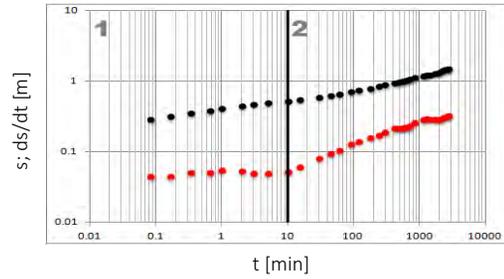
4.14



4.15



4.16



● Abatimiento

● Derivada

Figura 4.24. Continuación.

Clave interna de la prueba	Modelo conceptual inferido	Modelo de ajuste	L de Bourdet	Parámetros					
				T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	RMSE	Otros parámetros calculados
				[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]	[m <sup>2</sup> /día]		
4.1	Semiconfinado con flujo controlado por fracturas	Moench (1984)	0.70	806.00	254.14			0.01	K <sub>f</sub> b=931.68 (m/día)m; r <sub>i</sub> =527.04 m
4.2	Semiconfinado con frontera de carga constante y pozo parcialmente penetrante	Moench (1985)	--	14.40	128.90			0.14	K <sub>s</sub> =2.56 m/día; L=114.12 m; r <sub>i</sub> =291.04 m
4.3	Semiconfinado con doble porosidad y pozo parcialmente penetrante	Hantush-Jacob (1955)	0.70	449.28	323.30			0.31	K <sub>f</sub> b=15.81 (m/día)m; K <sub>s</sub> =7.6 m/día
4.4	Semiconfinado	Hantush-Jacob (1955)	0.80	234.14	32.80	40.00	41.00	0.42	

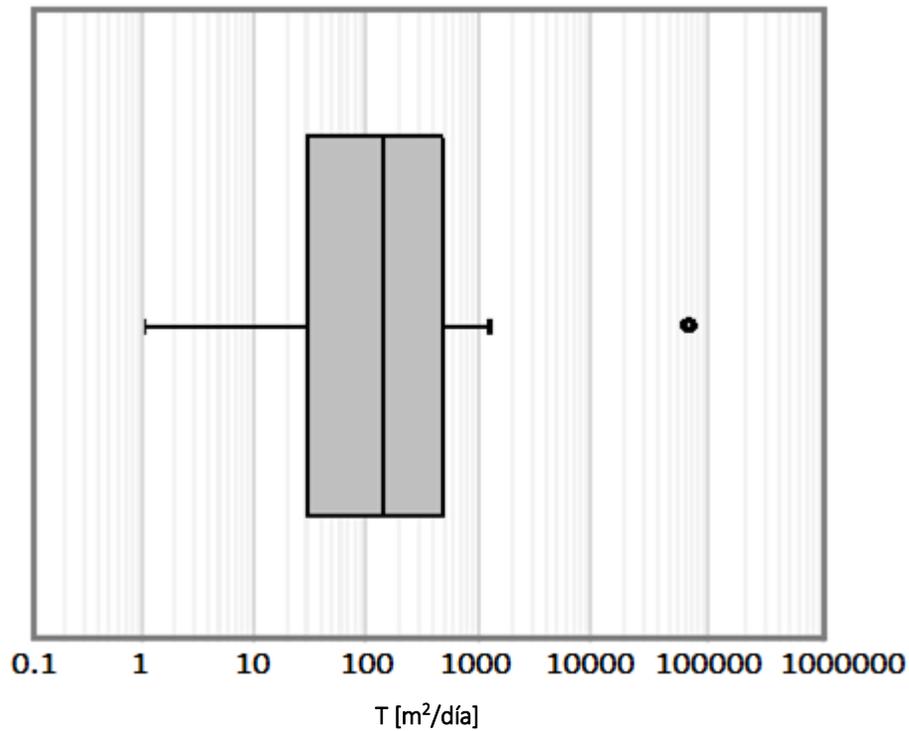
**Tabla 4.12.** Análisis paramétrico, donde: T<sub>1</sub>: transmisividad previa reportada en la fuente original de la prueba (ver tabla 4.10); T<sub>2</sub>: transmisividad resultante del ajuste con curvas tipo; T<sub>3</sub>: transmisividad de Cooper-Jacob (1948) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.8); T<sub>4</sub>: transmisividad obtenida por el método de Reynolds et al. (2000) durante el periodo de flujo radial (ecuación 2.13); RMSE: valor del error de ajuste de los datos del abatimiento con curvas tipo; C: coeficiente de almacenamiento de pozo; E: eficiencia del pozo de bombeo; K<sub>f</sub>b: conductividad hidráulica de la fractura; K<sub>s</sub>: conductividad hidráulica esférica; L: distancia a la frontera más cercana; xf: ancho de fractura; r<sub>i</sub>: radio de investigación de la prueba.

4.5	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Hantush-Jacob (1955)	--	501.12	98.37			0.31	$x_f=7.64$ m; $K_s=5.64$ m/día
4.6	Semiconfinado con doble porosidad y frontera de carga constante	Moench (1985)	0.70	641.09	486.00			0.14	$L=11.5$ m
4.7	Semiconfinado con doble porosidad y pozo parcialmente penetrante	Moench (1985)	0.60	719.71	315.70	318.70	389.00	0.11	$K_s=30$ m/día; $L=22.13$ m
4.8	Semiconfinado	Hantush (1960)	0.70	21.60	2.19	13.6	21.10	0.39	
4.9	Flujo controlado por fracturas	Moench (1984)	0.40	42.57	20.41			0.23	$K_f b=0.76$ (m/día)m; $L=10.9$ m
4.10	Libre	Moench (1997)	0.50	4.26	2.97			0.34	$x_f=1.56$ m
4.11	Libre con flujo radial infinito	Cooper-Jacob (1946)	0.80	29401.92	68720.00	65353.00	69293.50	0.02	$E=53.13\%$ ; $r_i=688.02$ m
4.12	Libre	Moench (1997)	0.50	5.42	3.27			0.41	$C=90.53$ L/m
4.13	Flujo controlado por fracturas	Moench (1984)	0.40		364.50	288.50	342.50	0.72	$L=241.27$ m; $r_i=842.53$ m
4.14	Libre con doble porosidad por fracturamiento	Moench (1997)	0.70		55.67			0.83	$r_i=148.86$ m

Tabla 4.12. Continuación.

