

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Catálogo de curvas diagnóstico  
teóricas para mejorar la  
interpretación de pruebas de  
bombeo en acuíferos.**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de

**Ingeniera petrolera**

**P R E S E N T A**

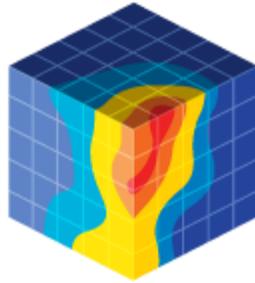
Yael Eskarlet Gutiérrez Pérez

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO**

Dr. José Antonio Hernández Espriú



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



The  
HYDRO  
geology  
Group  
FACULTY OF ENGINEERING  
U N A M



## CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA

DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la contribución No. 27 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 document represents the contribution No. 27 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM) as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.*

<http://www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology/>

Twitter: @hydrogeologymx

# AGRADECIMIENTOS

## **A mi querida UNAM**

Mi alma mater, mi segunda casa, infinitas gracias por darme la oportunidad de convertirme en lo que soy ahora, por permitirme conocer a personas increíbles, por permitirme adquirir conocimientos y experiencias que me servirán para toda mi vida, por permitirme crecer tanto profesional como personalmente.

## **A mi amada familia**

Mi madre Claudia Verónica Pérez Reyes y mi padre Francisco Saúl Gutiérrez Padilla por siempre mostrar gran interés en mi formación académica, porque no importaba la situación siempre buscaban la mejor forma de ayudarme, todo esto es gracias a su apoyo y amor, no tengo con que agradecerles todo lo que han hecho por mí, gracias por siempre darme la mejor motivación y estar en las buenas y en las malas, mamá eres pésima dándome ánimos, pero muchas veces sólo así entendía, gracias por la familia que tenemos y por ser muy buenos padres, esto no lo hubiera logrado sin ustedes, los amo 3 millones.

A mi hermano, Saúl Manuel Gutiérrez Pérez por su gran corazón, por darme las mejores risas y las mejores peleas, gracias por estar siempre, te quiero.

A mis abuelos, Bertha Reyes Castañeda y Santiago Pérez Valencia por siempre brindarme amor, y paciencia por ser los mejores abuelos que la vida me pudo haber dado, este logro también es por y para ustedes.

A mi tío, Vitor Hugo Pérez Reyes, por siempre darme motivación a ser mejor persona, por siempre darme el ejemplo de no rendirme, por ser uno de mis modelos a seguir, por todo que ha hecho por mí, son cosas que nunca se me olvidaran.

A mis tíos Ricardo Pérez Reyes y Alberto Pérez Reyes porque cada uno a su manera nos apoyó a mi hermano y a mí en los tiempos difíciles, por molestarnos, pero también darnos muchas risas.

## **A mis amigos**

Carlos Álvarez, por ser el mejor amigo que pude haber tenido durante toda la carrera, gracias por ser mi equipo, por las risas, por las lágrimas, por el estrés compartido, porque por mucho tiempo me motivaste a ser mejor persona y me brindaste muchas cosas positivas por las cuales siempre me dará gusto recordar la universidad.

Carlos Serrano, por contar con tu apoyo en muchas ocasiones, gracias por tu amistad y los momentos padres y no tan padres, por recordarme lo efímero que es todo y que por eso hay que vivir el presente de la mejor forma.

A Laura Lino, Iris García, Sam Zúñiga, Álvaro Pérez, Diego Herrera, Ángel Monreal, Chuma, y Missa, por ser mis amigos durante la carrera, por las miles de risas compartidas, por todo el estrés y apoyo compartido, chicos los quiero mucho, si bien ya no son mis amigos de carrera espero que siempre sean mis amigos de vida.

A Mónica López y Ángel Morales, gracias por siempre escucharme y darme ánimos, nuestra amistad ya supera los 8 y 6 años respectivamente y dicen que esos son los años promedio para saber quién será tu amigo de por vida, espero que así sea, los quiero montones.

#### **A mis sinodales**

Al Dr. José Antonio Hernández Espriú por inspirarme y guiarme en la realización de este trabajo, por haber sido de mis mejores profesores de la carrera, y tener siempre disposición a compartir sus conocimientos.

Al Ing. Israel Castro y al Ing. Slim Santillán Hernández, por brindarme su apoyo y sus conocimientos a lo largo de la carrera, por su amabilidad y comprensión, gracias por haber sido mis profesores.

Al Ma. David Loera y al ing. Alberto Arias Paz, gracias por siempre tener buena disposición por compartirme sus conocimientos y su tiempo.

**A todos los que me apoyaron y me brindaron su amistad, amor, paciencia, conocimiento, diversión, muchas gracias.**

## RESUMEN

Actualmente no se cuenta con catálogo de curvas diagnóstico que nos ayude a interpretar pruebas de bombeo en acuíferos. Algunos de los métodos aplicados para la interpretación de estas pruebas provienen de la industria petrolera, sin embargo, en el sector hidrogeológico es escasa su aplicación. Un ejemplo de esto es el uso del análisis a partir de la función derivada de la presión, base de este trabajo.

Se desarrolló material visual para ayudar en la interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos, el cual consiste en un catálogo con una serie de curvas diagnóstico que aplican métodos de análisis comunes en la industria petrolera.

El trabajo está plasmado en un cartel que queda a disposición de la comunidad tanto estudiantil como docente.

## ABSTRACT

*Currently there is no catalog of diagnostic curves that help us interpret pumping tests in aquifers. Some of the methods applied to interpret these tests come from the oil industry, however, their application is scarce in the hydrogeological sector. An example of this is the use of analysis based on the function derived from pressure, the basis of this work.*

*Visual material was developed to assist in the interpretation of aquifer pumping tests, which consists of a catalog with a series of diagnostic curves that apply common analysis methods in the oil industry.*

*The work is embodied in a poster that is available to the student and teacher community.*

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	I
CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO .....	3
II.I. Descripción de los parámetros hidrogeológicos.....	3
II.II. Descripción de los métodos.....	9
II.II.I. Acuíferos confinados.....	9
II.II.II. Acuíferos semiconfinados.....	10
II.II.III. Acuíferos Libres.....	12
II.II.IV. Acuíferos Fracturados .....	13
II.III. Interpretación de pruebas de bombeo usando curvas diagnóstico.....	13
II.IV. Limitaciones/ Suposiciones.....	16
CAPÍTULO III- METODOLOGÍA .....	17
CAPÍTULO IV- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
III.I Confinados .....	21
III.II Semiconfinados .....	31
III.III Libre .....	41
III.IV Fracturado.....	51
III.V Pozos .....	61
III.VI Multipozos.....	71
CAPÍTULO V- CONCLUSIONES .....	79
REFERENCIAS CITADAS.....	80
ANEXOS.....	82
IV.I Anexo A .....	82
IV.II Anexo B .....	87

---

## CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN

Las pruebas de bombeo 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). El principio en el que se basan las pruebas de bombeo en acuíferos es análogo a las pruebas de presión para la caracterización dinámica de yacimientos, realizadas en la industria petrolera (Spane Jr and Wurstner, 1993).

Theis (1935) fue pionero en la interpretación de pruebas de bombeo mediante el análisis con curvas tipo, con la solución de flujo en estado transitorio para acuífero confinado, homogéneo e isótropo. Dicha solución fue retomada por Cooper y Jacob (1946) los cuales simplificaron e implementaron el método de la línea recta en gráficos semilogarítmicos.

La propuesta en el uso del concepto de la derivada para mejorar la interpretación de pruebas de bombeo en pozos se le atribuye a Chow (1952), 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.

El análisis derivativo propuesto por Bourdet et al. (1983) ha revolucionado el análisis de pruebas de pozos (fig. 1.1), ya que resulta ser una herramienta poderosa que ayuda en la interpretación y caracterización de acuíferos o yacimientos, debido a que permite la identificación de geometrías de flujo, fronteras, daños a la formación, almacenamiento en el pozo, heterogeneidades y fracturas.

La aplicación de la derivada como un complemento 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).

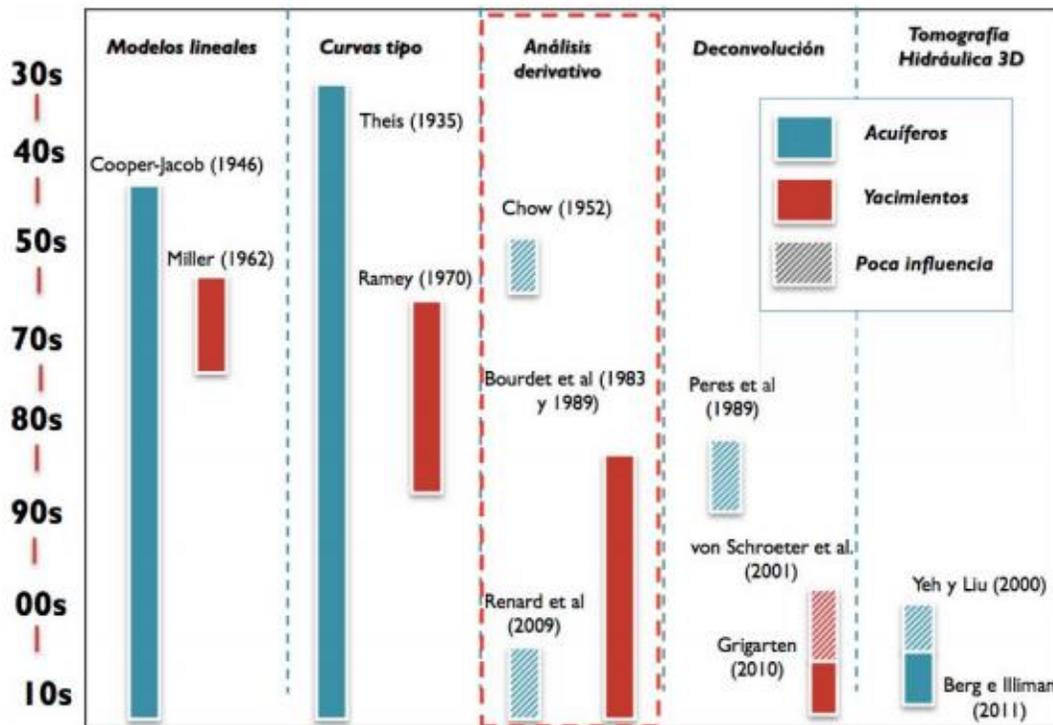
Con la publicación de Renard et al. (2009) incrementó la implementación de gráficos diagnóstico para la interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos. No obstante, pese a que en hidrogeología, existen algunos ejemplos recientes donde se utiliza la derivada para la interpretación de pruebas de bombeo (Hernández-Espriú et al., 2017), esta técnica sigue siendo poco utilizada si se compara con el uso que tiene en la caracterización dinámica y análisis del comportamiento de yacimientos petroleros y sus pozos, o incluso en la caracterización dinámica de yacimientos geotérmicos (Garg and Kassoy, 1981).

La experiencia de los docentes en aguas subterráneas de la Facultad de ingeniería de la UNAM ha permitido establecer que la adición del análisis de la derivada y por ende sus gráficos diagnósticos representen un aporte importante a la enseñanza de la interpretación de pruebas de bombeo, ya que ayuda a la comunidad estudiantil, a comprender y analizar el comportamiento de un acuífero/ yacimiento y del pozo.

Al respecto, actualmente no existe un catálogo que tenga una amplia gama de gráficos diagnóstico que le permita a un estudiante identificar los efectos que muestra la derivada durante una prueba de bombeo, excepto el catálogo publicado por [Renard et al. \(2009\)](#), el cual es muy limitado.

Por lo tanto, el principal objetivo de este trabajo es mostrar un catálogo de gráficos diagnóstico más amplio que sirva como una herramienta adicional de enseñanza a docentes y alumnos, en el cual se pueda identificar cuáles son los efectos que muestra la derivada al variar algún parámetro del pozo o del acuífero.

La Fig. 1. 1 muestra la cronología de la publicación de diversas técnicas que sirven en la interpretación de pruebas de bombeo, tanto para pozos petroleros como para pozos de agua subterránea, considerando las metodologías dominantes (modelos lineales, curvas tipo, análisis derivativo, deconvolución y tomografía hidráulica 3D).



**Fig 1. 1 Cronología de la evolución de caracterización dinámica (ADAPTADA DE HÉRNANDEZ- ESPRIÚ, 2015)**

## CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO

### II.I. Descripción de los parámetros hidrogeológicos

#### Transmisividad.

El parámetro que describe el flujo a través de un acuífero se conoce como transmisividad (T) (Fletcher, 1996) y se define como la propiedad que mide la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de una unidad de ancho por el espesor saturado del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario, matemáticamente se expresa de la siguiente forma (Fetter, 2018)

$$T = Kb \quad (1)$$

Dónde:

T: transmisividad (m<sup>2</sup>/día)

K: conductividad hidráulica (m/día)

b: espesor saturado del acuífero (m)

En los acuíferos confinados, el valor de la transmisividad se mantiene constante sin embargo en los acuíferos libres el espesor saturado puede variar con el tiempo y, por ende, el valor de la transmisividad también.

La transmisividad se relaciona análogamente con un parámetro conocido como transmisibilidad (T), matemáticamente (Werner, 1996; Maizeret, 2013).

$$T = \frac{kh}{\mu} \quad (2)$$

Donde:

T: Transmisividad (md.ft/cp)

k: Permeabilidad (md)

h: Espesor (ft)

$\mu$ : Viscosidad (cp)

### Coefficiente de almacenamiento.

En acuíferos confinados se define a la capacidad de almacenar y ceder agua se cuantifica por medio del coeficiente de almacenamiento elástico o simplemente coeficiente de almacenamiento ( $S$ ).

El coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) se define como la cantidad de agua que libera (o toma) una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende) una unidad (Deming, 2002) (Fig. 2.1). Por lo anterior,  $S$  es un coeficiente adimensional.

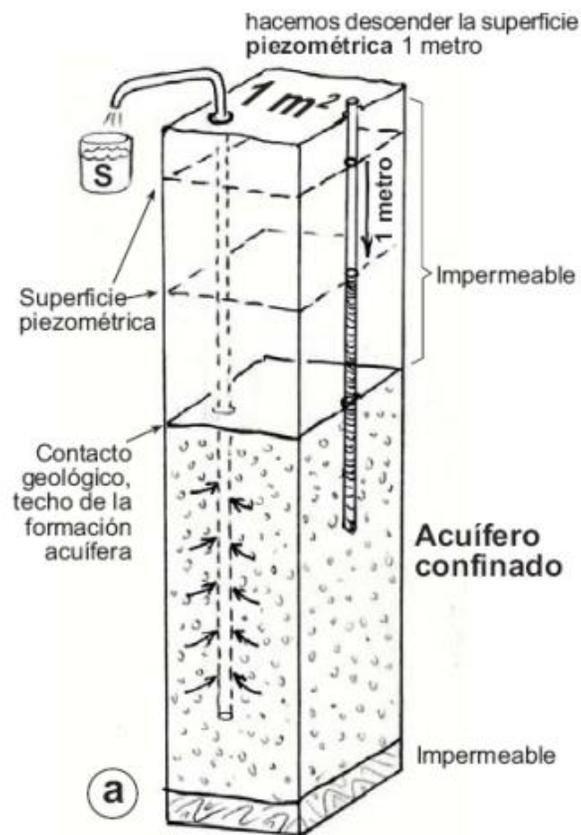


Fig. 2. 1 Ejemplo gráfico del coeficiente de almacenamiento (Adaptada Sánchez, 2012)

### Rendimiento específico.

Sin embargo, dependiendo del tipo de acuífero, existe una diferencia al aplicar el concepto, para los acuíferos libres aplica el término rendimiento específico ( $S_y$ ); que se define como el volumen de agua que se drena de una roca saturada debido al efecto de la gravedad, cuando el nivel freático desciende una unidad. Por lo que el término retención específica ( $S_r$ ) se asigna al volumen de agua que no es drenado de la roca (Fetter, 2018). Partiendo de la definición de porosidad total, si el volumen de agua que se extrae depende de la porosidad efectiva de la roca, es posible establecer que la porosidad efectiva y el rendimiento específico son equivalentes (Heath, 1983)

$$\phi_T = \phi_{ef} + \phi_{noef} \leftrightarrow \phi_T = S_y + S_r \quad (3)$$

Por lo tanto:

$$S_y = \phi_{ef} \quad (4)$$

Donde:

$S_y$ : Rendimiento específico (adimensional)

$S_r$ : Retención específica (adimensional)

$\phi_T$ : Porosidad total (adimensional)

$\phi_{ef}$ : Porosidad efectiva (adimensional)

$\phi_{noef}$ : Porosidad no efectiva (adimensional)

### Almacenamiento específico.

En el caso del agua bajo superficie freática, o dentro del mismo acuífero en caso de un sistema confinado, el mecanismo de obtención de agua proporcionada por descompresión, tanto del terreno como de la propia agua, se denomina almacenamiento específico ( $S_s$ ), y tiene unidades 1/L

Por tanto:

$$S_s = S/\text{espesor} \quad (5)$$

El almacenamiento específico ( $S_s$ ) es la cantidad de agua, por unidad de volumen, que es almacenada o liberada debido a la compresibilidad del esqueleto mineral y del agua en los poros debido a un cambio unitario en el nivel de agua en el acuífero. Este coeficiente se denomina coeficiente de almacenamiento elástico. Este concepto se aplica tanto a acuíferos confinados como no confinados. El almacenamiento específico está dado por la siguiente expresión:

$$S_s = \rho_w \cdot g \cdot (\alpha + n \cdot \beta) \quad (6)$$

Donde:

$\rho_w$  = Densidad del agua ( $\frac{M}{L^3}$ )

$g$  = Aceleración de gravedad ( $\frac{L}{T^2}$ )

$\alpha$  = Compresibilidad del esqueleto del acuífero ( $\frac{1}{LT^2}$ )

$n$  = Porosidad ( $\frac{L^3}{L^3}$ )

$\beta$  = Compresibilidad del agua ( $\frac{L}{LT^2}$ )

El almacenamiento específico tiene unidades de 1/L, con valores inferiores a 0.0001 1/m.

### Daño.

Se define el daño a la formación [ $S_w$ ] como cualquier restricción al flujo de fluidos en el medio poroso, causado por la reducción de la permeabilidad en la vecindad del pozo, por la producción de fluidos o por la introducción de fluidos durante las operaciones de perforación, terminación y/o rehabilitación del pozo, y que puede ser eliminada mediante tratamiento químico (ácidos, surfactantes u otros), permitiendo al pozo recuperar la mayor parte de su capacidad original de producción.

Se sabe que el daño afecta solo a una zona en las inmediaciones del pozo, que no está muy bien definida, en la cual la permeabilidad se va afectada. A esta zona se le conoce como zona dañada, afectada por un cambio en la permeabilidad con respecto a la de la zona más alejada del pozo. La zona dañada tiene un radio medido desde el centro del pozo que puede ser estimado mediante perfiles como el microlaterolog o el perfil de proximidad. El daño de la formación se determina mediante ensayos, pero de no tener los datos precisos puede ser estimado mediante la relación de permeabilidades y radios del skin y la formación.

$$S_w = \left( \frac{k}{k_{skin}} - 1 \right) * \ln \left( \frac{r_{skin}}{r_w} \right) \quad (7)$$

Dónde:

$k$ : Permeabilidad media de la formación productiva.

$k_{skin}$ : Permeabilidad media de la zona afectada por el daño (skin).

$r_{skin}$ : Radio desde el centro del pozo al borde externo de la zona dañada.

$r_w$ : Radio del pozo.

De aquí se puede observar que:

- a) Si  $k_{skin} < k$ ,  $S_w > 0$ , el pozo tiene daño.
- b) Si  $k_{skin} = k$ ,  $S_w = 0$ , el pozo no tiene daño.
- c) Si  $k_{skin} > k$ ,  $S_w < 0$ , el pozo fue estimulado.

### Conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica ( $K$ ) es una propiedad del material que conforma el acuífero (también es denominada comúnmente, pero erróneamente, permeabilidad). Es la medida de la facilidad con que un acuífero transmite agua y se define concretamente como el caudal por unidad de superficie de acuífero que transmite un acuífero sometido a un gradiente unidad de alturas piezométricas. La conductividad hidráulica viene determinada en primer lugar por el tamaño de los poros, en igualdad de condiciones siempre tendrá mayor permeabilidad el medio cuyos poros son de mayor dimensión y están mejor conectados. También viene determinada por la viscosidad y el peso específico; estas dos magnitudes dependen de la temperatura y por lo tanto, en aguas subterráneas, donde las temperaturas son bastante estables, la influencia de estos parámetros, en general, es despreciable.

### Factor de goteo.

El factor de goteo se expresa diferente según sea el método, para acuíferos semiconfinados sin almacenamiento en el acuitardo el factor de goteo ( $r/B$ ) se expresa mediante la ecuación 8, donde el método de solución es [Hantush y Jacob \(1955\)](#).

$$r/B = \frac{r}{\sqrt{\frac{Tb'}{K'}}} \quad (8)$$

Para acuíferos semiconfinados con almacenamiento en el acuitardo el factor de goteo ( $\beta$ ) se expresa mediante la ecuación 9, donde el método de solución es [Hantush \(1960\)](#).

$$\beta = \frac{r}{4B} \sqrt{\frac{S'}{S}} \quad (9)$$

### Anisotropía y heterogeneidad.

Frecuentemente la permeabilidad de un terreno varía según la dirección en la que se observe (anisotropía). Una de las causas de esta anisotropía es la estratificación. En terrenos estratificados, la permeabilidad vertical puede ser muchas veces inferior a la horizontal.

La heterogeneidad consiste en la variación de las propiedades del medio de un lugar a otro. Una causa muy frecuente de heterogeneidad es la aparición de lentejones o intercalaciones de materiales poco permeables.

Otras veces la heterogeneidad consiste en el cambio más o menos gradual del material del acuífero con la consiguiente variación de la permeabilidad. Esta variación puede ser tanto en dirección horizontal como vertical.

A continuación, se muestra una tabla donde describe la analogía de algunos parámetros hidrogeológicos con los parámetros usados en la ingeniería petrolera.

