

ACUÍFEROS CONFINADOS – PRÁCTICO



Edición 2024

Manuel Giménez

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

mgimenez@fing.edu.uy

ACUÍFEROS CONFINADOS – PRÁCTICO

Objetivos

- ❖ Incorporar conceptos y nociones básicas de la hidráulica de captaciones.
- ❖ Recordar las características que describen a un acuífero confinado.
- ❖ Comprender los métodos analíticos para calcular descensos en acuíferos confinados.
- ❖ Diferenciar los métodos utilizados en estado estacionario y transitorio.
- ❖ Utilizar métodos de cálculo gráficos (ábacos) y analíticos.
- ❖ Conocer los procedimientos de cálculo necesarios para determinar los parámetros hidrogeológicos de un acuífero confinado.

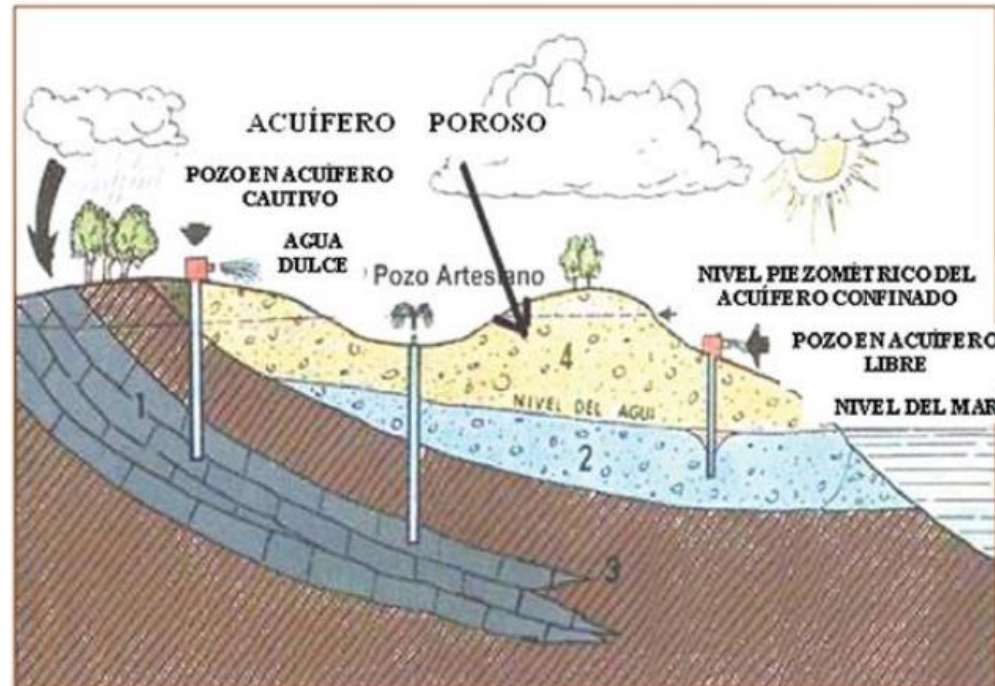
APLICACIONES DE HIDRÁULICA DE CAPTACIONES

- La hidráulica de captaciones ofrece múltiples aplicaciones prácticas. Si conocemos los parámetros del acuífero (T, S y K) podremos:
- Calcular el caudal que podrá obtenerse sin superar un cierto descenso.
 - El descenso máximo vendrá determinado por la profundidad del pozo, de la bomba de extracción o por razones económicas o medioambientales.
- Calcular el descenso producido por un caudal dado a cierta distancia.
 - Ejemplo: si ya existe un sondeo y se proyecta una segunda captación, sería deseable realizarla a la distancia suficiente para que ambas no se afecten o lo hagan mínimamente.
- Calcular el radio del cono de descensos o radio de influencia de la captación.
 - Ejemplo: si a cierta distancia existe en superficie una fuente de contaminación, podremos calcular si el cono de descensos llega hasta el punto contaminante.

Tipos de acuíferos

Clasificación según el tipo de medio geológico:

- Acuíferos en medios porosos → Flujo a través de poros interconectados
- Acuíferos en medios fracturados → Flujo a través de grietas en la roca
- Acuíferos en medios kársticos → Flujo intergranular o por conductos



Tipos de acuíferos

Clasificación de acuerdo a la presión hidrostática del agua contenida

Acuífero libre: Superficie libre del agua por debajo del techo del acuífero, y por lo tanto a presión atmosférica.

Acuíferos cautivos o confinados: Agua sometida a una presión superior a la atmosférica.

El agua ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que la contiene, saturándola completamente. Al perforar su techo, se observa un ascenso rápido del nivel de agua hasta la estabilización.

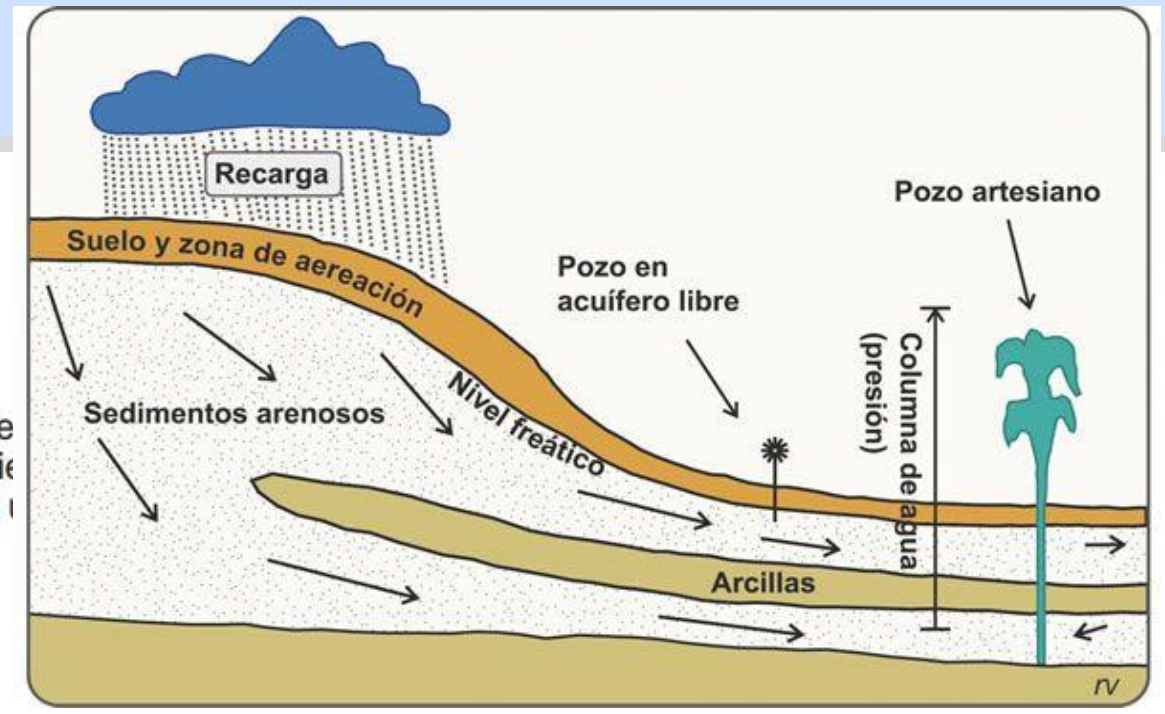
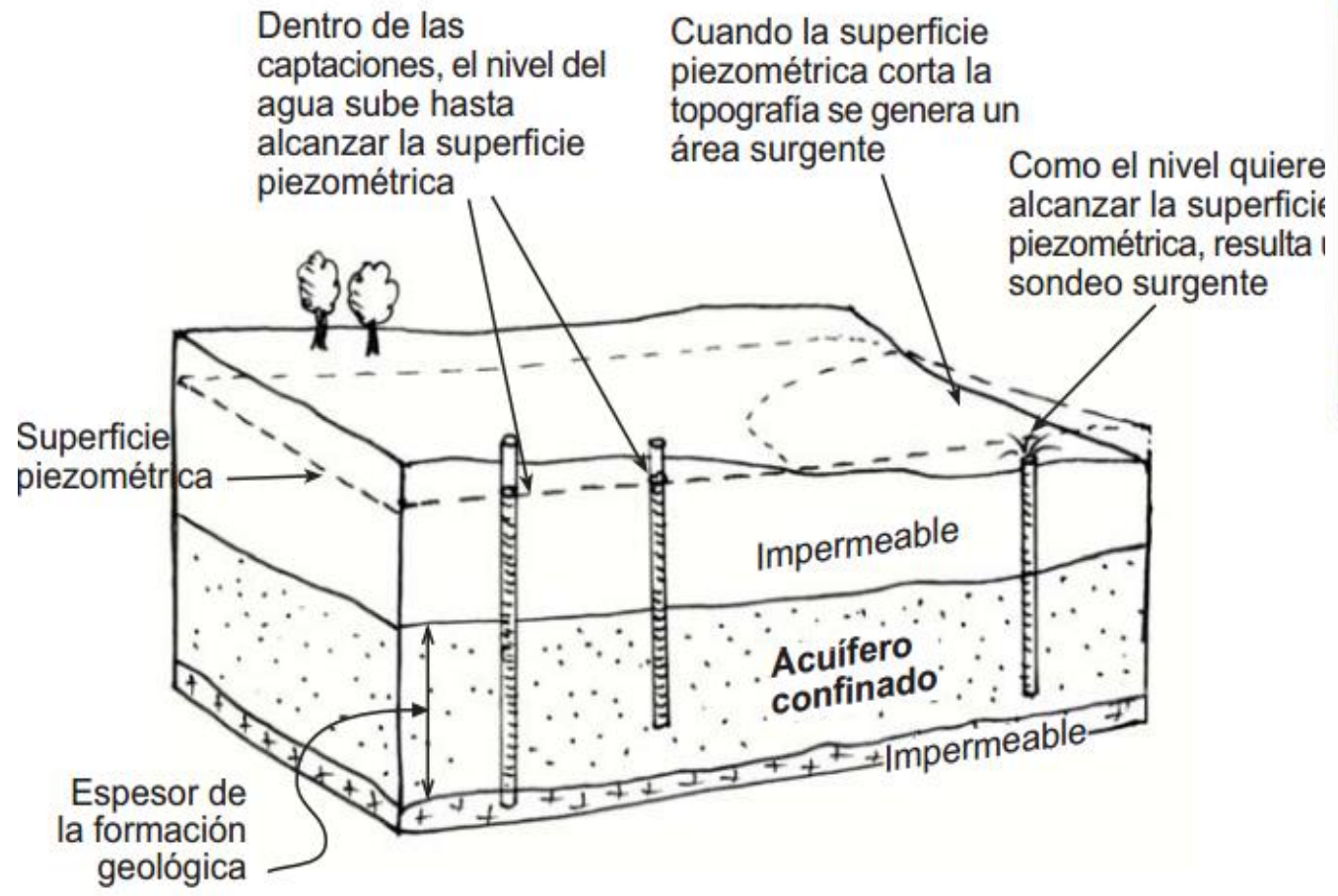
Acuíferos semicautivos o semiconfinados: Acuíferos cautivos en los que el piso y/o el techo que los encierra no es totalmente impermeable (acuitardo). Su techo o piso permite infiltración vertical de agua lentamente y la alimentación del cuerpo principal.

