

144

TRABAJO N. 13

a

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

CASILLA 10465 — TELEFONO 30121

AGUSTINAS 785 — 5.º PISO

SANTIAGO



**FUNCIONAMIENTO POTENCIAL DE ACUIFEROS Y POZOS  
determinado por medio de la prueba de bombeo**

**conocimiento esencial para  
interpretar las informaciones  
de terreno**

**POR LORENZO BARRELA S.**

**Ingeniero U. de Chile**

**Chile  
1961**

# I N D I C E

## INTRODUCCION

## PRIMERA PARTE

Cuidado y Precisión en la Prueba de Bombeo

Poros de Observación

Suposiciones Fundamentales

Bombeo continuado

Gráficos construidos en base a La Prueba de Bombeo

Utilidad de las Curvas del Comportamiento Hidráulico

Simplificación de la Curva "Tiempo-Depresión"

Transmisibilidad

Curva "Distancia-Depresión"

Cambios en el Gasto

Interferencia

Diferentes periodos "t" de Bombeo continuado

## SEGUNDA PARTE

Respecto de las Suposiciones Fundamentales

Predicción de la Depresión

Deducciones Geofísicas

A menudo existe una Recarga

Recarga proveniente de un río

Infiltración vertical

"Espejo de Agua" con inclinación



## INTRODUCCION

Basicaremos en capítulo especial a la parte de la "Teoría de la Hidráulica del Pozo", que trata sobre la prueba de bombeo y las conclusiones que se pueden extraer de sus resultados.

La prueba de bombeo es una operación que, para aportar, informaciones dignas debe ser operada y dirigida por personal con base matemática tal, que le permita formar conciencia de la trascendencia que el más leve error o descuido tendrá en las especulaciones hidráulicas que emanan de ella.

En una palabra, la prueba de bombeo es de vital importancia para el conocimiento de acuíferos y pozos; es la que permite penetrar los secretos de su mecanismo.

He considerado conveniente ordenar los conocimientos del tema presente, antes de la definición y redacción del temario que vendrá a constituir el segundo informe sobre el Agua Subterránea de Santiago.

La interpretación de los datos de terreno y la selección de los mismos requieren un conocimiento elemental de las normas a seguir en las operaciones de una Prueba de Bombeo, como así mismo, de las bases teóricas en que se apoya la teoría de la Hidráulica Subterránea.

# INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

CASILLA 10465 - TELEFONO 30121

AGUSTINAS 785 - 5.º PISO

SANTIAGO



**PRIMERA PARTE**



## CUIDADO Y PRECISION EN La Prueba de Bombeo

La condición esencial que se debe cumplir al practicar una prueba de bombeo, es realizarla con precisión y acuciosidad. Esto significa medir con exactitud durante las operaciones las fluctuaciones del bombeo o Gasto; los niveles del agua en el acuífero y los tiempos. Tanta finura es indispensable pues, a base de las informaciones que se obtengan de la prueba de bombeo se confeccionaran cartas y gráficos que, interpretados técnica y competentemente, explicarán el mecanismo que rige el comportamiento del acuífero y del pozo que se bombea.

Las mediciones descuidadas e imprecisas conducen, por lo general, a conclusiones erróneas. Mientras con más cuidado y precisión se conduzcan las operaciones mismas de la prueba, de mayor utilidad resultará el cuadro gráfico representativo del comportamiento del pozo o del acuífero que podremos extraer de las informaciones proporcionadas por la prueba.

En general, para la mayoría de los objetivos, la prueba debe conducirse a bombeo o Gasto constante. Es de mucha importancia controlar permanentemente la constancia de dicho gasto. Debe tomarse nota de cualquier cambio inevitable que haya que efectuar en el valor del Gasto y anotar igualmente, el tiempo que se ocupe en dicho cambio. Así mismo, el tiempo exacto de partida y parada de la bomba.

Las curvas representativas o explicativas del comportamiento que podemos elaborar a base de la prueba de bombeo, muestran los cambios de la Depresión producidos durante el tiempo que dura el bombeo. Por esta razón, una condición esencial a cumplir será la anotación exacta de la hora en que se efectúa cada medición del nivel del agua. El control del tiempo debe efectuarse con relojes de precisión. Se considerará inexcusable el incurrir en cualquier falla o proceder por tanteo en la anotación de los tiempos de las observaciones realizadas.

Debe conocerse la "cota" o "elevación" topográfica del punto "material" en el cual se toman las medidas. A menudo este punto es el borde del "casing" o tubería de revestimiento del pozo.

Cuando no se puede referir la cota del punto de medida al nivel del mar, bastará con referirse a un punto arbitrario de nivelación.



También es de gran utilidad en la recopilación de informaciones destinadas a la composición de las curvas de comportamiento del pozo y del acuífero, la velocidad con la cual se recuperan los niveles del agua una vez detenido el bombeo. Por lo tanto, también debe concederse importancia a las mediciones del nivel del agua efectuadas durante el "Período de Recuperación".

#### POZOS DE OBSERVACION

Si se requieren buenos resultados de una prueba de bombeo, debe disponerse a lo menos de un pozo de observación ubicado a una distancia razonable del pozo que se bombea. Lo más conveniente serán dos o más pozos de observación. Los niveles del agua deberán leerse tanto en el Pozo de Prueba como en cada uno de los Pozos de Observación.

Las lecturas realizadas en varios pozos de observación, ubicados a diferentes distancias del Pozo de Bombeo, proporcionan la mejor de las informaciones para construir curvas que revelen la magnitud de la "interferencia entre pozos" indicando, en consecuencia, un "espaciamiento entre pozos" que será el apropiado para cuando los pozos se pongan en explotación permanente. Sin embargo, los costos de instalación limitan por lo general, el número de pozos de observación a uno o dos. Conviene disponer del mayor número posible de ellos. A menudo se pueden aprovechar como pozos de observación algunos pozos existentes.

#### SUPOSICIONES FUNDAMENTALES

La teoría de la "Hidráulica del Pozo" tal como la ha desarrollado Theis, se basa en la suposición que el acuífero y su comportamiento, se rigen por ciertas condiciones estables. Tales suposiciones son indispensables a fin de hacer posible la expresión matemática de las condiciones que controlan el flujo del agua que llega a un pozo.

La primera parte del presente capítulo se desarrollará en conformidad con la teoría de Theis.

En forma resumida, las suposiciones empleadas al analizar el funcionamiento del pozo o del acuífero son:

- a) En el acuífero o formación transmisora del agua la permeabilidad y demás características son uniformes, tanto en sentido vertical como horizontal.



- b) La formación o acuífero tienen un espesor uniforme
- c) La formación se extiende indefinidamente en todas direcciones alrededor del pozo
- d) La formación no recibe ninguna clase de recarga
- e) El Pozo de Bombeo atraviesa completamente todo el acuífero
- f) El agua fluye desde el acuífero instantáneamente hacia el pozo, sin provocar ningún descenso en el nivel del agua

#### BOMBEO CONTINUADO

"Bombeo Continuo" significa bombear a razón de 24 horas sin dejar lugar para que el nivel de agua se recupere. No es difícil comprender que la Depresión acumulativa de un pozo que sólo se bombeó en forma intermitente, durante parte del período de 24 horas, sea tan diferente de aquellas Depresiones producidas al cabo de 7,30 o 90 días de bombeo ininterrumpido. Así, en un pozo que se bombeó a razón de 12 horas y se deja sin funcionar las otras 12, el nivel del agua tiene la oportunidad de recuperarse durante las últimas 12 horas

Mientras la bomba se mantiene detenida, el nivel del agua no recuperará completamente su "Nivel Estático" o nivel de partida, a menos que exista una recarga del acuífero; de modo que, cuando se reanuda el bombeo, el nivel del agua comenzará a descender, ca da vez, desde un punto ligeramente más bajo que aquel que subsistía al iniciar el primero de los bombeos intermitentes

Si suponemos ausencia de recarga, suposición "d", el nivel deprimido que se obtendría al cabo de 90 días de bombeo intermitente equivaldría posiblemente a la Depresión alcanzada después de 10 días de bombeo ininterrumpido con Gasto constante

#### GRAFICOS CONSTRUIDOS EN BASE a la Prueba de Bombeo

Las curvas gráficas que se pueden trazar a base de los resultados obtenidos en las pruebas de bombeo, pueden ser utilizadas como gráficos representativos o explicativos del funcionamiento, ya sea de un sólo pozo o de una batería de pozos, o bien del acuífero en bombeo

Las informaciones proporcionadas por las pruebas pueden ser presentadas gráficamente de diferentes maneras con el objeto de exponer las distintas características que presenta este campo de la Hidráulica



Se pueden dibujar "Gráficos del Funcionamiento" en diferentes grados de exactitud para explicar lo que ocurre cuando se bombea con diferentes gastos, como también para explicar lo que acontece cuando se bombea continuamente durante periodos distintos de tiempo; asimismo, cuando se opera con un grupo de pozos dispuestos según distintos esquemas o con diferentes espaciamientos entre sí

#### UTILIDAD DE LAS CURVAS DEL comportamiento Hidráulico

Los tipos de curvas gráficas representativas, mencionadas anteriormente, cumplen varias finalidades prácticas. Así, por ejemplo, se pueden determinar los elementos esenciales del diseño de un pozo mayor definitivo, solamente a base de los resultados en las pruebas realizadas en un pozo de explotación pequeño

Se puede determinar la capacidad total de un acuífero demostrando el volumen de agua que cada año se puede bombear de un grupo de pozos

También se puede predecir en uno o más pozos en explotación, la futura depresión del nivel del agua a ocurrir después de cualquier período dado de bombeo continuo

Todo lo anterior permite una selección más o menos exacta del equipo de bombeo que deberá satisfacer las condiciones que se presentarán después de prolongados periodos de bombeo

Es posible también, predecir la interferencia que un pozo nuevo producirá en los ya existentes; o bien, predecir el efecto de otros pozos que se agregarán en el futuro

En la misma forma se puede determinar la existencia de una fuente de recarga que actúa en el acuífero

Ilustraremos lo expuesto con un ejemplo, para lo cual se supondrán las siguientes condiciones:

Pozo de Prueba o Bombeo de 8" - Figura 1

Gasto de Prueba o razón de bombeo  $Q = 30$  l/sog

Período de Bombeo.....  $t = 500$  min

Distancia entre el Pozo de Prueba y un Pozo de Observación  $A = 50$  m

Se controlan los niveles del agua en ambos pozos

NO. 319A. MILLIMETERS. 200 BY 250 DIVISIONS. CODEX BOOK COMPANY, INC., NORWOOD, MASSACHUSETTS. PRINTED IN U. S. A.