Hidrogeología	Yacimientos
Porosidad total ( $\phi_T$ )	Porosidad total ( $\phi_T$ )
Rendimiento específico ( $S_y$ )	Porosidad efectiva ( $\phi_{ef}$ )
Coefficiente de almacenamiento (S)	Capacidad de almacenamiento (s)
Coefficiente de almacenamiento específico ( $S_s$ )	Compresibilidad total ( $C_T$ )
Carga hidráulica (h)	Presión (P)
Conductividad hidráulica (K)	Permeabilidad (k)
Transmisividad (T)	Transmisibilidad (T)
Daño ( $S_w$ )	Daño (S)
Abatimiento adicional debido al daño ( $Sw_\sigma$ )	Caída de presión debida al daño ( $\Delta P_s$ )
Tasa de anisotropía ( $\frac{k_v}{k_h}$ )	Tasa de anisotropía ( $\frac{k_v}{k_h}$ )

Tabla 2.1 Comparación de parámetros usados en ingeniería petrolera vs parámetros hidrogeológicos

## II.II. Descripción de los métodos

### II.II.I. Acuíferos confinados.

#### Método de Theis.

Theis (1935) desarrolló una fórmula para régimen de flujo transitorio, para acuíferos confinados, donde además de las suposiciones básicas asignó otras que cumplieran con lo siguiente: [1] el acuífero se encuentra confinado tanto en su techo como en su piso; [2] no existe recarga del acuífero de ningún medio; [3] el acuífero es compresible y el agua se expulsa instantáneamente del acuífero en cuanto la carga hidráulica disminuye y [4] el pozo se bombea a caudal constante (Fetter, 2018). La ecuación de Theis permite calcular el abatimiento a cualquier distancia del pozo de bombeo, transmisividad y coeficiente de almacenamiento (Fletcher, 1996), la ecuación 7, representa la expresión de Theis:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty e^{-u} \frac{du}{u} = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (10)$$

De tal manera:

$$U = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (11)$$

Dónde:

s= Abatimiento medido en el piezómetro (m).

r= Distancias del piezómetro al pozo de bombeo (m).

Q= Caudal constante de descarga en el pozo de bombeo (m<sup>3</sup> /día).

S= Coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional).

T= Transmisividad del acuífero (m<sup>2</sup> /día).

t= Tiempo de bombeo (días).

Maneras de resolver la integral exponencial:

La integral puede expresarse en forma de serie infinita, así:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{(2 * 2!)} + \frac{u^3}{(3 * 3!)} - \dots \quad (12)$$

La solución de la integral para los distintos valores de u aparece tabulada en todos los textos de Hidrogeología. Se incluye dicha tabla para el cálculo (Tabla A.3) en el anexo A.

### Método de Cooper- Jacob

Cooper y Jacob (1946) desarrollaron una modificación a la ecuación de Theis, la cual cumple con todas las condiciones anteriores e implementan una extra, en la cual establecen que cuando un pozo lleva cierto tiempo de bombeando, el valor de  $u$  es tan pequeño ( $u < 0.05$ ) que puede ser descartado (Fetter, 2018) ya que se alcanza una forma de estado estacionario (Fletcher, 1996) y la ecuación puede ser expresada de la siguiente manera (Fetter, 2018):

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta h} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2S}\right) \quad (13)$$

Donde:

T: Transmisividad ( $m^2/d$ )

S: Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

$\Delta h$ : Abatimiento (m)

Q: Caudal ( $m^3/d$ )

t: Tiempo (días)

r: Radio desde el pozo de bombeo (m)

### II.II.II. Acuíferos semiconfinados.

#### Método de Hantush-Jacob.

Para el análisis de acuífero semiconfinados se introduce una nueva variable que hace referencia a el goteo que existe desde el acuitardo, se utilizan los métodos desarrollados por Hantush y Jacob (1955) y por Hantush (1960), cabe destacar que estos métodos se basan en la ecuación de Theis pero con una función de pozo más elaborada, donde las condiciones dependen de si el acuitardo almacena o no almacena agua (Fletcher, 1996).

Hantush y Jacob (1955) desarrollaron el primer modelo matemático riguroso de flujo transitorio de agua a un pozo de bombeo en un acuífero semiconfinado. Su ecuación matemática es la siguiente:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w\left(u, \frac{r}{B}\right) \quad (14)$$

$$B = \left(\frac{Tb'}{K'}\right)^{1/2} \quad (15)$$

$$K' = \frac{[Tb' \left(\frac{r}{B}\right)^2]}{r^2} \quad (16)$$

Donde:

T: Transmisividad (m<sup>2</sup>/d).

S: Coeficiente de almacenamiento (adimensional).

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/d).

s: Abatimiento (m).

t: Tiempo (días).

r: Radio desde el pozo de bombeo (m).

W(u,r/B): Función de un pozo de goteo adimensional.

u: Constante adimensional.

B: Factor de goteo.

b': Espesor del acuitardo (m).

K': Conductividad hidráulica vertical de acuitardo (m/d).

Una solución práctica para encontrar los valores de W(u) y W( $\frac{r}{B}$ ), se muestra en la tabla A. 4 del anexo A.

### Método de Hantush.

Para acuíferos semiconfinados con almacenamiento en el acuitardo, Hantush (1960) realizó modificaciones a las ecuaciones anteriores, sin embargo El proceso es el mismo que en el método de (Hantush and Jacob, 1955), la única diferencia es que en este método se cuenta con que el acuitardo tiene almacenamiento.

Para calcular los parámetros del acuífero las ecuaciones son las siguientes (Fletcher, 1996):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H(u, \beta) \quad (17)$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (18)$$

Donde:

T: Transmisividad (m<sup>2</sup>/d).

S: Coeficiente de almacenamiento (adimensional).

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/d).

s: Abatimiento (m).

t: Tiempo en días.

r: Radio desde el pozo de bombeo (m).

H(u, β): Función de un pozo con goteo (adimensional).

u: Constante (adimensional).

B: Factor de goteo (m).

b': Espesor del acuitardo (m).

$K'$ : Conductividad hidráulica vertical del acuitardo (m/d).

Una solución práctica para encontrar los valores de  $W(u)$  y  $W\left(\frac{r}{B}\right)$  para un acuífero semiconfinado con almacenamiento en el acuitardo se muestra en la tabla A. 5 del anexo A.

### II.II.III. Acuíferos Libres.

#### Método de Neuman.

Neuman, (1972) enunció la siguiente ecuación, similar a la de los acuíferos confinados excepto por la función de pozo:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \beta) \quad (19)$$

$$u_A = \frac{r^2}{4\pi T} \quad (20)$$

$$u_B = \frac{r^2}{4\pi t} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h} \quad (22)$$

Donde:

$s$ =Descenso a una distancia  $r$  transcurrido un tiempo  $t$ .

$Q$ =Caudal de bombeo.

$T$ = Transmisividad del acuífero.

$K_v$ = Conductividad hidráulica vertical.

$K_h$ = Conductividad hidráulica horizontal.

$S$ = coeficiente de almacenamiento.

$S_y$ = Rendimiento específico.

$W$ = función tabulada en función de  $1/u_A$  y de  $1/u_B$ .

La ecuación 16 es una expresión conjunta de las siguientes dos ecuaciones:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, \beta) \quad (23)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_B, \beta) \quad (24)$$

Las ecuaciones (20) y (21) se resuelven utilizando las series o tablas normalizadas incluidas en las tablas A.1 y A.2 en el anexo A.

#### II.II.IV. Acuíferos Fracturados

##### Método de Gringarten and Witherspoon.

Una solución matemática de Gringarten y Witherspoon (1972) es útil para determinar las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, almacenamiento específico, anisotropía de conductividad hidráulica y longitud de fractura) de acuíferos fracturados con una sola fractura de plano vertical que cruza el pozo bombeado. El análisis implica hacer coincidir la solución con los datos de extracción recopilados durante una prueba de bombeo. La solución estima la anisotropía de la conductividad hidráulica en un plano horizontal (x-y).

A continuación, se presenta la forma de obtener el abatimiento en una prueba de bombeo para un acuífero fracturado.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(U_{vf}, r') \quad (25)$$

Donde

$$u_{vf} = \frac{Tt}{SX_f^2} \quad (26)$$

$$r' = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{X_f} \quad (27)$$

S= Coeficiente de almacenamiento, adimensional.

T=Transmisividad (m<sup>2</sup> /día).

X<sub>f</sub>= Longitud media de la fractura vertical (m).

X,Y= Distancia entre el pozo de observación y el pozo de bombeo (m).

Para  $r' \geq 5$ , usar el método de Theis

Para resolver la función  $F(U_{vf}, r')$ , se agrega una gráfica (Fig. A.1) en el anexo A.

#### II.III. Interpretación de pruebas de bombeo usando curvas diagnósticas

La importancia de las pruebas de bombeo consiste en tener un panorama amplio de las respuestas mostrada por el yacimiento o acuífero a los cambios en la producción, lo cual permite identificar los posibles modelos de flujo y o frontera, así como parámetros del yacimiento (Gringarte, 2008).

Los modelos que se usan para la interpretación de las pruebas de bombeo definen el comportamiento del yacimiento o acuífero, los cuales tienen diferentes respuestas entre sí durante el tiempo de la prueba (Bourdet, 2002).

### Análisis derivativo

La derivada representa la tasa de cambio del abatimiento (pendiente), y, por tanto, amplifica los cambios asociados a efectos hidrogeológicos en el pozo y en el acuífero. La lectura conjunta de la gráfica de abatimiento y su respectiva derivada permite identificar visualmente, con cierta facilidad, efectos de almacenamiento de pozo, fronteras, flujo dominado por fracturas, regímenes radiales de flujo, efectos de pozos parcialmente penetrantes y daño en la captación, entre otros (interpretación no paramétrica).

En algunos casos, estos efectos pueden cuantificarse paraméricamente (interpretación paramétrica), sin necesidad de curvas tipo, adaptando las soluciones analíticas de la ingeniería petrolera al ámbito de la hidrogeología (p.e. Gómez-Espinosa, 2017).

Para una interpretación integral y precisa de las pruebas de bombeo se usa la derivada, ya que permite identificar todos los regímenes de flujo en una sola gráfica, lo cual representa mayor precisión durante la caracterización del acuífero y o yacimiento; además, permite saber qué gráfico especializado corresponde a cada modelo.

Como se muestra en la tabla 2.1 , conociendo las pendientes en la respuesta de la derivada, así como algunos datos del pozo y del acuífero se pueden calcular otros parámetros para cada régimen de flujo usando sus respectivos gráficos especializados (Bourdet, 2002).

Regímenes y geometrías de flujo	Pendiente de la derivada	Gráfico especializado	Parámetros a calcular
<b>Almacenamiento de pozo</b>	1	$\Delta t$	C- coeficiente de almacenamiento en el pozo
<b>Flujo radial</b>	0	$\log(\Delta t)$	T- transmisividad Sw- daño al pozo $r_i$ –radio de investigación
<b>Flujo lineal</b>	1/2	$(\Delta t)^{1/2}$	Xf- longitud del ala de la fractura o longitud media de un acuífero canal
<b>Flujo bilineal</b>	1/4	$(\Delta t)^{1/4}$	$k_f w_f$ -conductividad hidráulica de la fractura
<b>Flujo esférico (pozo parcialmente penetrante)</b>	-1/2	$(\Delta t)^{-1/2}$	$k_s$ –permeabilidad esférica $\frac{k_v}{k_h}$ –tasa de anisotropía
<b>Frontera de Carga o presión constante</b>	-1 (tiende a indefinirse)	$\log(\Delta t)$	L- distancia a la frontera

<b>Yacimiento cerrado (pseudoequilibrio)</b>	1	$\Delta t$	$\phi h A$ – volumen de poros
--	---	------------	-------------------------------

Tabla 2. 2 identificación del régimen de flujo y su grafico especializado por medio de pendientes (adaptada de Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Renard et al. 2009).

La Fig. 2. 2 muestra un catálogo de curvas diagnóstico con su respectiva derivada propuesta por Renard et al. (2009). En este se observan distintos regímenes y geométricas de flujo. De las cuales se basa este trabajo para la interpretación de las pruebas de bombeo.

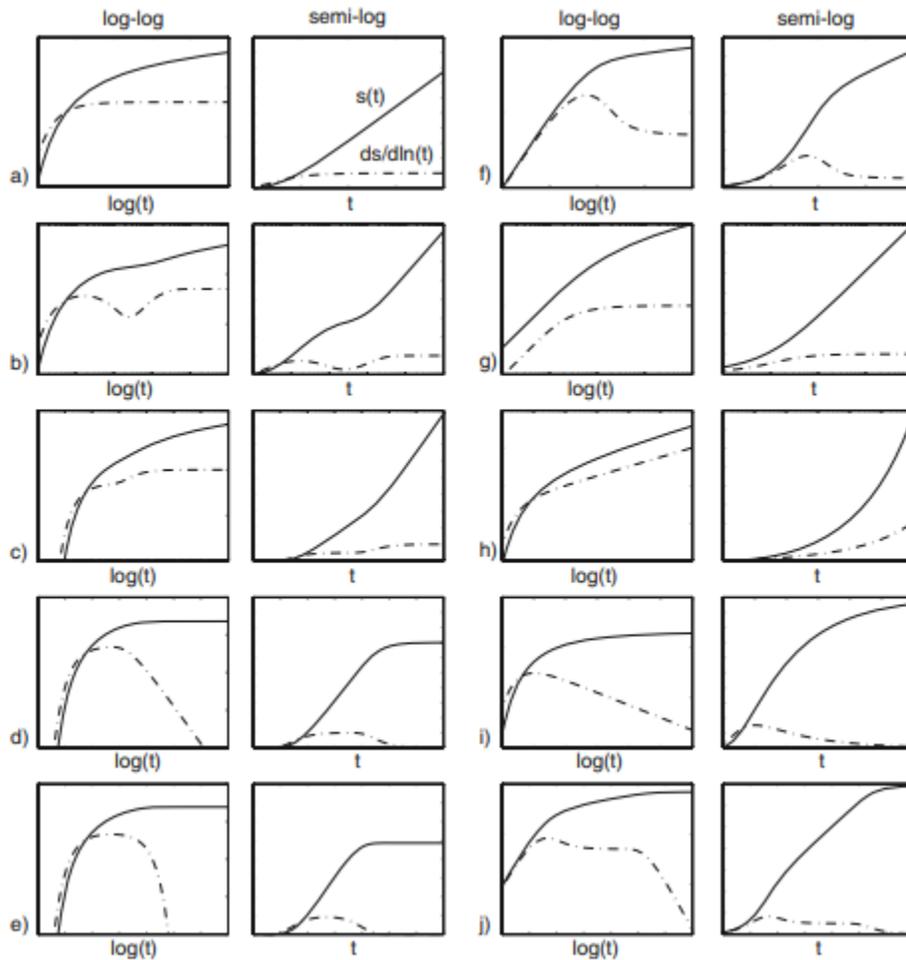


Fig. 2. 2 Gráficos diagnóstico más típicos en hidrogeología (adaptada de Renard et al, 2009) a. modelo de Theis: acuífero confinado bidimensional infinito; b. doble porosidad o acuífero no confinado; c. frontera infinita de no flujo; d. frontera de carga constante; e. acuífero semiconfinado; f almacenamiento de pozo y daño; g. fractura vertical de conductividad infinita.; h. acuífero canal; i. pozo parcialmente penetrante; j. efecto combinado del almacenamiento del pozo, flujo radial y frontera de carga constante

## II.IV. Limitaciones/ Suposiciones

- El acuífero está delimitado en el fondo por una unidad de confinamiento.
- Todas las formaciones geológicas son horizontales y tienen una extensión horizontal infinita.
- La superficie potenciométrica es horizontal antes del bombeo,
- Todos los cambios potenciométricos están estrechamente relacionados con el pozo de bombeo solo.
- La ley de Darcy es válida.
- El pozo de bombeo tiene un diámetro infinitesimal y es 100% eficiente.
- Todo el flujo es radial hacia un pozo.
- El acuífero es homogéneo e isotrópico.
- Son pruebas sintéticas, debido a esto no existe ruido en los resultados obtenidos.
- No se aplica algoritmos de suavizado.

## CAPÍTULO III- METODOLOGÍA

Todo el proceso que conllevó la realización de este trabajo se puede mostrar en dos grandes etapas:

La primera etapa consistió en la búsqueda de información en artículos, libros, notas de clase de hidrogeología para establecer el rango en la magnitud de los valores que tiene cada parámetro hidrogeológico para cada tipo de acuífero.

Definidos los parámetros para cada tipo de acuífero, se plantearon 29 escenarios, divididos de la siguiente forma:

- ✓ Acuíferos confinados
  - 1 Variando la Transmisividad [T]
  - 2 Variando el coeficiente de almacenamiento [S]
  - 3 Variado el daño [ $s_w$ ]
  - 4 Variando la distancia a una frontera de carga constante [ $L_c$ ]
  - 5 Variando la distancia a una frontera impermeable [ $L_i$ ]
- ✓ Acuíferos semiconfinados
  - 6 Variando la Transmisividad [T]
  - 7 Variando el coeficiente de almacenamiento [S]
  - 8 Variando el factor de goteo con almacenamiento en el primer acuitardo [ $\beta'$ ]
  - 9 Variando el factor de goteo sin almacenamiento en el acuitardo [ $r/B$ ]
  - 10 Variando el factor de goteo sin almacenamiento en el primer acuitardo [ $r/B'$ ]
- ✓ Acuíferos libres
  - 11 Variando el rendimiento específico [ $S_y$ ]
  - 12 Variando la relación de anisotropía [ $\frac{k_h}{k_v}$ ]
  - 13 Variado el daño [ $s_w$ ]
  - 14 Variado el radio del pozo y el radio del casing [ $r_w, r_c$ ]
  - 15 Variado el daño [ $s_w$ ], para un pozo parcialmente penetrante [PP]
- ✓ Acuíferos Fracturados
  - 16 Variando la conductividad hidráulica [K]
  - 17 Variando el almacenamiento específico de la matriz [ $Ss'$ ]
  - 18 Variando el almacenamiento específico [Ss]
  - 19 Variado el radio de la fractura [ $r_f$ ]
  - 20 Variando la conductividad hidráulica radial [ $K_r$ ]
- ✓ Pozos
  - 21 Variado el radio del pozo [ $r_w$ ], para un acuífero confinado
  - 22 Variado el radio del casing [ $r_c$ ], para un acuífero confinado
  - 23 Variado el radio del pozo [ $r_w$ ], para un acuífero semiconfinado
  - 24 Variado el radio del casing [ $r_c$ ], para un acuífero semiconfinado

- 25 Variado el daño  $[s_w]$ , para un acuífero confinado (estimulación).
- ✓ Multipozos
  - 26 Variado el radio del pozo  $[r_w]$ , con un pozo de bombeo y dos de observación, para un acuífero confinado.
  - 27 Variando el coeficiente de almacenamiento  $[S]$ , con un pozo de bombeo y dos de observación, para un acuífero confinado.
  - 28 Variando el almacenamiento específico de la matriz  $[S_s]$ , con un pozo de bombeo y dos de observación, para un acuífero fracturado.
  - 29 Variando el uno sobre el factor de goteo con almacenamiento en el primer acuitardo  $[\beta]$ , con un pozo de bombeo y tres de observación, para un acuífero fracturado para un acuífero libre.

Se realizó un análisis de sensibilidad, variando los parámetros del acuífero o del pozo (según cada caso), con cada escenario, se ingresó al software AQTESOLV, en el cual se seleccionó un Foward Solution wizard y se ingresaron lo datos seleccionados para el tipo de acuífero, se seleccionó un método de solución de acuerdo el al tipo de acuífero y parámetro hidrogeológico a variar. A continuación, se muestra una tabla con el método de solución seleccionado para cada escenario.

Escenario	Método de solución
1	Thies(1935)/ hantush(1961)
2	Thies(1935)/ hantush(1961)
3	Thies(1935)/ hantush(1961)
4	Thies(1935)/ hantush(1961)
5	Thies(1935)/ hantush(1961)
6	Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964).
7	Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964)
8	Hantush (1960)
9	Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964)
10	Moench (1985).
11	Neuman (1974)
12	Neuman (1974).
13	Moench (1997).
14	Moench (1997).
15	Moench (1997).
16	Moench (1984).
17	Moench (1984).
18	Gringarten-Witherspoon (1972).
19	Gringarten-Ramey (1974).
20	Gringarten-Ramey (1974)
21	Moench (1985).
22	Moench (1985).
23	Moench (1985).
24	Moench (1985).
25	Moench (1985).

26	Dougherty-Babu (1984).
27	Dougherty-Babu (1984).
28	Moench (1984).
29	Moench (1985).

Tabla 3. 1 muestra el método de solución para obtener la curva del abatimiento en cada escenario.

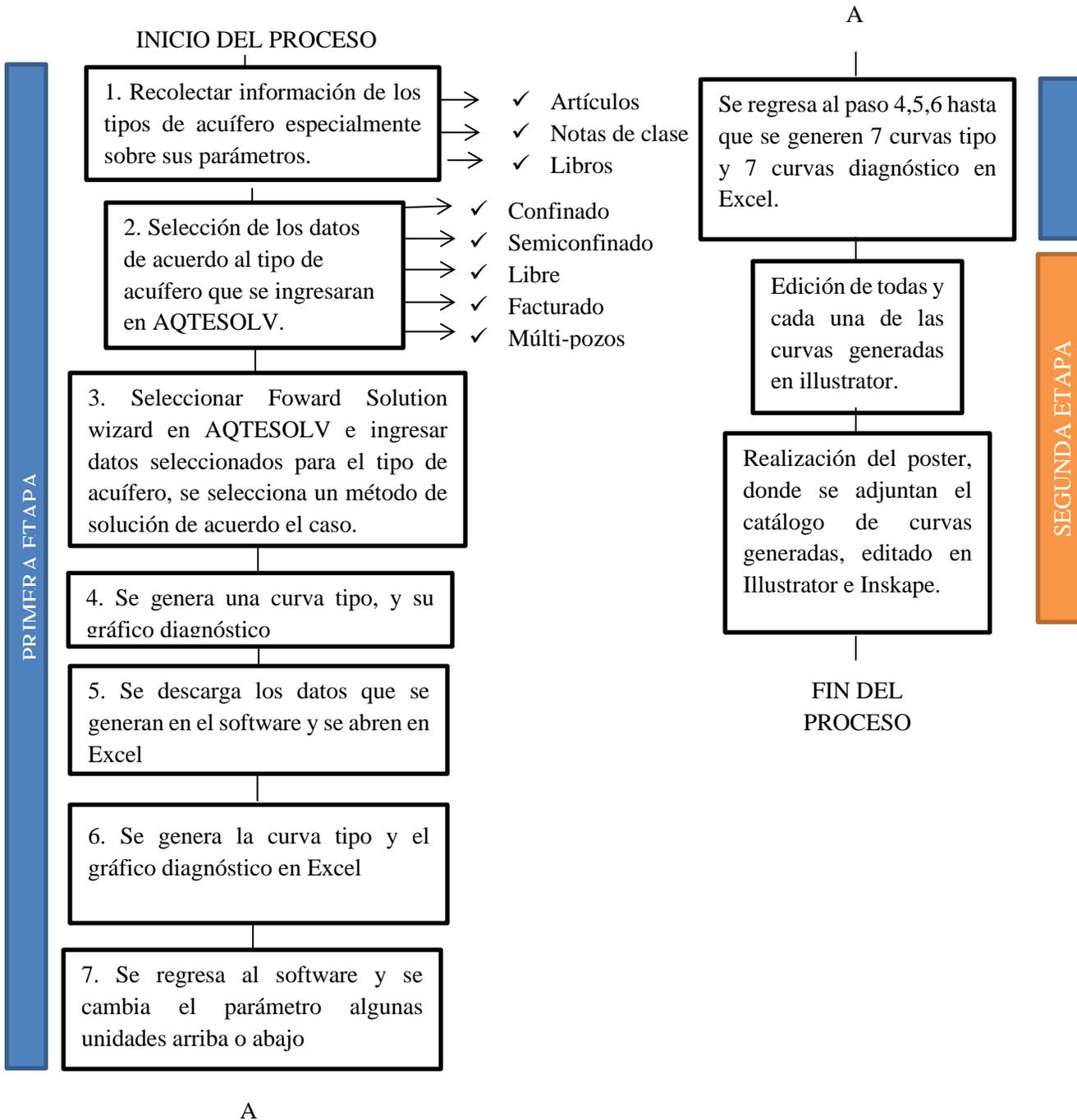
El software calcula el abatimiento de cada acuífero sintético con los métodos mostrados en la tabla anterior Tabla 3. 1, la derivada la calcula con método de [Bourdet et al. \(1983\)](#).