Acuífero confinado

- El agua se encuentra a presión.
- Si extraemos agua del acuífero, ningún poro se vacía, la extracción procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida.
- La superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero, se denomina **superficie piezométrica**.
- En un punto concreto, es decir en un pozo, se habla de **nivel piezométrico**.

Acuífero confinado

- Cuando la superficie piezométrica está por encima de la superficie topográfica, se producen los **pozos surgentes**.
- La surgencia no es un indicador de la productividad de la captación. La surgencia solamente refleja la altura de la presión del agua (potencial hidráulico).
- El caudal que puede proporcionar el pozo depende de la **Transmisividad (T)** y del **coeficiente de Almacenamiento (S)**.

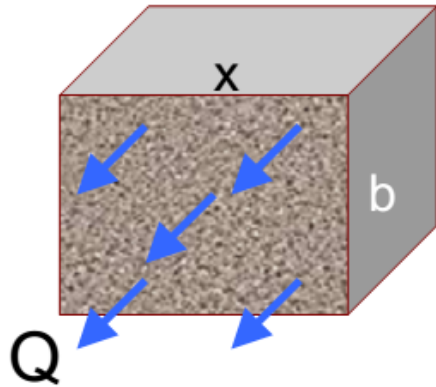


Parámetros hidrogeológicos

1) Transmisividad (T)

$$T = Kb = (m / día)(m) = (m^2 / día)$$

b: espesor del acuífero



$$Q = vA = kiA = kibx = Tix$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } i=1, y \\ x=1 \end{array} \right\} \Rightarrow Q=T$$

La transmisividad es el caudal que circula por unidad de ancho del acuífero, para un gradiente hidráulico unitario.

Parámetros hidrogeológicos

2) Coeficiente de almacenamiento (S)

Definición:

EL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO de un acuífero, es el volumen de agua cedida o tomada del almacenamiento del mismo, por unidad de área superficial cuando se produce un cambio unitario de carga.

Se distinguen dos casos:

1) Acuíferos Libres

2) Acuíferos Cautivos

- Los valores de S_y (Ac Libre) varían desde 0.01 hasta 0.35
- Los valores de S (Ac Cautivo) varían desde 0.00001 hasta 0.001

Cono de descensos

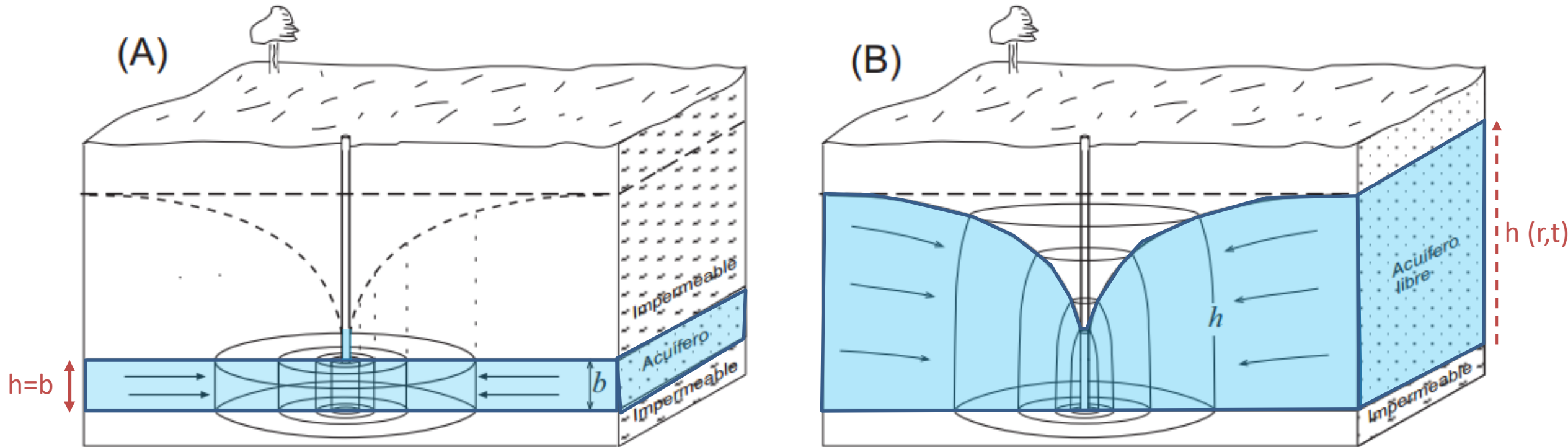


Figura 3.- (A) Cono de descensos y superficies equipotenciales en un acuífero **confinado**.
(B) Idem. en un acuífero **libre**.

Las superficies equipotenciales son cilindros verticales de sección circular y concéntricos con el pozo. Ésto equivale a suponer que el flujo es radial y horizontal.

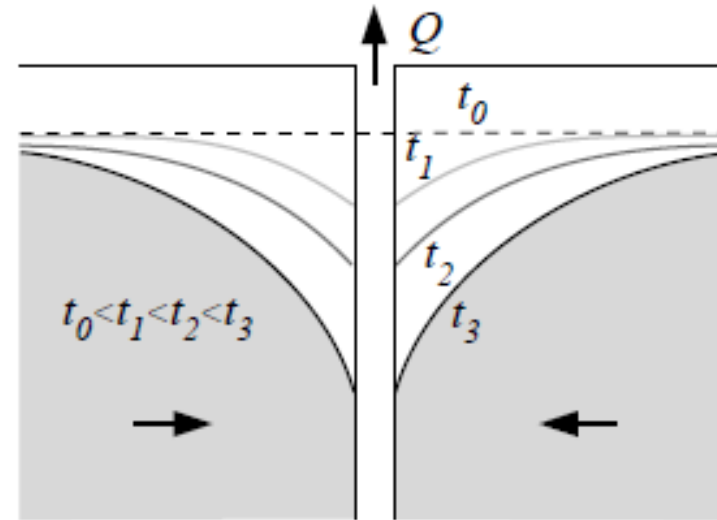
Regímenes hidráulicos

Cuando se inicia el bombeo a caudal constante inicialmente se extrae agua del almacenamiento cercano gracias al descenso del nivel producido.

Poco a poco el cono de influencia va extendiéndose de forma que la cantidad de agua producida a consecuencia del descenso de nivel iguale a la extraída por el pozo.

El periodo durante el cual los descensos van aumentando se llama **régimen transitorio**. Si el acuífero no recibe agua del exterior este descenso continuaría indefinidamente.

Si el acuífero es muy grande y debido a que la superficie del cono de influencia es creciente, la velocidad de descenso va disminuyendo paulatinamente hasta que los descensos se estabilizan, entonces se dice que se ha alcanzado el **régimen estacionario**.



Regímenes hidráulicos

Régimen Transitorio $\rightarrow s(Q,t)$

$t_0 \rightarrow 0$ Nivel estático

$t_1 \rightarrow s_1$ Donde

$t_2 \rightarrow s_2$ $s_1 > \Delta s_{1-2} > \Delta s_{2-3} > \Delta s_{3-4} > \dots > \Delta s_{(n-1)-n}$

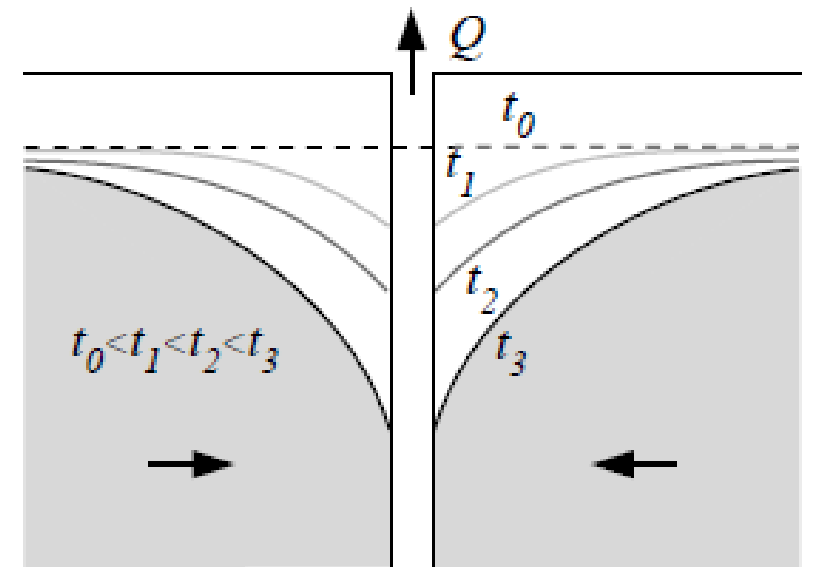
.....

$t_n \rightarrow s_n$



Régimen Estacionario $\rightarrow s(Q) = s_n$

Nivel dinámico



Hidráulica de pozos completos a caudal constante

- Los métodos de cálculo del cono de descensos se derivan de la ecuación general de flujo para acuífero homogéneo:

$$\nabla^2 h + \frac{F}{k} = \frac{S}{T} \times \frac{\partial h}{\partial t}$$

con

h= carga hidráulica.

F= aportes de agua (m³/m³/s)

k= conductividad hidráulica.

T= transmisividad

S= coeficiente de almacenamiento.

- Utilizando las hipótesis de Dupuit se puede simplificar dicha ecuación y obtener modelos analíticos sencillos para cada tipo de acuífero funcionando en régimen estacionario o transitorio.