4.15	Semiconfinado con frontera de carga constante y doble porosidad por fracturamiento	Moench (1985)	0.70		35.93			0.36	$L=204.42$ m; $r_i=625.05$ m
4.16	Flujo controlado por fracturas de conductividad finita	Moench (1984)	0.50		1243.00	5986.40	6127.80	0.04	$K_{fb}=1558.82$ (m/día)m

**Tabla 4.12.** Continuación.



**Figura 4.25.** Gráfico de caja de las transmisividades calculadas en el Noreste de México por medio del ajuste con curvas tipo. La línea central representa el valor de la media, mientras que los puntos negros representan valores atípicos de la muestra de datos.

## 4.6 Aspectos finales

### 4.6.1 Breve resumen de la interpretación de pruebas hidráulicas usando análisis derivativos

De las 71 pruebas reinterpretadas, el 56% de éstas pudieron ser ajustadas completamente a curvas tipo. Este ajuste presentó como principales limitantes, la doble porosidad en acuíferos heterogéneos y los efectos de almacenamiento y daño en los pozos de bombeo, que no se encuentran contemplados dentro de la solución de la mayoría de los modelos disponibles.

Fue posible la identificación de por lo menos una geometría dominante de flujo en todas las pruebas analizadas mediante el uso de la derivada, a excepción de la prueba 3.7 que no fue interpretable, debido a que el abatimiento del nivel dinámico registró una recuperación no coherente, que pudo ser causada por errores en la toma de datos o incidentes con la sonda durante la prueba. En los casos en que no se detectó un régimen radial, la interpretación con curvas tipo fue esencial para el cálculo de la transmisividad en la prueba.

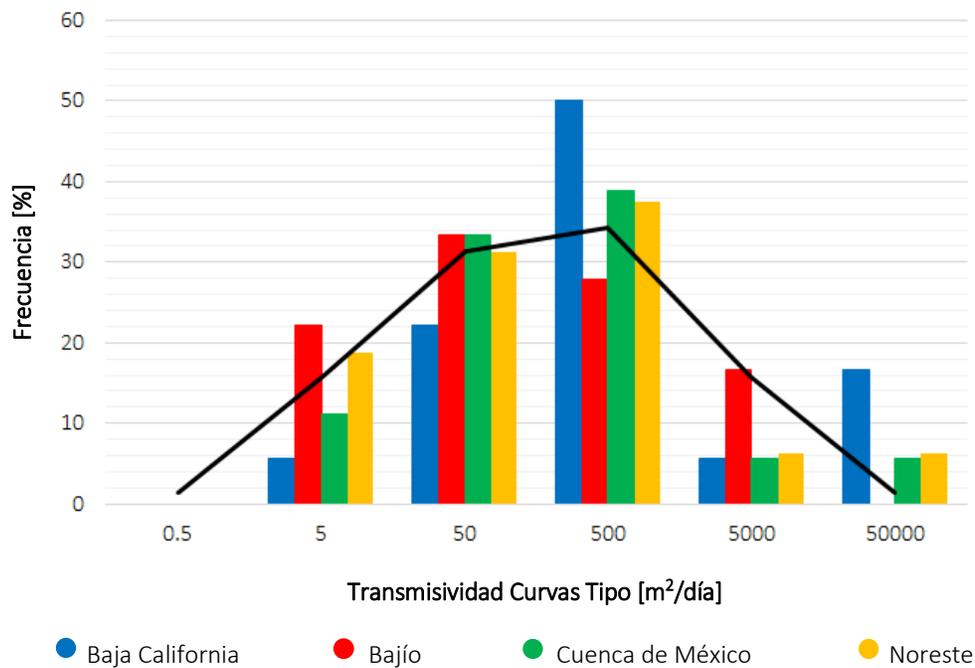
Mediante la integración de técnicas derivativas con curvas tipo, fue posible la identificación de la estructura puntual del acuífero en las zonas analizadas. Esto resultó muy útil en los casos de acuíferos no uniformes, como es el caso del Bajío, donde todos los pozos analizados se encuentran dentro de un acuífero regional de estructura y composición heterogéneas. En este caso, se pudo detectar aquellos pozos que extraen agua del medio granular (p.e. prueba 2.12) o del medio fracturado (p.e. prueba 2.16). Esta zonificación fue comprobada mediante la comparación de los valores de transmisividad para cada caso, identificando zonas con mayor potencial para la extracción de agua.

El 77.5% de las pruebas analizadas requirió de la aplicación de una ventana de suavizamiento para la identificación de pendientes características de cada régimen de flujo. Un claro ejemplo de ello es la prueba BR-3, cuyos datos originales presentaban una gran dispersión que hacía imposible su interpretación derivativa. El suavizamiento evidenció los regímenes de flujo presente y facilitó la elección del modelo conceptual más adecuado.

Las geometrías de flujo identificadas por medio del análisis derivativo fueron congruentes con la geología del subsuelo previamente analizada, ambos recursos fueron de utilidad para descartar modelos de interpretación en el caso de que hubiese más de uno posible, dando como resultado una herramienta adicional frente al problema de la no unicidad en la interpretación de pruebas en pozos.