POZO DE PRUEBA o

Pozo de Bombeo

POZO DE OBSERVACION "A"

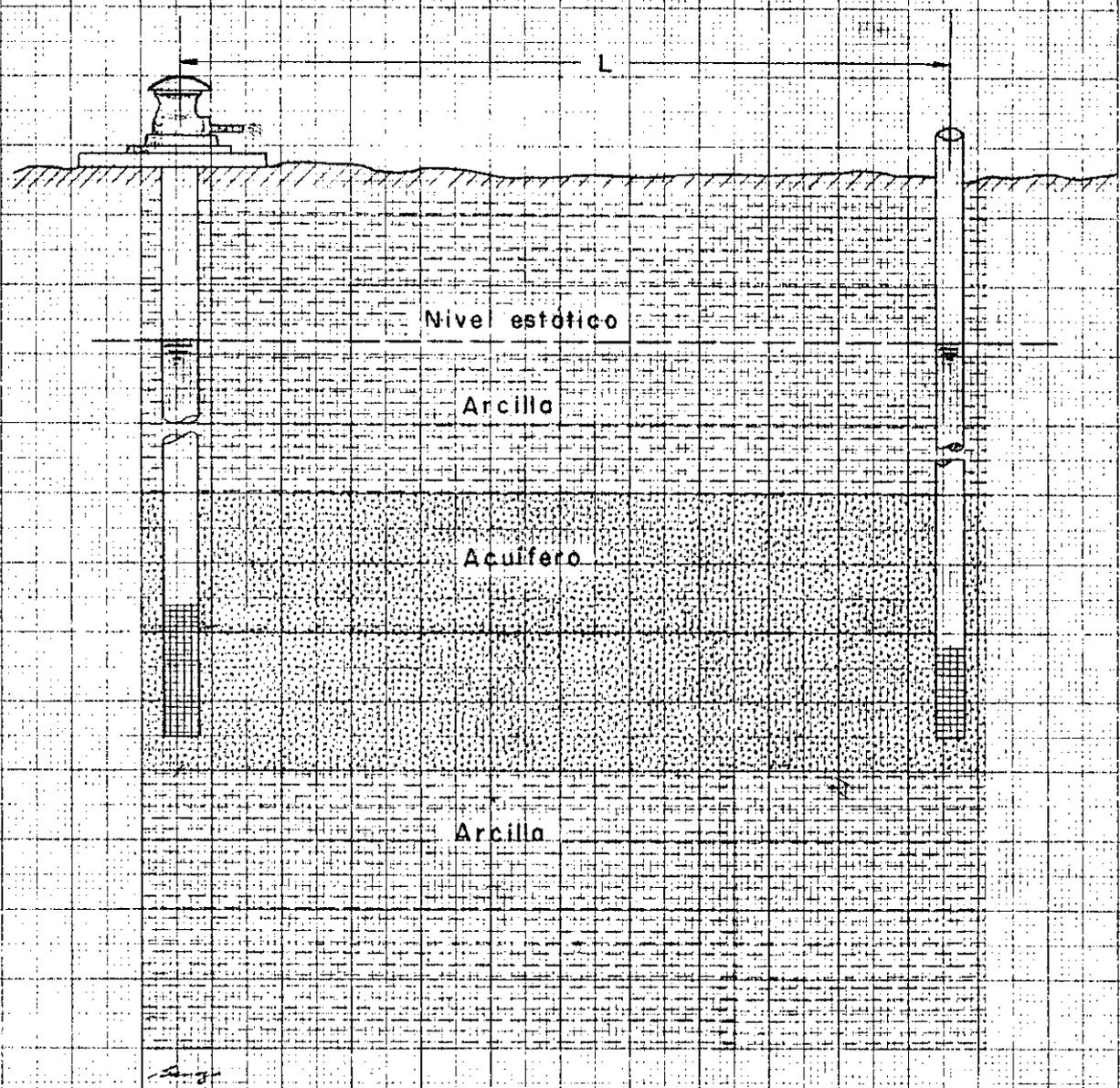


Fig. 1. Pozo de Prueba y pozo de Observacion imaginarios



Una vez terminada la prueba y practicadas las mediciones y observaciones correspondientes, se construye con los datos tomados en el pozo de observación, LA "CURVA DE DEPRESIÓN" O CURVA "TIEMPO-DEPRESIÓN" o CURVA DE AGOTAMIENTO, como también se la denomina (Fig. 2)

Según la práctica para un pozo de las condiciones supuestas resultará una curva semejante a la de la figura 2

Como ya sabemos, por experiencia, es típico de estos fenómenos de la Hidráulica Subterránea, que la Depresión aumenta rápidamente durante los primeros minutos de bombeo para luego adquirir una razón de crecimiento que disminuye a medida que el tiempo transcurre

Las características de los cambios que experimenta la Depresión durante el tiempo de bombeo, tienen un interés especial por cuanto ellas constituyen los elementos que componen el cuadro que revela el comportamiento del acuífero

La forma que adopte la Curva de Depresión depende del valor del Caste mantenido durante la prueba de bombeo, como así también de las propiedades hidráulicas del acuífero

Una vez que aquellos factores hidráulicos han sido determinados, se los podrá emplear como medios para estimar el comportamiento de otros pozos perforados en el mismo acuífero y que se encuentran funcionando en condiciones diferentes a aquellas que prevalecieron durante la prueba de bombeo. Sin embargo, es preciso advertir que la curva "Tiempo-Depresión", tal como se muestra en la figura 2, no se presta para abordar análisis comparativos. Será preciso entonces, emplear otro tipo de gráfico como veremos a continuación

#### SIMPLIFICACION DE LA CURVA "TIEMPO-DEPRESION"

Si los datos ahora los registramos en un tipo de diagrama diferente al usado hasta ahora, empleando por ejemplo uno en el cual la escala horizontal o abscisas representen el logaritmo del tiempo correspondiente a cada lectura de la depresión, entonces obtendremos una curva "Tiempo-Depresión" muy simplificada como la que se muestra en la figura 3, construida en papel semi-logarítmico. Con este procedimiento toda la curva "Tiempo-Depresión", excepto la primera parte de ella, se convierte en una recta

Si en la misma forma que para el pozo de observación construímos en papel semi-logarítmico la curva "Tiempo-Depresión" para el pozo de bombeo, llegaremos a comprobar que su curva también se convierte en una línea recta. Esto ocurrirá siempre que las anotaciones y mediciones tomadas en el terreno hayan sido realizadas con exactitud. Sin embargo, es necesario tener presente que, a causa de las vibraciones de la bomba y de las variaciones momentáneas que experimentan el Caste, las medidas del nivel del agua practicadas en el Pozo de Bombeo, son generalmente menos precisas que aquellas tomadas en los pozos de observación, razón de la