Hipótesis básicas de Dupuit:

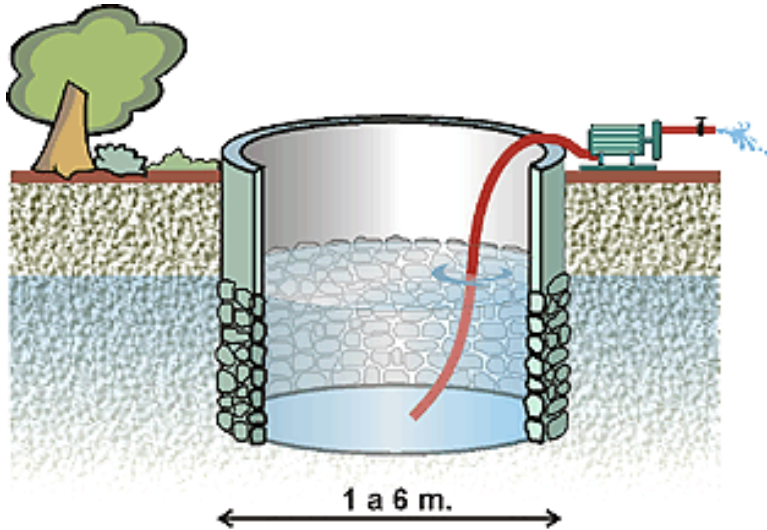
- Acuífero confinado perfecto
- Acuífero de espesor constante, isótropo y homogéneo
- Acuífero infinito (sin límites en el ámbito alcanzado por el cono de descensos)
- Superficie piezométrica inicial horizontal (=sin flujo natural)
- Caudal de bombeo constante
- Sondeo vertical, con diámetro infinitamente pequeño (=agua almacenada en su interior despreciable)
- Captación “completa” (= que atraviese el acuífero en todo su espesor)

Métodos de cálculo en hidráulica de captaciones:

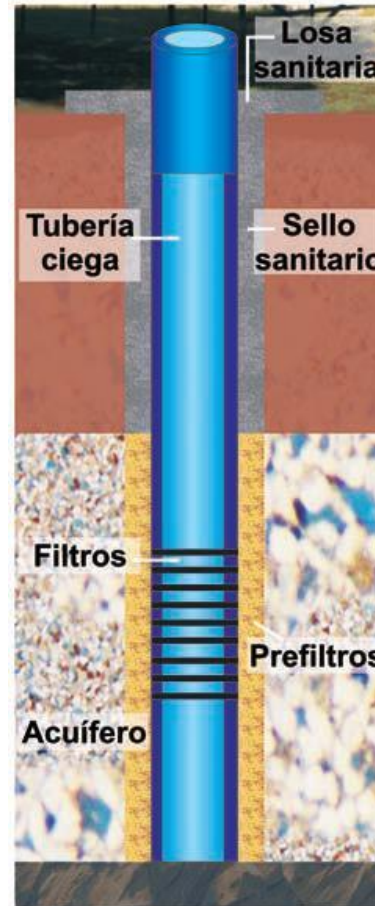
TIPO DE ACUÍFERO	RÉGIMEN	FORMULACIÓN
Cautivo	estacionario	Thiem
	transitorio	Theis
		aproximación de Jacob
Semiconfinado	estacionario	De Glee o Jacob-Hantush
	transitorio	Hantush
Libre sin recarga	estacionario	Dupuit
		aproximación a Thiem
		corrección de Jacob
	transitorio	fórmulas varias
		aproximaciones para s chicos
Libre recargado uniformemente	estacionario	fórmula y aproximación para s chicos

Tipos de captaciones comunes:

-Pozos excavados:



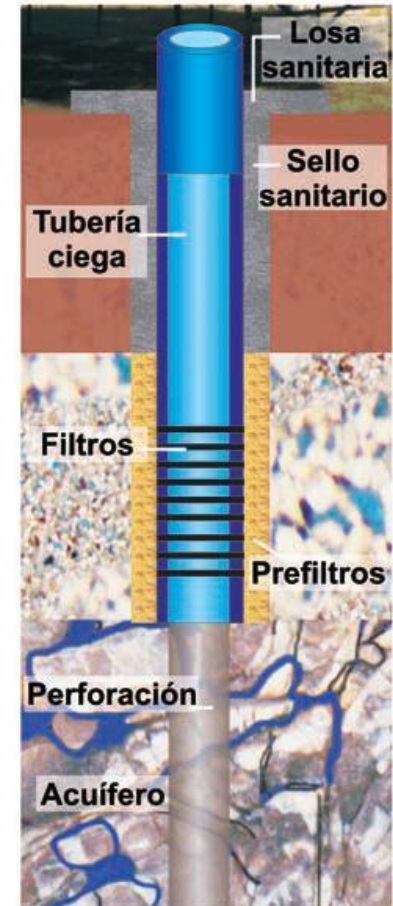
-Pozos perforados:



Pozo en acuífero poroso



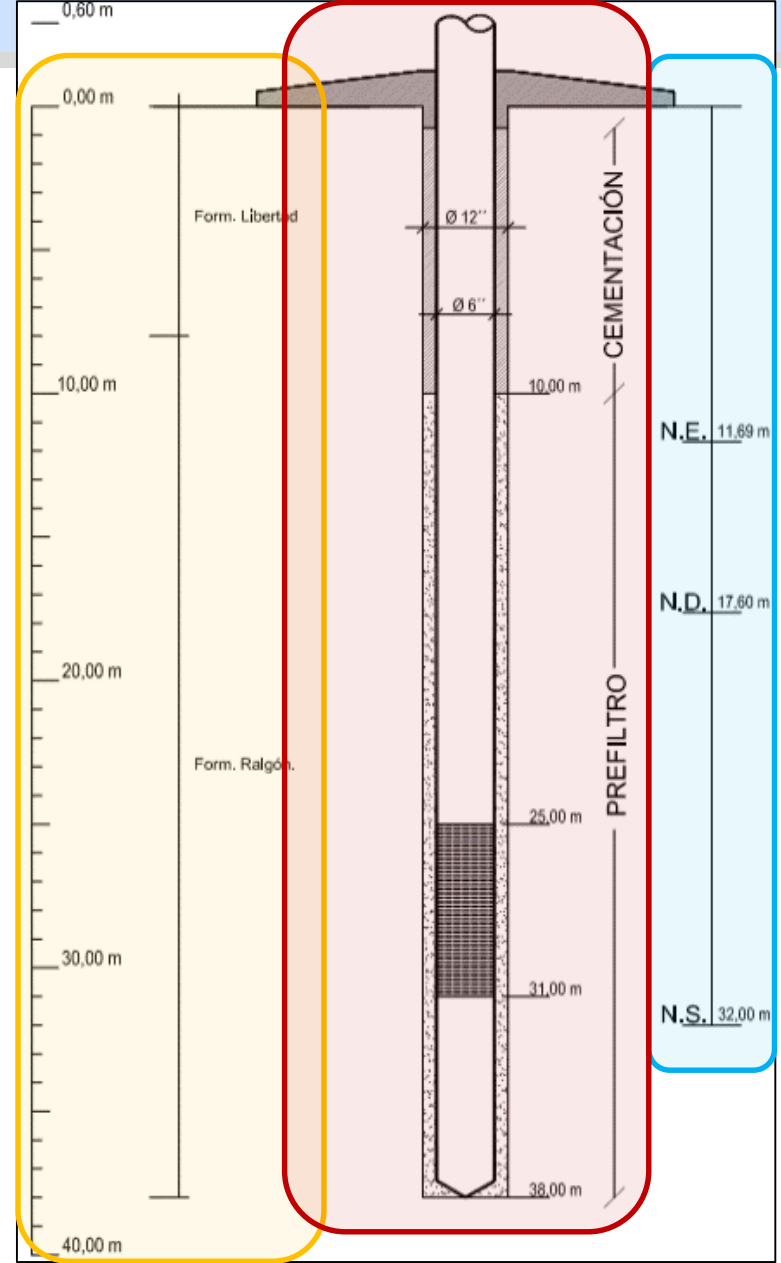
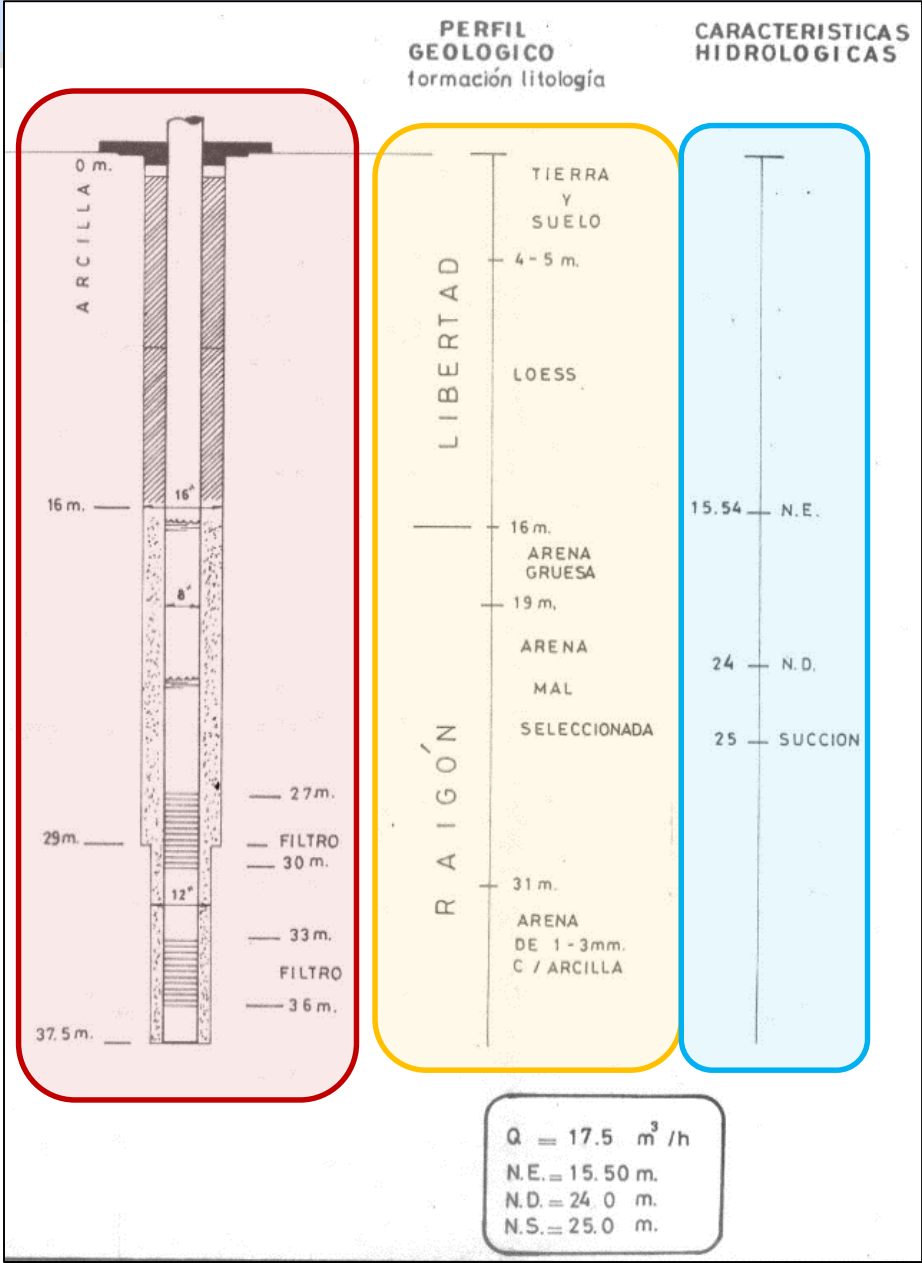
Pozo en acuífero fisurado