De la figura 4.26 se puede observar que, desde un punto de vista global, las transmisividades calculadas presentan una distribución simétrica, con una moda de 100 a 1000 m<sup>2</sup>/día. Para la zona de Baja California, el intervalo de transmisividad dominante fue de 100 a 1000 m<sup>2</sup>/día, al igual que en la Cuenca de México y el Noreste,

donde el porcentaje de frecuencia de este intervalo fue de 50%, 38.8% y 37.5%, respectivamente. En el Bajío Mexicano, el intervalo de transmisividad dominante fue de 10 a 100 m<sup>2</sup>/día, con una frecuencia de 33.3%. En el Noreste del país, el fracturamiento de las rocas promueve valores de transmisividad más altos con respecto a las otras tres zonas, que alcanzan hasta 68000 m<sup>2</sup>/día. Las transmisividades más bajas calculadas se ubican en la Cuenca de México y el Bajío, y corresponden a 1.87 m<sup>2</sup>/día en ambos casos.



**Figura 4.26.** Histograma y polígono de frecuencias de transmisividades calculadas por medio del ajuste con curvas tipo. La línea color negro representa el comportamiento global de las transmisividades.

#### 4.6.2 Integración de valores de transmisividad en las pruebas analizadas

Para estudiar la correspondencia entre los métodos de análisis que se emplearon, se elaboró matriz de correlación de las transmisividades obtenidas con cada uno de éstos

(tabla 4.13). Los valores de transmisividad previa, reportados en las fuentes originales de las pruebas (ver tablas 4.1, 4.4, 4.7 y 4.10) presentan una correspondencia del 81.66% con respecto a los obtenidos por medio del ajuste con curvas tipo, (figura 4.27a), que indica un grado de correlación alto, debido a que ambas interpretaciones se basan en el ajuste del total de datos de las pruebas. La ausencia de una correlación más alta se debe a que, en las fuentes originales, la mayor parte de las pruebas fueron interpretadas mediante el método de [Cooper-Jacob \(1946\)](#), de manera indistinta (p.e. sin identificar el periodo de flujo radial, o tomar en cuenta el modelo conceptual del acuífero), mientras que para este trabajo se emplearon modelos diferentes, según las condiciones de los acuíferos analizados y las geometrías de flujo detectadas con análisis derivativo.

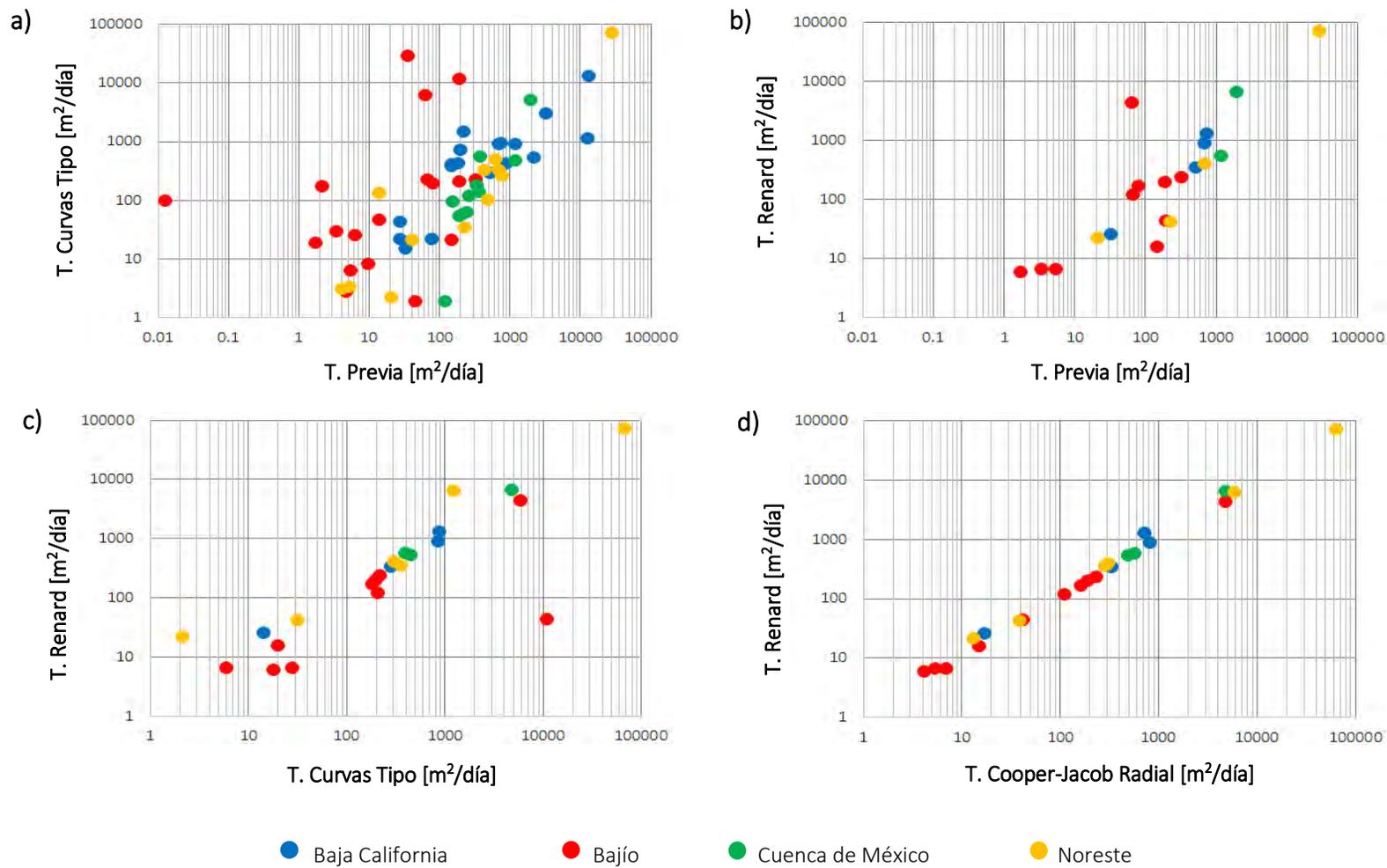
Las transmisividades obtenidas de la curva derivativa del abatimiento, de acuerdo con la ecuación propuesta por [Renard et al., \(2009\)](#), durante los periodos de flujo radial, presentan un coeficiente de correlación de Pearson de 0.99 con respecto a las transmisividades previas reportadas (figura 4.27b) y de 0.98 con las calculadas por medio de modelos no lineales (figura 4.27c), respaldando la validez del cálculo de la transmisividad mediante el valor de la derivada durante los periodos de flujo radial.