curva "TIEMPO - DEPRESION"  
para el  
Pozo de Observacion A

D  
E  
P  
R  
E  
S  
I  
O  
N

Pozo de Bombeo  
operado con  
Gasto Q

T  
I  
E  
M  
P  
O  
 D  
E  
 B  
O  
M  
B  
E  
O - min

Fig.2 El tiempo se mide desde el momento en que comienza a funcionar la bomba

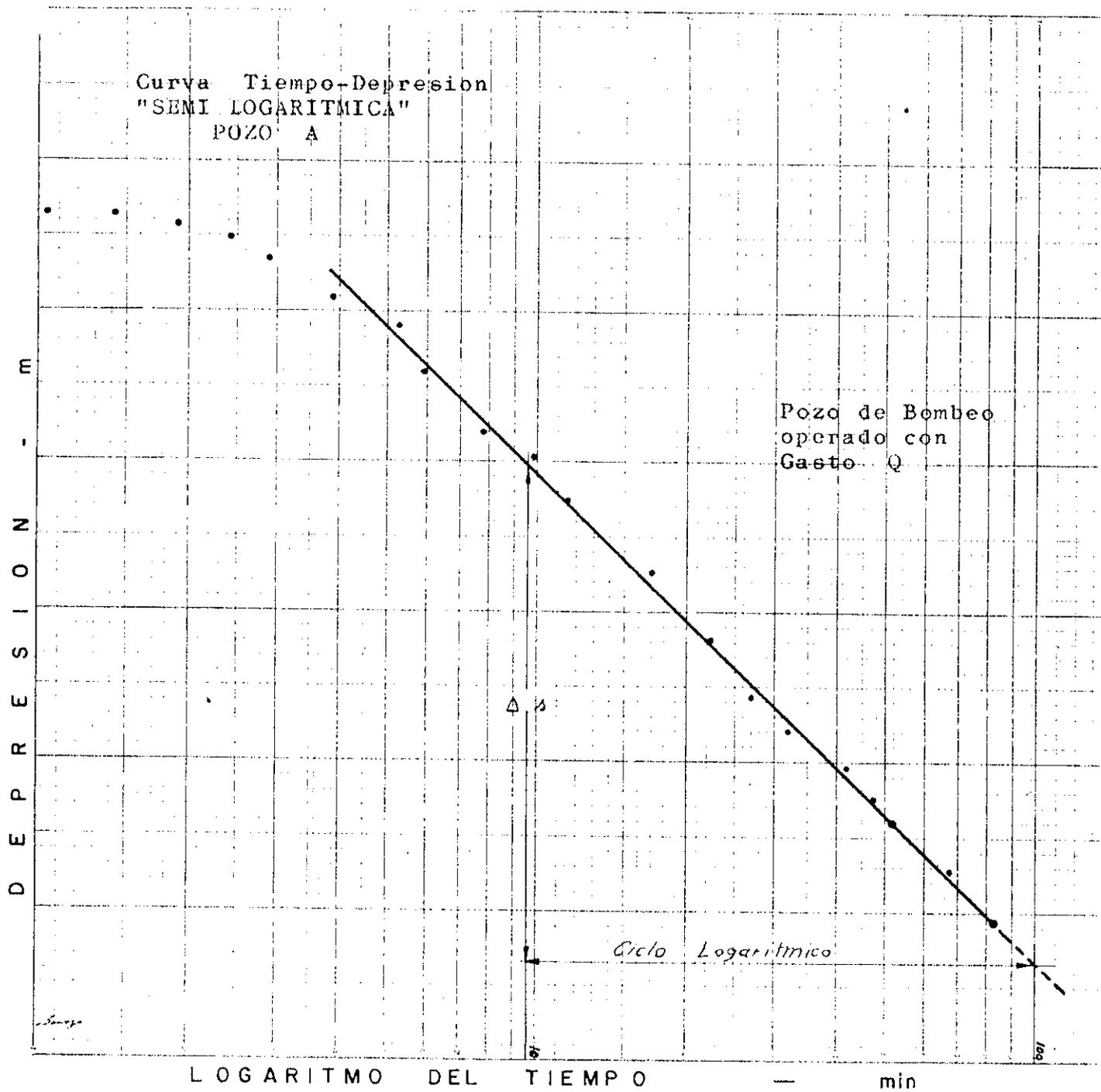


Fig.3 construida con los mismos datos de la Fig.2 con la unica diferencia que aqui las abcisas son el "logaritmo del tiempo"



cual se infiere la conveniencia de trabajar preferentemente con los datos de los pozos de observación.

**CURVA "TIEMPO-DEPRESION"**  
en gráfico semi-logarítmico  
para el pozo A

Al analizar la curva "Tiempo-Depresión" lo primero que nos interesará en ella es su "PENDIENTE", "GRADIENTE" o "PALLINACION" respecto de la horizontal. La gradiente expresa el cambio experimentado por la Depresión, medida en metros, durante un lapso de tiempo igual a un "CICLO LOGARITMICO". Un "Ciclo Logarítmico" representa la distancia que hay en la escala de los tiempos, del gráfico semi-logarítmico, entre dos valores del tiempo cuya razón entre ellos es igual a 10 (Fig 3). La gradiente que acabamos de definir se designa con el símbolo  $\Delta s$  en la fig. 3.

Por experiencia se sabe que existen dos factores que determinan la gradiente de la "curva" recta de la figura 3. Uno de ellos es la razón de bombeo o Gasto mantenido durante la prueba de bombeo. El otro factor es la TRANSMISIBILIDAD del acuífero. La transmisibilidad es una de las características de mayor importancia de una formación transmisora de agua subterránea

### TRANSMISIBILIDAD

Llegados a este punto, debemos definir el término y explicar su significado en la Hidráulica Subterránea:

"La transmisibilidad" de un acuífero es el valor que se obtiene al multiplicar la Permeabilidad-media de los materiales que integran la formación del acuífero, por el espesor total de la misma formación"

Por otra parte tenemos que:

"La permeabilidad de un material es la razón con la cual el agua fluirá, bajo la acción de una gradiente hidráulica de 100% a través de la unidad de sección de dicho material"

En consecuencia resulta que:

"Transmisibilidad es la razón con la cual el agua fluye, bajo la acción de una gradiente hidráulica de 100%, a través de una sección vertical del acuífero que tiene por altura el espesor total del mismo y por ancho la unidad de longitud"



7.

Esta fórmula se expresa matemáticamente por la fórmula

$$T = P \cdot e \quad 1/\text{seg/m} \quad (1)$$

donde:

$$T = \text{Transmisibilidad en } 1/\text{seg/m}$$

$$P = \text{Permeabilidad media en } 1/\text{seg/m}^2$$

$$e = \text{Espesor del acuífero en m}$$

Para determinar la Permeabilidad  $P$  del acuífero, es necesario conocer la transmisibilidad  $T$  la cual se puede determinar prácticamente a base del valor del Gasto  $Q$  con que se operó la prueba de bombeo y, gráficamente, a base del valor de la gradiente hidráulica  $\Delta s$  de la curva "Tiempo-Depresión" semi-logarítmica correspondiente a dicha prueba. El ejemplo lo da la figura 3. La fórmula empleada es la siguiente:

$$T = 2.64 \frac{Q}{\Delta s} \quad \text{gal/min/pie} \quad (2)$$

o bien:  $T = 19,63 \frac{Q}{\Delta s} \quad 1/\text{seg/m} \quad 54,5 \text{ (log)} \quad (3)$

si hacemos:  $C = 19,63$

teniremos:  $T = C \cdot \frac{Q}{\Delta s} \quad (4)$

La fórmula (2) fue introducida por Theis en la Hidráulica Subterránea como un medio para determinar la transmisibilidad a partir de los datos proporcionados por la RECUPERACION que experimenta el nivel del agua desde el instante en que se corta el bombeo. La fórmula original es

$$T = 2.64 \frac{Q}{\Delta s} \cdot \log_{10} \frac{t'}{t''} \quad \text{gal/min/pie} \quad (5)$$

donde  $t'$  es el tiempo transcurrido desde la puesta en marcha de la bomba y  $t''$  donde se detiene. Como en la definición  $\Delta s$  se considera un período de tiempo  $t$  igual al "ciclo-logarítmico", es decir, que la razón entre los dos tiempos que limitan al ciclo es igual a 10, resulta entonces:

$$\frac{t'}{t''} = 10$$

de donde  $\log_{10} \frac{t'}{t''} = 1$

en consecuencia la fórmula (5) se reduce a la (2).



8.

En conclusión, para la determinación de Permeabilidad del acuífero a base de la prueba de bombeo podremos utilizar la fórmula (1) de donde despejamos P:

$$P = \frac{T}{\phi} \quad (5)$$

pero, introduciendo (4) en (5), resulta la fórmula final

$$P = C \frac{Q}{\Delta s \cdot e} \quad \text{l/seg/m}^2 \quad (7)$$

donde, como ya se dijo, Q lo da la prueba de bombeo; A s lo da la curva "Tiempo-Depresión", el símbolo e es el espesor total del acuífero

Como un apéndice agregaremos la fórmula que determina el Gasto Q:

La Fórmula de Dupuit fundada en la ley de Darcy es

$$Q = P \times \Delta s \cdot A \cdot t \quad \text{l/seg} \quad (8)$$

Tal es la fórmula que nos da el Gasto en l/seg que, con una gradiente hidráulica  $\Delta s$  en metros, fluye durante t minutos a través de una sección A medida en metros cuadrados

Para acuíferos de características uniformes y de gran extensión en todas direcciones, el valor de T permanece constante. En este caso ideal, la gradiente de la curva "Tiempo-Depresión" (T-D) es función directa del Gasto Q. Esto está en concordancia con la fórmula (4) que también se puede presentar así

$$\Delta s = C \cdot \frac{Q}{T} \quad (9)$$

Esta fórmula nos permitirá determinar, a base de una sola prueba de bombeo, la orientación de una serie de curvas T-D semi-logarítmicas como la de la figura 3, para diferentes valores dados de Q. La condición esencial es que se trate de un acuífero extenso y uniforme. Posteriormente se demostrará la utilidad que reporta este procedimiento



**CURVA "DISTANCIA-DEPRESION"**

El segundo paso en la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de bombeo es construir la curva "DISTANCIA-DEPRESION". Esto se puede conseguir midiendo el nivel del agua en tres o más pozos de observación simultáneamente y registrando sus valores en un gráfico en función de la distancia al Pozo de Bombeo. Un trabajo semejante al representado en la figura 4 nos ofrecerá la traza ya familiar del "CONO DE DEPRESION" originado alrededor de ese pozo

Ahora, se repite aquí el hecho que, si computamos en gráfico semi-logarítmico los valores de la Depresión contra el logaritmo de la distancia, figura 5, la mayor parte de la curva resultante también será una recta en la misma forma que ocurre para el gráfico Tiempo-Depresión

La nueva recta, se CURVA levemente a una distancia considerable desde el pozo de bombeo, pero aquí nos preocuparemos solamente de la parte recta de ella. Esta forma de construir gráficamente la traza del CONO de Depresión simplifica mucho su comparación relativa con otros gráficos

Es fácil advertir ahora que podemos definir la "gradiente hidráulica  $\Delta S$  de la curva Distancia-Depresión logarítmica (D-D)" en la misma forma que se hizo para la curva Tiempo-Depresión (T-D)

La fórmula de Thiem que es una modificación de la de Dupuit es la siguiente

$$P = \frac{Q}{2\pi c (d^m - d^n)} (\log_e 1^m - \log_e 1^n) \quad (10)$$

o también  $(d^m - d^n) = \frac{\log_e 1^m - \log_e 1^n}{2\pi c P} \quad (11)$

Esta fórmula supone el acuífero ideal de que ya se ha tratado en páginas anteriores; o sea, una formación uniforme y extensa donde P y c son constantes.