Pozo mixto, acuífero poroso y fisurado

Perfiles de un pozo

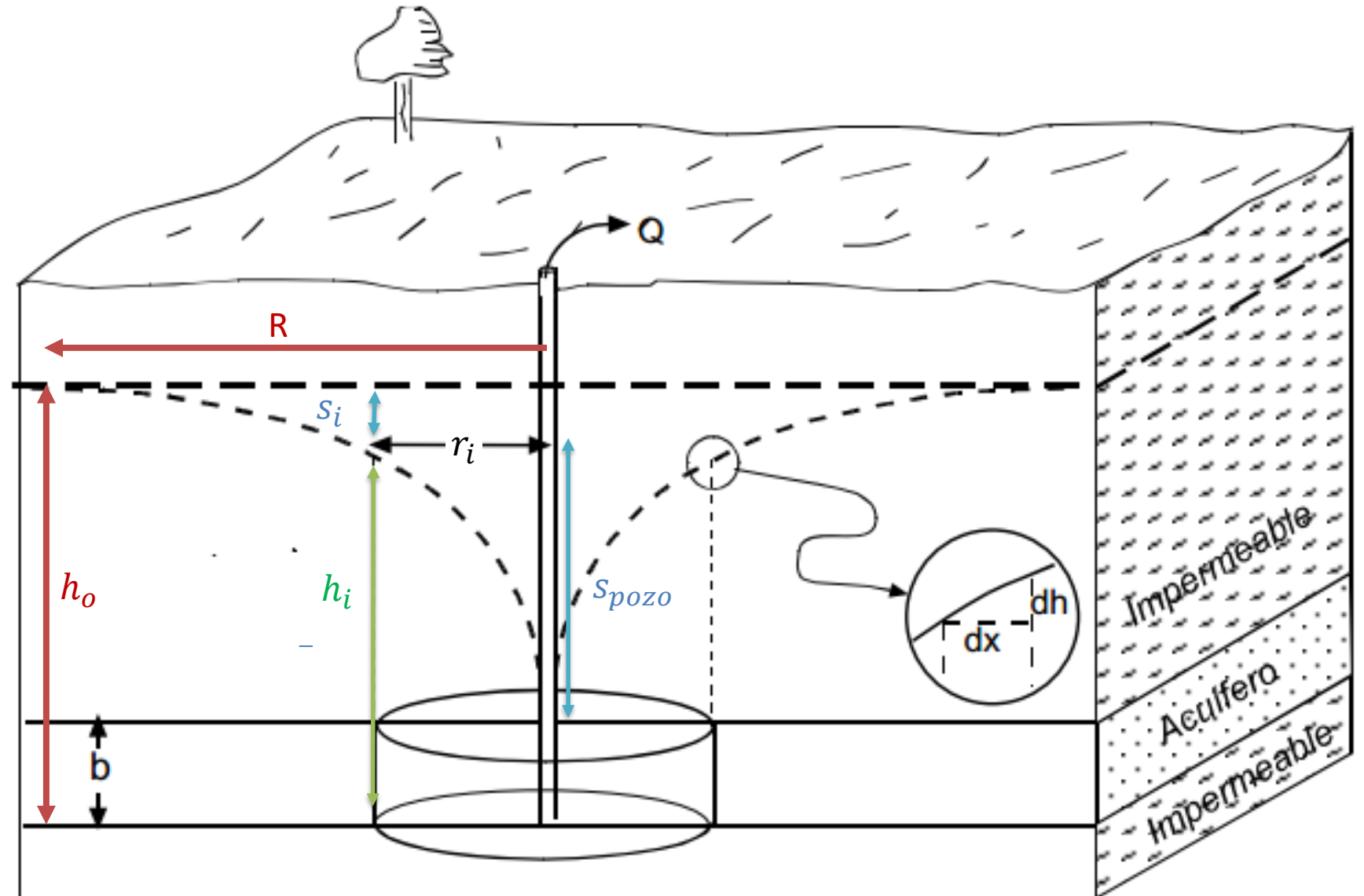
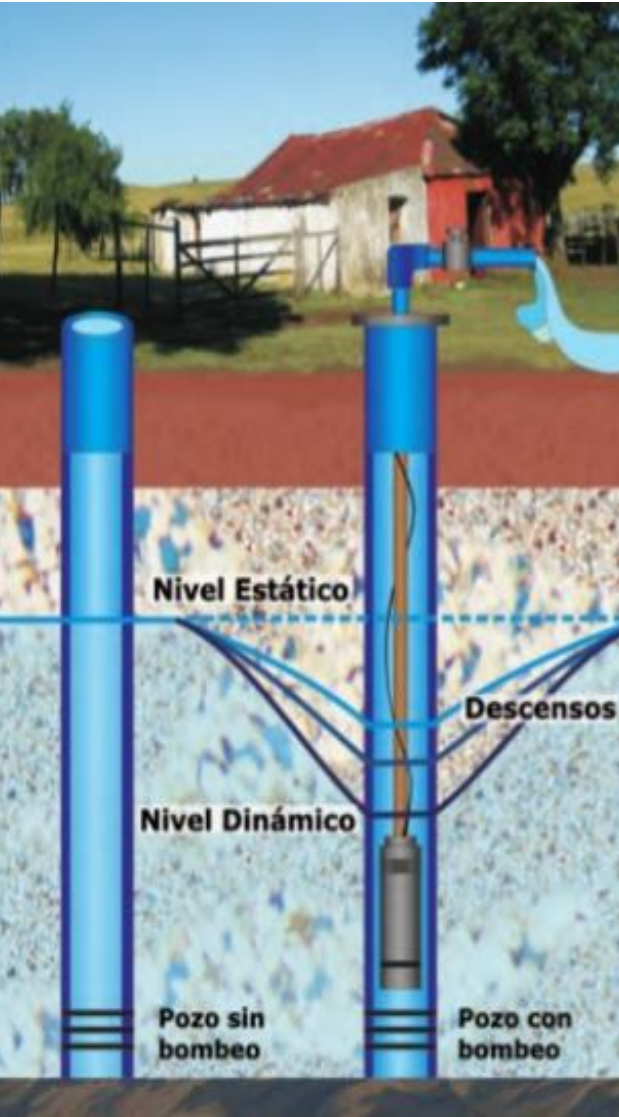
- Perfil geológico o litológico
- Perfil hidráulico
- Perfil constructivo



Problemas a resolver:

- La primera parte de la hidráulica de pozos se ocupa de como obtener los **descensos producidos por un bombeo conociendo los parámetros hidráulicos del acuífero.**
- En la segunda parte **los parámetros hidráulicos son determinados por medio de ensayos de bombeo realizados en el acuífero.**
- En un ensayo de bombeo **se bombea agua del acuífero y se registran los descensos producidos** a través de pozos de observación.
- **Los descensos observados en función del tiempo son luego interpretados** para derivar estimaciones de los parámetros hidráulicos del acuífero.

Acuífero cautivo: variables del problema



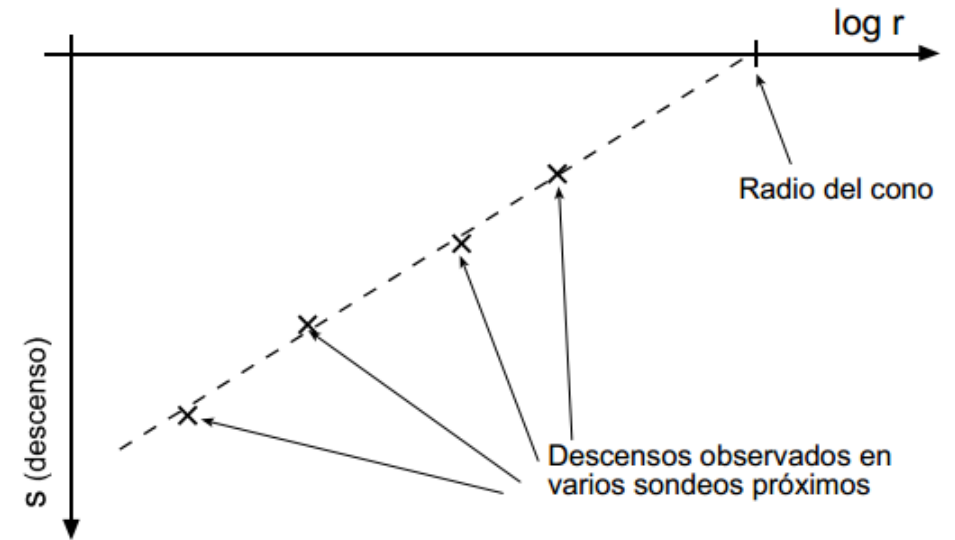
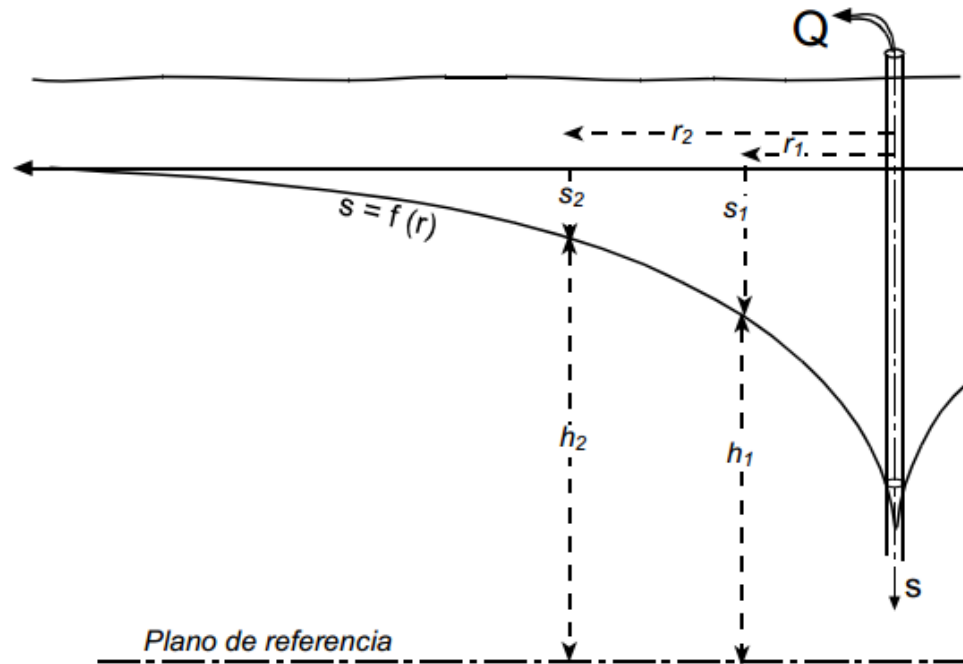
Ecuación de Dupuit-Thiem

- Ac. Confinado
- Régimen permanente

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Como $h_2 - h_1 = s_1 - s_2$