Así mismo, los resultados obtenidos por los métodos de [Renard et al., \(2009\)](#) y [Cooper-Jacob \(1946\)](#) en periodos de flujo radial, presenta una correlación de 0.999 (figura 4.27d), lo cual no solo otorga un segundo criterio para la validez de los valores obtenidos por medio de análisis derivativo, también muestra la ventaja de realizar una identificación de geometrías de flujo, para el cálculo de transmisividad con métodos lineales durante periodos de flujo radial.

La correlación entre métodos permite una validación mutua de los mismos. El cálculo de los parámetros de una prueba por más de una metodología otorga la posibilidad de comparar resultados que, en conjunto con un buen conocimiento geológico del área, otorgan resultados plausibles.

	Transmisividad previa reportada	Curvas tipo	Cooper-Jacob (1946) para flujo radial	Renard et al. (2009) con valor de la derivada
Transmisividad previa reportada	1			
Curvas tipo	0.8166	1		
Cooper-Jacob (1946) para flujo radial	0.9960	0.9833	1	
Renard et al. (2009) con valor de la derivada	0.9967	0.983	0.9997	1

**Tabla 4.13.** Matriz de correlación de los valores de transmisividad obtenidos con cada uno de los métodos explorados.



**Figura 4.27.** Comparación de transmisividades, donde: a) *transmisividad previa Vs transmisividad con curvas tipo*; b) *transmisividad previa Vs transmisividad de Renard et al. (2009)*; c) *transmisividad con curvas tipo Vs transmisividad de Renard et al. (2009)*; d) *transmisividad de Cooper-Jacob (1946) en el periodo radial Vs transmisividad de Renard et al. (2009)*.

## Capítulo 5

### Conclusiones y líneas futuras de investigación

#### 5.1 Conclusiones

- El análisis derivativo es una técnica muy efectiva para la identificación de patrones de flujo en un acuífero sometido a bombeo y para el cálculo de los parámetros hidráulicos asociados a dichos patrones. Permite identificar fácilmente geometrías de flujo, daños en el pozo de bombeo y fronteras.
- El análisis derivativo por su sencillez, practicidad y efectividad debería formar parte de la interpretación rutinaria de la interpretación de pruebas en pozos, por profesionales del agua subterránea.
- La curva derivativa del abatimiento en una prueba de bombeo permite la identificación del tipo de comportamiento hidráulico de un acuífero, ya sea libre, semiconfinado o confinado, su análisis provee un punto de partida certero para las siguientes etapas de la caracterización.
- El análisis derivativo es aplicable para la caracterización de patrones de flujo en todos los ambientes hidrogeológicos.
- Una importante utilidad del análisis derivativo se presenta cuando la curva de abatimiento de la prueba no es concordante con ninguno de los modelos disponibles, ya que permite la interpretación de la prueba por etapas, diagnosticando geometrías de flujo y permitiendo descartar los periodos de transición entre cada una de ellas. Además, otorga información adicional para escoger el o los modelos de ajuste.

- La identificación de patrones de flujo en la curva derivativa de una prueba permite identificar de manera puntual la estructura del acuífero, facilitando la ubicación de zonas fracturadas en acuíferos heterogéneos, para la distinción de zonas con mayor potencial hidrogeológico para la explotación.
- Cuando los datos de abatimientos se toman de manera directa en el pozo de bombeo, es posible identificar efectos de almacenamiento de agua en el pozo y cuantificarlo al hacer uso de la identificación de pendientes en gráficos derivativos.
- La diferenciación de zonas fracturadas y granulares en acuíferos heterogéneos mediante la identificación de geometrías de flujo, ofrece una ventaja en la planeación de sistemas de abastecimiento humano, ya que ayuda en la detección de zonas con un mayor potencial hidrogeológico (transmisividad) con base en la estructura del subsuelo en el área.
- La integración de las técnicas habituales de caracterización de acuíferos con el análisis derivativo conforma una poderosa herramienta de interpretación, para la caracterización paramétrica y no paramétrica del acuífero sometido a bombeo.
- Una toma de datos cuidadosa y/o la depuración de los datos previa a la aplicación de la derivada, disminuye el ruido generado, lo cual implica el uso de menores ventanas de suavizamiento y disminuye el riesgo de enmascarar efectos en la prueba a causa de una mala aplicación de esta herramienta.
- Los algoritmos de suavizamiento son una herramienta importante de refinamiento de la curva derivativa en pruebas de bombeo, permitiendo al intérprete identificar con mayor certeza y comodidad las pendientes características de cada régimen. Sin embargo, deben aplicarse de manera cautelosa, ya que pueden enmascarar efectos reales de la prueba.