Con la información que arrojó el software, se graficó en Excel un gráfico diagnóstico que muestra el abatimiento y la derivada ambas en escala log-log; este proceso se repitió 7 veces para tener un sentido de cómo variaba el comportamiento de las curvas al variar la magnitud de algún parámetro algún parámetro del acuífero si se cambiaba la magnitud de este (análisis de sensibilidad).

La segunda etapa consistió en la edición de todas las curvas generadas en Excel, las cuales se pasaron a un software de edición (Illustrator), el cual permitió que las gráficas lucieran como en el siguiente capítulo, donde se hace la interpretación del catálogo de curvas generado.

Posteriormente se realizó el poster, donde se adjuntan todo el catálogo de curvas diagnóstico generado y el cual se pone a disposición en el Anexo B; este fue editado en los softwares de edición Illustrator e Inskape.

El siguiente grafico es la representación de todo el proceso.



## CAPÍTULO IV- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### III.I Confinados

#### Escenario 1

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, donde se varía la transmisividad (T) en un acuífero confinado; se empieza con una prueba donde  $T=1000$  [m<sup>2</sup>/d], la cual muestra una respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, representadas con líneas continua en la Fig 3. 1, en esa misma figura se visualiza la variación de los valores de transmisividad, reflejados en la Tabla 3. 1, los cuales se representan con líneas punteadas y van aumentando su valor como indica el sentido de la flecha. Cada prueba se da por finalizada a los 10000 [min].

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000 891.3 794.328 631 500.1 398 281.8
S [-] =	0.00001
kz/kx =	1

Tabla 3. 1 Datos utilizados para las pruebas sintéticas de bombeo.

#### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero confinado.
- Variación de la Transmisividad (T).

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Theis, (1935).

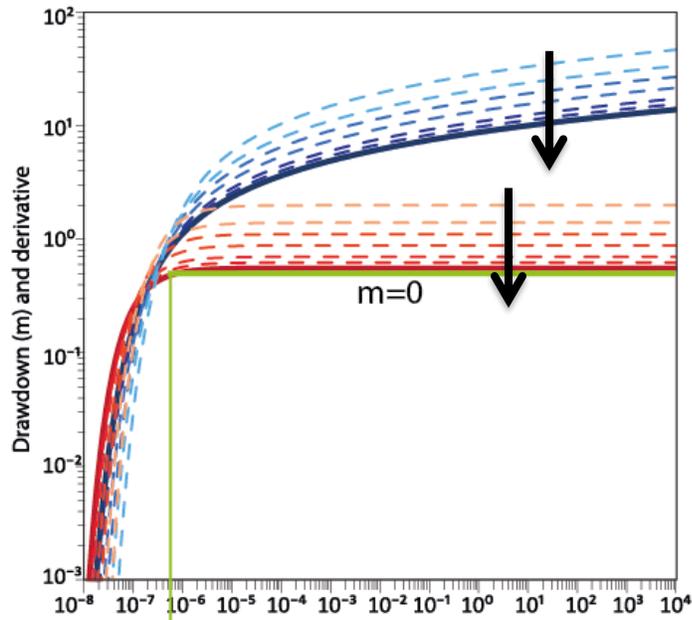


Fig 3. 1 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (T); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

La derivada muestra una tendencia lineal con pendiente 0, prácticamente desde que inician las pruebas ( $3 \times 10^{-6}$  [min]), lo cual denota la presencia de un periodo de flujo radial (infinite acting radial flow, IARF) durante todas las pruebas.

Por otro lado, podemos observar que a medida que la transmisividad aumenta, el abatimiento disminuye. Esto debido a que existe una relación inversa entre la transmisividad y el abatimiento, tal como muestra la ecuación de Theis ecuación (3), ya que tienen más peso otros parámetros como Q. De igual forma, físicamente el cono de abatimiento se ve más amplio para una mayor transmisividad, por ende, el abatimiento es menor.

## Escenario 2

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas sintéticas de bombeo, donde se varía el Coeficiente de almacenamiento (S) en un acuífero confinado. Se empieza con una prueba donde  $S = 10^{-5}$  [adim], la cual muestra la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, representadas con líneas continua en la Fig 3. 2, En esta misma figura se visualiza la variación de los valores de S, reflejados en la Tabla 3.2, los cuales se representan con líneas punteadas y van aumentando su valor como indica el sentido de la flecha. Cada prueba se da por finalizada a los 10000 [min].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m3/d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m2/d] =	1000
S [-] =	0.000010 0.000015 0.000023 0.000035 0.000054 0.000088 0.000133
kz/kx =	1

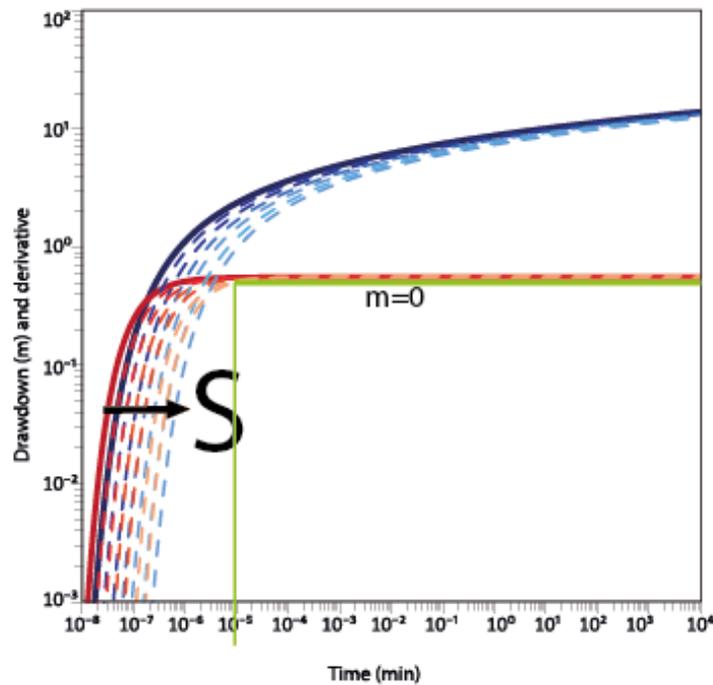
**Tabla 3. 2 Datos utilizados para las pruebas sintéticas de bombeo.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero confinado.
- Variación del coeficiente de almacenamiento (S).

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Theis, (1935).



**Fig 3. 2 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (S); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha**

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

La derivada muestra una tendencia lineal con pendiente igual a cero, prácticamente desde el tiempo inicial; cabe mencionar que es diferente para cada prueba, ya que entre mayor sea el coeficiente de almacenamiento, mayor tiempo tarda en llegar al periodo de flujo radial (IARF).

El tiempo que se tarda en llegar a la estabilización es prácticamente desde que inicia la prueba, por lo cual, sólo se señala en el tiempo 10<sup>-5</sup> como se muestra en la Fig 3. 2, a partir de este tiempo es válida la solución de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, se observa que a tiempos cortos el abatimiento es diferente para todas las pruebas, de igual forma existe una relación inversamente proporcional entre el coeficiente de almacenamiento y el abatimiento, lo cual se puede comprobar en el método de Theis (1935), ya que entre mayor sea S, mayor será  $u$  y al evaluar ese valor de  $u$  en  $W(u)$ , el valor del abatimiento disminuye.

También se aprecia que a tiempos largos las pruebas no varían mucho en cuestión del abatimiento y en algún punto permanecen constantes. De la misma forma existe una proporcionalidad inversa entre el coeficiente de almacenamiento y el abatimiento. Este efecto se puede explicar a causa de que en un acuífero confinado aporta agua al pozo (por descompresión), por lo tanto, depende del espesor geológico del acuífero, y para este caso el espesor utilizado es el mismo para las siete pruebas.

### Escenario 3

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 3; el parámetro a variar fue el daño al pozo ( $S_w$ ) en un acuífero confinado. Se empieza con una prueba en un pozo sin daño donde ( $S_w=0$  [adim]); la respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 3; para las siguientes pruebas, se aumenta el valor de  $S_w$ , representando un daño positivo al pozo, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, las cuales representan un daño al pozo. De la misma forma, se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, representadas con líneas punteadas en la figura mencionada.

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
$S_w$ [-] =	0 0.45 0.9 1.35 1.8 2.25 2.7
S [-] =	0.00001
kz/kx =	1

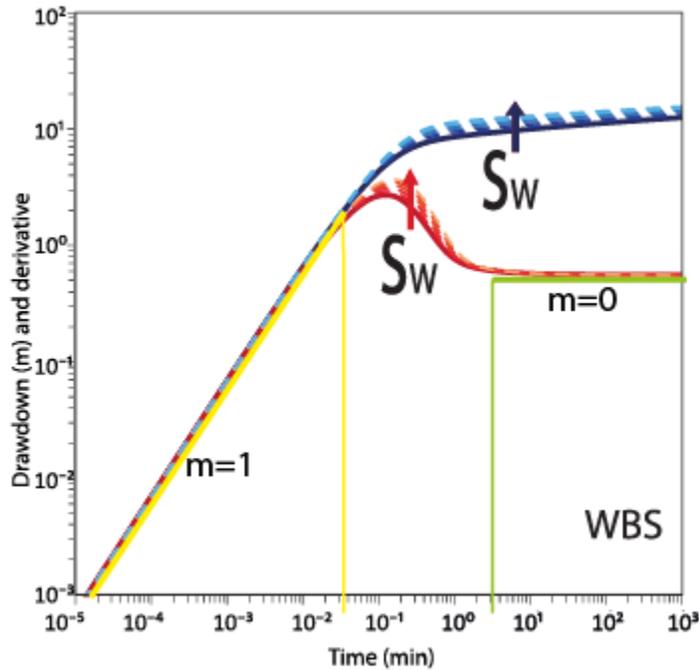
**Tabla 3. 3 Datos utilizados para las pruebas sintéticas de bombeo.**

#### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero confinado.
- Variación del daño al pozo ( $S_w$ ).
- Almacenamiento de pozo.

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Doughery-Babu (1984).



**Fig 3. 3** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $S_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta un tiempo aproximado de 0.08 [min] para cada prueba. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba (inflexión de la curva); el tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Además, [Agarwal et al. \(1970\)](#) han demostrado que se produce exactamente la misma forma de los gráficos diagnóstico cuando un efecto de daño reduce la transmisividad de una zona estrecha alrededor del pozo de bombeo. En ese caso, la duración del período de la pendiente unitaria y el tamaño de la joroba están en función de los efectos combinados de almacenamiento y daño en el pozo.

Se observa una estabilización de la derivada a los 3 [min] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0 a partir del tiempo  $3 \times 10^1$  [min], en el cual es válida la aplicación de la aproximación de [Cooper-Jacob \(1946\)](#). La prueba se da por terminada a los  $10^3$  [min].

Con respecto al parámetro variado  $S_w$ , el daño crea un abatimiento adicional al que causa el pozo, cuando el daño es positivo, es decir no hay una estimulación al pozo, es por eso que entre más aumente el daño, mayor es el abatimiento, sólo se observa a tiempos cortos, ya que a tiempos largos, se empieza a extraer el agua del acuífero y no sólo se percibe el efecto cercano al pozo (se estabiliza).

## Escenario 4

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, donde se varía la distancia en la que se presenta una frontera de carga ( $L_c$ ) en un acuífero confinado. Se empieza con una prueba donde la frontera se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas (100,50) [m], (100,-50) [m], y para la siguiente prueba se recorre 50 [m] laterales al pozo, el pozo se encuentra ubicado en las coordenadas (0,0) [m], datos mostrados en la Tabla 3. 4, la respuesta de abatimiento y la derivada se presentan con líneas continuas como se muestran en la Fig 3. 4, donde va aumentando la distancia de la frontera hacia el pozo como indica el sentido de la flecha, también se muestra la respuesta que arroja el abatimiento y la derivada para cada prueba con líneas punteadas.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados			
Tiempo [min] =		1000.00	
Q [m <sup>3</sup> /d] =		7000.00	
rw [m] =		0.1524	
T [m <sup>2</sup> /d] =		1000	
S [-] =		0.00001	
kz/kx =		1	
Frontera de h constante			
Coordenadas [m,m]			
B1	(100,50)	C1	(100,50)
B2	(95,50)	C2	(95,-50)
B3	(90,50)	C3	(90,-50)
B4	(85,50)	C4	(85,-50)
B5	(80,50)	C5	(80,-50)
B6	(75,50)	C6	(75,-50)
B7	(70,50)	C7	(70,-50)

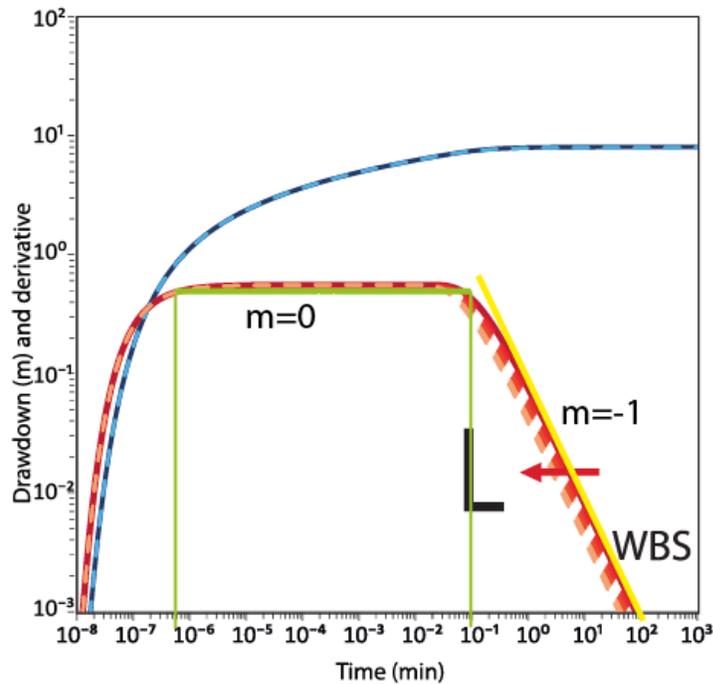
**Tabla 3. 4 Datos utilizados para las pruebas sintéticas de bombeo.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero confinado.
- Variación de la distancia en la que se presenta una frontera de carga [L].

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Theis (1935)/ Hantush(1961).



**Fig 3. 4** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $L$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

El comportamiento de la derivada muestra una tendencia lineal con pendiente 0 a partir del tiempo  $4 \times 10^{-6}$  [min] hasta el tiempo  $10^{-1}$  [min], se presenta en un periodo de flujo radial (infinite acting radial flow, IARF), hasta que el transiente de presión toca la frontera de carga lo cual se refleja en prueba a partir del tiempo  $10^{-1}$  [min] hasta  $10^2$  [min], la pendiente que resulta en este periodo de tiempo es  $m=-1$ , por lo cual podemos confirmar que se trata de la presencia de una frontera de carga (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Renard et al 2009).

Por otro lado, podemos observar que entre más cerca este la frontera del pozo la onda de presión tarda menos tiempo en tocarla, lo cual también es mostrado en la Fig 3. 4.

## Escenario 5

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, donde se varía la distancia en la que se presenta una frontera impermeable ( $L_i$ ) en un acuífero confinado, se empieza con una prueba donde la frontera se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas (200,50) [m], (200,-50) [m], y para la siguiente prueba se recorre 25 [m] laterales hacia el pozo. El pozo se encuentra ubicado en las coordenadas (0,0), datos mostrados en la Tabla 3. 5, dichas respuestas del abatimiento se muestran en la Fig 3. 5 con líneas continuas, donde va aumentando la distancia de la frontera hacia el pozo como indica el sentido de la flecha. Así mismo, se muestra la respuesta que arroja el abatimiento y la derivada para cada prueba con líneas punteadas.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados			
Tiempo [min] =		1000.00	
Q [m <sup>3</sup> /d] =		7000.00	
rw [m] =		0.1524	
T [m <sup>2</sup> /d] =		1000	
S [-] =		0.00001	
kz/kx =		1	
Frontera de no flujo			
coordenadas			
B1	(200,50)	C1	(200,-50)
B2	(175,50)	C2	(175,-50)
B3	(150,50)	C3	(150,-50)
B4	(125,50)	C4	(125,-50)
B5	(100,50)	C5	(100,-50)
B6	(75,50)	C6	(75,-50)
B7	(50,50)	C7	(50,-50)

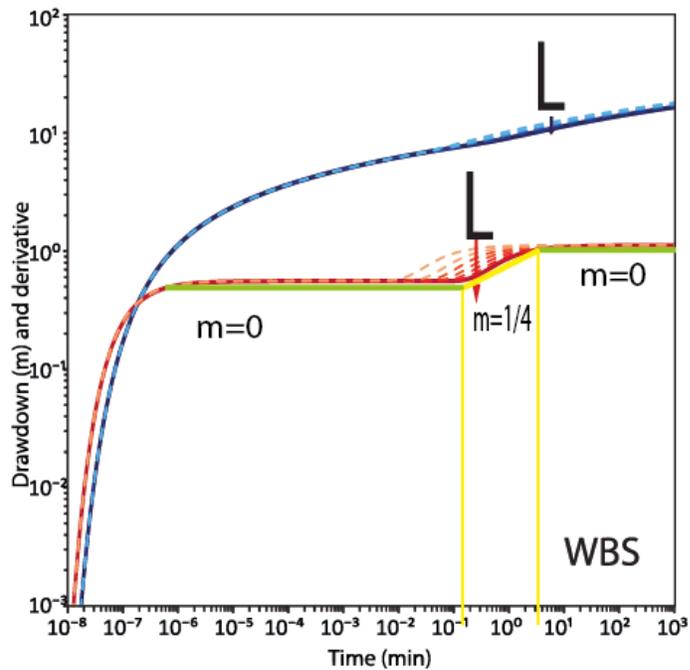
**Tabla 3.5 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero confinado.
- Variación de la distancia en la que se presenta una frontera impermeable [L].

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Theis (1935) / Hantush(1961).



**Fig 3. 5** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (L); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

El comportamiento de la derivada muestra una tendencia lineal con pendiente 0 a partir del tiempo  $10^{-6}$ [min] hasta el tiempo  $10^{-1}$ [min] (para la primera prueba), lo cual refleja un periodo de flujo radial (infinite acting radial flow, IARF), hasta que el transiente de presión toca la frontera, un límite de no flujo se caracteriza por una duplicación del valor de la derivada, lo cual se refleja en prueba a partir del minuto  $10^{-1}$  hasta los  $9 \times 10^1$  [min], donde se estabiliza el flujo y se presenta otro periodo de flujo radia hasta el tiempo  $10^3$ ( tiempo que se da por terminada la prueba).

Por otro lado, podemos observar que entre más cerca este la frontera del pozo el transiente de presión tarda menos tiempo en tocarla, por lo cual se estabiliza más rápido el flujo.

## III.II Semiconfinados

### Escenario 6

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, donde se varía la transmisividad (T) en un acuífero semiconfinado (Leaky aquifer). Se empieza con una prueba donde  $T=1000$  [m<sup>2</sup>/d], la cual muestra la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, los cuales se representan líneas continuas en la Fig 3. 6, misma figura donde se muestra la variación de los de más valores de transmisividad, dichos valores se muestran en la Tabla 3. 6, los cuales se representan con líneas punteadas y van aumentando su valor como indica el sentido de la flecha.

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000 891.251 794.328 707.946 630.957 562.341 501.187
S [-] =	0.001
kz/kx =	1

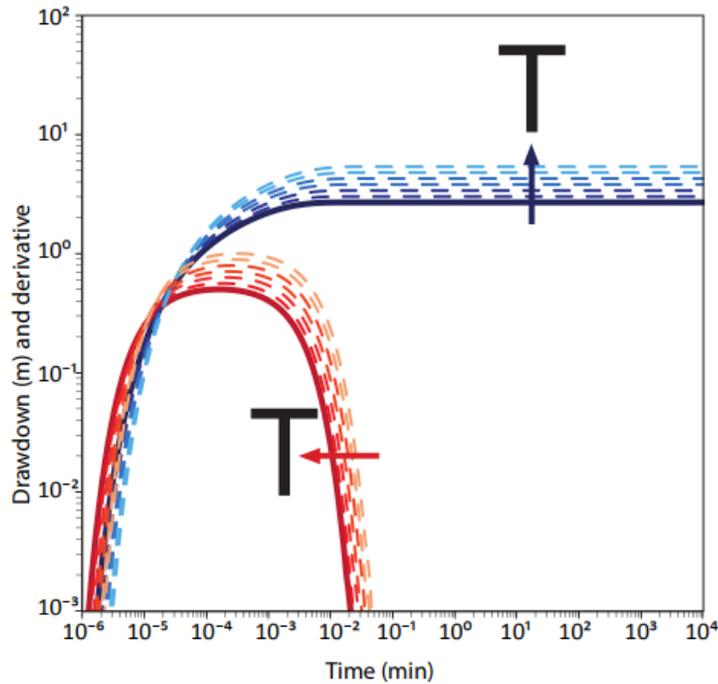
**Tabla 3. 4 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

#### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero semiconfinado.
- Variación de la Transmisividad [T].