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

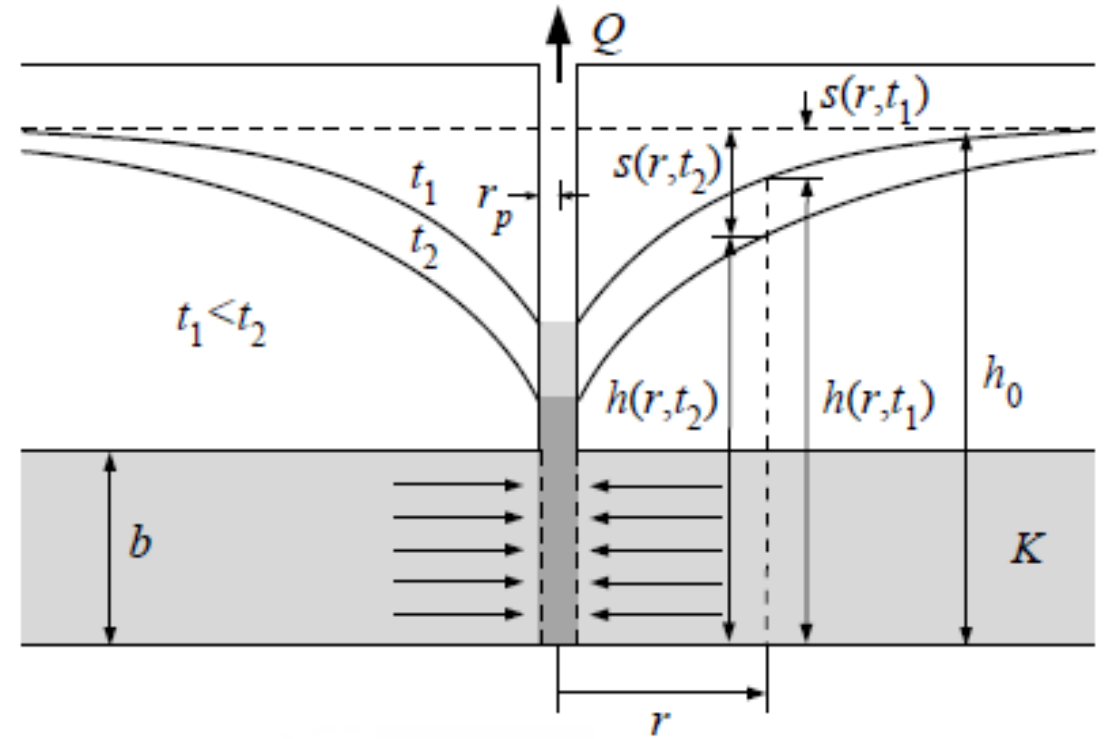
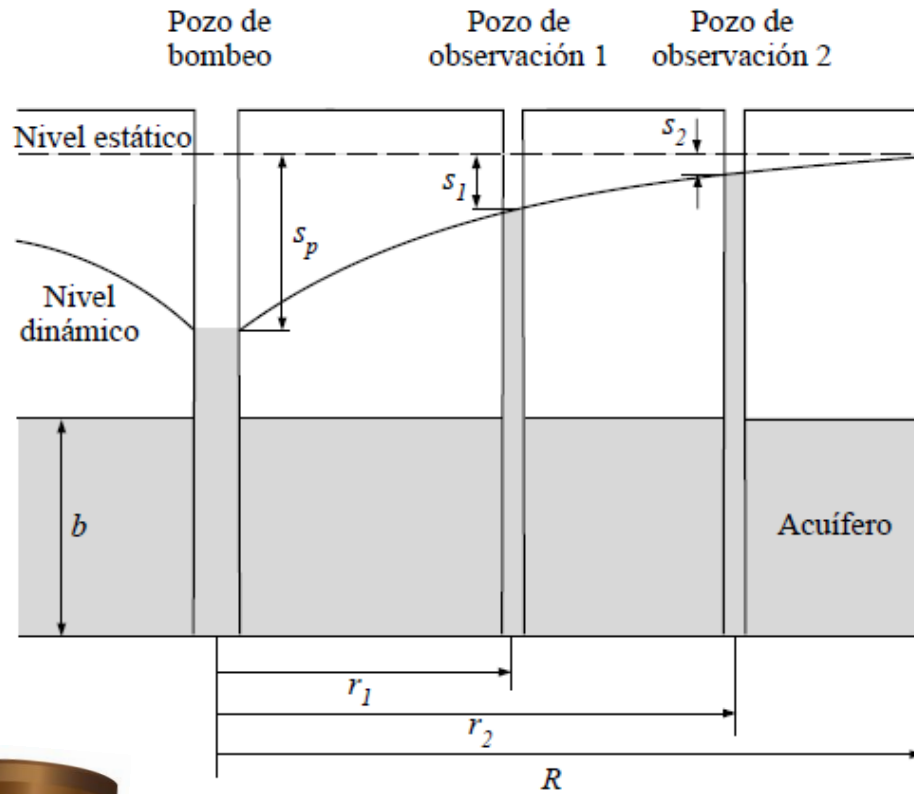


Cálculo del radio del cono ("radio de influencia"): Basta calcular la distancia a la que el descenso es 0. Para ello, tomaremos la pareja de valores: $r_2 = R$; $s_2 = 0$, con lo que la fórmula resulta:

$$s_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_1}$$

Obs: $s(R)=0$

Ecuación de Theis: Régimen transitorio



$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Función de pozo:

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

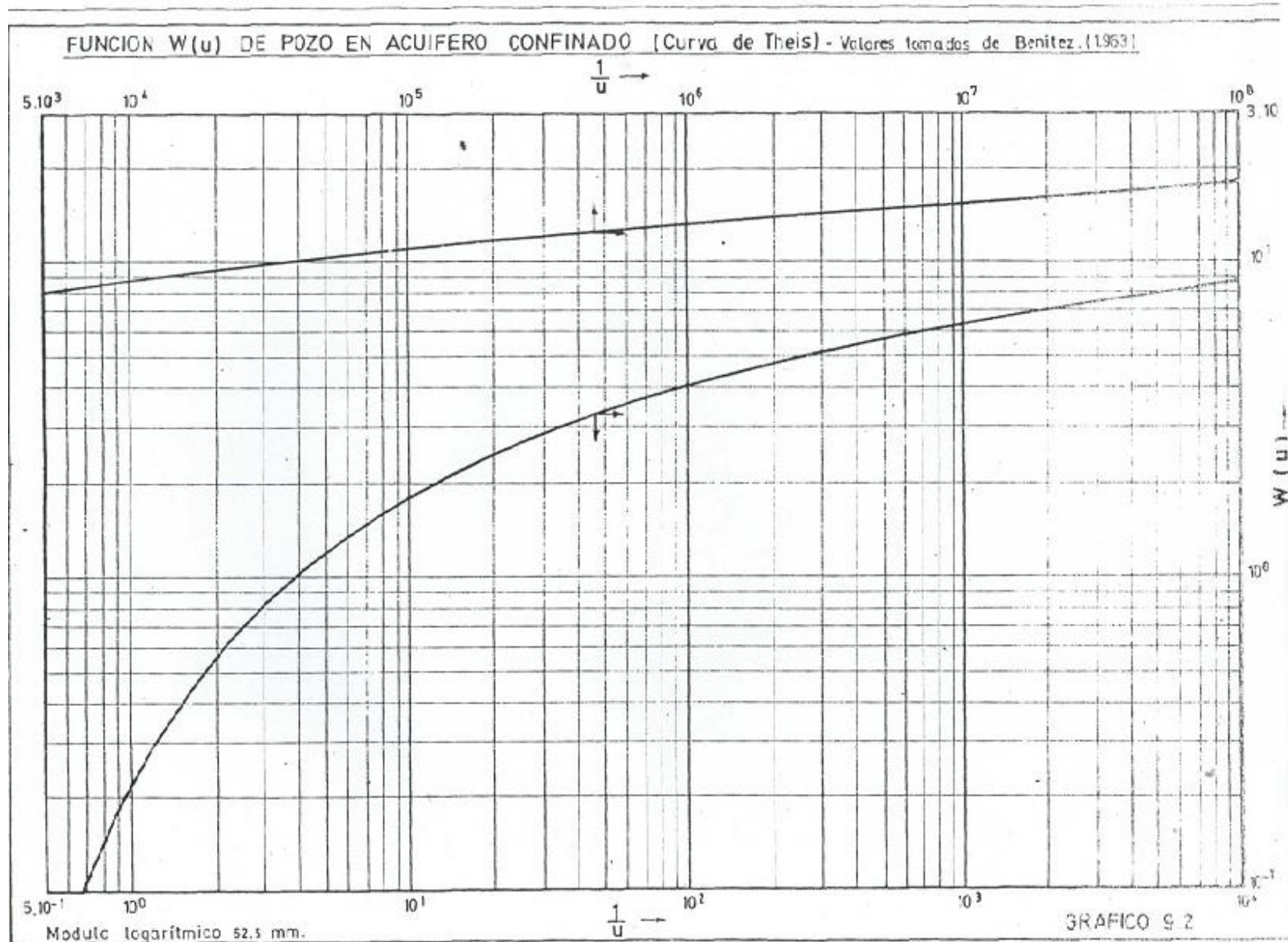


$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Hoja bilogarítmica

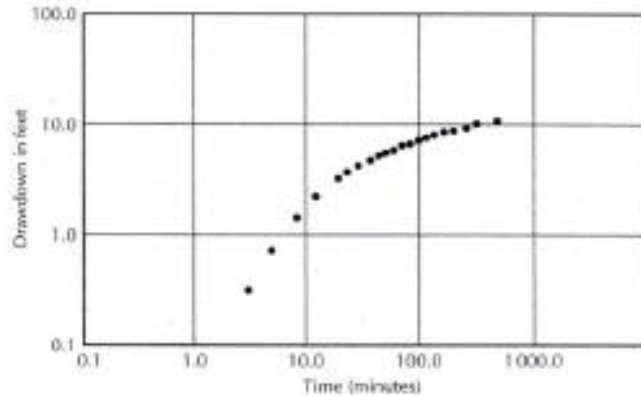
A blank logarithmic grid paper (Hoja bilogarítmica) with a grid of squares. The grid is composed of 10 major columns and 10 major rows. Each major column is further divided into 10 minor columns, and each major row is divided into 10 minor rows. A vertical line runs down the center of the grid, separating the first five major columns from the last five major columns. The grid is used for plotting logarithmic data.

Ábaco de Theis

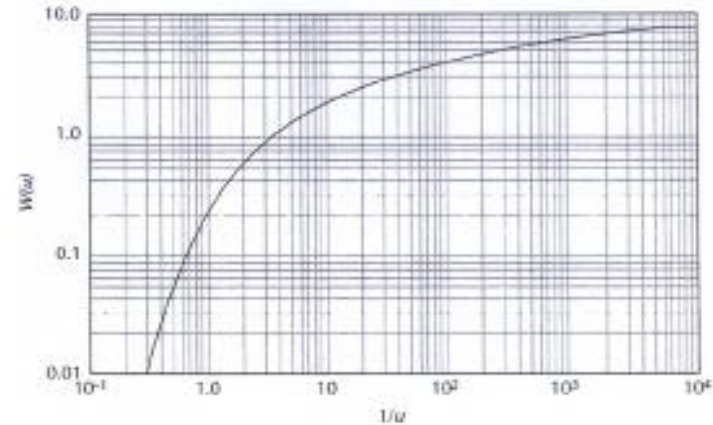


Procedimiento para usar el ábaco

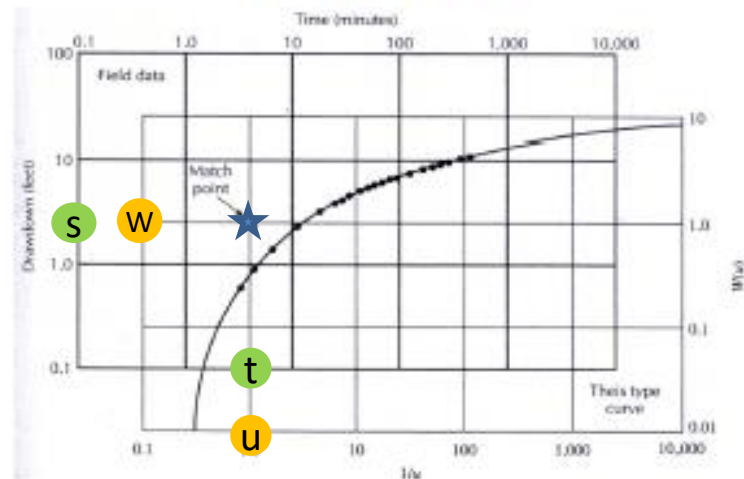
Representación gráfica de los datos



Curva de Theis



Superposición



$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

1) Grafico s vs t en hoja bilogarítmica.