- El cálculo de la dimensión de flujo de un patrón de bombeo contribuye a la toma de decisiones en los casos en que se presentan pendientes con valores intermedios.
- Es importante seguir investigando el potencial de la aplicación de estos métodos en ambientes hidrogeológicos específicos, con la finalidad de establecer metodologías de análisis individuales para cada uno de ellos, que permitan estimaciones más precisas de los parámetros hidráulicos de los sistemas acuíferos analizados.
- El análisis derivativo no sustituye a las técnicas usuales de interpretación de pruebas de bombeo y caracterización de acuíferos, es una práctica complementaria que debe realizarse a la par de una interpretación convencional y del modelo estático del subsuelo.
- La aplicación del análisis derivativo a pruebas hidráulicas de calidad deficiente se encuentra limitada por la cantidad de lecturas tomadas y el espaciamiento temporal entre ellas. En ocasiones, las geometrías de flujo ocurren durante lapsos de tiempo cortos, incluso más pequeños que el espacio habitual que se le da a la toma de datos en etapas avanzadas de las pruebas de bombeo. Un número reducido de puntos podría no ser representativo para definir la pendiente propia de cierto régimen de flujo, aun cuando dicho régimen se encuentre ocurriendo en el acuífero.
- Otra limitante del método es la duración de las pruebas, ya que cuando el ensayo se suspende antes de alcanzar la estabilización, no es posible identificar efectos de frontera en la prueba. Para una interpretación completa de las pruebas de bombeo, resulta imperativo cumplir con los estándares de duración de las mismas.
- En pruebas con datos insuficientes, la aplicación de algoritmos de suavizamiento agrava el problema, al reducir aún más el número de lecturas.

- El conocimiento previo del marco geológico de la zona a interpretar es muy importante, para que el intérprete obtenga resultados coherentes y sea capaz de discriminar periodos de transición que ocurren entre regímenes de flujo.
- El método de [Cooper-Jacob \(1946\)](#), continúa siendo la opción por excelencia para la interpretación de pruebas hidráulicas, pero se encuentra limitado a la aparición de periodos con régimen de flujo radial. La derivada es particularmente resolutive para su identificación, analizando pendientes cercanas a cero, durante al menos, un ciclo logarítmico.
- La comparación de resultados de dos o más técnicas, permite realizar inferencias con un mayor detalle y margen de confianza, resultando muy conveniente para la interpretación de pruebas en México, en las que a menudo no se cuenta con pozos de observación para la comprobación de resultados, y contribuyendo a resolver el problema de la no unicidad de la solución de los modelos no lineales.
- Es importante la actualización de los procedimientos de realización de pruebas de bombeo en nuestro país, ya que ninguna de las pruebas analizadas cumple con todos los estándares establecidos. Como ejemplo más representativo de este hecho se tiene la ausencia de pozos de observación, cuya existencia permitiría el cálculo de las propiedades del acuífero de forma múltiple, dando márgenes de comparación y comprobación más amplios.
- Para realizar caracterizaciones completas de los sistemas acuíferos en la República Mexicana, resulta imperativa la formación de grupos interdisciplinarios de trabajo, que incluyan hidrogeólogos, ingenieros de yacimientos y programadores. Esto permitirá ampliar el panorama en cuanto a la diversidad de técnicas que se tienen disponibles para dichos fines.

## 5.2 Líneas futuras de investigación

### 5.2.1 Segunda derivada

El análisis de la dimensión de flujo en la interpretación de pruebas de bombeo es una herramienta potente y sencilla de diagnóstico. Sin embargo, el cálculo de este parámetro puede ser erróneo por cualquiera de dos razones: [1] la geometría de flujo no es estable, o [2] existe un régimen de flujo estable, pero ha sido diagnosticado de manera incorrecta, siendo comúnmente asumido como radial ([Beauheim et al., 2004](#)).

[Roberts et al. \(1999\)](#) desarrollaron los denominados “gráficos diagnóstico de dimensión de flujo”, para cada uno de los tres tipos más comunes de pruebas hidráulicas (caudal constante, caudal variable y pruebas slug), con base en la primera derivada del abatimiento con respecto al tiempo. Estos gráficos son útiles para determinar si existe una dimensión de flujo estable durante la prueba. Si es así, la derivada presentará un valor constante, equiparable a la dimensión de flujo. Para su validez, la dimensión de flujo debe permanecer estable durante al menos un ciclo logarítmico; sin embargo, esto no siempre ocurre.

Para los casos en que la dimensión de flujo no se mantiene estable durante el tiempo suficiente para su evaluación, [Roberts et al. \(1999\)](#) crearon un gráfico semilogarítmico que expresa a la segunda derivada del abatimiento en función del tiempo, tal que, a tiempos tardíos de la prueba, la segunda derivada toma un valor constante igual a la dimensión de flujo. Si esto ocurre, el valor de la segunda derivada puede tomarse como expresión de la dimensión de flujo presente (incluso cuando la estabilización no haya ocurrido con la primera derivada), lo cual brinda un criterio de diagnóstico para la identificación de regímenes de flujo. Si, por el contrario, el valor de la segunda derivada no se estabiliza, implica no-unicidad de la solución con modelos analíticos. Por tanto, es recomendable una interpretación con soluciones numéricas ([Beauheim et al., 2004](#)).

Esta herramienta ha sido empleada exitosamente por numerosos autores en la ingeniería de yacimientos (Bourdet et al., 1989; Chilingarian et al., 1996; Bahrami y Siavoshi, 2005; Bahrami et al., 2010; Soomro y Muther, 2014; Suri et al., 2014); sin embargo, su uso en hidrogeología ha sido limitado (Roberts et al., 1999; Beauheim et al., 2004). Explorar la aplicación de la segunda derivada en la interpretación de pruebas de bombeo, brindaría un parámetro certero para la identificación de regímenes de flujo, así como una herramienta de diagnóstico eficiente para el análisis de pruebas con solución analítica no-única.