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Hantush-Jacob (1955)/ Hantush (1964).



**Fig 3. 6** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (T); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

La derivada muestra una tendencia hacia 0, prácticamente desde que inicia la prueba, este comportamiento es particular de las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos semiconfinados, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero confinado con frontera de carga, en este caso la derivada tiende más rápido a 0, debido a que el abatimiento se vuelve prácticamente constante.

Por otro lado, se observa que al igual que en los acuíferos confinados a medida que la transmisividad aumenta el abatimiento disminuye debido a que existe una relación inversa entre la transmisividad y el abatimiento como muestra la ecuación de [Theis \(1935\)](#), ya que tienen más peso otros parámetros como Q. De igual forma físicamente el cono de abatimiento se ve más amplio para una mayor transmisividad, por ende, la caída del abatimiento es menor.

## Escenario 7

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.7, el parámetro a variar fue el coeficiente de almacenamiento (S) en un acuífero semiconfinado. Se empieza con una prueba donde  $S = 0.001$  [adim], la respuesta del abatimiento y la derivada se representan con líneas continuas en la Fig 3.7, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura. De la misma forma, se observa la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.0010000 0.0011092 0.0012303 0.0013646 0.0015136 0.0016788 0.0018621
kz/kx =	1

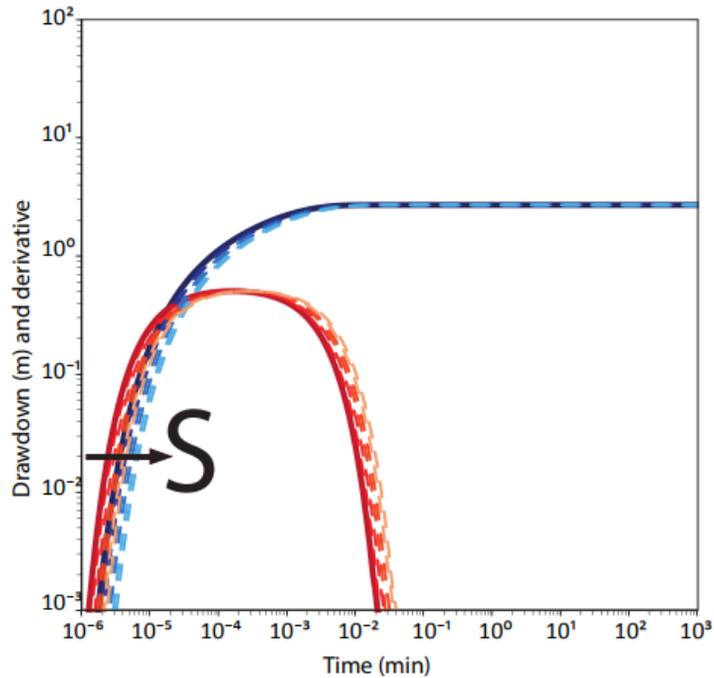
**Tabla 3. 7 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero semiconfinado.
- Variación de del coeficiente de almacenamiento [S].

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964).



**Fig 3. 7 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (S); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha**

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

La derivada muestra una tendencia hacia 0, prácticamente desde que inicia la prueba, este comportamiento es particular de las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos semiconfinados, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero confinado con frontera de carga en este caso la derivada tiende más rápido a 0, debido a que el abatimiento se vuelve prácticamente constante.

Por otro lado, se observa que el abatimiento de todas las pruebas no varía mucho y en algún punto permanece constante. Este efecto se puede explicar a causa de que un acuífero semiconfinado se tiene aporte del acuitardo por lo cual el abatimiento tiende a ser constante.

## Escenario 8

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, donde se varía el factor de goteo ( $\beta'$ ) en un acuífero semiconfinado con almacenamiento en el acuitardo. Se empieza con una prueba donde  $\beta'=0.1$  [adim], la cual muestra la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, representadas con líneas continua en la Fig 3. 8, misma figura donde se visualiza la variación de los valores del factor de goteo, reflejados en la Tabla 3. 8, los cuales se representan con líneas punteadas y van aumentando su valor como indica el sentido de la flecha.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
B' =	0.1 0.1413 0.1995 0.2818 0.3981 0.5623 0.7943
S [-] =	0.001
kz/kx =	1

**Tabla 3. 8 Datos utilizados para las pruebas sintéticas de bombeo.**

### TIPO DE EFECTO:

- Variación del factor de goteo, 1er acuitardo [ $\beta'$ ].
- Acuífero semiconfinado con almacenamiento en el acuitardo.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Hantush (1960).

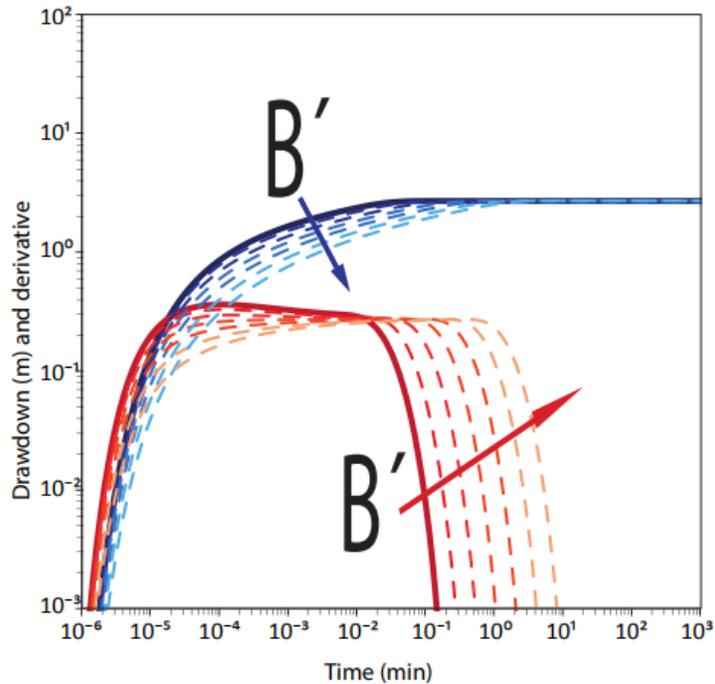


Fig 3. 8 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $B'$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

A tiempos cortos ( $10^{-6}$  a  $10^{-2}$  [min]) de las pruebas de bombeo, el agua extraída procede de la descompresión del propio acuífero (el acuífero se comporta como si fuera confinado). A partir del tiempo  $10^{-2}$  [min] la derivada muestra una tendencia hacia 0, este comportamiento es particular de las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos semiconfinados, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero confinado con frontera de carga en este caso la derivada tiende más rápido a 0, debido a que el abatimiento se vuelve prácticamente constante.

Por otro lado, el acuitardo cede agua que tiene almacenada, por ende, entre mayor sea el valor de  $\beta'$  menor será el aumento del abatimiento puesto que en las ecuaciones de Hantush (1960), entre más grandes sean los valores  $\beta'$  y de  $u$  al ser evaluados en la ecuación el abatimiento es menor. Otra forma de verlo es que entre mayor sea la recarga del acuífero el cono de abatimiento es más amplio y por ende no se tiene una caída abrupta.

## Escenario 9

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 9, el parámetro a variar fue factor de goteo ( $r/B$ ) en un acuífero semiconfinado sin almacenamiento en el acuitardo. Se empieza con una prueba donde  $r/B=0.100$  [adim] cuya respuesta del abatimiento y su derivada se representan con líneas continuas en la Fig 3. 9 y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como indica el sentido de la flecha, de la misma forma se puede observar la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.001
kz/kx =	1
r/B[-]=	0.1000 0.1076 0.1148 0.1230 0.1318 0.1413 0.1514

Tabla 3. 5 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

### TIPO DE EFECTO:

- Variación de del factor de goteo [ $r/B$ ].
- Acuífero semiconfinado sin almacenamiento en el acuitardo.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964).

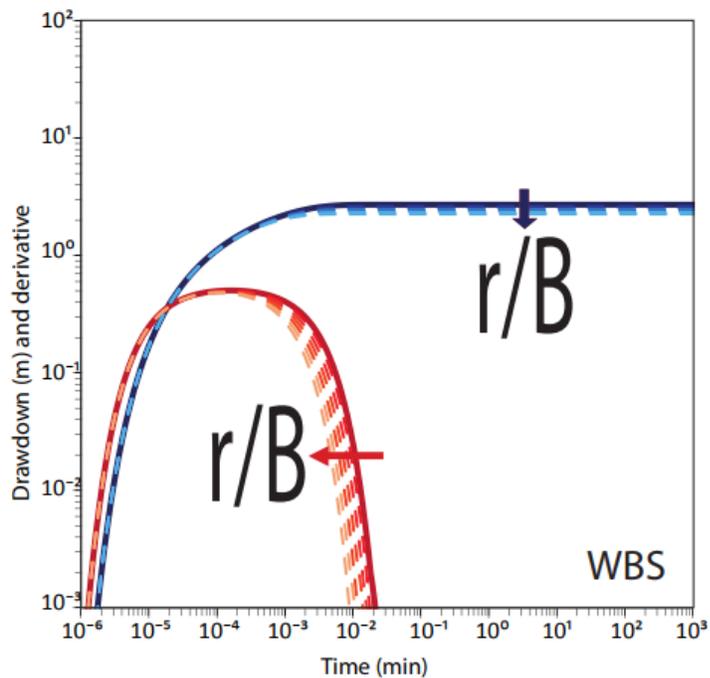


Fig 3. 9 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r/B$ ).

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA

Las derivadas muestran una tendencia hacia 0, prácticamente desde que inicia la prueba, este comportamiento es particular de las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos semiconfinados, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero confinado con frontera de carga en este caso la derivada tiende más rápido a 0, debido a que el abatimiento se vuelve prácticamente constante.

Por otro lado podemos observar que el abatimiento de todas las pruebas es el mismo para tiempos cortos y a partir del tiempo  $10^{-3}$  [min] la curvas del abatimiento se estabilizan y se vuelven constantes, esta tendencia a la estabilización es debida a la recarga por goteo vertical, que llega al cono de bombeo del acuífero, también se observa que existe una proporcionalidad entre el abatimiento y nuestro parámetro variado  $r/B$ , entre mayor sea el factor de goteo menor será el abatimiento, como se muestra a tiempos largos ( $10^{-2}$  [min].), lo que implica una pequeña influencia relativa en la recarga del acuífero a partir del acuitardo.

## Escenario 10

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 10, el parámetro a variar fue factor de goteo ( $r/B'$ ) en un acuífero semiconfinado con almacenamiento en el primer acuitardo (sólo se considera la existencia de un acuitardo). Se empieza con una prueba donde  $r/B'=0.123$  [adim] cuya respuesta del abatimiento y su derivada se representan con una línea continua en la Fig. 3. 10, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como indica el sentido de la flecha, de la misma forma se observa la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.001
kz/kx =	1
r/B' =	0.123 0.151 0.186 0.229 0.282 0.347

**Tabla 3. 6 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

#### TIPO DE EFECTO:

- Variación del factor de goteo [ $r/B'$ ] para el primer acuitardo.
- Almacenamiento de pozo.
- Acuífero semiconfinado con almacenamiento de pozo.

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).

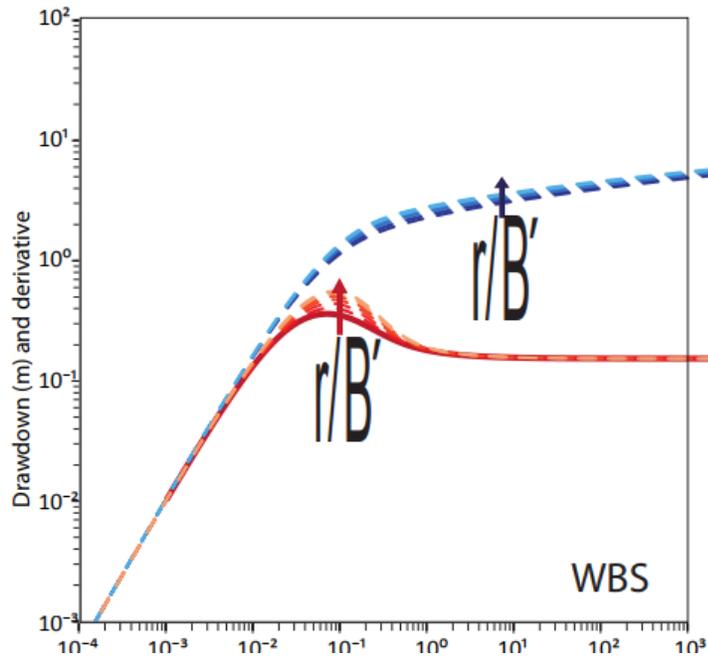


Fig 3. 10 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r/B'$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$  [min]. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Se muestra una estabilización de las derivadas al 1er[ $\text{min}$ ] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, debido a que la pendiente se vuelve 0, en este tiempo es válida la aplicación de la aproximación de Cooper-Jacob (1946), las pruebas se dan por terminadas a los  $10^3$ [ $\text{min}$ ].

Para estas pruebas de bombeo no se muestra el comportamiento típico de un acuífero semiconfinado debido a que el método de solución de moench (1985) muestra tres opciones para la simulación, en el cual se escogió el caso 2 el cual pone dos límites impermeables, tanto de la base como de la cima del acuífero.

Por lo tanto, el efecto mostrado para esta prueba no es del factor de goteo si no del almacenamiento y daño que tiene el pozo para cada prueba de bombeo.

### III.III Libre

#### Escenario 11

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.11, el parámetro a variar fue el rendimiento específico ( $S_y$ ) en un acuífero libre, se empieza con una prueba donde  $S_y=0.1$  [adim], la cual muestra la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, se representan con líneas continua en la fig. 3. 11, misma figura donde se muestra la respuesta del abatimiento y derivada para los de más valores asignados de  $S_y$ , los cuales se representan con líneas punteadas y van disminuyendo su valor como indica el sentido de la flecha.

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min]	10000.00
=	
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.5
kz/kx =	1
sy[-]=	0.1
	0.05
	0.03
	0.02
	0.01
	0.006
	0.003

**Tabla 3. 7 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

#### TIPO DE EFECTO:

- Variación de del rendimiento especifico [ $S_y$ ].
- Acuífero libre.

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Neuman (1974).

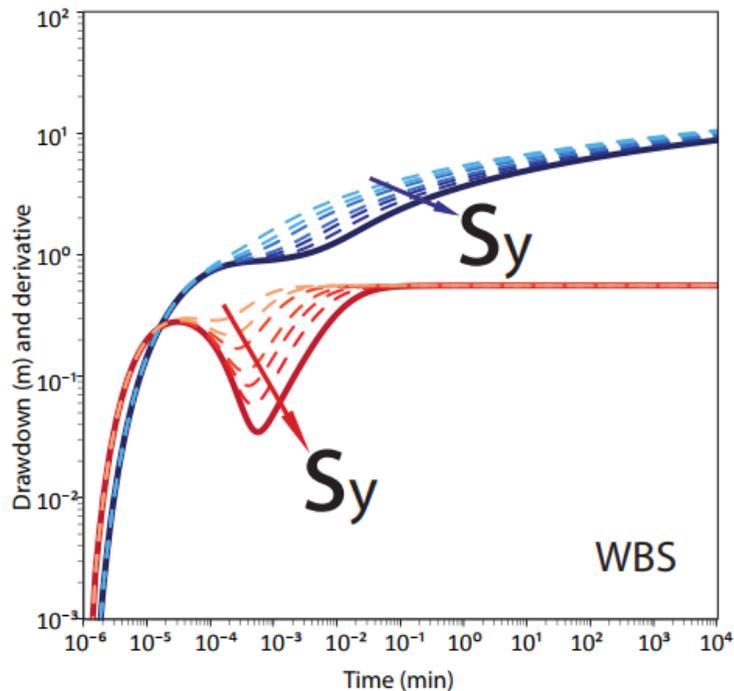


Fig 3. 11 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $S_y$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se observa la inflexión del abatimiento en el tiempo 0.001[ $\text{min}$ ] que se refleja en un agujero pronunciado en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo inicial agota la zona saturada del acuífero libre. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser el drenaje vertical retardado de la zona insaturada sobre la parte saturada del acuífero libre (Moench, 1995; Neuman, 1972). Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero pronunciado. A partir de los 0.8 [ $\text{min}$ ], todo el sistema se equilibra y se comporta como un medio continuo equivalente, en el cual alcanza un periodo de flujo radial (IARF), para este tiempo es válida la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, el rendimiento específico ( $S_y$ ), es un símil de la porosidad efectiva (véase tabla 2.1). Se observa que a mayor rendimiento específico se tiene un menor abatimiento a tiempos cortos, a tiempos largos se observa que el abatimiento prácticamente permanece constante, este efecto se puede explicar con el método de Neuman (1974).

## Escenario 12

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 12, el parámetro a variar fue la relación de anisotropía (B) en un acuífero libre. Se comienza con una prueba donde  $B=0.1$  [adim], la cual muestra la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, se representan líneas continuas en la fig. 3. 12, misma figura donde se muestra la variación de los de más valores asignados de B, dichos valores se muestran en la Tabla 3. 12, los cuales se representan con líneas punteadas y van disminuyendo su valor como indica el sentido de la flecha.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
Sy [-] =	0.5
$\beta$ =	0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1

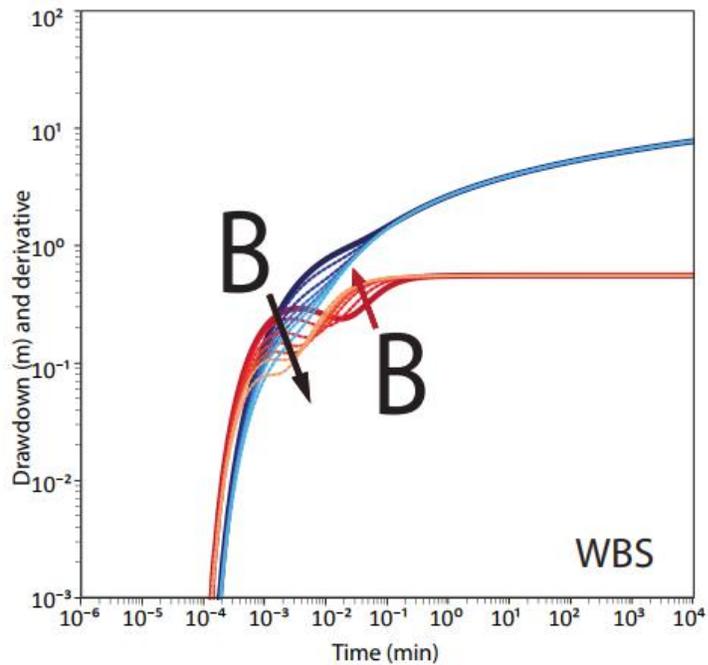
**Tabla 3. 8 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Relación de anisotropía, conductividad hidráulica [B] ó [kz/kr].
- Acuífero libre.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN

- Neuman (1974).



**Fig 3. 12** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (B); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra una inflexión del abatimiento que se refleja en un agujero pronunciado en la derivada. Este comportamiento se debe a que el bombeo inicial agota la zona saturada de un acuífero libre. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser el drenaje vertical retardado de la zona insaturada sobre la parte saturada en un acuífero libre (Moench, 1995; Neuman, 1972). Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero pronunciado. A partir de los  $2 \times 10^{-1}$  [min], todo el sistema se equilibra en el cual alcanza un periodo de flujo radial (IARF), periodo en el que es válida la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, entre menor sea la relación de anisotropía mayor es el aumento en el abatimiento, es decir, el cono de abatimiento se vuelve más estrecho. Físicamente en el acuífero, la relación de la permeabilidad horizontal y la permeabilidad vertical varía mucho más por lo cual dificulta el flujo del agua.

### Escenario 13

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 13, el parámetro a variar fue el daño al pozo ( $S_w$ ) en un acuífero confinado. Se comienza con una prueba en un pozo sin daño donde  $S_w = 0$  [adim]. La respuesta del abatimiento y la derivada se representan con líneas continuas en la Fig.3.13, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, las cuales representan un daño negativo al pozo. Así mismo, se observan las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, estas se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
Sy [-] =	0.5
Sw=	0
	0.15
	0.3
	0.45
	0.6
	0.75
	0.9
S=	0.1
kz/kx =	1
$\beta$ =	0.1

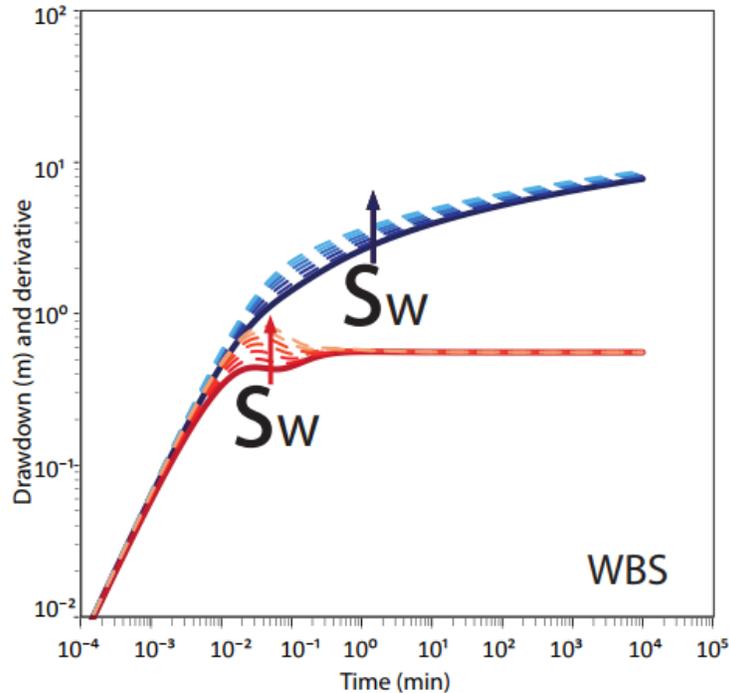
Tabla 3. 9 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

#### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero libre.
- Almacenamiento de pozo.
- Daño al pozo [ $S_w$ ].

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1997).



**Fig 3. 13 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $S_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha**

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra una inflexión del abatimiento entre el tiempo  $2 \times 10^{-1}$  [min] y  $8 \times 10^{-1}$  [min], que se refleja en un agujero en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo inicial agota la zona saturada de un acuífero libre. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser el drenaje vertical retardado de la zona insaturada sobre la parte saturada en un acuífero libre (Moench 1995; Neuman 1972). Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero. A partir de los  $9 \times 10^{-1}$  [min], todo el sistema se equilibra y se comporta como un medio continuo, en el cual alcanza un periodo de flujo radial (IARF), para el cual es válida la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

Se observa un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $6 \times 10^{-2}$  [min], tiempo que se tardó en extraer el agua del pozo. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. En ese caso, la duración del período de la pendiente unitaria y el tamaño de la joroba son una función de los efectos combinados de almacenamiento y daño en el pozo, debido a esto el agujero típico del comportamiento de un acuífero libre no se visualiza como un agujero tan pronunciado.