2) Hago coincidir la curva de Theis con la curva obtenida del gráfico 1).

3) Selecciono un punto cualquiera.

4) Tomo las parejas de valores del punto seleccionado $[1/u; W(u)]$ y $[t; s]$ en el gráfico correspondiente.

4) Sustituyo estos valores en las siguientes fórmulas de u y $s(W(u))$

5) Despejo T (transmisividad) y S (coeficiente de Alm.)

Aproximación de Jacob

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad \longrightarrow \quad W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \dots$$

Simplificamos suponiendo $u < 0.03$

$$W(u) = -0,5772 - \ln u$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Sustituyendo en la ecuación de Theis se tiene:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

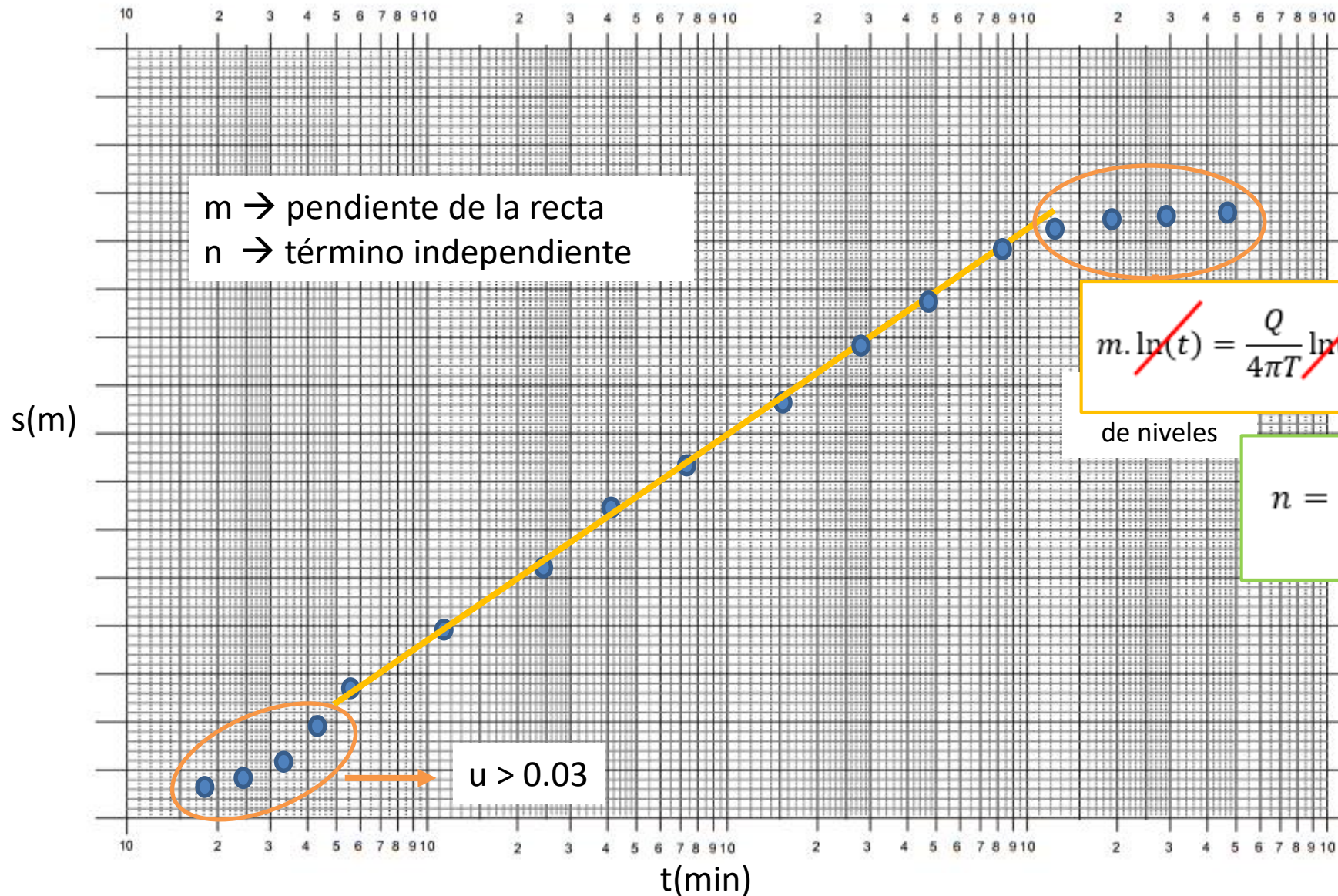
APROXIMACIÓN DE JACOB

- Nos independizamos del ábaco de Theis
- Se utilizará una hoja semilogarítmica para graficar la curva de $s(t)$
- Solución válida para t grandes y/o s pequeños

Hoja semilogarítmica

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$



$$s = \underbrace{\frac{Q}{4\pi T} \ln(t)}_{m \cdot \ln(t)} + \underbrace{\frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2.25 T}{r^2 S}\right)}_n$$

$$m \cdot \cancel{\ln(t)} = \frac{Q}{4\pi T} \cancel{\ln(t)} \Rightarrow m = \frac{Q}{4\pi T} \Rightarrow T = \frac{Q}{4\pi m}$$

de niveles

$$n = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25 T}{r^2 S} \Rightarrow S = \frac{2.25 T}{r^2 \cdot e^{\frac{4\pi T n}{Q}}}$$

$$s = m \cdot \text{Log}(t) + n$$

Relación útil: $\text{Ln}(x)/\text{Log}(x)=2.3$

$$m \cdot \log(t) = \frac{Q}{4\pi T} (2.3 \log(t))$$

Resolución de ejercicio 6 Práctico 2:

Ejercicio 6

La tabla a continuación muestra los resultados de un ensayo de bombeo de un día en un acuífero cautivo. El caudal extraído fue de $6 \text{ m}^3/\text{min}$ y las medidas se efectuaron en un pozo a 50m de distancia. El diámetro del pozo de bombeo es de 10"

a) Determinar los parámetros hidrogeológicos del acuífero. Resolver utilizando Theis y aproximación de Jacob.

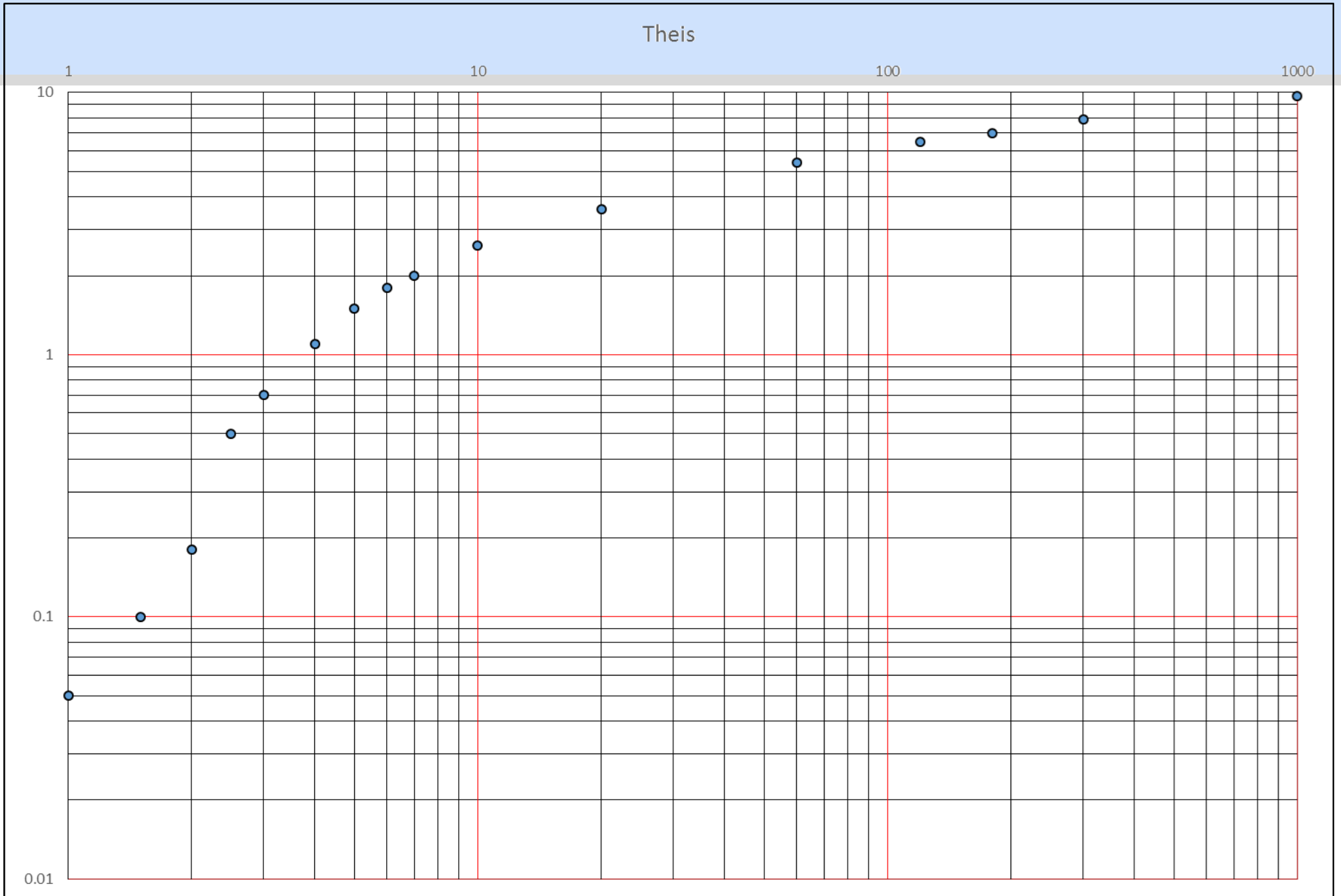
b) Determinar el caudal máximo que puede brindar el acuífero luego de un extenso período de bombeo, si el descenso máximo observado en el pozo es de 15m y el descenso observado en el piezómetro luego de estabilizados los niveles es de 12m.