### 5.2.2 Deconvolución

La deconvolución es un proceso que ha recibido mucha atención en la industria petrolera a partir del año 2001 (Gringarten et al., 2003; Ilk et al., 2005; Levitan, 2005), desde el desarrollo de la metodología propuesta por von Schroeter et al (2001). Su uso ha ido en aumento debido a la constante mejora de los algoritmos matemáticos para su aplicación a la interpretación de pruebas de presión en pozos petroleros (Pimonov et al., 2009).

Esta metodología convierte los datos de presión a tasa variable en sus correspondientes valores a tasa constante, con una duración igual a la duración total de la prueba. Además, calcula directamente el valor de la derivada de la presión normalizada a una tasa constante. Por lo tanto, esta curva derivativa no presenta las distorsiones causadas por el algoritmo del cálculo de la derivada de la presión, ni los errores que se introducen a los datos por el truncamiento del cálculo (Gringarten, 2008).

La transformación de los datos por medio de la deconvolución aumenta la cantidad de lecturas a tasa constante disponibles para la interpretación, con respecto al conjunto original de datos. A partir de ello, es posible identificar efectos en tiempos tardíos de las pruebas en pozos, como son las fronteras, que habitualmente deben ser inferidas debido a la corta duración de algunas pruebas (Gringarten, 2008).

En el ámbito de la hidrología subterránea, se ha aplicado la deconvolución para la transformación de datos de abatimiento en pruebas de bombeo y pruebas slug, y su posterior interpretación con curvas tipo. Probando que los datos convertidos proporcionan estimaciones confiables de los parámetros hidráulicos del acuífero, incluso en pruebas con periodos cortos de recuperación. Esto hace posible la interpretación de pruebas que bajo métodos habituales (p. e. métodos lineales y curvas tipo) se consideran no analizables (Peres et al., 1989; Chakrabarty y Enachescu, 1997; Renard et al., 2009). Sin embargo, es una metodología poco analizada en esta área y hasta la fecha no forma parte de los procesos habituales de interpretación de pruebas en pozos de bombeo. Es importante explorar las bondades que ofrece de este método, con la finalidad de mejorar la interpretabilidad de las pruebas hidráulicas, así como disponer de más metodologías confiables para la verificación de resultados en la caracterización de acuíferos.

## Referencias citadas

- Anáhuac Ingenieros, Consultores y Supervisores, S.A. de C.V. (1990). Estudio Geohidrológico de la zona de Allende Piedras Negras, Coahuila. Comisión Nacional del Agua.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Morales-Casique, E., Benowitz, J. A., Rangel, E., & Escolero, O. (2013). New constraints in the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*.
- Ariel Construcciones, S.A. (1982). Actualización de estudio geohidrológico del valle de León, Gto. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Ariel Consultores, S.A. (2007). Pruebas de bombeo en la Cuenca del valle de México. México: Comisión Nacional del Agua.
- Avcı, C. B., Şahin, A. U., & Çiftçi, E. (2013). A new method for aquifer system identification and parameter estimation. *Hydrology Process Journal*, (2485–2497).
- Bahrami, H., & Siavoshi, J. (2005). Second derivative yields new insights to well test analyses. *Oil & Gas Journal*.
- Bahrami, H., Rezzae, R., Siavoshi, J., & Jammazi, R. (2010). SPE-132475-MS/Using Second Derivative of Transient Pressure in Welltest Analysis of Low Permeability Gas Reservoirs. SPE Production and Operations Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Barker, J. A. (1988). A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research Journal*, 24(10), (1796-1804).
- Beauheim, R. L., Roberts, R. M., & Avis, J. D. (2004). Well testing in fractured media: flow dimensions and diagnostic plots. *Essais de puits dans les milieux fracturés: dimensions d'écoulement et relevés de*. *Journal of Hydraulic Research*, (69-76).

- Botero-Santa, P., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S., & Ortega-Obregón, C. (2015). Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (83-94).
- Bourdet, D. (2002). *Well test analysis: The use of advanced interpretation models*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science B.V.
- Bourdet, D. P., Whittle, T. M., Douglas, A. A., & Pirard, Y. M. (1983). A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil Journal*, 6(196).
- Bourdet, D., Ayoub, J. A., & Pirard, Y. M. (1989). Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE Formation Evaluation*, (293-302).
- Butler Jr., J. J. (1988). Pumping tests in nonuniform aquifers—the radially symmetric case. *Journal of Hydrology*, 101, (15-30).
- Cerca-Martínez, L. M., Aguirre-Díaz, G. J., & López-Martínez, M. (2000). The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, Mexico: A documental example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *International Geology Review*, (131-151).
- Chilingarian, G. V., Mazzulo, S. J., & Rieke, H. H. (1996). *Carbonate reservoir characterization: A geologic-engineering analysis, part II*. Elsevier.
- Chow, V. T. (1952). On the Determination of Transmissibility and Storage Coefficients from Pumping Test Data. *American Geophysical Union*, (396-408).
- Cinco-Ley, H., & Samaniego, F. (1981). Transient pressure analysis for fractured wells. *Journal of Petroleum Technology*, (1749-1766).
- Cinco-Ley, H., Samaniego, F., & Dominguez, N. (1978). Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture. *SPE Journal*, (253-264).
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Elaboración del documento de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Encarnación, en el estado de Jalisco*. Instituto de Geología UNAM, Jalisco.