Con respecto al parámetro variado  $S_w$ , el daño crea un aumento en el abatimiento adicional al que causa pozo, cuando el daño es positivo, es decir no hay una estimulación al pozo, es por eso que entre más aumente el daño, mayor es el abatimiento, claro que sólo se observa a tiempos cortos de tiempo ya que a tiempos largos, se empieza a extraer el agua del acuífero y no sólo se percibe el efecto cercano al pozo (se estabiliza).

## Escenario 14

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.14, para este caso se varían dos parámetros al mismo tiempo, el radio del casing ( $r_c$ ) y el radio del pozo ( $r_w$ ) para un acuífero libre. Se empieza con una prueba donde  $r_c=0.15$  [m] y  $r_w=0.15$  [m] representando la respuesta del abatimiento y la respectiva derivada con líneas continuas en la Fig 3. 14, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido la flecha, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. La prueba se da por terminada a los 10000[ $\text{min}$ ].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados			
Tiempo [min] =		10000.00	
Q [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] =		7000.00	
$r_w$	0.15	$r_c[\text{m}]$ =	0.15
[m] =	0.1607		0.1607
	0.1722		0.1722
	0.1845		0.1845
	0.1977		0.1977
	0.2119		0.2119
	0.227		0.227
T [ $\text{m}^2/\text{d}$ ] =		1000	
Sy [-] =		0.5	
Sw=		0	
S=		0.1	
kz/kx =		1	
$\beta$ =		0.1	

Tabla 3. 10 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el radio del pozo [ $r_w$ ] y el radio del casing [ $r_c$ ].
- Almacenamiento de pozo.
- Acuífero libre.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1997).

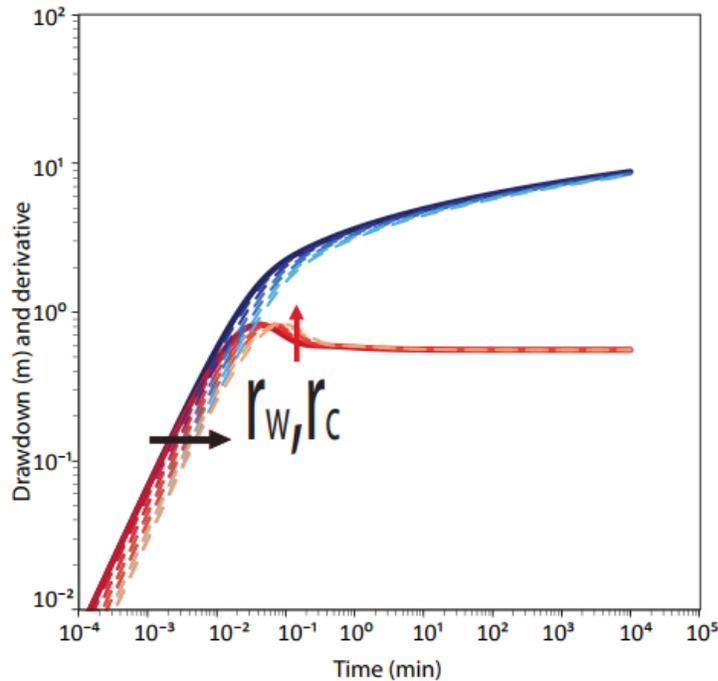


Fig 3. 14 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_w, r_c$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo con diferentes tiempos de término para cada prueba aproximadamente varían en el intervalo de tiempo de  $10^{-4}$  [min] a  $10^{-2}$ . Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba se abre más que para un pozo de diámetro pequeño.

Entre menor sea el radio del casing, menor tiempo tarda en llegar a la estabilización, se muestra que en todas las pruebas se ha llegado a la estabilización al 1 [min] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0 a partir de ese tiempo, en el cual es válida la aplicación de la aproximación de Cooper-Jacob, (1946).

Por otro lado, se puede observar que entre mayor sea el radio del casing mayor tiempo tarda en arrojar una respuesta del abatimiento, por eso las siete pruebas tienen el mismo comportamiento en cuanto a su forma, pero se van desfasando en el eje del tiempo.

## Escenario 15

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 15, el parámetro a variar fue el daño al pozo ( $S_w$ ) en un acuífero libre. Se empieza con una prueba a un pozo sin daño donde  $S_w = 0$  [adim] representada con una línea continua en la Fig 3. 15, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, las cuales representan un daño negativo al pozo, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. La prueba se da por terminada a los 10000 [min].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min]	10000.00
$Q$ [ $m^3/d$ ]	7000.00
$r_w$ [m]	0.1524
$T$ [ $m^2/d$ ]	1000
$S$ [-]	0.5
$k_z/k_x$	1
$S_w$	0 0.075 0.15 0.225 0.3 0.375 0.45
$s_y$ [-]	0.1

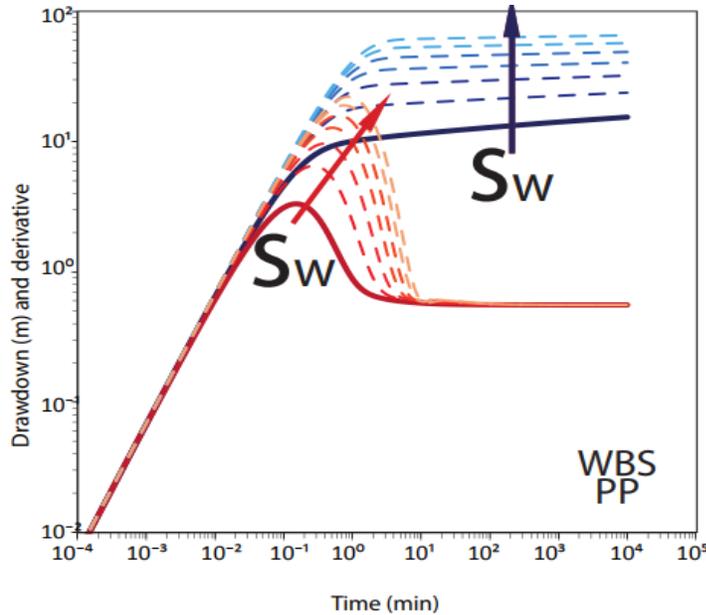
**Tabla 3. 11 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el daño al pozo [ $S_w$ ].
- pozo parcialmente penetrante [PP].
- Almacenamiento de pozo.
- Acuífero libre.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1997).



**Fig 3. 15** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $S_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra una inflexión de el abatimiento entre el tiempo  $2 \times 10^{-1}$  [min] y  $8 \times 10^{-1}$  [min] que se refleja en un agujero en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo inicial agota la zona saturada de un acuífero libre. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser el drenaje vertical retardado de la zona insaturada sobre la parte saturada en un acuífero libre (Moench 1995; Neuman 1972). Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero. A partir de los  $9 \times 10^{-1}$  [min], todo el sistema se equilibra y se comporta como un medio continuo, en el cual alcanza un periodo de flujo radial (IARF), para el cual es válida la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

Se puede observar un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $6 \times 10^{-2}$  [min]. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba, el tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba será más pronunciada que para un pozo de diámetro pequeño. En ese caso, la duración del período de línea recta de la pendiente unitaria y el tamaño de la joroba son una función de los efectos combinados de almacenamiento y daño en el pozo, debido a esto el agujero típico del comportamiento de un acuífero libre no se visualiza como un agujero tan pronunciado.

Con respecto al parámetro variado  $S_w$ , el factor de daño es producido por la convergencia del flujo hacia la penetración parcial en la zona productora, lo que ocasiona un aumento en el abatimiento adicional, dando como resultado un factor de daño. Cuando el daño es negativo, es decir no hay una estimulación al pozo, es por lo que entre más aumente el daño (valores positivos), mayor es el abatimiento, claro que sólo se observa a tiempos cortos de tiempo ya que, a tiempos largos, se empieza a extraer el agua del acuífero y no sólo se percibe el efecto cercano al pozo (se estabiliza).

### III.IV Fracturado

#### Escenario 16

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 16, el parámetro a variar fue la conductividad hidráulica de la fractura [K] en un acuífero fracturado de doble porosidad. Se empieza con una prueba donde  $K= 10$  [m/d], cuya respuesta del abatimiento y su derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 16, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se observan las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. La prueba se da por terminada a los 10000 [min].

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.15
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.00001
kz/kx =	1
k[m/d]=	10 8.91251 7.94328 7.07946 6.30957 5.62341 5.01187
K´[m/d]=	1.44
Ss[m-1]=	1.00E-07
Ss´[m-1]=	0.001
Sw[-]=	0
Sf[-]=	0
rc [m] =	0.15

Tabla 3. 12 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

#### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero fracturado.
- Variando la conductividad hidráulica de la fractura [K].
- Almacenamiento de pozo.

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1984).

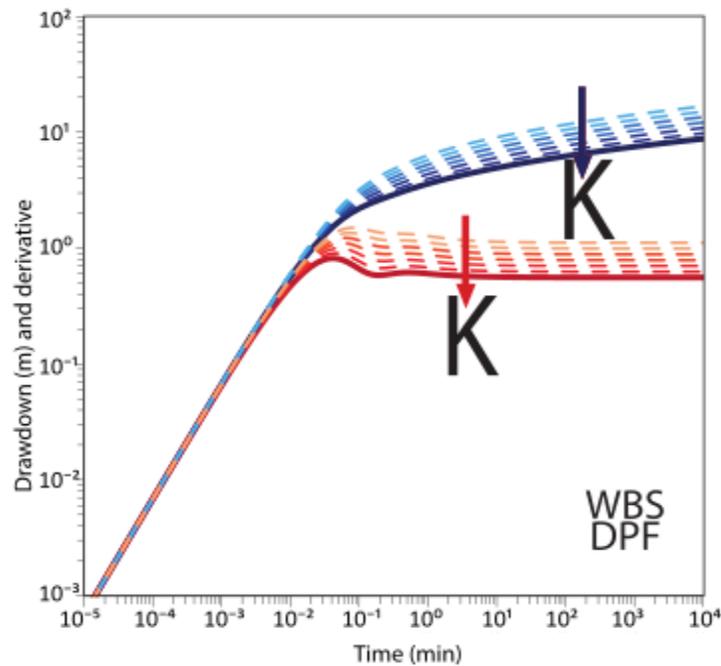


Fig 3. 16 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (k). el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se observa la presencia de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$  [min]. De la misma forma muestra otro comportamiento típico de un acuífero fracturado de doble porosidad, una inflexión en la curva de abatimiento en un tiempo intermedio que se refleja en un agujero en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo inicial agota un primer reservorio que está bien conectado al pozo de bombeo por las fracturas. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero pronunciado. A partir de los 2 [min] todo el sistema se equilibra y se presenta un periodo de flujo radial (IARF), ya que tiene una pendiente cero, periodo en el cual es válida la aproximación de [Cooper-Jacob \(1946\)](#).

Por otro lado, podemos observar que existe una proporcionalidad inversa entre el abatimiento y la conductividad hidráulica [K], ya que como pasa con la transmisividad el cono de abatimiento es menos pronunciado cuando hay una buena conductividad.

## Escenario 17

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 17, el parámetro a variar fue el coeficiente de almacenamiento específico de la matriz ( $Ss'$ ) en un acuífero fracturado de doble porosidad. Se empieza con una prueba donde  $Ss' = 0.001$  [ $m^{-1}$ ], cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 17, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se observa las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [ $m^3/d$ ] =	7000.00
rw [m] =	0.15
T [ $m^2/d$ ] =	1000
S [-] =	0.00001
kz/kx =	1
K[m/d]=	10
K'[m/d]=	1.44
Ss[m-1]=	1.00E-07
Ss'[m-1]=	0.00100 0.00056 0.00032 0.00018 0.00011 0.00006
rc [m] =	0.15

**Tabla 3. 13 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero fracturado de doble porosidad.
- Variando el almacenamiento específico de la matriz [ $Ss'$ ].
- Almacenamiento de pozo.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1984).

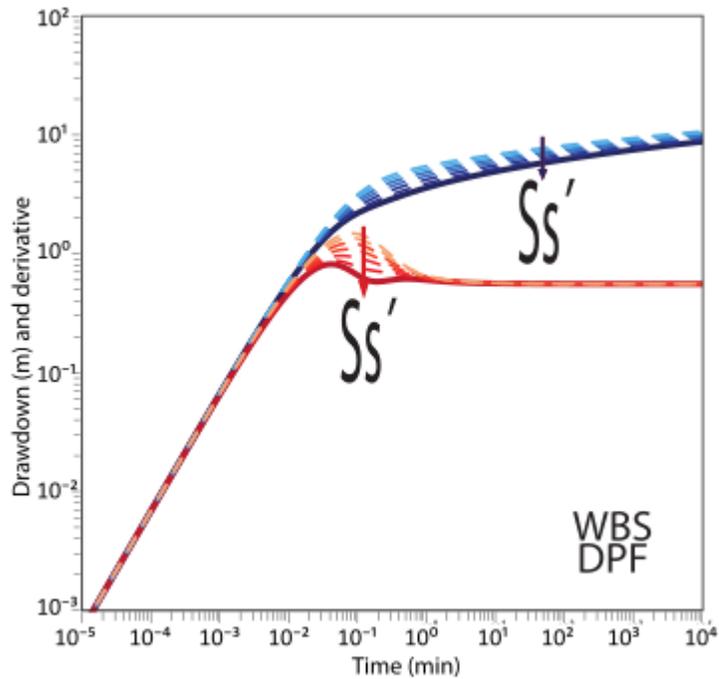


Fig 3. 17 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $Ss'$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

La derivada muestra una tendencia de pendiente unitaria lo cual denota almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$  [min]. De la misma forma muestra otro comportamiento típico de un acuífero fracturado de doble porosidad, una inflexión de la reducción en un tiempo intermedio que se refleja en un agujero en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo inicial agota un primer reservorio que está bien conectado al pozo de bombeo por las fracturas. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser del drenaje de bloques de matriz en fracturas (Warren y Root 1963). Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero pronunciado. A partir de los 10 [min] todo el sistema se equilibra y se presenta un periodo de flujo radial (IARF) ya que tiene una pendiente cero, periodo en el cual es válida la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, podemos observar que el abatimiento de todas las pruebas no varía mucho, es decir no hay una gran diferencia en cuanto el abatimiento de todas las pruebas, no obstante, se muestra una relación inversa entre el coeficiente de almacenamiento específico de la matriz ( $Ss'$ ) y el abatimiento, a menor  $Ss'$  mayor abatimiento.

## Escenario 18

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.18, el parámetro a variar fue el almacenamiento específico (Ss) en un acuífero fracturado con fractura vertical. Se empieza con una prueba donde  $Ss = 1 \times 10^{-7}$  [m<sup>-1</sup>], la respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 18, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. Las pruebas se dan por terminadas a los 10000 [min].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.15
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
ky/kx =	1
Kx[m/d]=	10
Lf[m]=	1
Ss[m-1]=	1.00E-07 1.36E-07 1.86E-07 2.54E-07 3.47E-07 4.73E-07 6.46E-07

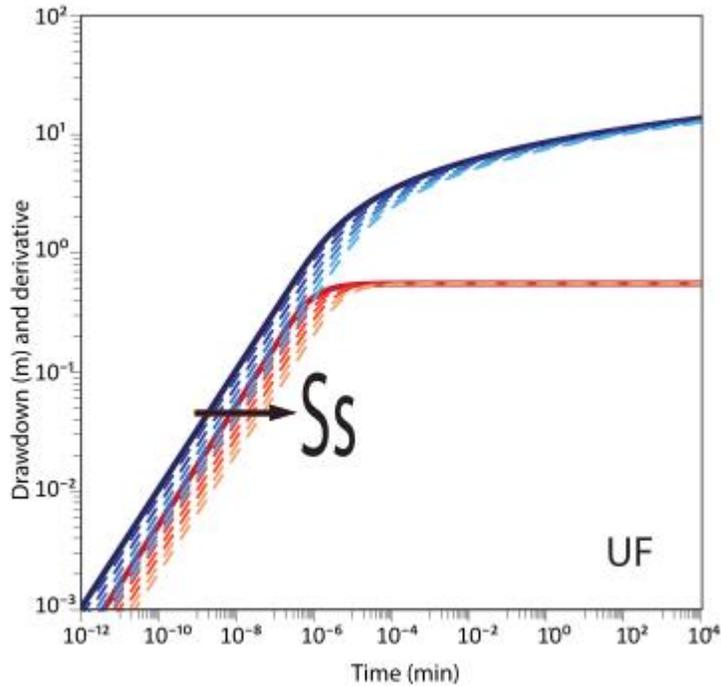
**Tabla 3. 14 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero fracturado, con una sola fractura vertical (UF).
- Variando el Almacenamiento específico [Ss].

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Gringarten-Witherspoon (1972).



**Fig 3. 18** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $S_s$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

El caso de una fractura vertical de extensión finita, pero conductividad infinita (Gringarten et al. 1974) se caracteriza por un período temprano en el que predomina el efecto de la fractura (tiempo  $1 \times 10^{-6}$ ) y una diferencia constante entre la derivada y el abatimiento correspondiente a un factor de proporcionalidad 2. Después de un período de transición, la solución tiende hacia un periodo de flujo radial (IARF), en el que la derivada se estabiliza y muestra una pendiente de valor cero, periodo en el cual es válida la solución de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, podemos observar que el abatimiento de todas las pruebas no varía mucho, es decir no hay una gran diferencia en cuanto el abatimiento de todas las pruebas y todas disminuye con el mismo factor de proporcionalidad, tal que se muestra que a menor almacenamiento específico menor abatimiento. Cabe destacar que los dos factores que influyen más en esta respuesta son la porosidad de la roca y la compresibilidad de ésta.

## Escenario 19

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 15, el parámetro a variar fue radio de la fractura [ $r_f$ ] en un acuífero fracturado con fractura horizontal. Se empieza con una prueba donde  $r_f = 5.012[m]$  cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representa con líneas continuas en la Fig. 3. 19, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min]	10000.00
=	
Q [ $m^3/d$ ] =	7000.00
rw [m] =	0.15
T [ $m^2/d$ ] =	1000
kz/kr =	1
Kr[m/d]=	10
rf[m]=	5.012 5.5 6.0256 6.607 7.079 7.586 8.128
Ss[m-1]=	1.00E-07

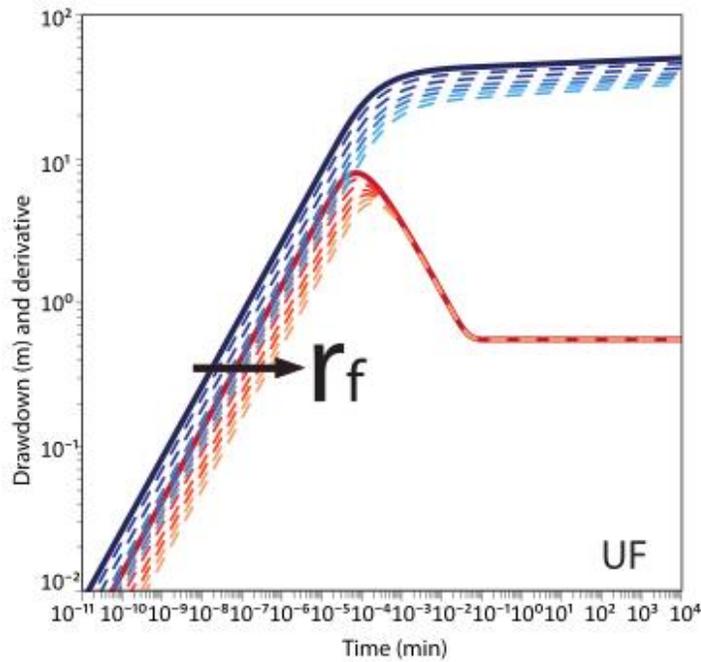
**Tabla 3. 15 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el radio de la fractura [ $r_f$ ].
- acuíferos fracturados, con una sola fractura (UF) en el plano horizontal que cruza el pozo de control.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Gringarten-Ramey (1974).



**Fig 3. 19** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_f$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

En este caso que es una fractura horizontal de extensión finita, pero conductividad infinita (Gringarten et al. 1974) se caracteriza por un período temprano en el que predomina el efecto de la fractura (tiempo  $1 \times 10^{-6}$ ), se presenta una diferencia constante entre la derivada y el abatimiento correspondiente a un factor de proporcionalidad multiplicador de 2. Después se observa un período de transición en el tiempo  $10^{-4}$  a  $3 \times 10^{-1}$  [min] en el que se toca el límite de la fractura, la solución tiende hacia un periodo de flujo radial (IARF), en el que la derivada se estabiliza en el tiempo  $2 \times 10^{-1}$  [min] y muestra una pendiente de valor cero en la derivada, periodo en el cual es válida la solución de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, podemos observar que el abatimiento de todas las pruebas no varía mucho, es decir no hay una gran diferencia en cuanto el abatimiento de todas las pruebas y todas disminuye con el mismo factor de proporcionalidad, tal que se muestra que a mayor radio de la fractura menor abatimiento. Debido a que la fractura probó un flujo preferencial en esa zona lo cual hace que el cono de abatimiento se más amplio y el aumento del abatimiento sea más gradual.