La fórmula se aplica para el caso de una prueba de bombeo con dos pozos de observación (A y B) ubicados a las distancias  $1^m$  y  $1^n$  del pozo que se bombea.  $d^m$  y  $d^n$  son las Depresiones respectivas medidas simultáneamente en ellos.

Como los pozos de observación son estáticos el numerador de la fórmula (11), al igual que su denominador, es también constante.

Por lo tanto, podemos escribir la fórmula (11) de la siguiente manera:

" TRAZA del CONO de DEPRESION "

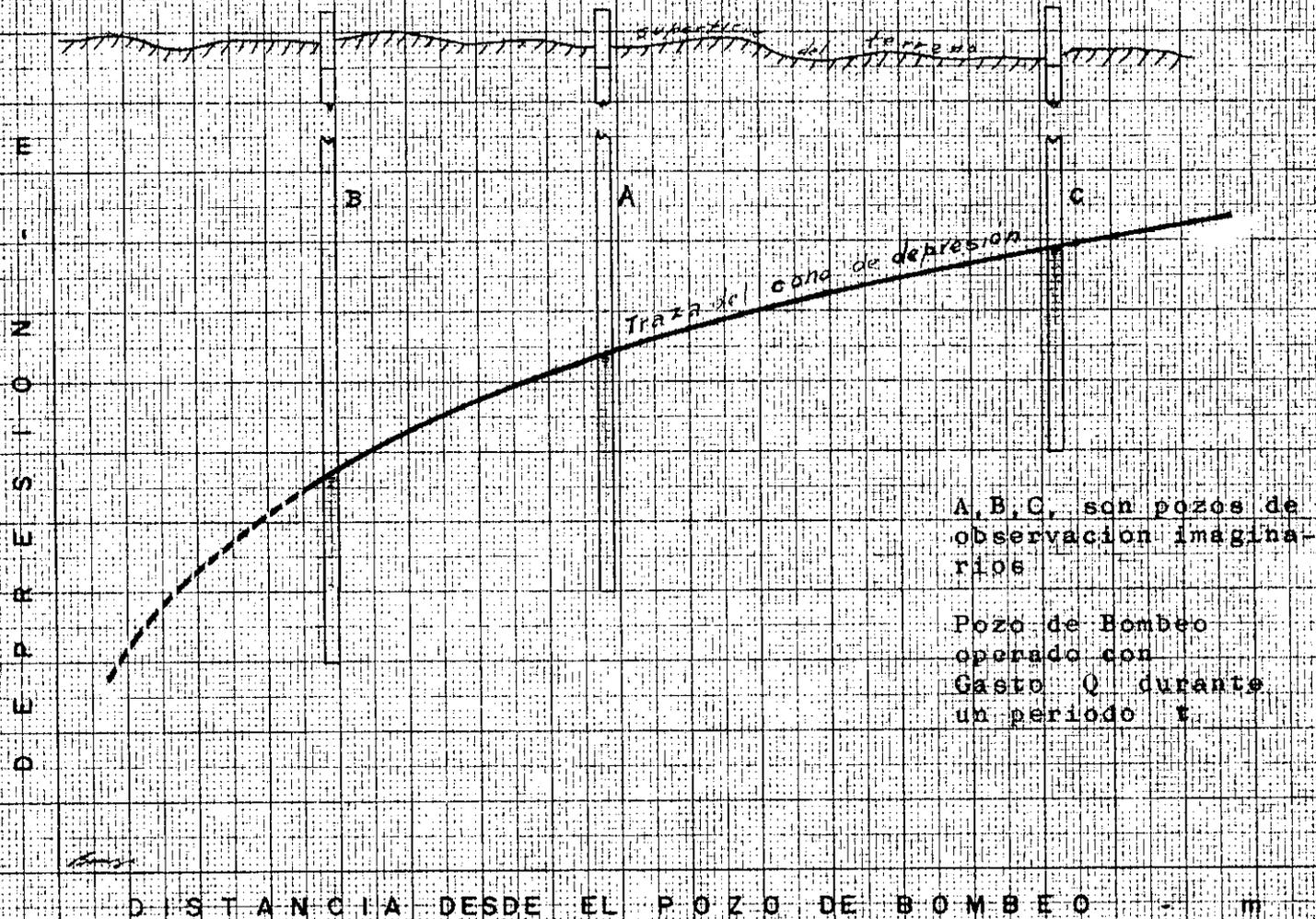


Fig. 4 Trazo o Perfil del Cono de Depresion construido en base a las lecturas de la Depresion tomadas simultaneamente en los 3 pozos A, B, C.

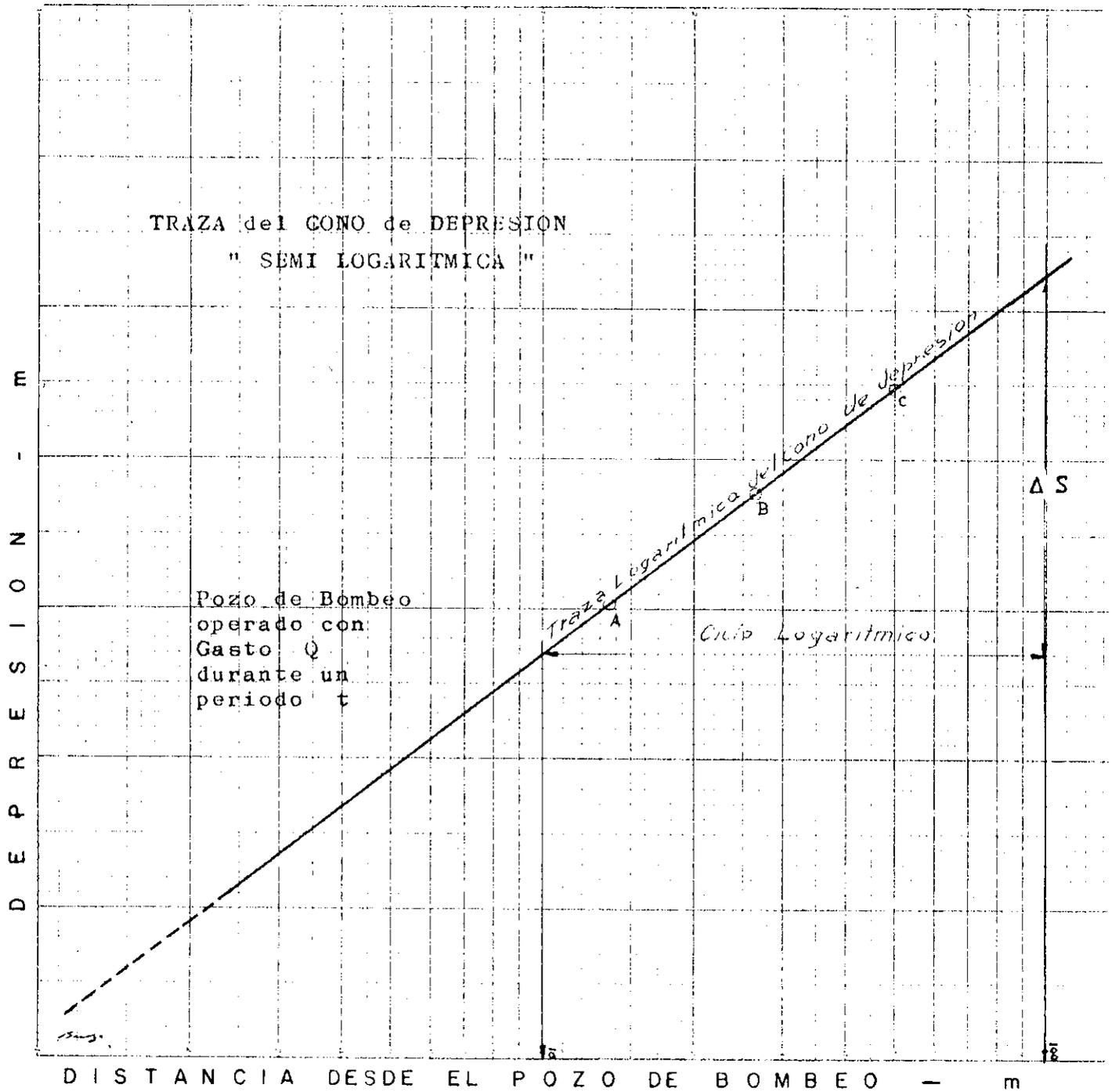


Fig.5 es la misma curva de la Fig.4 pero, llevando aqui en las abscisas, el "logaritmo de las distancias" de los pozos de observacion al Pozo de Bombeo. Las Depresiones se midieron al cabo de "t" minutos de bombeo continuado



$$(d' - d'') = Q \cdot k \quad (12)$$

donde

$$k = \frac{\log_e l'' - \log_e l'}{2.7 \cdot e \cdot P} = \text{constante}$$

Si volvemos a las figuras 4 y 5 notaremos que la única variable que determina la conformación de la curva es la Depresión y, lógicamente, lo será también la gradiente hidráulica  $\Delta s$  que es una expresión de la Depresión.