Tiempo (min)	Descensos (m)
1	0,05
1,5	0,1
2	0,18
2,5	0,5
3	0,7
4	1,1
5	1,5
6	1,8
7	2
10	2,6
20	3,6
60	5,4
120	6,5
180	7
300	7,9
1000	9,7

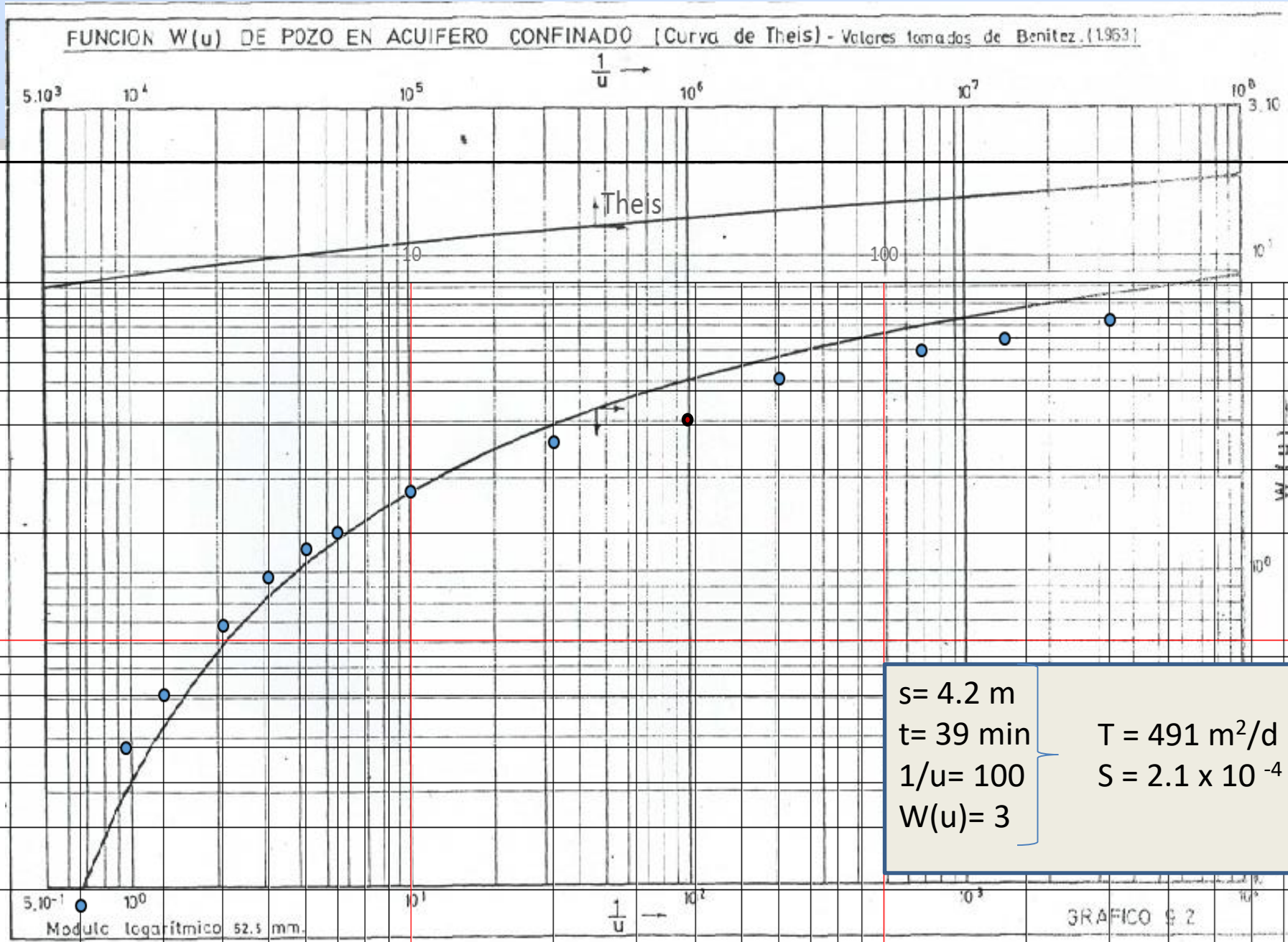
a1) Usando Theis:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$



a1) Usando Theis:

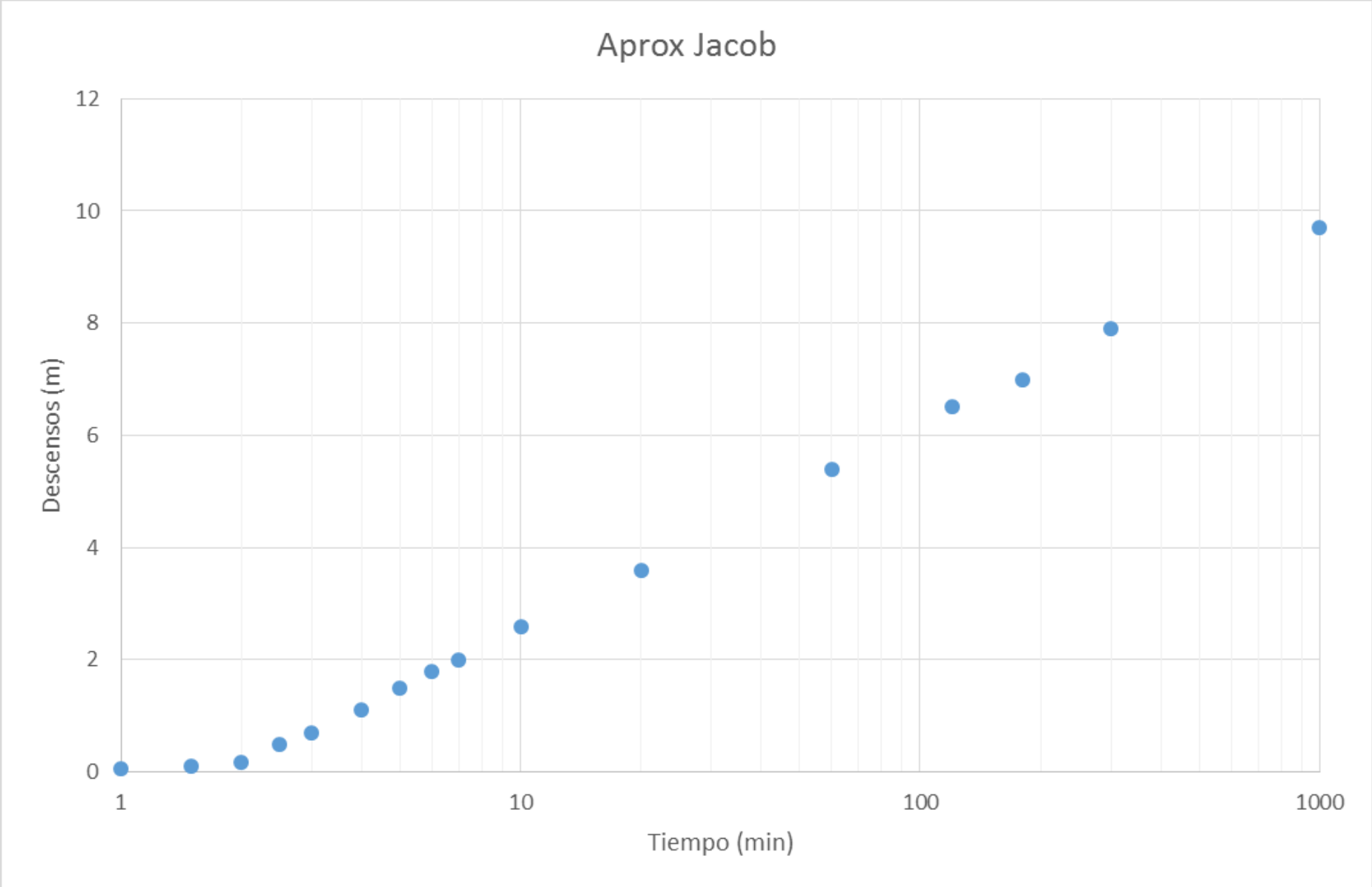


$s = 4.2 \text{ m}$
 $t = 39 \text{ min}$
 $1/u = 100$
 $W(u) = 3$
 $T = 491 \text{ m}^2/\text{d}$
 $S = 2.1 \times 10^{-4}$

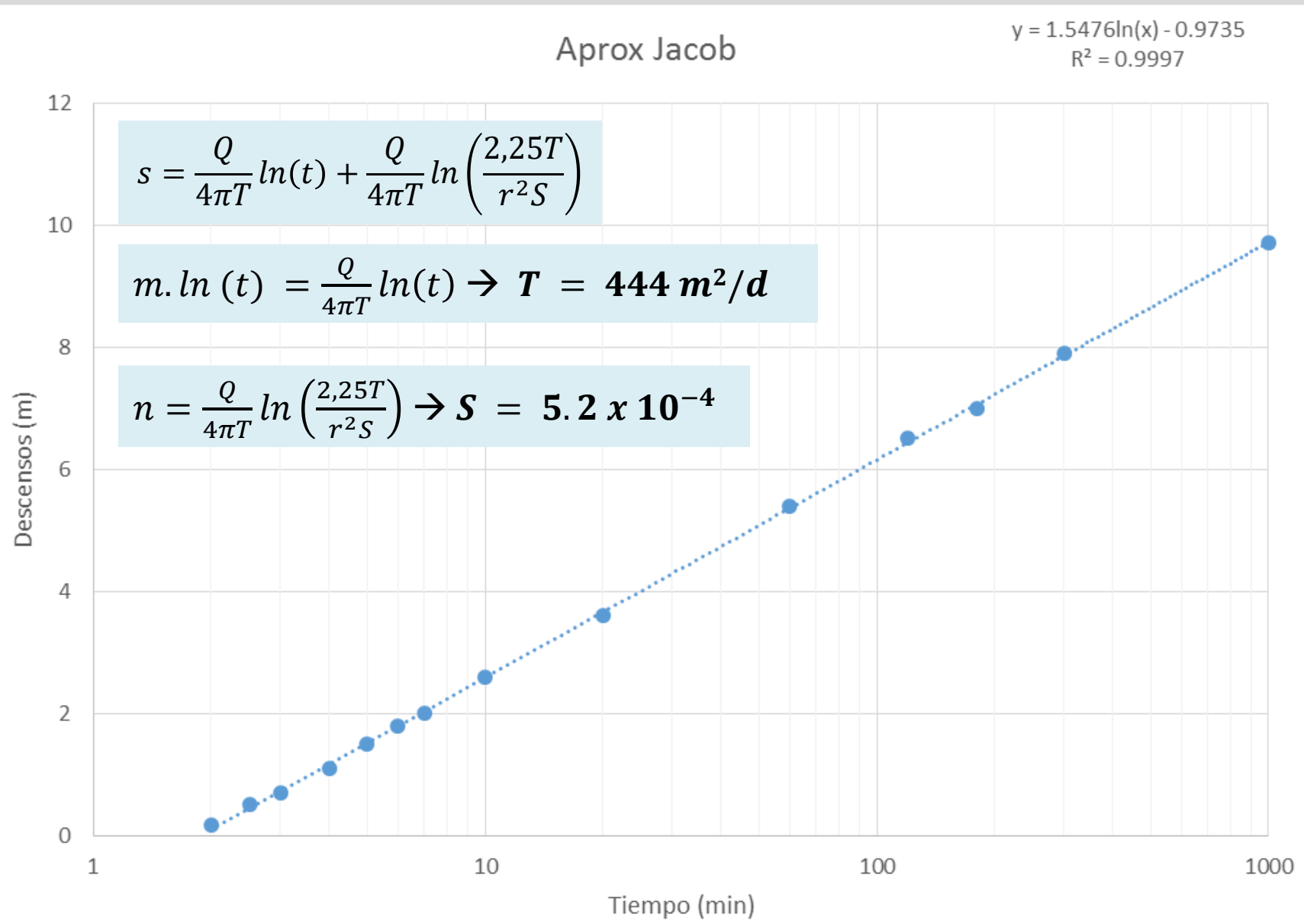
$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