## Escenario 20

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.20, el parámetro a variar fue la conductividad hidráulica radial [ $k_r$ ] en un acuífero fracturado con fractura horizontal. Se empieza con una prueba donde  $k_r = 10$ [m/d], representando su respuesta del abatimiento y derivada con líneas continuas en la Fig. 3. 20, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. Las pruebas se dan por finalizadas a los 10000 [min].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.15
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
kz/kr =	1
Kr[m/d]=	10 12.5893 15.8489 19.9526 25.1189 31.6228 35.4813
rf[m]=	1
Ss[m-1]=	1.00E-07

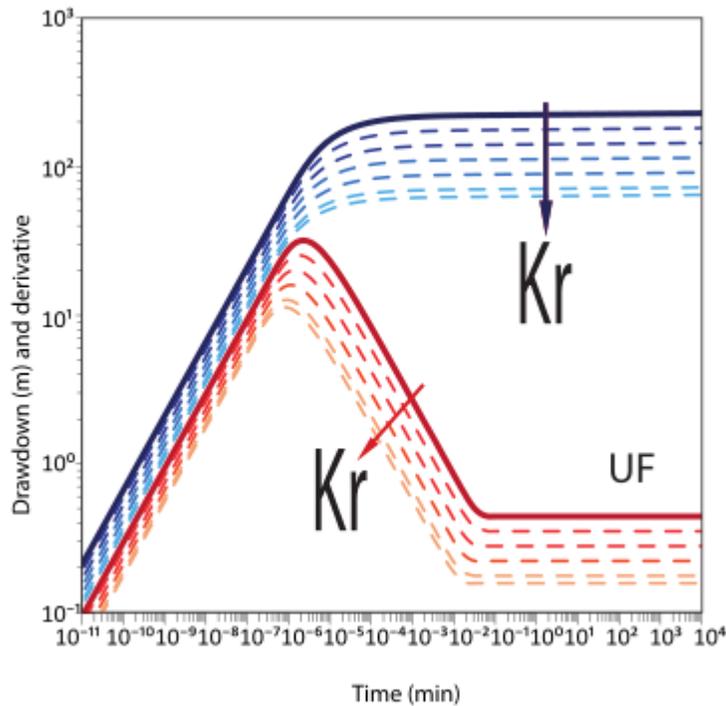
**Tabla 3. 16 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Variando la conductividad hidráulica radial. [Kr].
- acuíferos fracturados, con una sola fractura (UF) en el plano horizontal que cruza el pozo de control.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Gringarten-Ramey (1974).



**Fig 3. 20** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $K_r$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

En este caso que es una fractura horizontal de extensión finita, pero conductividad infinita (Gringarten et al. 1974) se caracteriza por un período temprano en el que predomina el efecto de la fractura (tiempo 0 a  $1 \times 10^{-6}$  [min]), se presenta un factor de proporcionalidad constante entre la derivada y el abatimiento correspondiente a un factor multiplicador de 2. Después se observa un período de transición en el tiempo  $10^{-6}$  a  $3 \times 10^{-1}$  [min] en el que se toca el límite de la fractura, la solución tiende hacia un periodo de flujo radial (IARF), en el que la derivada se estabiliza en el tiempo  $2 \times 10^{-1}$  [min] y muestra una pendiente de valor cero en la derivada, periodo en el cual es válida la solución de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado podemos observar que el abatimiento de todas las pruebas no varía mucho, es decir no hay una gran diferencia en cuanto el abatimiento de todas las pruebas y todas disminuye con el mismo factor de proporcionalidad, también que en el período de transición se observa un disminución en el abatimiento conforme la conductividad hidráulica radial aumenta, este efecto es debido a que se provee una mejor permeabilidad en la vecindad del pozo por lo cual el cono de abatimiento se hace más amplio.

### III.V Pozos

#### Escenario 21

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.21, el parámetro a variar fue el radio del pozo ( $r_w$ ) en un acuífero fracturado confinado. Se empieza con una prueba donde  $r_w=0.152$  [m], cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 21, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas. Las pruebas se dan por terminadas a los 10000[ $\text{min}$ ].

#### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	10000.00
Q [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] =	7000.00
$r_w$ [m] =	0.1524 0.243272 0.39454 0.639869 1.03775 1.683 2.72955
T [ $\text{m}^2/\text{d}$ ] =	1000
S [-] =	0.00001
$kz/kx$ =	1

Tabla 3. 17 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

#### TIPO DE EFECTO:

- Variando el radio del pozo [ $r_w$ ].
- almacenamiento de pozo.
- acuífero confinado.

#### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).

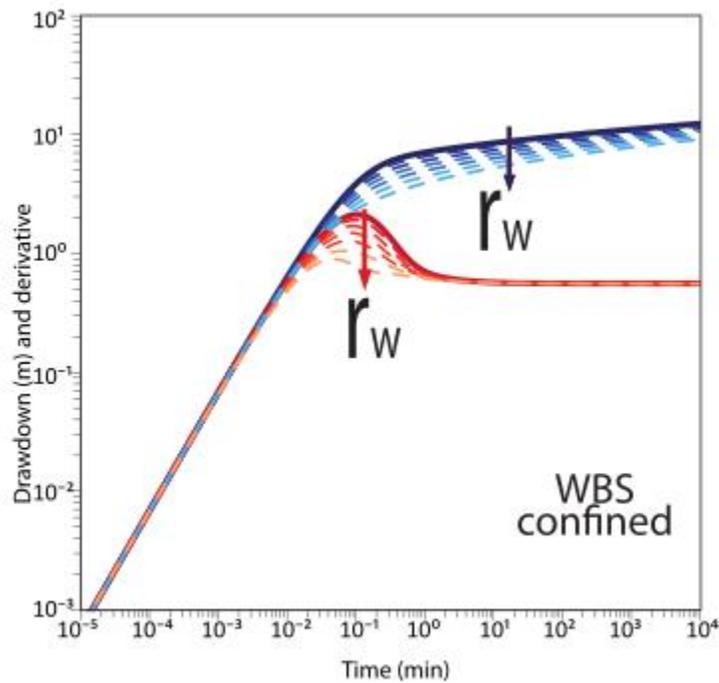


Fig 3. 21 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$ [min]. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba se abre más que para un pozo de diámetro pequeño.

Se muestra una estabilización de la derivada a los 2[ $\text{min}$ ] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0 a partir de los 3[ $\text{min}$ ] de las pruebas en el cual es válida la aplicación de la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

## Escenario 22

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 22 el parámetro a variar fue el radio del casing ( $r_c$ ) en un acuífero confinado. Se empieza con una prueba donde  $r_c=0.172$  [m], cuya respuesta del abatimiento y de la derivada se representan con líneas continua en la Fig. 3. 22, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. Las pruebas se dan por finalizadas a los 10000[ $\text{min}$ ].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.15
rc [m] =	0.172 0.197 0.227 0.267 0.299 0.344
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.00001
kz/kx =	1

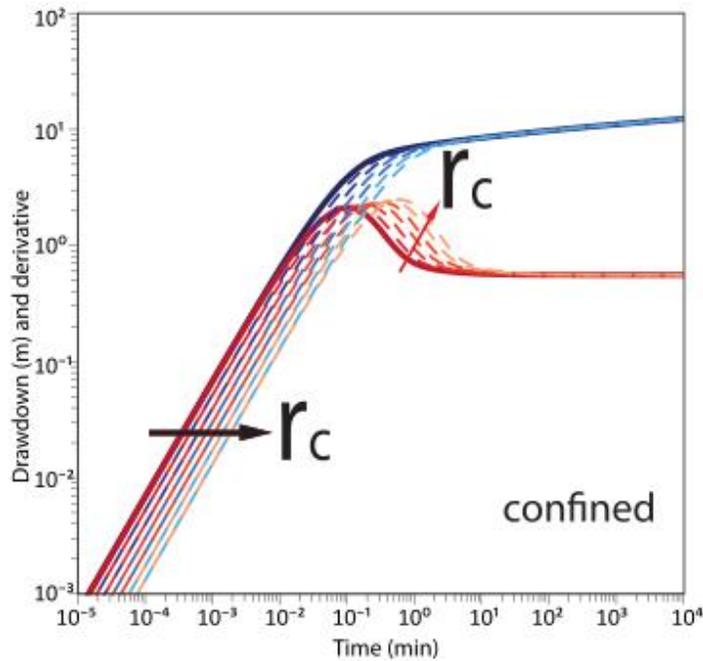
Tabla 3. 18 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el radio del pozo [ $r_w$ ].
- Almacenamiento de pozo.
- Acuífero confinado.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).



**Fig 3. 22** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_c$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo con diferentes tiempos de término para cada prueba aproximadamente varían en el intervalo de tiempo  $1 \times 10^{-2}$  [min] y  $9 \times 10^{-2}$ . Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba se abre más que para un pozo de diámetro pequeño, para este caso las jorobas de todas las pruebas se mantienen constantes ya que el radio del pozo es el mismo para todas las pruebas.

Entre menor sea el radio del casing, menor tiempo tarda en llegar a la estabilización, se muestra que en todas las pruebas se ha llegado a la estabilización a los 2[min] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0 a partir de ese tiempo, en el cual es válida la aplicación de la aproximación de [Cooper-Jacob \(1946\)](#).

Por otro lado, se puede observar que entre mayor sea el radio del casing mayor tiempo tarda en arrojar una respuesta del abatimiento, por eso las siete pruebas tienen el mismo comportamiento en cuanto a su forma, pero se van desfasando en el eje del tiempo.

## Escenario 23

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3. 23, el parámetro a variar fue el radio del pozo ( $r_w$ ) en un acuífero semiconfinado. Se empieza con una prueba donde  $r_w=0.1524$  [m], cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 23, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. Las pruebas se dan por terminadas a los 1000[ $\text{min}$ ].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] =	7000.00
$r_w$ [m] =	0.1524 0.1977 0.2607 0.3436 0.453 0.5972 0.7872
T [ $\text{m}^2/\text{d}$ ] =	1000
S [-] =	0.001
$kz/kx$ =	1

Tabla 3. 19 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

### TIPO DE EFECTO:

- Almacenamiento de pozo.
- Variando el radio de pozo [ $r_w$ ].
- Acuífero semiconfinado.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).

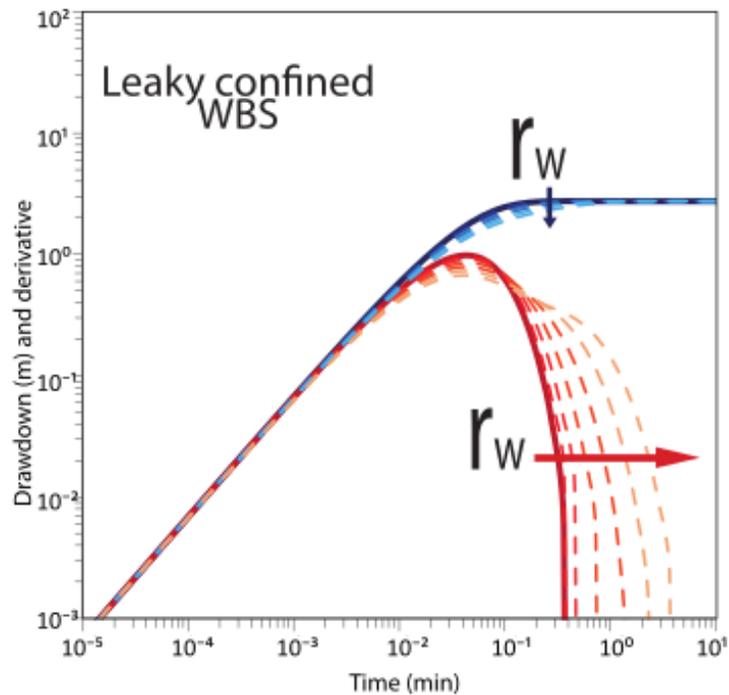


Fig 3. 23 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$ [min] aproximadamente para cada prueba. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba se abre más que para un pozo de diámetro pequeño.

La derivada muestra una tendencia hacia 0, prácticamente desde que inicia la prueba, este comportamiento es particular de las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos semiconfinados, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero confinado con frontera de carga en este caso la derivada tiende más rápido a 0, debido a que el abatimiento se vuelve prácticamente constante.

## Escenario 24

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.24, el parámetro a variar fue el radio del casing ( $r_c$ ) en un acuífero semiconfinado. Se empieza con una prueba donde  $r_c=0.152$  [m] cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 24, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura. De la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada. Las pruebas se dan por terminadas a los 1000 [min].

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Tiempo [min] =	1000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
$r_c$ [m] =	0.152 0.172 0.197 0.227 0.299 0.344
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.001
$k_z/k_x$ =	1

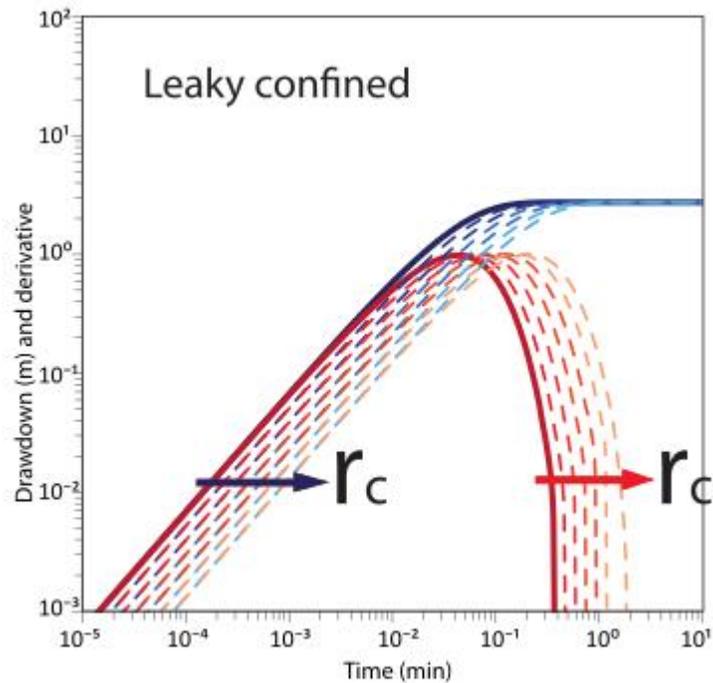
Tabla 3. 20 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el radio del casing [ $r_c$ ].
- Acuífero semiconfinado.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).



**Fig 3. 24** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_c$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

La derivada muestra una tendencia hacia 0, prácticamente desde que inician todas las pruebas, este comportamiento es particular de las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos semiconfinados, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero confinado con frontera de carga en este caso la derivada tiende más rápido a 0, debido a que el abatimiento se vuelve prácticamente constante.

Por otro lado, se puede observar que entre mayor sea el radio del casing mayor tiempo tarda en arrojar una respuesta del abatimiento, por eso las siete pruebas tienen el mismo comportamiento en cuanto a su forma, pero se van desfasando en el eje del tiempo.

## Escenario 25

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, con los datos proporcionados en la Tabla 3.25, el parámetro a variar fue el daño al pozo ( $S_w$ ) en un acuífero libre. Se empieza con una prueba a un pozo sin daño donde  $S_w = 0$  [adim] cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 25 y va aumentando su valor para las siguientes pruebas como indica el sentido de la flecha, las cuales representan un daño negativo al pozo, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.00001
K[md] =	10
$S_w[-]$ =	-0.2 -1.1 -2 -3.05 -4.025 -5 -6

**Tabla 3. 21 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero confinado.
- Variando el daño [ $S_w$ ], para acuífero libre.
- Almacenamiento de pozo.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).

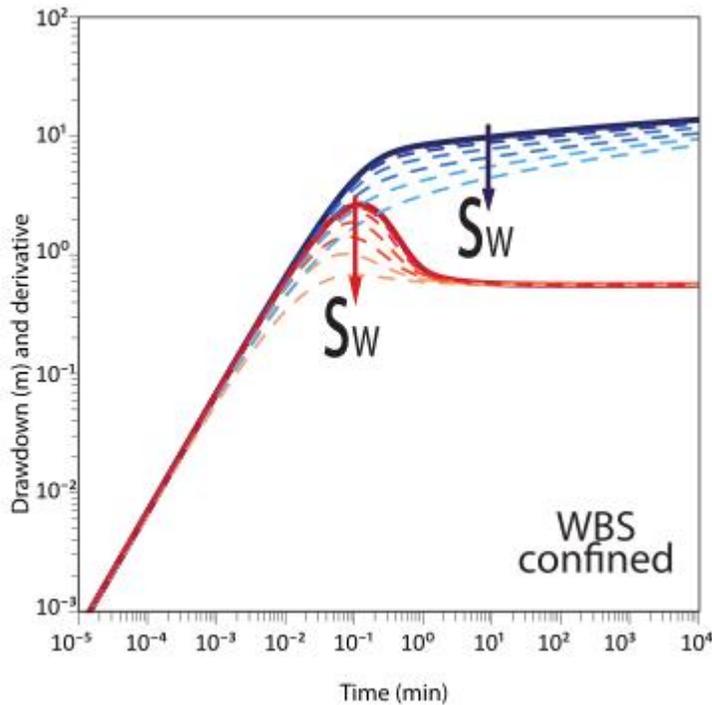


Fig 3. 25 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $S_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el min 0.08, tiempo que se tardó en extraer el agua del pozo. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. Además, [Agarwal et al. \(1970\)](#) han demostrado que se produce exactamente la misma forma de los gráficos diagnóstico cuando un efecto de daño reduce la transmisividad de una zona estrecha alrededor del pozo de bombeo. En ese caso, la duración del período de la pendiente unitaria y el tamaño de la joroba son una función de los efectos combinados de almacenamiento y daño en el pozo.

Muestra una estabilización de la derivada a los 3[ $\text{min}$ ] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0 a partir del minuto 3 de la prueba en el cual es válida la aplicación de la aproximación de [Cooper-Jacob, \(1946\)](#), la prueba se da por terminada a los 1000[ $\text{min}$ ].

Con respecto al parámetro variado  $S_w$ , el daño crea una disminución en el abatimiento adicional que causa pozo, cuando el daño es negativo, es decir hay una estimulación al pozo, es por eso que entre mayor sea la estimulación, menor es el abatimiento, claro que sólo se observa a tiempos cortos de tiempo ya que a tiempos largos, se empieza a extraer el agua del acuífero y no sólo se percibe el efecto cercano al pozo (se estabiliza).

### III.VI Multipozos

#### Escenario 26

##### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, en donde existe un pozo de bombeo y dos pozos observadores. El parámetro variado fue el radio del pozo ( $r_w$ ) en un acuífero confinado. Los datos proporcionados para esta prueba se muestran en la Tabla 3. 26. Se empieza con una prueba donde  $r_w=0.1524$  [m] cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada se representan con líneas continuas en la Fig. 3. 26, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas.

En este escenario a cada prueba se le dio un tiempo de  $10^5$  [min] con el fin de observar el efecto que se tiene en los pozos observadores.

##### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m <sup>3</sup> /d] =	7000.00
$r_w$ [m] =	0.1524 0.243272 0.39454 0.639869 1.03775 1.683 2.72955
T [m <sup>2</sup> /d] =	1000
S [-] =	0.00001
$k_z/k_x$ =	1

Tabla 3. 22 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.

##### TIPO DE EFECTO:

- Variando el radio del pozo [ $r_w$ ].
- Acuífero confinado.
- Almacenamiento de pozo.

##### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Dougherty-Babu (1984).

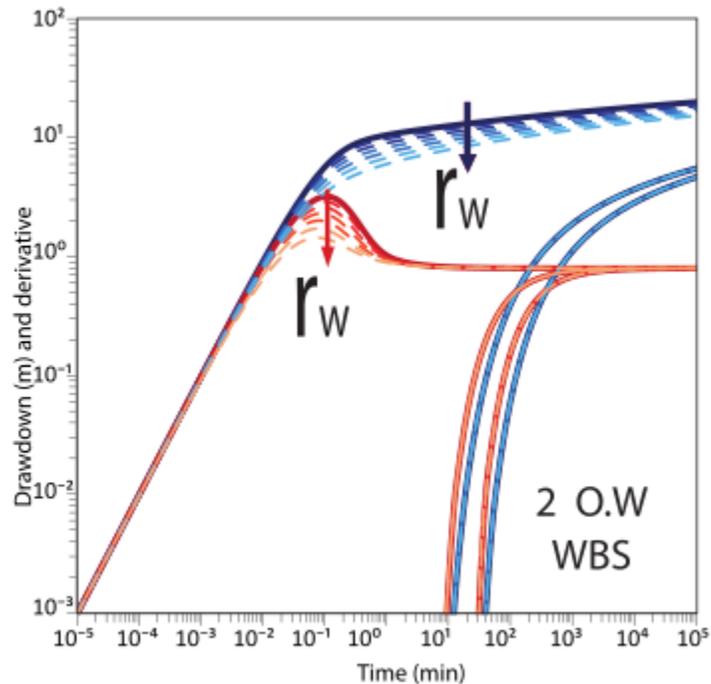


Fig 3. 26 Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $r_w$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $2 \times 10^{-2}$  [min] aproximadamente, tiempo que es diferente para cada prueba. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba se abre más que para un pozo de diámetro pequeño.

Se muestra una estabilización de la derivada al 1er [min] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0, tiempo en el cual es válida la aplicación de la aproximación de Cooper-Jacob, (1946).

A partir del tiempo  $10^1$  [min] se puede observar el efecto en los pozos observadores, los cuales muestran una respuesta típica para un acuífero confinado. Para los tiempos largos en el que se ve el efecto de los pozos observadores el parámetro variado ( $r_w$ ) ya no tiene ningún efecto, debido a que se muestra la respuesta del acuífero y no sólo de la vecindad del pozo.

## Escenario 27

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas sintéticas de bombeo, con los datos proporcionados en la Tabla 3.27 donde se varía el Coeficiente de almacenamiento (S) en un acuífero confinado. Se empieza con una prueba donde  $S = 10^{-4}$  [adim], la cual muestra la respuesta del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada, representadas con líneas continua en la Fig. 3. 27, misma figura donde se visualiza las respuestas del abatimiento y su derivada para cada prueba los cuales se representan con líneas punteadas y van aumentando su valor como indica el sentido de la flecha.

En este escenario a cada prueba se le dio un tiempo de  $10^6$  [min] con el fin de observar el efecto que se tiene en los pozos observadores.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m3/d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m2/d] =	1000
S [-] =	0.0001 0.00015136 0.00022909 0.00034674 0.00052481 0.0007943 0.001202
kz/kx =	1

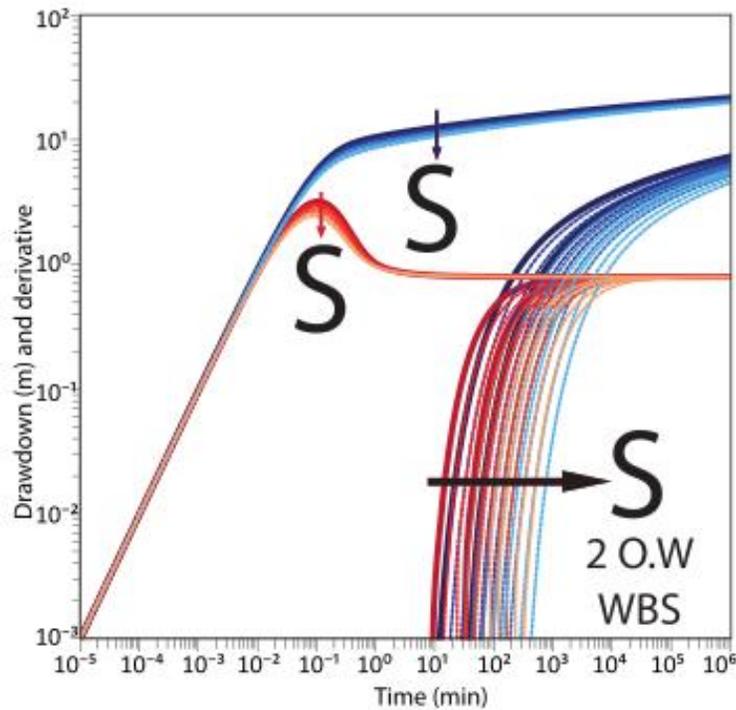
**Tabla 3. 23 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el coeficiente de almacenamiento [S].
- Almacenamiento de pozo.
- Para acuífero confinado.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Dougherty-Babu (1984).