Ahora bien, interpretando la fórmula (12) desarrollada para el caso que analizamos, se deduce que la gradiente hidráulica  $\Delta s$ , de la traza logarítmica del Cono de Depresión, varía en función directa con el Gasto  $Q$  mantenido durante el bombeo, o sea que,

$$S = \text{función de } Q \quad (13)$$

Sin entrar en demostraciones matemáticas enunciaremos un principio de la hidráulica, establecido entre las gradientes de las curvas semi-logarítmicas T-D y D-D correspondientes a un mismo acuífero cuando se bombea un pozo con un Gasto  $Q$  constante:

"La relación entre las gradientes  $\Delta s$  de la curva semi-logarítmica Tiempo-Depresión y la gradiente  $\Delta S$  de la curva Distancia-Depresión, es una razón constante igual a 2"

Relación que se expresa por la fórmula

$$\frac{\Delta S}{\Delta s} = 2$$

o también

$$\Delta S = 2 \Delta s \quad (14)$$

Esta fórmula proporciona un mediosencillo para construir la traza Distancia-Depresión, una vez determinada la gradiente  $\Delta s$  para la curva Tiempo-Depresión

De todo lo anterior se infiere que con una sola prueba de bombeo será posible deducir varias trazas del Cono de Depresión, como la que deduciremos más adelante en la figura 6, correspondientes a diferentes valores del Gasto  $Q$ , pues en conformidad con las fórmulas (13) y (14) que acabamos de trazar, será posible determinar la gradiente  $\Delta s$  de una nueva curva para un valor dado del Gasto. Con ello tendríamos la dirección de dicha curva, la cual es una recta, de modo que, para ubicarla en su posición nos bastará con fijar en el plano uno sólo de sus puntos; a continuación veremos cómo se consigue ésto, pero antes explicaremos otras definiciones que son previas



Para abordar las referidas explicaciones debemos hacer un preámbulo sobre los fenómenos que se originan al cambiar los valores del Gasto, con que se bombea el Pozo de Prueba, y sobre lo que significa el término "Efecto de Interferencia"

#### CAMBIOS EN EL GASTO

Siempre queremos tener idea de cuál sería la Depresión que se originará con valores del Gasto, distintos al que se mantuvo durante la Prueba. Por otra parte, esta información es indispensable para poder calcular el "Efecto de Interferencia" que un pozo produce sobre otro al operar el primero de ellos con diferentes Gastos

En páginas precedentes la fórmula (9) nos ofrecía el medio para conocer la gradiente de las curvas T-D semi-logarítmicas en función del Gasto del Pozo de Bombeo

Respecto al efecto de interferencia se nos plantea el caso de querer saber qué efectos producirá nuestro Pozo de Prueba, si se bombea ahora con un Gasto  $Q'$ , sobre un pozo A, ubicado a una distancia L de él. La respuesta la tendremos gráficamente cuando dibujemos la curva "Distancia-Depresión" correspondiente (ejemplo en Fig. 6)

Veamos primero otro principio de la "Hidráulica del Pozo" que dice:

"La Depresión en cualquier punto de los alrededores del Pozo de Bombeo, varía en razón directa con el Gasto  $Q$ ". Ello está en concordancia con la fórmula (8) de páginas anteriores, pues:

$$Q = \Delta s \cdot P \cdot A$$

$$\text{o sea} \quad \Delta s = Q \frac{1}{P \cdot A} \quad (8)$$

Si aplicamos esta expresión a nuestro caso en que los dos Pozos de Bombeo y de Observación son vecinos y pertenecen al mismo acuífero ideal tendremos:

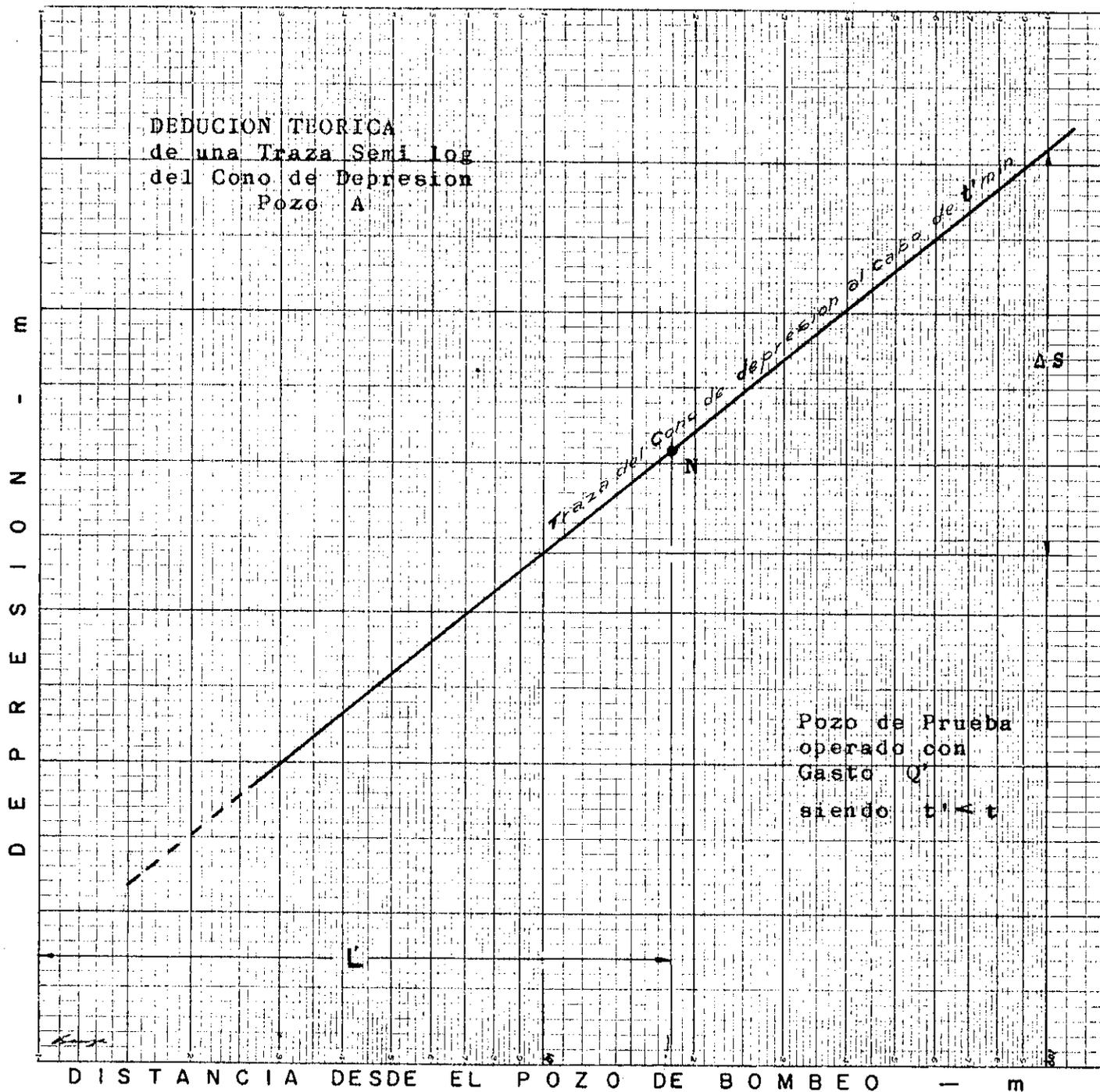


Fig.6 "Traza Semilogaritmica del Cono de Depresion" deducida en base a la Gradiente  $A_s$  de la curva T-D semilog de la Fig.3 y, de las coordenadas "N" de un Pozo de Observacion A de la Fig.3



12

X

Bombeando con Gasto  $Q^*$

$$\Delta s^* = Q^* \frac{1}{P A}$$

Bombeando con Gasto  $Q$

$$\Delta s = Q \frac{1}{P A}$$

Dividiendo miembro a miembro

$$\frac{\Delta s^*}{\Delta s} = \frac{Q^*}{Q}$$

Luego

$$\Delta s^* = \frac{Q^*}{Q} \cdot \Delta s \quad (15)$$

Como estamos tratando con curvas semi-logarítmicas rectas, podremos reemplazar la gradiente por la depresión:

$$s^* = \frac{Q^*}{Q} \cdot s \quad (16)$$

La fórmula (16) establece para un mismo pozo la relación matemática entre los Gastos  $Q$  y sus Depresiones  $s$  correspondientes, cuando el pozo se bombea con Gastos diferentes

La depresión  $s$  es el valor de la ordenada de los puntos de la curva de la fig. 3. Las abscisas correspondientes las da el tiempo