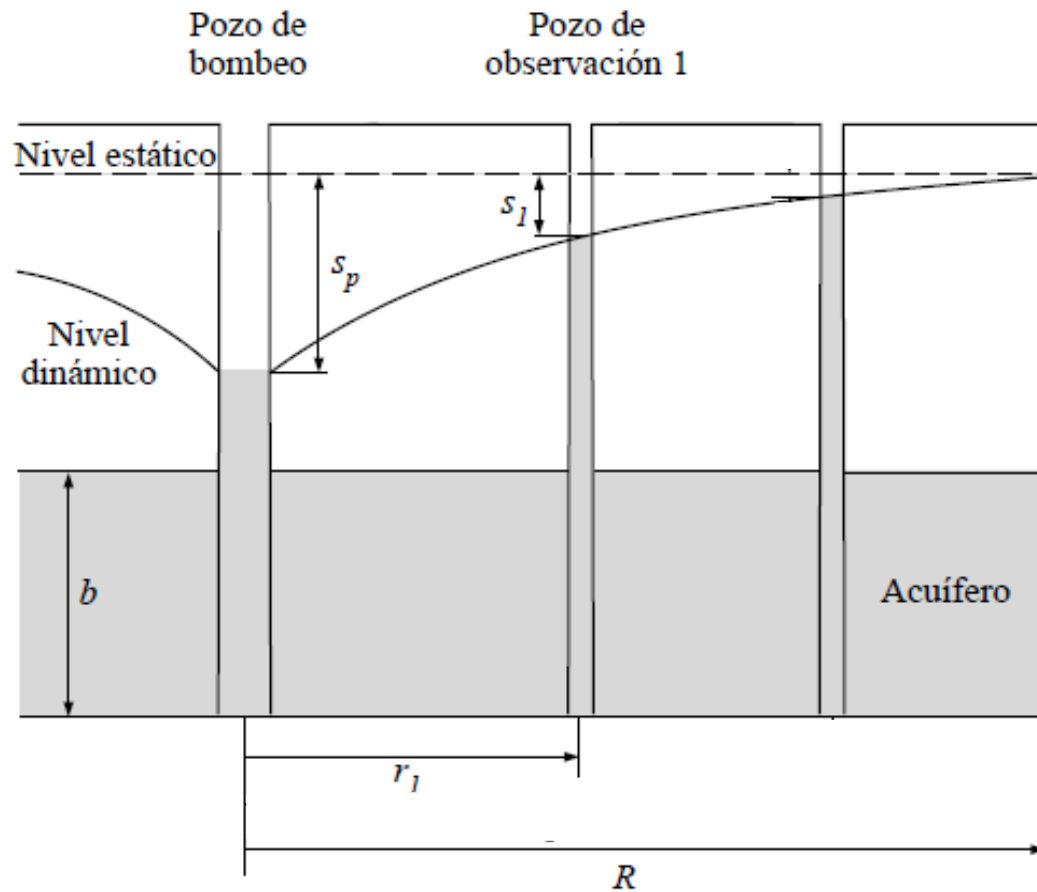
a2) Usando la Aproximación de Jacob:



a2) Usando aprox. Jacob:



b)



Spozo = 15 m

$S_1 = 12$ m

rpozo = 5" x 0.0254 m = 0.127 m

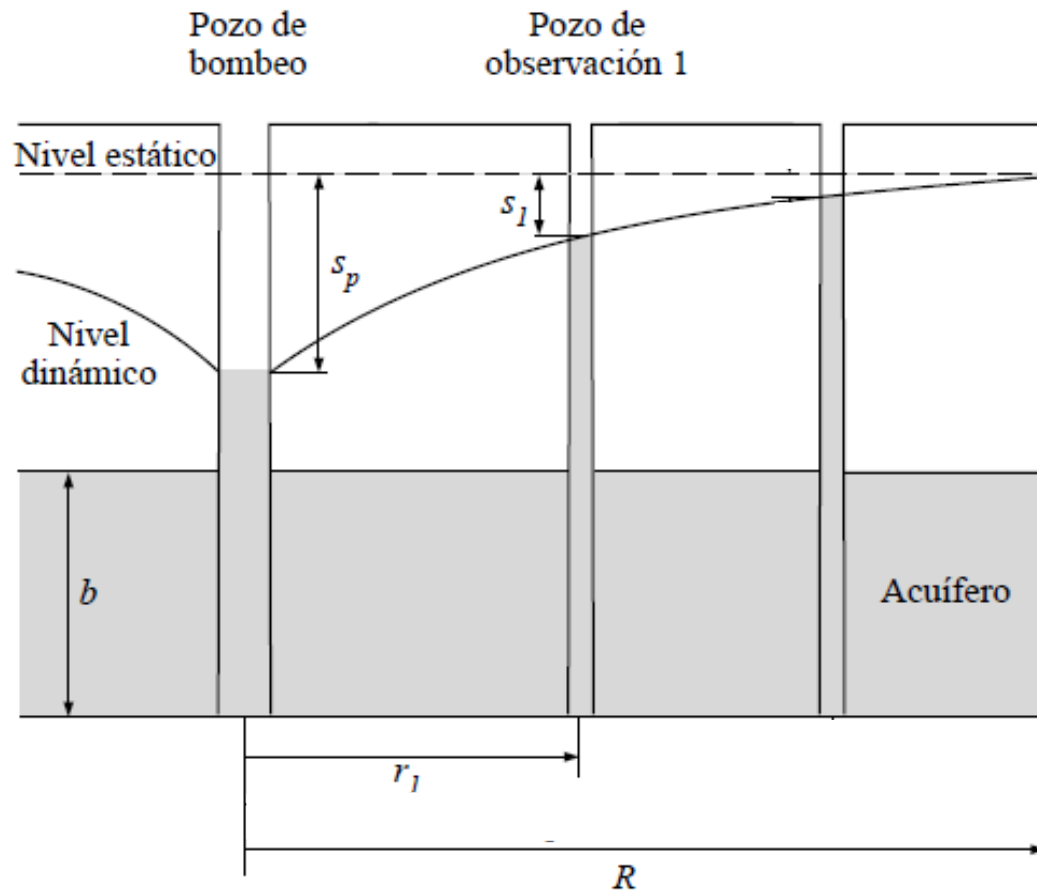
$r_1 = 50$ m

$T = 444$ m²/d

$Q_{max} = ? \rightarrow$ problema estacionario

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

b)



El radio de influencia (R) es la distancia radial desde un pozo de bombeo donde el descenso es efectivamente cero durante un tiempo determinado.

Bear (1979) muestra que la ecuación de Cooper y Jacob para la reducción conduce a la siguiente fórmula simple para calcular el radio de influencia, $R(t)$, de un pozo de penetración total que extrae un caudal constante en un acuífero confinado infinito sin fugas:

$$R(t) = 1.5 \sqrt{Tt/S}$$

$$S = 5,2 \times 10^{-4}$$

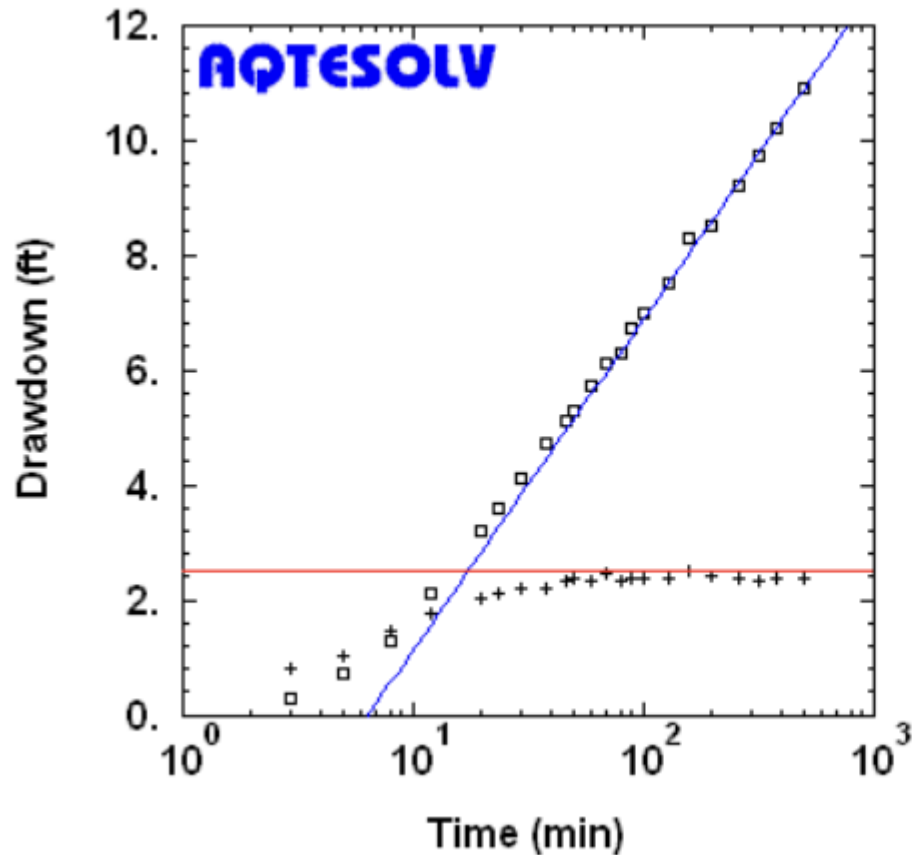
$$T = 444 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$t = ? \longrightarrow \text{Suponemos } t = 1 \text{ día}$$

$$R(1 \text{ día}) = 1386 \text{ m}$$

AQTESOLV

- <http://www.aqtesolv.com/demo.htm>
- HydroSOLVE



Obs. Wells

□ Well 1

Aquifer Model

Confined

Solution

Cooper-Jacob

Parameters

$T = 1.01E+4$ gal/day/ft

$S = 2.0E-5$

¡Muchas Gracias por su atención!

¿Preguntas?