**Fig 3. 27** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando (S); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

#### DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $2 \times 10^{-2}$  [min] aproximadamente, tiempo que es diferente para cada prueba. Durante los tiempos intermedios, la derivada hace una joroba. El tamaño de esta joroba varía en función de la duración del efecto de almacenamiento del pozo. Para un pozo de diámetro muy grande, la joroba se abre más que para un pozo de diámetro pequeño, como en este caso no se varía el radio del pozo la joroba permanece constante.

La derivada muestra una tendencia lineal con pendiente igual a cero, prácticamente desde el tiempo  $1 \text{er}$  [min], cabe mencionar que es diferente para cada prueba, ya que entre menor sea el coeficiente de almacenamiento mayor tiempo tarda en llegar al periodo de flujo radial (IARF), a partir de este tiempo es válida la solución de [Cooper-Jacob, \(1946\)](#).

Por otro lado, se puede observar que a tiempos cortos el abatimiento es diferente para todas las pruebas, de igual forma existe una relación inversamente proporcional entre el coeficiente de almacenamiento y el abatimiento, lo cual se puede comprobar en el método de Theis (E.3) ya que entre mayor sea  $S$  mayor será  $u$  y al evaluar ese valor de  $u$  en  $W(u)$ , su valor disminuye.

## Escenario 28

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, en donde existe un pozo de bombeo y dos pozos observadores. El parámetro variado fue el almacenamiento específico de la matriz ( $Ss'$ ) en un acuífero fracturado de doble porosidad. Los datos proporcionados para esta prueba se muestran en la Tabla 3. 28. Se empieza con una prueba donde  $Ss'=0.001$  [1/m] cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada es representada con líneas continuas en la Fig. 3. 28, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

A cada prueba se le dio un tiempo de  $10^9$  [min] con el fin de observar el efecto que se tiene en los pozos observadores.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m3/d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m2/d] =	1000
$Ss'$ [1/m]=	0.001 0.001585 0.002512 0.003981 0.00631 0.01 0.01585
S [-] =	0.0001
kz/kx =	1

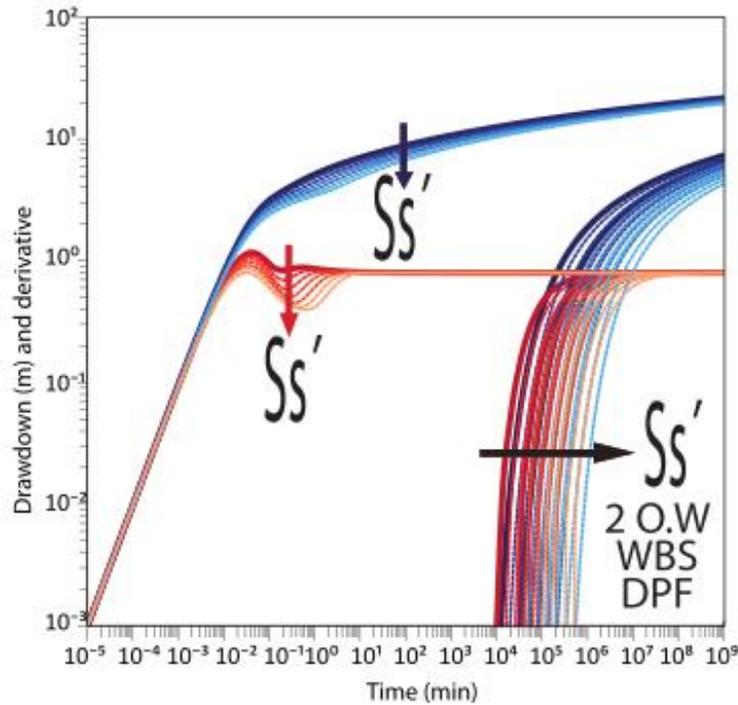
**Tabla 3. 24 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética.**

### TIPO DE EFECTO:

- Variando el almacenamiento específico de la matriz [ $Ss'$ ].
- Acuífero confinado fracturado de doble porosidad.
- Almacenamiento de pozo.
- Multipozo.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1984).



**Fig 3. 28** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $Ss'$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha.

**DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.**

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$ [min] aproximadamente, tiempo que es diferente para cada prueba. De la misma forma muestra un comportamiento típico de un acuífero fracturado de doble porosidad, una inflexión de la reducción en un tiempo intermedio que se refleja en un agujero en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo inicial agota un primer reservorio que está bien conectado al pozo de bombeo por las fracturas. El agotamiento en este reservorio es compensado parcialmente por un flujo retardado provisto por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser el drenaje de bloques de matriz en fracturas (Warren and Root, 1963). Durante ese período, el abatimiento se estabiliza y la derivada muestra un agujero pronunciado. A partir de los 10 [min] todo el sistema se equilibra y se presenta un periodo de flujo radial (IARF) debido a que la derivada presenta una pendiente cero, periodo en el cual es válida la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

Por otro lado, podemos observar que el abatimiento de todas las pruebas no varía mucho, es decir no hay una gran diferencia en cuanto el abatimiento de todas las pruebas, no obstante, se muestra una relación inversa entre el almacenamiento específico de la matriz ( $Ss'$ ) y el abatimiento, a menor  $Ss'$  mayor abatimiento.

A partir del tiempo  $10^4$  [min] se puede observar el efecto en los pozos observadores, los cuales muestran una respuesta típica para un acuífero confinado. Para los tiempos largos en el que se ve el efecto de los pozos observadores el parámetro variado ( $Ss'$ ), tarda más tiempo en llegar para valores más altos de  $Ss'$ .

## Escenario 29

### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.

Se realizaron 7 pruebas de bombeo sintéticas, en donde existe un pozo de bombeo y tres pozos de observadores. El parámetro variado fue  $1/B'$  en un acuífero semiconfinado. Los datos proporcionados para esta prueba se muestran en la Tabla 3. 29. Se empieza con una prueba donde  $1/B'=0.67[1/m]$  cuya respuesta del abatimiento y su respectiva derivada es representada con una línea continua en la Fig. 3. 29, y va aumentando su valor para las siguientes pruebas, como muestra el sentido de la flecha en la misma figura, de la misma forma se puede observar las respuestas del comportamiento que tiene el abatimiento y su respectiva derivada para cada prueba, en estos casos se representan con líneas punteadas en la figura mencionada.

A cada prueba se le dio un tiempo de  $10^9$  [min] con el fin de observar el efecto que se tiene en los pozos observadores.

### RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS.

Datos utilizados	
Time [min] =	10000.00
Q [m3/d] =	7000.00
rw [m] =	0.1524
T [m2/d] =	1000
$1/B'$ [1/m]=	0.66667 0.820179 1.00904 1.24139 1.527 1.879 2.312
S [-] =	0.01
kz/kx =	1

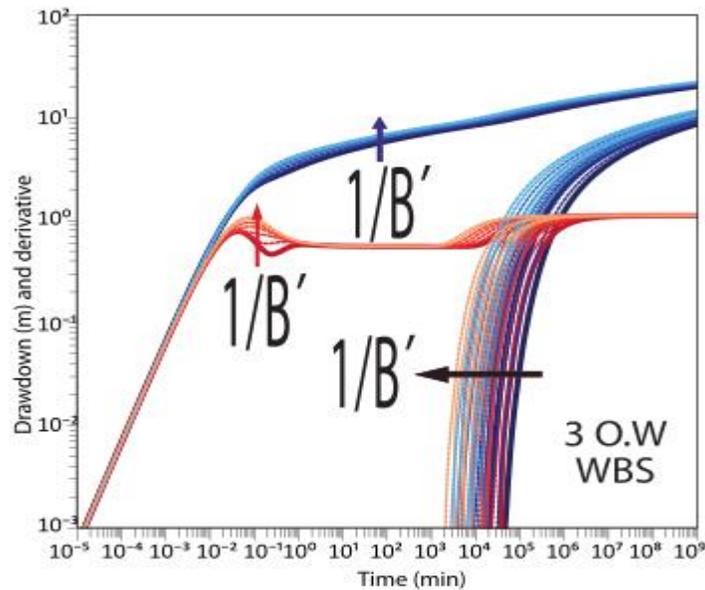
**Tabla 3. 25 Datos utilizados para la prueba de bombeo sintética**

### TIPO DE EFECTO:

- Acuífero semiconfinado.
- Almacenamiento de pozo.
- Variación de  $1/\text{espesor del acuitardo}$ .
- Múltipozos.

### MÉTODO DE SOLUCIÓN:

- Moench (1985).



**Fig 3. 29** Gráfica de la prueba sintética con la curva de abatimiento y su derivada, variando ( $1/B'$ ); el parámetro aumenta su valor como indica el sentido flecha  
 DISCUSIÓN DE LA GRÁFICA.

Se muestra un periodo de almacenamiento de pozo hasta el tiempo  $10^{-2}$  [min]. De la misma forma muestra otro comportamiento típico de un acuífero libre: una inflexión del abatimiento en el tiempo intermedio ( $2 \times 10^{-1}$  [min]) que se refleja en un agujero pronunciado en la derivada. El proceso que conduce a este comportamiento es uno en el que el bombeo temprano agota un primer depósito que está bien conectado al pozo de bombeo (la zona saturada de un acuífero libre). El agotamiento en este depósito se compensa en parte por un flujo retrasado proporcionado por un segundo compartimento del acuífero. Puede ser el drenaje vertical diferido de la zona no saturada sobre la parte saturada en un acuífero libre (Moench 1995; Neuman 1972). Se muestra una estabilización de las derivadas al 1 [min] de iniciada la prueba, correspondiente al período de flujo radial, ya que la pendiente se vuelve 0 en el cual es válida la aplicación de la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

A partir del tiempo  $10^3$  [min] se infiere que existe la presencia de un acuífero canal y por eso el efecto de pendiente  $1/4$  en la derivada, para tiempo  $10^{-4}$  [min] se puede observar el efecto en los pozos observadores, los cuales muestran una respuesta típica para un acuífero confinado. Para los tiempos largos en el que se ve el efecto de los pozos observadores el parámetro variado ( $1/B'$ ) ya no tiene ningún efecto.

Por otro lado podemos observar que entre menor sea el espesor del acuitardo mayor será la caída de presión cabe destacar que la prueba fue realizada para un acuífero semiconfinado con el método de solución de Moench, (1985) el cual muestra tres opciones para la simulación, en el cual se escogió el caso 2 el cual supone dos límites sin flujo, tanto de la base como de la cima del acuífero, lo cual lo convierte prácticamente en un acuífero libre o confinado, para este caso se comporta como un acuífero libre. Por lo cual, el efecto mostrado para esta prueba no es certero ya que el simulador sólo hizo la operación matemática del factor inverso del espesor del acuitardo, pero no se tiene un acuífero semiconfinado.

## CAPÍTULO V- CONCLUSIONES

El uso del enfoque derivativo para interpretación de pruebas hidráulicas en acuíferos resulta ser una herramienta que facilita la identificación de los fenómenos ocurridos durante una prueba de pozo debido a que la derivada exagera los efectos que interfieren con el comportamiento del abatimiento a través del tiempo, los cuales permite identificar mejor los regímenes de flujo, así como los efectos que muestra el pozo y el acuífero.

Los gráficos diagnóstico facilitan la elección del modelo analítico de ajuste sin tener la necesidad de generar los gráficos especializados. Estos últimos resultan de gran utilidad para verificar los comportamientos de la derivada. Es importante resaltar que la interpretación de pruebas hidráulicas usando enfoque derivativo no sustituye la interpretación clásica, sino que resulta una herramienta complementaria con la cual se pueden percibir fenómenos no identificados con la curva de abatimientos por sí misma.

El catálogo generado en este trabajo provee una herramienta mucho más amplia para la interpretación de pruebas de bombeo en los diferentes tipos de acuíferos ya que resulta una extensión del catálogo de [Renard, 2005](#), del cual parte el trabajo.

El poster generado incluido al final de este trabajo se puede usar como un artículo adicional para la enseñanza de la interpretación de pruebas de bombeo a los alumnos de hidrogeología y académicos.

---

## REFERENCIAS CITADAS

Bourdet, D. *et al.* (1983) 'A new set of type curves simplifies well test analysis', *World oil*, 196(6), pp. 95–106.

Bourdet, D. (2002) *Well test analysis: the use of advanced interpretation models*. Elsevier.

Cooper Jr, H. H. and Jacob, C. E. (1946) 'A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history', *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Wiley Online Library, 27(4), pp. 526–534.

Deming, D. (2002) *Introduction to hydrogeology*. McGraw-Hill College.

Fetter, C. W. (2018) *Applied hydrogeology*. Waveland Press.

Fletcher, F. (1996) *Basic Hydrogeologic Methods: A Field and Laboratory Manual with Microcomputer Applications*. CRC Press.

Garg, S. K. and Kassoy, D. R. (1981) 'Convective Heat and Mass Transfer in Hydrothermal Systems, Geothermal Systems: Principles and Case Histories edited by L. Rybach and LJP Muffler', *John Wiley & Sons*, 37, p. 76.

Hantush, M. S. (1960) 'Modification of the theory of leaky aquifers', *Journal of Geophysical Research*. Wiley Online Library, 65(11), pp. 3713–3725.

Hantush, M. S. and Jacob, C. E. (1955) 'Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer', *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Wiley Online Library, 36(1), pp. 95–100.

Heath, R. C. (1983) 'Basic Groundwater Hydrology: US Geological Survey Water Supply Paper 2220; prepared in cooperation with the North Carolina Department of Natural Resources and Community Development'.

Hernández-Espriú, A. *et al.* (2017) 'Aquifer test interpretation using derivative analysis and diagnostic plots', in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 11350.

Karasaki, K., Long, J. C. S. and Witherspoon, P. A. (1988) 'Analytical models of slug tests', *Water Resources Research*. Wiley Online Library, 24(1), pp. 115–126.

Maizeret, P.-D. (2013) 'Best Practice to Design and Interpret Interference Tests Based on Features of the Line-Source Solution: Theory and Application', in *North Africa Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Neuman, S. P. (1972) 'Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table', *Water Resources Research*. Wiley Online Library, 8(4), pp. 1031–1045.

Renard, P., Glenz, D. and Mejias, M. (2009) 'Understanding diagnostic plots for well-test interpretation', *Hydrogeology Journal*. Springer, 17(3), pp. 589–600.

Sánchez, J. (2012) 'Conceptos Fundamentales de Hidrogeología', *Universidad de Salamanca*

(España), 1, p. 11.

Spane Jr, F. A. and Wurstner, S. K. (1993) 'DERIV: A computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulic test analysis', *Groundwater*. Wiley Online Library, 31(5), pp. 814–822.

Warren, J. E. and Root, P. J. (1963) 'The behavior of naturally fractured reservoirs', *Society of Petroleum Engineers Journal*. Society of Petroleum Engineers, 3(03), pp. 245–255.

Werner, J. (1996) 'Introducción a la Hidrogeología'.

# ANEXOS

## IV.I Anexo A

### Valores de la función $W(u,\beta)$

$1/u_k$	$\beta = 0.001$	$\beta = 0.004$	$\beta = 0.01$	$\beta = 0.03$	$\beta = 0.06$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.4$	$\beta = 0.6$	$\beta = 0.8$	$\beta = 1.0$	$\beta = 1.5$	$\beta = 2.0$	$\beta = 2.5$	$\beta = 3.0$	$\beta = 4.0$	$\beta = 5.0$	$\beta = 6.0$	$\beta = 7.0$
0.4	0.0248	0.0243	0.0241	0.0235	0.023	0.0224	0.0214	0.0199	0.0188	0.0179	0.017	0.015	0.0138	0.0125	0.0113	0.0093	0.0077	0.0064	0.0053
0.6	0.145	0.142	0.14	0.136	0.131	0.127	0.119	0.108	0.0988	0.0915	0.085	0.071	0.0603	0.0511	0.0435	0.0317	0.0234	0.0174	0.0131
1.4	0.358	0.352	0.345	0.331	0.318	0.304	0.279	0.244	0.217	0.194	0.175	0.136	0.107	0.0846	0.0678	0.0445	0.0302	0.021	0.0151
2.4	0.662	0.648	0.633	0.601	0.57	0.54	0.483	0.403	0.343	0.296	0.256	0.182	0.133	0.101	0.0767	0.0476	0.0313	0.0214	0.0152
4	1.02	0.992	0.963	0.905	0.849	0.792	0.688	0.542	0.438	0.36	0.3	0.199	0.14	0.103	0.0779	0.0478		0.0215	
8	1.57	1.52	1.46	1.35	1.23	1.12	0.918	0.659	0.497	0.391	0.317	0.203	0.141						
14	2.05	1.97	1.88	1.7	1.51	1.34	1.03	0.69	0.507	0.394									
24	2.52	2.41	2.27	1.99	1.73	1.47	1.07	0.696											
40	2.97	2.8	2.61	2.22	1.85	1.53	1.08												
80	3.56	3.3	3	2.41	1.92	1.55													
140	4.01	3.65	3.23	2.48	1.93														
240	4.42	3.93	3.37	2.49	1.94														
400	4.77	4.12	3.43	2.5															
800	5.16	4.26	3.45																
1400	5.4	4.29	3.46																
2400	5.54	4.3																	
4000	5.59																		
8000	5.62																		
14000	5.62	4.3	3.46	2.5	1.94	1.55	1.08	0.696	0.507	0.394	0.317	0.203	0.141	0.103	0.0779	0.0478	0.0313	0.0215	0.0152

Tabla A. 1 Tabla normalizada para el cálculo de la función de pozo para acuíferos libres (según Neuman, 1975, Kruseman, 1990).

Valores de la función  $W(u,\beta)$  (según Neuman, 1975, en Kruseman, 1990)

$1/u_s$	$\beta = 0.001$	$\beta = 0.004$	$\beta = 0.01$	$\beta = 0.03$	$\beta = 0.06$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.4$	$\beta = 0.6$	$\beta = 0.8$	$\beta = 1.0$	$\beta = 1.5$	$\beta = 2.0$	$\beta = 2.5$	$\beta = 3.0$	$\beta = 4.0$	$\beta = 5.0$	$\beta = 6.0$	$\beta = 7.0$
4E-04	5.62	4.3	3.46	2.5	1.94	1.56	1.09	0.697	0.508	0.395	0.318	0.204	0.142	0.104	0.078	0.0479	0.0314	0.0215	0.0153
8E-04															0.0781	0.048	0.0315	0.0216	0.0153
0.001														0.103	0.0783	0.0481	0.0316	0.0217	0.0154
0.002														0.104	0.0785	0.0484	0.0318	0.0219	0.0156
0.004								0.697	0.508	0.395	0.318	0.204	0.142	0.104	0.0789	0.0487	0.0321	0.0221	0.0158
0.008								0.697	0.509	0.396	0.319	0.205	0.143	0.105	0.0799	0.0496	0.0329	0.0228	0.0164
0.014								0.698	0.51	0.397	0.321	0.207	0.145	0.107	0.0814	0.0509	0.0341	0.0239	0.0173
0.024								0.7	0.512	0.399	0.323	0.209	0.147	0.109	0.0838	0.0532	0.0361	0.0257	0.0189
0.04								0.703	0.516	0.403	0.327	0.213	0.152	0.113	0.0879	0.0568	0.0393	0.0286	0.0215
0.08						1.56	1.09	0.71	0.524	0.412	0.337	0.224	0.162	0.124	0.098	0.0661	0.0478	0.0362	0.0284
0.14					1.94	1.56	1.1	0.72	0.537	0.425	0.35	0.239	0.178	0.139	0.113	0.0808	0.0612	0.0486	0.0398
0.24				2.5	1.95	1.57	1.11	0.737	0.557	0.447	0.374	0.265	0.205	0.166	0.14	0.106	0.0853	0.0714	0.0614
0.4				2.51	1.96	1.58	1.13	0.763	0.589	0.483	0.412	0.307	0.240	0.21	0.184	0.149	0.128	0.113	0.102
0.8	5.62	4.3	3.46	2.52	1.98	1.61	1.18	0.829	0.667	0.571	0.506	0.41	0.357	0.323	0.298	0.266	0.245	0.231	0.22
1.4	5.63	4.31	3.47	2.54	2.01	1.66	1.24	0.922	0.78	0.697	0.642	0.562	0.517	0.489	0.47	0.445	0.43	0.419	0.411
2.4	5.63	4.31	3.49	2.57	2.06	1.73	1.35	1.07	0.954	0.889	0.85	0.792	0.763	0.745	0.733	0.718	0.709	0.703	0.699
4	5.63	4.32	3.51	2.62	2.13	1.83	1.5	1.29	1.2	1.16	1.13	1.1	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05
8	5.64	4.35	3.56	2.73	2.31	2.07	1.85	1.72	1.68	1.66	1.65	1.64	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
14	5.65	4.38	3.63	2.88	2.55	2.37	2.23	2.17	2.15	2.15	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
24	5.67	4.44	3.74	3.11	2.86	2.75	2.68	2.66	2.65	2.65	2.65	2.65	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
40	5.7	4.52	3.9	3.4	3.24	3.18	3.15	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
80	5.76	4.71	4.22	3.92	3.85	3.83	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82
140	5.85	4.94	4.58	4.4	4.38	4.38	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37
240	5.99	5.23	5	4.92	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91
400	6.16	5.59	5.46	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42

Tabla A. 2 Tabla normalizada para el cálculo de la función de pozo para acuíferos libres (según Neuman, 1975, Kruseman, 1990).