En otras palabras, si en la curva de la fig. 3 tomamos un punto cualquiera  $N$ , su ordenada será la Depresión  $s$ . Ahora bien, la fórmula (16) nos dice que si el Pozo de Prueba se bombeara con un Gasto  $Q^*$ , en vez de  $Q$ , la nueva ordenada  $s^*$  de un Punto  $N$  será calculable por la referida fórmula (16)

Con ésto estaremos en condiciones de fijar completamente la posición de la curva que se pretende deducir en la fig. 6, a base de la simple variación del valor del Gasto

Resumiendo las consideraciones comenzadas en la página 10, para analizar las posibilidades de deducir teóricamente curvas Distancia-Depresión (fig. 6) para distintos Gastos en base de una sólo Prueba de Bombeo, tendremos:



- a. El Pozo de Prueba se bombea prácticamente con un Gasto constante  $Q$  durante un período  $t$
- b. Las Depresiones se controlan en el Pozo de Observación A ubicado a la distancia  $L$  del anterior
- c. Con los datos tomados se construyan las curvas semi-logarítmicas Tiempo-Depresión de la fig. 3 y Distancia-Depresión de la fig. 5
- d. De los análisis de dichas curvas tanto como de las fórmulas matemáticas desarrolladas, se concluye la posibilidad de deducir teóricamente otras curvas similares a las anteriores para valores supuestos  $Q'$  del Gasto, distintos al Gasto  $Q$  con que se practicó la Prueba
- e. Tales deducciones se consiguen, primero, haciendo uso de la fórmula (14) y de la fig. 3 con lo cual se calcula la Gradiente  $As'$  de la nueva curva. Segundo, empleando la fórmula (16) con la fig. 3, se obtiene la ordenada  $s'$  de un punto N de dicha curva. Con estos dos elementos la nueva curva (fig. 6) queda totalmente determinada y fijada en el plano

Las conveniencias de orden práctico y económico, para nuestros estudios, de estas relaciones hidráulicas son evidentes.



### **INTERFERENCIA**

En cuanto al fenómeno del interferencia que produce el bombeo de un pozo en los distintos puntos del acuífero, a su alrededor, la Depresión, que es la expresión física de esa interferencia, se puede leer en las curvas D-D de la figura 7.

Ahora, si imaginamos en uno de esos puntos cercanos al pozo de bombeo un pozo de observación a que se somete también a un bombeo con gasto  $Q'$ , la Depresión total que experimentará su nivel acuífero será la resultante de la suma de la Depresión causada por el Pozo de Prueba más la proveniente de su propio bombeo.

Es obvio, que a Gastos  $Q$  iguales de dos pozos, corresponderán Depresiones recíprocas exactamente iguales. Con un criterio similar se pueden considerar los efectos de interferencia producidos por varios pozos espaciados a distancias diferentes, es decir, la interferencia total que recibe un pozo, está integrada por la suma de las interferencias parciales provenientes de los pozos que lo rodean.

Hay que tener presente que las comparaciones y discusiones que se acaban de hacer sobre los "Efectos de Interferencia" entre pozos, suponen la condición básica que el pozo de prueba ha sido bombeado en forma continuada durante un período de tiempo " $t$ " y que ellas son válidas para el acuífero durante todo el período  $t$  de duración de la prueba de bombeo.

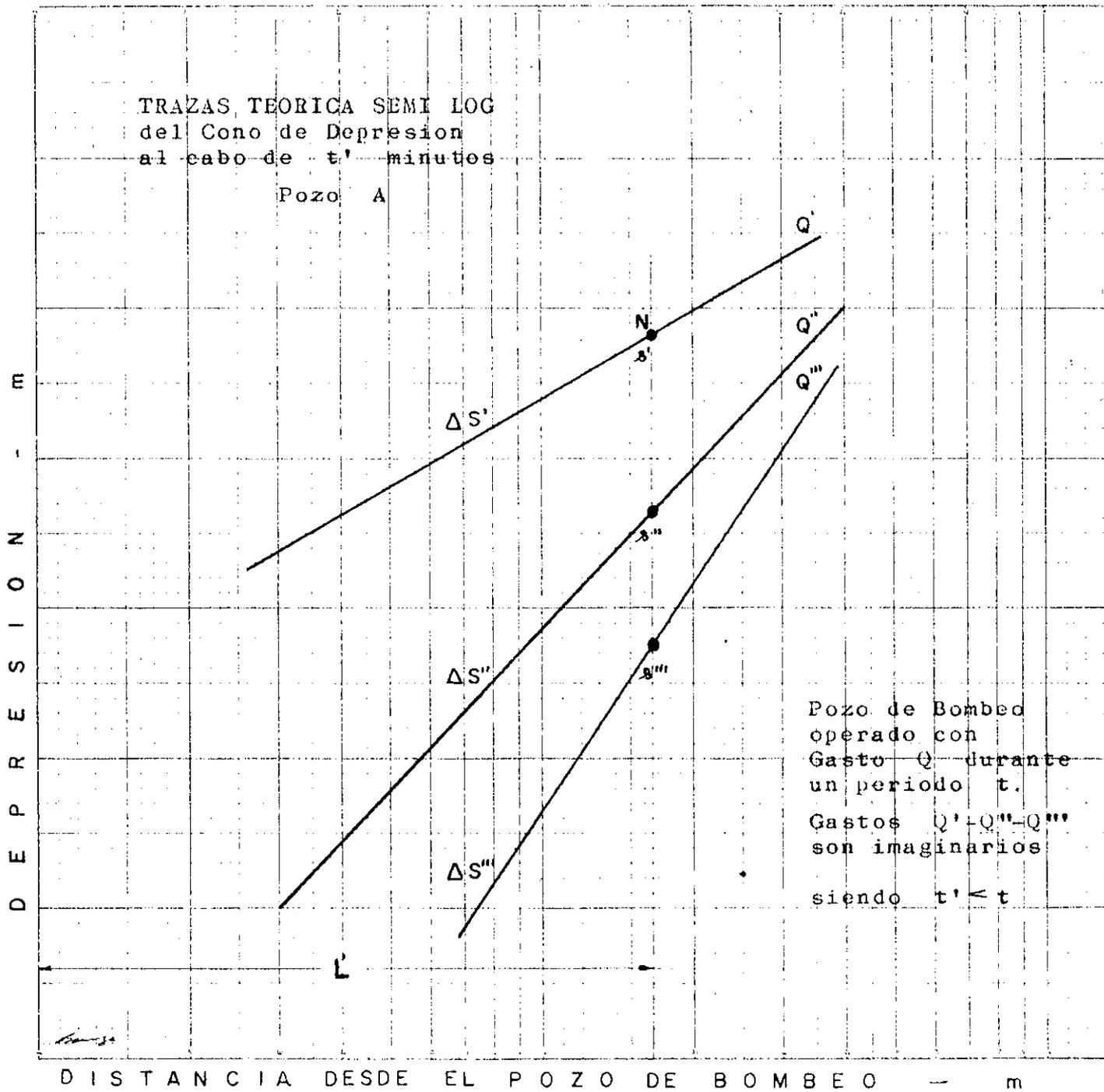


Fig.7 Trazas SEMILOGARITMICAS del Cono de Depresion deducidas teoricamente en base a los datos (Fig.5), de una sola prueba de bombeo operada a Gasto  $Q$  durante un periodo  $t$ . Estas trazas exponen condiciones del Acuífero al cabo de un tiempo de bombeo  $t'$  siendo  $t'$  menor que  $t$



**DIFERENTES PERIODOS "t"**  
de bombeo continuado

Podría ser necesario conocer la magnitud de la depresión e interferencia que un pozo de bombeo producirá al cabo de distintos periodos "t" de bombeo en diversos puntos alrededor de él

En la curva T-D semi-logarítmica de la figura 3, se observa que el tiempo de bombeo no afecta a la gradiente hidráulica  $\Delta s$  de la curva, excepto en casos excepcionales. En consecuencia, la curva semi-logarítmica D-D que representa las condiciones del acuífero al cabo de un periodo t de bombeo continuado tendrá la misma gradiente  $\Delta s$  que otras curvas construidas para los tiempos  $t^1$ ,  $t^2$ , etc. En otras palabras, esas curvas o rectas serán paralelas como lo muestra la figura 8. Por otra parte, estas curvas D-D tienen todas las misma gradiente  $\Delta s$  que la figura 6

Para comprender con claridad las curvas del tipo de la figura 8, daremos una explicación gráfica por medio de dicha figura

Nos encontramos en el campo de un acuífero ideal en el cual se bombea, prácticamente, un Pozo de Prueba con un Costo Q durante un periodo de tiempo t. Se miden las depresiones en puntos cercanos al pozo de prueba. Tales puntos corresponden a pozos de observación A, B y C ubicados a distancias  $l^1$ ,  $l^2$  y  $l^3$  del primero

Se trata ahora, de deducir teóricamente la interferencia, o sea, la Depresión que se produciría en estos puntos A, B y C al final de periodos  $t^1$ ,  $t^2$ , etc., de bombeo del pozo de prueba. Como ya se discutió, la solución la dan las curvas semi-logarítmicas de la figura 8 con la cual ilustraremos un ejemplo:

- 1) al cabo de un tiempo  $t^1$  de bombeo, se producirá en el pozo A ubicado a  $l^1$  metros del pozo de bombeo, una Depresión dada por el punto E. Al final de un periodo  $t^2$  la depresión será la dada por el punto F
- 2) lo mismo vale para un punto del acuífero como podría serlo el pozo C ubicado a la distancia  $l^3$  del Pozo de Bombeo. Al cabo de  $t^1$  minutos de bombeo la Depresión en dicho lugar será la ordenada de H y al cabo de  $t^2$  minutos la Depresión será N, etc.