- Comisión Nacional del Agua. (2014). Estadísticas del Agua en México.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Estadísticas del Agua en México.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Estadísticas del Agua en México.
- Comisión Nacional para el uso y conocimiento de la Biodiversidad. (2012). Mapa Geológico de la República Mexicana.
- Consultores, S.A. (1981). Actualización del estudio geohidrológico de los valles Aguascalientes, Chicalote y Venadero, en el estado de Aguascalientes. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Transactions American Geophysics Union Journal* (27), (526-534).
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dijon, Francia.
- Daviau, F., Mouronval, G., Bourdarot, G., & Curuchet, P. (1985). Pressure analysis for horizontal wells. *SPE Paper 14251 (22-25)*. Las Vegas, USA: SPE.
- Delleur, J. W. (2006). *The handbook of groundwater engineering (2° ed.)*. USA: CRC Press.
- Dougherty, D. E., & Babu, D. K. (1984). Flow to a partially penetrating well in a double-porosity reservoir. *Water Resources Research Journal*, (1116-1122).
- Dupuit, J. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables (2a. ed.)*. Dunod, París.
- Elliot Cruz, J. (2015). *Estudio Hidrogeológico del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, Estado de Coahuila*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Escobar-Macualo, F. H. (2003). *Análisis moderno de presiones en pozos*. Neiva, Colombia.
- Ferrari-Pedraglio, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. J., & Carrasco-Núñez, G. (1999). Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From

the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology Journal*, (303-306).

Ferrari-Pedraglio, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Technophysics*, (122-149).

Fetter, C. W. (2000). *Applied hydrogeology Journal* (4a. ed.). Upper Sanddle River, USA.

Fletcher, F. (1996). *Basic hydrogologic methods: A field and laboratory manual with microcomputer applications*. USA: CRC Press.

Flores-López, C., & Zárate-Lupercio, A. (2005). *Marco de referencia de la investigación del Departamento Forestal del Estado de Coahuila*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Garduño V., Arreygue E., & Rodríguez G. (2000). *Mapa de riesgos de Salamanca*. Reporte técnico. Municipio de Salamanca, Universidad Nicolaita Michoacán.

Geofísica de exploraciones Guysa S.A. de C.V. (1997). *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de León*. Comisión Nacional del Agua.

Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V. (1998). *Estudio Geohidrológico y modelo matemático del valle de Irapuato-Valle de Santiago*. Comisión Nacional del Agua.

Geofs, S.A. (1980). *Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona del valle de Celaya, en el estado de Guanajuato*. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Gómez, S., Ramos, G., Mesejo, A., Camacho, R., Vásquez, M., & del Castillo, N. (2014). Well Test Analysis of Naturally Fractured Vuggy Reservoirs with an Analytical Triple Porosity-Double Permeability Model and a Global Optimization Method. *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies Nouvelles*, (653-671).

Gómez-Espinosa, V. M. (2017). Material Didáctico. AquíDplot: Hoja de cálculo interactiva para la interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos usando análisis derivativos y gráficos de diagnóstico. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Gordon-Gastil, R., Phillips, R., & Allison, E. (1973). Mapa. Reconnaissance geologic map of the state of Baja California. Geological Society of America; Universidad Autónoma de Baja California.

Gringarten, A. C. (2008). From straight lines to deconvolution: The evolution of the state of the art in well tests analysis. Paper SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas.

Gringarten, A. C., & Ramey, H. J. (1974). Unsteady state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry. Soc. Petrol. Engineers, (413-426).

Gringarten, A. C., & Witherspoon, P. A. (1972). A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Assoc. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics, 3B, (1-9).

Gringarten, A. C., Ramey, H. J., & Raghavan, R. (1974). Unsteady-state pressure distributions created by a well with single infinite-conductivity vertical fracture. Soc. Petrol. Engineers, (347-360).

Halford, K. J., Weight, W. D., & Schreiber, R. P. (2006). Interpretation of Transmissivity Estimates from Single-Well Pumping Aquifer Tests. Groundwater Journal, (467-471).

Hantush, M. S. (1960). Modification of the theory of leaky aquifers. Journal of Geophysics Research, 65(11), (3713-3725).

Hantush, M. S., & Jacob, C. E. (1955). Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Transactions American Geophysical Union Journal, 36(1), (95-100).

Hausback, B. (1984). Cenozoic Volcanic and Tectonic Evolution. Society for Sedimentary Geology-Pacific Section, (219-236).

Hernández-Espriú, A., Castro-Herrera, I., Zapata-Norberto, B., & Arias-Paz, A. (2015). Interpretación moderna de pruebas hidráulicas en acuíferos, adaptando metodologías de la ingeniería petrolera. X Congreso Nacional de Aguas Subterráneas. Ixtapa, Guerrero.

Hernández-Espriú, A., Rcyna-Gutiérrez, J., Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., & Martínez-Santos, P. (2014). The DRASTIC-Sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subjects to differential land subsidence, with application to Mexico City. *Hydrogeology Journal*, (1469-1485).

Herrera, I., Martínez, R., & Hernández, G. (1989). Contribución para la Administración Científica del Agua en México. *Revista Geofísica Internacional*.

Horne, R. N. (1995). *Modern Well Test Analysis: A Computer-Aided Approach* (2nd. ed.). Palo Alto: Petroway.

Hosseinpour-Zonoozi, N., Ilk, D., & Blasingame, A. (2006). SPE 103204. The Pressure Derivative Revisited-Improved Formulations and Applications. *SPE Journal*.

Ilk, D., Anderson, D. M., Valko, P. P., & Blasingame, T. A. (2005). Deconvolution of Variable Rate Reservoir Performance Data Using B-Spline Deconvolution. *SPE*, (582-595).

Ingeniería Geofísica y Sistemas, S.A. (1999). Estudio Geohidrológico y modelo matemático del acuífero del valle de Celaya. Comisión Nacional del Agua.