Valores de la función  $W(u)$  para varios valores de  $u$

	$x 1$	$x 0,1$	$x 0,01$	$x 10^{-3}$	$x 10^{-4}$	$x 10^{-5}$	$x 10^{-6}$	$x 10^{-7}$	$x 10^{-8}$	$x 10^{-9}$	$x 10^{-10}$
1.0	0,2194	1,8229	4,0379	6,3315	8,6332	10,9357	13,2383	15,5409	17,8435	20,1460	22,4486
1.2	0,1584	1,6595	3,8576	6,1494	8,4509	10,7534	13,0560	15,3586	17,6611	19,9637	22,2663
1.4	0,1162	1,5241	3,7054	5,9955	8,2968	10,5992	12,9018	15,2044	17,5070	19,8096	22,1122
1.6	0,08631	1,4092	3,5739	5,8621	8,1633	10,4657	12,7683	15,0709	17,3735	19,6760	21,9786
1.8	0,06471	1,3098	3,4581	5,7445	8,0455	10,3479	12,6505	14,9531	17,2557	19,5583	21,8608
2.0	0,04890	1,2226	3,3547	5,6394	7,9402	10,2426	12,5451	14,8477	17,1503	19,4529	21,7555
2.2	0,03719	1,1454	3,2614	5,5443	7,8449	10,1473	12,4498	14,7524	17,0550	19,3576	21,6602
2.4	0,02844	1,0762	3,1763	5,4575	7,7579	10,0603	12,3628	14,6654	16,9680	19,2706	21,5732
2.6	0,02185	1,0139	3,0983	5,3776	7,6779	9,9802	12,2828	14,5854	16,8879	19,1905	21,4931
2.8	0,01686	0,9573	3,0261	5,3037	7,6038	9,9061	12,2087	14,5113	16,8138	19,1164	21,4190
3.0	0,01305	0,9057	2,9591	5,2349	7,5348	9,8371	12,1397	14,4423	16,7448	19,0474	21,3500
3.2	0,01013	0,8583	2,8965	5,1706	7,4703	9,7726	12,0751	14,3777	16,6803	18,9829	21,2855
3.4	0,007891	0,8147	2,8379	5,1102	7,4097	9,7120	12,0145	14,3171	16,6197	18,9223	21,2249
3.6	0,006160	0,7745	2,7827	5,0532	7,3525	9,6548	11,9574	14,2599	16,5625	18,8651	21,1677
3.8	0,004820	0,7371	2,7306	4,9993	7,2985	9,6007	11,9033	14,2059	16,5085	18,8110	21,1136
4.0	0,003779	0,7024	2,6813	4,9482	7,2472	9,5495	11,8520	14,1546	16,4572	18,7598	21,0623
4.2	0,002969	0,6700	2,6344	4,8996	7,1985	9,5007	11,8032	14,1058	16,4084	18,7110	21,0135
4.4	0,002336	0,6397	2,5899	4,8533	7,1520	9,4541	11,7567	14,0593	16,3619	18,6644	20,9670
4.6	1,841E-03	0,6114	2,5474	4,8091	7,1075	9,4097	11,7122	14,0148	16,3174	18,6200	20,9226
4.8	1,453E-03	0,5848	2,5068	4,7667	7,0650	9,3671	11,6697	13,9723	16,2748	18,5774	20,8800
5.0	1,148E-03	0,5598	2,4679	4,7261	7,0242	9,3263	11,6289	13,9314	16,2340	18,5366	20,8392
5.2	9,086E-04	0,5362	2,4306	4,6871	6,9850	9,2871	11,5896	13,8922	16,1948	18,4974	20,8000
5.4	7,198E-04	0,5140	2,3948	4,6495	6,9473	9,2494	11,5519	13,8545	16,1571	18,4596	20,7622
5.6	5,708E-04	0,4930	2,3604	4,6134	6,9109	9,2130	11,5155	13,8181	16,1207	18,4233	20,7259
5.8	4,532E-04	0,4732	2,3273	4,5785	6,8758	9,1779	11,4804	13,7830	16,0856	18,3882	20,6908
6.0	3,601E-04	0,4544	2,2953	4,5448	6,8420	9,1440	11,4465	13,7491	16,0517	18,3543	20,6569

Tabla A. 3 Tabla normalizada para el cálculo de la función de pozo para acuíferos confinados.

Valores de la función  $W(u,r/B)$

Acuífero semiconfinado SIN almacenamiento en el acuitardo

	r/B																		
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5	2	4	6
0,000002	12,10	11,22	10,46	9,89	9,44	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,000004	11,62	11,06	10,43	9,88	9,44	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,000006	11,29	10,88	10,36	9,87	9,44	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,000008	11,04	10,72	10,28	9,84	9,43	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00001	10,83	10,57	10,20	9,80	9,42	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00002	10,19	10,05	9,84	9,58	9,30	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00004	9,52	9,45	9,34	9,19	9,01	8,03	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00006	9,13	9,08	9,00	8,89	8,77	7,98	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00008	8,84	8,81	8,75	8,67	8,57	7,91	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0001	8,62	8,59	8,55	8,48	8,40	7,84	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0002	7,94	7,92	7,90	7,86	7,82	7,50	6,62	5,86	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0004	7,24	7,24	7,22	7,21	7,19	7,01	6,45	5,83	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0006	6,84	6,84	6,83	6,82	6,80	6,68	6,27	5,77	5,27	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0008	6,55	6,55	6,54	6,53	6,52	6,43	6,11	5,69	5,25	4,84	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,001	6,33	6,33	6,32	6,32	6,31	6,23	5,97	5,61	5,21	4,83	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,002	5,64	5,64	5,63	5,63	5,63	5,59	5,45	5,24	4,98	4,71	3,50	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,004	4,95	4,95	4,95	4,49	4,94	4,92	4,85	4,74	4,59	4,42	3,48	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,006	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,53	4,48	4,41	4,30	4,18	3,43	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,008	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26	4,25	4,21	4,15	4,08	3,98	3,36	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,01	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,03	4,00	3,95	3,89	3,81	3,29	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,02	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,34	3,31	3,28	3,24	2,95	2,18	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,04	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,67	2,66	2,65	2,63	2,48	2,02	1,52	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,06	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,29	2,29	2,28	2,27	2,26	2,17	1,85	1,46	1,11	0,839	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,08	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,02	2,02	2,01	2,00	1,94	1,69	1,39	1,08	0,832	0,427	0,228	0,0223	0,0025
0,1	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,81	1,80	1,75	1,56	1,31	1,05	0,819	0,427	0,228	0,0223	0,0025
0,2	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,19	1,11	0,996	0,857	0,715	0,413	0,227	0,0223	0,0025
0,4	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,701	0,7	0,693	0,665	0,621	0,565	0,502	0,341	0,210	0,0223	0,0025
0,6	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,453	0,450	0,436	0,415	0,387	0,354	0,263	0,177	0,0222	0,0025
0,8	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,310	0,310	0,310	0,308	0,301	0,289	0,273	0,254	0,199	0,144	0,0218	0,0025
1	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,218	0,213	0,206	0,197	0,185	0,151	0,114	0,0207	0,0025
2	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,048	0,047	0,046	0,044	0,0394	0,034	0,0110	0,0021

Tabla A. 4 Tabla normalizada para el cálculo de la función de pozo para acuíferos semiconfinados

Valores de la función  $W(u,\beta)$ . Acuífero semiconfinado CON almacenamiento en el acuitardo

		$\beta$													
		0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20
u	10 <sup>-4</sup>	11.98	11.40	10.59	9.93	9.25	8.34	7.65	6.96	6.05	5.36	4.67	3.78	3.11	2.47
	2.10 <sup>-4</sup>	11.50	11.00	10.20	9.57	8.89	7.99	7.30	6.61	5.70	5.01	4.33	3.44	2.79	2.16
	4.10 <sup>-4</sup>	11.10	10.60	9.84	9.20	8.54	7.64	6.95	6.27	5.36	4.67	3.99	3.11	2.47	1.86
	6.10 <sup>-4</sup>	10.80	10.30	9.61	8.99	8.33	7.44	6.57	6.06	5.16	4.47	3.80	2.92	2.28	1.69
	8.10 <sup>-4</sup>	10.50	10.10	9.45	8.84	8.18	7.29	6.61	5.92	5.01	4.33	3.66	2.79	2.16	1.57
	10 <sup>-4</sup>	10.37	10.00	9.32	8.71	8.07	7.18	6.49	5.81	4.90	4.22	3.55	2.68	2.06	1.48
	2.10 <sup>-5</sup>	9.82	9.51	8.90	8.33	7.70	6.82	6.15	5.46	4.56	3.88	3.22	2.37	1.76	1.22
	4.10 <sup>-5</sup>	9.24	8.99	8.46	7.93	7.33	6.47	5.80	5.12	4.22	3.55	2.89	2.06	1.48	0.973
	6.10 <sup>-5</sup>	8.88	8.67	8.19	7.69	7.11	6.26	5.59	4.91	4.02	3.35	2.70	1.88	1.32	0.841
	8.10 <sup>-5</sup>	8.63	8.43	8.00	7.52	6.95	6.11	5.44	4.77	3.88	3.21	2.57	1.76	1.22	0.753
	10 <sup>-4</sup>	8.43	8.25	7.84	7.38	6.82	5.99	5.33	4.66	3.77	3.11	2.47	1.67	1.14	0.688
	2.10 <sup>-4</sup>	7.79	7.66	7.33	6.93	6.42	5.62	4.97	4.31	3.43	2.78	2.15	1.39	0.899	0.504
	4.10 <sup>-4</sup>	7.14	7.04	6.78	6.45	6.00	5.25	4.62	3.96	3.10	2.46	1.85	1.14	0.688	0.351
	6.10 <sup>-4</sup>	6.75	6.67	6.45	6.16	5.74	5.02	4.40	3.76	2.91	2.28	1.68	0.94	0.577	0.277
	8.10 <sup>-4</sup>	6.48	6.40	6.21	5.99	5.55	4.86	4.25	3.62	2.77	2.15	1.57	0.898	0.504	0.230
	0.001	6.26	6.20	6.02	5.77	5.40	4.73	4.13	3.50	2.67	2.05	1.48	0.827	0.451	0.198
	0.002	5.59	5.54	5.41	5.22	4.91	4.32	3.76	3.15	2.34	1.75	1.21	0.624	0.308	0.116
	0.004	4.91	4.88	4.78	4.64	4.40	3.89	3.38	2.80	2.03	1.47	0.966	0.450	0.197	0.0619
	0.006	4.52	4.49	4.41	4.29	4.08	3.62	3.14	2.60	1.84	1.31	0.833	0.362	0.146	0.0404
	0.008	4.23	4.21	4.14	4.04	3.85	3.43	2.98	2.45	1.72	1.20	0.744	0.306	0.116	0.0290
	0.01	4.02	4.00	3.93	3.84	3.67	3.28	2.84	2.33	1.62	1.11	0.678	0.267	0.0955	0.0221
	0.02	3.34	3.33	3.28	3.21	3.09	2.78	2.42	1.97	1.32	0.868	0.491	0.165	0.0487	0.00831
	0.04	2.67	2.66	2.63	2.58	2.50	2.27	1.98	1.61	1.04	0.647	0.336	0.0931	0.0216	0.00253
	0.06	2.29	2.28	2.26	2.22	2.15	1.96	1.72	1.39	0.884	0.530	0.259	0.0630	0.0124	0.00112
	0.08	2.02	2.01	1.99	1.96	1.90	1.74	1.53	1.24	0.776	0.453	0.212	0.0464	0.00797	5.87 E-04
	0.1	1.82	1.81	1.79	1.77	1.72	1.58	1.39	1.12	0.695	0.397	0.179	0.0359	0.00552	3.40 E-04
	0.2	1.22	1.22	1.21	1.19	1.16	1.07	0.950	0.767	0.460	0.245	0.0971	0.0143	0.00149	4.93 E-05
	0.4	0.701	0.699	0.694	0.685	0.668	0.622	0.554	0.448	0.262	0.130	0.0441	0.00448	2.83 E-04	4.24 E-06
0.6	0.453	0.452	0.449	0.444	0.433	0.404	0.361	0.293	0.169	0.0799	0.0247	0.00195	8.73 E-05		
0.8	0.31	0.309	0.307	0.304	0.297	0.277	0.248	0.201	0.115	0.0529	0.0152	9.86 E-04	3.40 E-05		
1	0.219	0.218	0.217	0.214	0.210	0.196	0.176	0.143	0.0812	0.0365	0.00993	5.47 E-04	1.51 E-05		
2	0.0488	0.0487	0.0484	0.0479	0.0468	0.0439	0.0395	0.0322	0.0180	0.00760	0.00173	5.51 E-05			
4	0.00377	0.00376	0.00374	0.00370	0.00362	0.00340	0.00307	0.00250	0.00139	5.58 E-04	1.08 E-04	1.89 E-06			
6	3.59 E-04	3.59 E-04	3.56 E-04	3.53 E-04	3.45 E-04	3.25 E-04	2.93 E-04	2.39 E-04	1.33 E-04	5.19 E-05	9.26 E-06				
8	3.76 E-05	3.75 E-05	3.73 E-05	3.69 E-05	3.62 E-05	3.40 E-05	3.07 E-05	2.51 E-05	1.39 E-05	5.36 E-06					

Tabla A. 5 Tabla normalizada para el cálculo de la función de pozo para acuíferos semiconfinados.

Valores de la función  $F(u_{vf}, r')$ . Acuífero fracturado

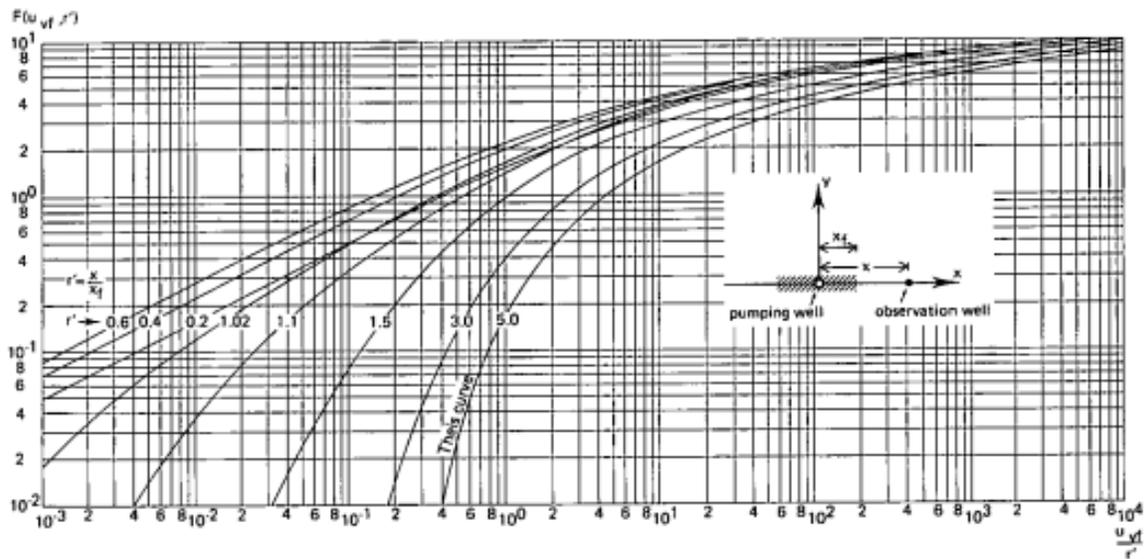


Fig. A.1 Gráfica normalizada para el cálculo de la función de pozo para acuíferos Fracturados.

IV.II Anexo B

# Catálogo de curvas diagnóstico teorías para mejorar la interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos.

<sup>1</sup>Antonio Hernandez-Espriú, <sup>2</sup>Yael Eskarlet Gutiérrez-Pérez

<sup>1</sup> Grupo de Hidrogeología, división de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNAM

## 1. Introducción

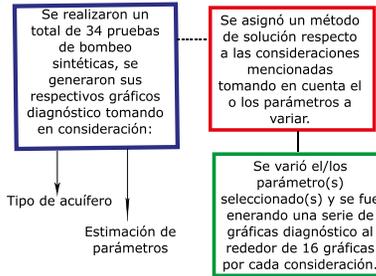
Las pruebas de presión-producción tienen su origen en el ámbito hidrogeológico con el desarrollo matemático de flujo en estado transitorio para acuífero confinado, homogéneo e isótropo realizado por Theis (1935). Este método y otras soluciones clásicas, como la aproximación de Cooper-Jacob (1946).

El análisis derivativo propuesto por Bourdet et al. (1983) han revolucionado el análisis de las pruebas de pozo al hacer posible evaluar los efectos cercanos al pozo logrando reconocer heterogeneidades, efectos de doble porosidad, daños en el pozo, flujo controlado por fracturas e identificación de fronteras.

Hoy en día, en el ámbito de la industria del gas y aceite, este análisis se ha adoptado como el estándar universal para la interpretación de pruebas en pozos petroleros es, quizás, el desarrollo individual más significativo en la historia del análisis de pruebas de pozo.

Este trabajo ilustra la aplicabilidad de gráficos diagnóstico utilizando ejemplos de campo 'no sintéticos' de un amplio espectro de pruebas, en condiciones geológicas diferentes.

## 2. Metodología



¿Interesado en nuestro grupo de Investigación?

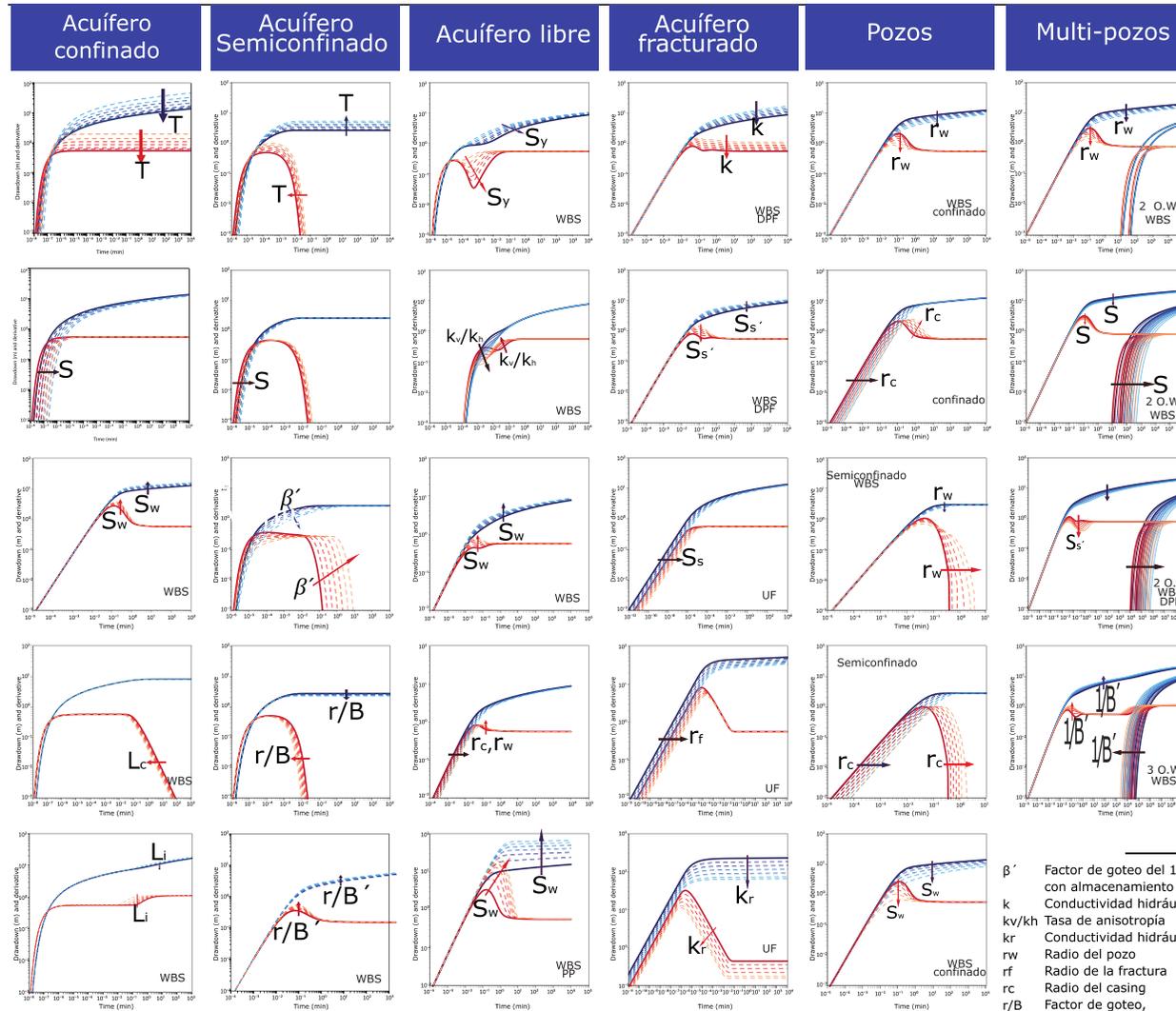
Follow us on Twitter! @hydrogeologymx

The HYDRO GEOLOGY GROUP

www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology

Descarga nuestro poster aquí

## 3. Resultados



## 3. Conclusiones

1.- El uso del enfoque derivativo para interpretación de pruebas hidráulicas en acuíferos resulta ser una herramienta que facilita la identificación de los fenómenos ocurridos durante una prueba de pozo debido a que la derivada exagera los efectos que interfieren con el comportamiento del abatimiento a través del tiempo.

2.- Los gráficos diagnóstico facilitan la elección del modelo analítico de ajuste sin tener la necesidad de generar los gráficos especializados. Estos últimos resultan de gran utilidad para verificar los comportamientos de la derivada. Es importante resaltar que la interpretación de pruebas hidráulicas usando enfoque derivativo no sustituye la interpretación clásica, sino que resulta una herramienta complementaria con la cual se pueden percibir fenómenos no identificados con la curva de abatimientos por sí misma.

3.- Se logró generar una serie de curvas que permitiran ver el comportamiento del acuífero con respecto a la propiedad que se esta variando, lo cual facilitara la interpretación de pruebas de bombeo.

## 4. Referencias

Bourdet, D., Whittle, T., Douglas, A., & Pirad, Y. (1983). A new set of type curves simplifies well test analysis. World Oil.

Theis, C.V.(1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate 161 and duration of discharge of a well using ground water storage. Washington, D.C.:Department of the interior.

Cooper, H.H., & Jacob, C.E (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geophys. Union Trans., 27, 526-534.

## Nomeclatura

$\beta'$	Factor de goteo del 1er acuífero, con almacenamiento en el acuífero	S	coeficiente de almacenamiento
k	Conductividad hidráulica de la matriz	Ss'	Almacenamiento específico de la matriz
kv/kh	Tasa de anisotropía	Ss	Almacenamiento específico
kr	Conductividad hidráulica radial	Sw	Daño
rw	Radio del pozo	Sy	Rendimiento específico
rf	Radio de la fractura	T	Transmisividad
rc	Radio del casing	OW	Pozos de observación
r/B	Factor de goteo, sin almacenamiento en el acuífero	WBS	Almacenamiento de pozo
r/B'	Factor de goteo del 1er acuífero sin almacenamiento en el acuífero	PP	Penetración Parcial
		DPF	Fractura de doble porosidad
		UF	Fractura única