Para construir una de tales rectas para un determinado "t", basta con obtener entonces la Depresión o la ordenada de un punto H, F o E (Fig. 9) a base de una curva o bien, a base de puntos ya conocidos y determinados como lo son por ejemplo el pozo A y las figuras 3 y 6

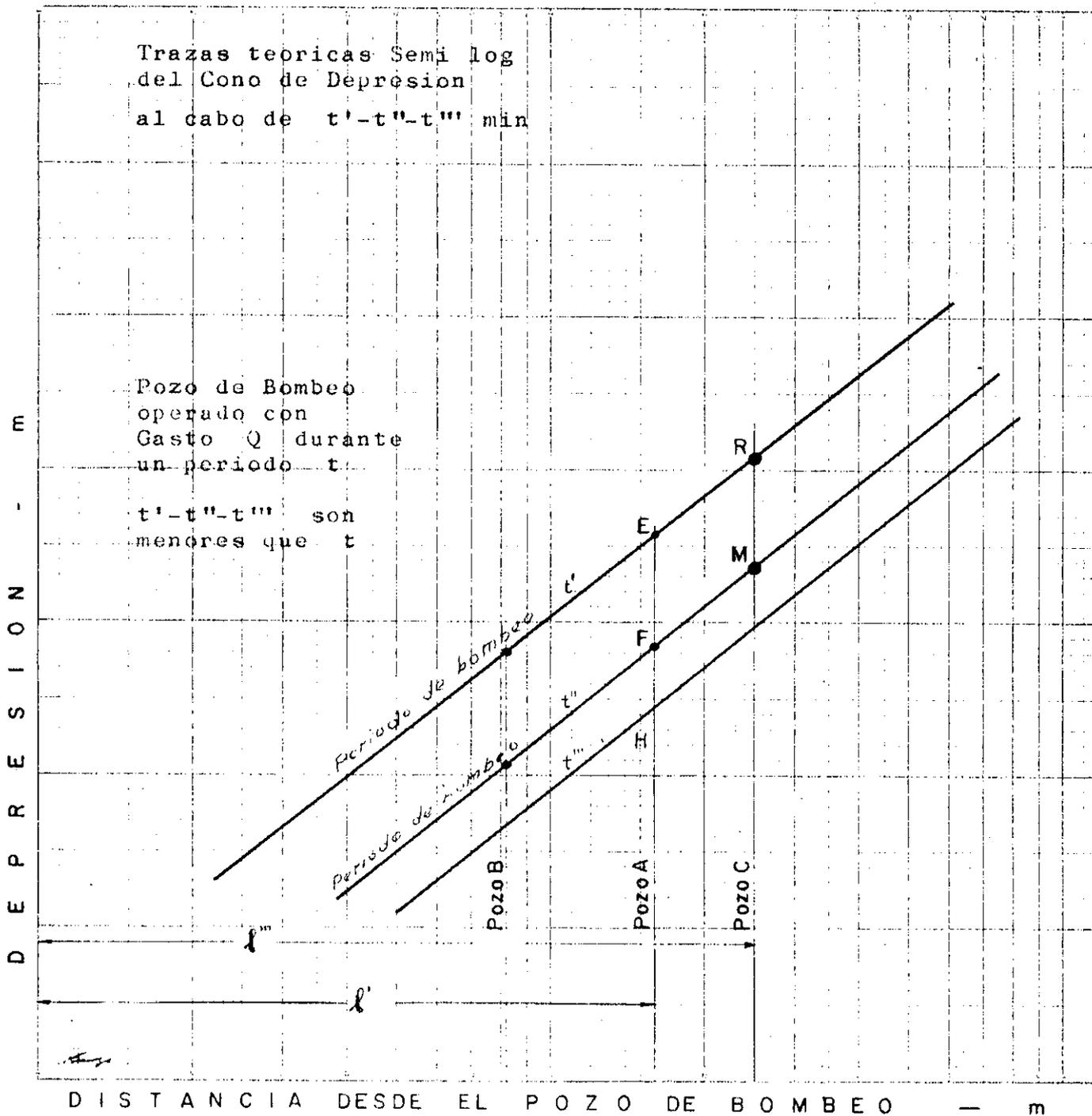


Fig.8 cuevas "Distancia-Depresion Semilogaritmicas" deducidas teoricamente de las informaciones de la prueba de bombeo sostenida con Gasto  $Q$  durante  $t$  minutos (Fig.3)

Estas trazas exponen las condiciones del Acuifero al cabo de  $t'$ ,  $t''$ ,  $t'''$  minutos de bombeo siendo estos periodos menores que  $t$

# INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

CASILLA 10465 - TELEFONO 30121

AGUSTINAS 785 - 5.º PISO

SANTIAGO



15.

Como ya se dijo, la gradiente  $\Delta S$  de todas las curvas de la figura 8 tienen el mismo valor que la gradiente de la curva de la figura 6 para el pozo A. Ahora bien, las ordenadas de H, F e H, es decir, las Depresiones en el pozo A para cualquier tiempo t, los proporciona la curva T-D semi log de la figura 3 para dicho pozo. Con estos elementos se pueden deducir todas las curvas que se requieran semejantes a las de la figura 8.

# INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

CASILLA 10465 - TELEFONO 30121

AGUSTINAS 785 - 5.º PISO

SANTIAGO



**SEGUNDA PARTE**



Antes de continuar repetiremos aquí las "suposiciones fundamentales" de Theis:

- a. En el acuífero o formación transmisora del agua la Permeabilidad y demás características son uniformes, tanto en sentido vertical como horizontal
- b. La formación o acuífero tienen un espesor uniforme
- c. La formación se extiende indefinidamente en todas direcciones alrededor del pozo
- d. La formación no recibe ninguna clase de recarga
- e. El Pozo de Bombeo atraviesa completamente todo el acuífero
- f. El agua fluye desde el acuífero instantáneamente hacia el pozo sin provocar ningún descenso en el nivel del agua

Valdría la pena que en este punto revisemos tales suposiciones pues, teniéndolas presentes estaríamos en situación de ofrecer una explicación más completa sobre los gráficos del comportamiento que nos quedan por exponer.

La suposición de que el acuífero no recibe Recarga desde ninguna fuente durante el período de bombeo, pretendió establecer que el Caste producido por un pozo, proviene completamente de las reservas de agua almacenadas en el acuífero. Esta afirmación podría apoyarse en el hecho que, a medida que transcurre el tiempo de bombeo, la Depresión se incrementa y el Cono de Depresión sigue expandiéndose.

Por otra parte el concepto fundamental "q" permite calcular la Transmisibilidad del acuífero a base de la curva T-D. Se ha establecido que la velocidad con que cambia la depresión en función del tiempo está en relación directa con la Transmisibilidad. Ello se expresa por la fórmula (4), que ya hemos empleado al comienzo.

$$T = C \cdot \frac{Q}{\Delta s} \quad (4) \quad \times$$

como

$$T = P \cdot c \quad (1)$$

introduciendo (1) en (4) y despejando  $\Delta s$  tenemos

$$\Delta s = \frac{C}{c} \cdot \frac{Q}{P} \quad (17) \quad \times$$

o también

$$\Delta s = C' \cdot \frac{Q}{P} \quad (18)$$

de donde

$$Q = C'' \cdot \Delta s \cdot P \quad (19)$$



La fórmula (18) nos dice que para un Gasto constante, la Depresión crecerá en razón inversa a la permeabilidad del acuífero. O sea, a mayor Permeabilidad, la Depresión provocada por el bombeo será menor. Por otra parte, la fórmula (19) expresa que, manteniendo una depresión fija obtendremos mayor cantidad de agua del acuífero mientras mayor sea su Permeabilidad.