Ingeniería Geofísica y Sistemas, S.A. de C.V. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Pénjamo-Abasolo (1120), Estado de Guanajuato. Comisión Nacional del Agua.

ININSA, S.A. (1981). Estudio Geohidrológico preliminar de la zona de Monclova, Coahuila. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1995). Estudio hidrológico del estado de Baja California. Gobierno del estado de Baja California.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1996). Estudio hidrológico del estado de Baja California Sur. Gobierno del estado de Baja California Sur.

Ji, S. H., Lee, D. H., & Yeo, I. W. (2014). Derivative-assisted classification of fractured zones crossing a deep borehole. *Groundwater Journal*, (145-155).

Karasaki, K., Long, J., & Witherspoon, P. A. (1988). Analytical models of slug tests. *Water Resources Research Journal*, 24(1), (115-126).

Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (2013). Estudio Geohidrológico del acuífero Palestina localizado en el estado de Coahuila. Comisión Nacional del Agua.

Lesser-Illades, J. M., & González-Posadas, D. (1998). Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de Pénjamo-Abasolo, Gto. CEASG.

Levitan, M. M. (2005). Practical Application of Pressure-Rate Deconvolution to Analysis of Real Well Tests. *SPE*, (113-121).

Martínez, G., & Díaz, J. (2011). Morfometría de la Cuenca Hidrológica de San José del Cabo, Baja California Sur, México. *Revista Geológica de América Central*, (83-100).

Moench, A. F. (1984). Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research Journal*, 20(7), (831-846).

Moench, A. F. (1985). Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. *Water Resources Research Journal*, 21(8), (1121-1131).

Moench, A. F. (1997). Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water-table aquifer. *Water Resources Research Journal*, 33(6), (1397-1407).

Neuman, S. P. (1974). Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research Journal*, 10(2), (303-312).

Neuman, S. P. (1975). Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research Journal*, 11(2), (329-342).

Neuman, S. P., & Witherspoon, P. A. (1969). Theory of flow in a confined two aquifer system. *Water Resources Research Journal*, 5(4), (803-816).

Neuman, S. P., & Witherspoon, P. A. (1979). Variational principles for confined and unconfined flow of ground water. *Water Resources Research Journal*, 6(5), (1376-1382).

Peña-Díaz, S., & Arreguín-Mañón, J. (1989). Eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo y de las condiciones hidráulicas en los pozos. *Ingeniería Hidráulica*, (17-24).

Pimonov, E. A., Onur, M., & Kuchuk, F. J. (2009). A New Pressure Rate Deconvolution Algorithm to Analyze Wireline Formation Tester and Well-Test Data. Society of Petroleum Engineers.

Renard, P. (2005). Hydraulics of wells and well testing. *Groundwater* (Encyclopedia of hydrological sciences).

Renard, P., Glenz, D., & Mejias, M. (2009). Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, 3(17).

Rudolph, D. (s.f.). Studies of groundwater flow and solute transport in a clay aquitard near Mexico City. Ontario, Canada: University of Waterloo.

Sánchez-San Román, F. J. (2012). *Hidráulica de Captaciones: Fundaciones*. Salamanca, España: Depto. de Geología Univ. Salamanca.

Singh, S. K. (2001). Confined aquifer parameters from temporal derivative of drawdowns. *Hydraulic Engineering Journal*, (466-470).

Soomro, S., & Muther, T. (2014). Characterizing and Developing Tight Gas Reservoirs. SPE Annual Technical Conference. Islamabad, Pakistan.

Spanc Jr., F. A., & Wurstner, S. K. (1993). DERIV: A computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulic test analysis. *Groundwater Journal (Computer notes)*, 5(31).

Straface, S. (2009). Estimation of transmissivity and storage coefficient by means of a derivative method using the early-time drawdown. *Hydrogeology Journal*, (1697-1686).

Sun, X., Xu, Y., & Lin, L. (2015). The diagnostic plot analysis of artesian aquifers with case studies in Table Mountain Group of South Africa. *Hydrogeology Journal*, (567-579).

Suri, Y., Dutt, A., & Mandal, A. (2014). A Comparative Analysis of Offshore and Onshore Fields Using Derivative and Second Derivative Plot (Without Type Curves). *Petroleum Science and Technology Journal*, (535-542).

Tartakovsky, G. D., & Neuman, S. P. (2007). Three-dimensional saturated-unsaturated flow with axial symmetry to a partially penetrating well in a compressible unconfined aquifer. *Water Resources Research Journal*.

Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (1974). Estudio Geohidrológico del valle de San Quintín, Baja California. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (1974). Estudio geohidrológico del valle de Santiago en el territorio de Baja California. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (1974). Estudio integral de rehabilitación del valle de San José del Cabo. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (1977). Informe final del estudio geohidrológico del valle de Guadalupe, Baja California. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (1978). Estudio integral de rehabilitación del valle de Santo Domingo. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysical Union Journal*, 16, (519-524).

Thiem, A. (1870). Über die Ergiebigkeit artesischer Bohrlöcher, Schachtbrunnen und Filtergalerien. *Gasund Wasserversorgung*.

Thiem, G. (1906). *Hydrologische methoden (Hydrological methods)*. Gebhardt, Leipzig, 56.

van Tonder, G. J., Botha, J. F., & van Bosch, J. (2001). A generalized solution for step-drawdown tests including flow dimension and elasticity. *Water SA*, (345-354).

Villanueva-Martínez, M., & Iglesias-López, A. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid: Instituto geológico y minero de España.

Xiao, L., & Xu, Y. (2014). Diagnostic analysis of pumping tests using derivative of  $dlgs/dlgt$  with case study. *Groundwater Journal*.