#### PREDICCIÓN DE LA DEPRESIÓN

Apoiados en la suposición "q" que excluye la presencia de Recarga del acuífero durante el período que dura la prueba de bombeo, podemos extrapolar la curva T-D de la figura 3. De este modo será factible predecir la Depresión para períodos superiores al de la prueba

Nótese que la figura 3 proporciona la Depresión futura, solamente para el pozo de observación A y no para el pozo de prueba

Pero como existe el mayor interés en estimar la Depresión futura en el Pozo de Bombeo será necesario que desarrollamos para él su curva T-D. Como ya sabemos que la gradiente de la depresión  $\Delta s$  de la curva T-D es la misma tanto; para el Pozo de Bombeo como para un pozo de observación A, siempre que se mantenga un gasto Q constante, contamos, desde luego, con uno de los datos necesarios para la construcción de la curva que deseamos desarrollar

El Pozo de Prueba cumple ya las condiciones conocidas:

Se bombea a gasto constante  $Q$   
 durante un período de tiempo  $t$   
 la gradiente hidráulica  $\Delta s$   
 es la misma del pozo A

Imaginemos ahora un pozo E, figura 9, ubicado en la vecindad del Pozo de Prueba anterior, pero operarlo bajo las siguientes condiciones:

Se bombea con el mismo gasto  $Q' = Q$   
 durante un período muy corto  $t'$   
 produciéndose una Depresión  $\Delta s'$

Por lo que ya se advirtió y, siendo  $Q' = Q$ , resulta  $\Delta s' = \Delta s$ . Con estos elementos estaremos en condiciones de trazar la curva T-D semi-logarítmica similar a la figura 3 para el pozo E. En efecto, con  $t'$  y  $s'$  localizamos el punto W en la figura 9. Como  $\Delta s' = \Delta s$ , tomaremos  $s$  de la figura 3. La curva de la figura 9 se puede extrapolar hasta donde sea necesario

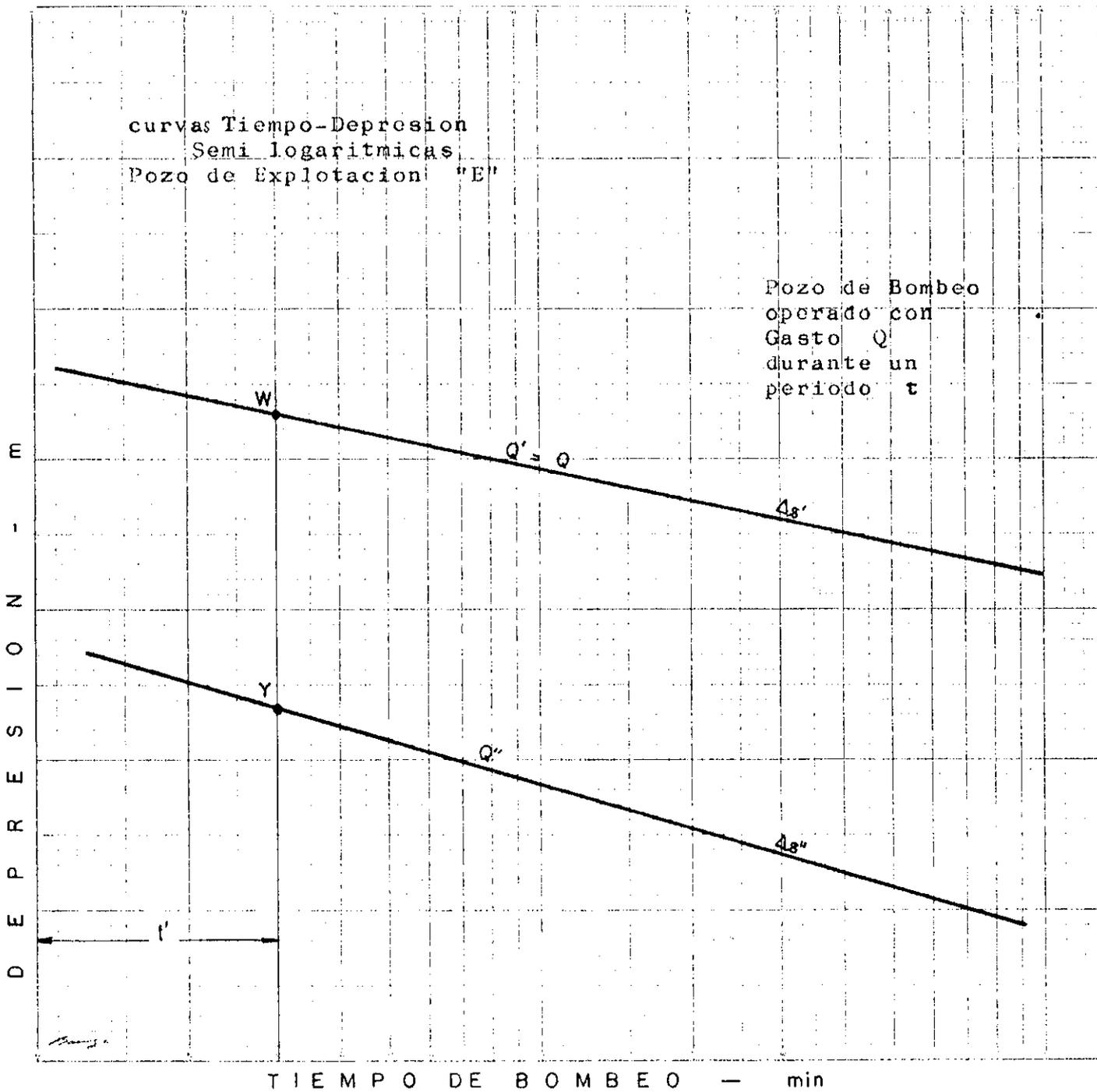


Fig.9 curvas "Tiempo-Depresion Semilogaritmicas"  
para un Pozo de Explotacion "E"  
que se bombea durante cortos periodos  $t'$  con dos Gastos  
diferentes, unos  $Q'=Q$  y otro  $Q''$  distinto de  $Q$   
Las coordenadas de los puntos W e Y se deducen de la Fig.



Ahora plantearemos un nuevo problema. Se tratará de construir la curva semi-logarítmica T-D para el mismo pozo E, pero en el supuesto que está trabajando en sus condiciones normales de explotación que supondremos, sean con un Gasto constante  $Q'$ . Al cambiar el valor del Gasto, cambia también el de la gradiente que en el presente caso será  $\Delta s''$ .

Lo primero por hacer será calcular  $\Delta s''$  correspondiente a  $Q''$ . Para ello utilizaremos la relación dada por la fórmula (15)

$$\frac{\Delta s''}{Q''} = \frac{\Delta s'}{Q'} \quad (15)$$

de donde se calcula  $\Delta s''$  pues, los términos restantes son conocidos. Ya sabemos que  $Q'$  es el Gasto de la prueba de bombeo y  $\Delta s'$  es su gradiente (fig. 3);  $Q''$  es el nuevo Gasto dado

Para localizar finalmente la curva en el gráfico de la figura 9, necesitamos encontrar un punto Y de ella. Esto se consigue experimentalmente haciendo correr de nuevo la bomba del pozo E en las siguientes condiciones:

se bombea con gasto  $Q''$   
durante el mismo tiempo  $t'$   
produciéndose una nueva depresión  $s''$

En esta forma, el punto Y queda determinado prácticamente por sus coordenadas  $t'$  y  $s''$ . Como ya hemos calculado la gradiente  $\Delta s''$  por la fórmula (15), podemos completar ahora, en la figura 9 la construcción de la curva T-D del pozo E para cuando se explota con un Gasto permanente  $Q''$

En la reciente discusión hemos considerado como válido el punto "q" que ignora la existencia de recarga en el acuífero mientras se bombea pero, sabemos por experiencia, que ello no es así por cuanto la gran mayoría de las formaciones siempre están recibiendo recarga, ya sea ésta en forma continua o intermitente

#### REDUCCIONES GEOFISICAS

Todos los gráficos que hemos presentado hasta aquí, reflejando el comportamiento de pozos de agua, han sido construidos sobre el principio de aquellas o suposiciones fundamentales que se emplean como medio indispensable de simplificación



Las notables divergencias que existen en el comportamiento del *ose*, las cuales son reveladas por las curvas que hemos construido hasta aquí, indican que las condiciones físicas del *pozo* y del acuífero no se conforman con las suposiciones adoptadas por Theis en el desarrollo de su "Teoría de la Hidráulica del Pozo". La manera cómo la curva I-D se desvía de la curva teórica, como lo veremos más adelante, refleja cuanto difiere el acuífero real del teórico. Contemplando éste bajo otro punto de vista, será posible aprovechar tales divergencias, presentadas por los gráficos del bombeo, como una herramienta geológica que será de gran utilidad en la composición de un cuadro más aproximado a la realidad de las características del acuífero en el cual se ha perforado el Pozo de Prueba con el cual hemos estado operando

La suposición "d" niega la ocurrencia de recarga en el acuífero durante la prueba de bombeo. Quizás quedaríamos más cerca de la realidad si modificáramos esta afirmación diciendo, en cambio, que ella quiere más bien expresar que

"no hay manifestaciones de recarga dentro de la zona de influencia del Pozo de Prueba mientras éste se bombea"

Con la suposición anterior en vista, consideremos ahora un *pozo* II de explotación que se bombea con un gasto  $Q^{II}$  durante un período de tiempo  $t^{II}$ . Se controla la Depresión y se construye la curva I-D semi-logarítmica de la figura 10 cuya pendiente será  $\Delta s^{II}$

Como ya hemos visto anteriormente, es posible estimar en forma rápida la futura Depresión para cualquier período de bombeo a Gasto constante  $Q^{II}$ , gracias al simple procedimiento de prolongar la curva I-D hasta donde sea necesario

Todo ésto nos ofrece un medio de enorme utilidad para determinar anticipadamente el futuro Nivel de Trabajo o Nivel Depresido, como también nos indicará la ubicación más conveniente que se deberá al cuerpo impulsor de la bomba dentro del acuífero. Aprovechando esas mismas informaciones se puede adoptar un factor de seguridad tal que, aplicado a los valores del Nivel de Trabajo, recién determinado, dicho factor protegerá la bomba de las fluctuaciones experimentadas por el nivel del agua como consecuencia del comportamiento *semi* activo del *pozo*, ya sea por incrustaciones de la rejilla o tubo ramado, como también por los efectos de la interferencia provenientes de otros *pozos* ubicados en sus cercanías. En la forma indicada no se correrá el riesgo que por alguna de esas causas que ocasionan descensos del Nivel del agua, el cuerpo impulsor de la bomba quede con poca altura de líquido o parcialmente en seco

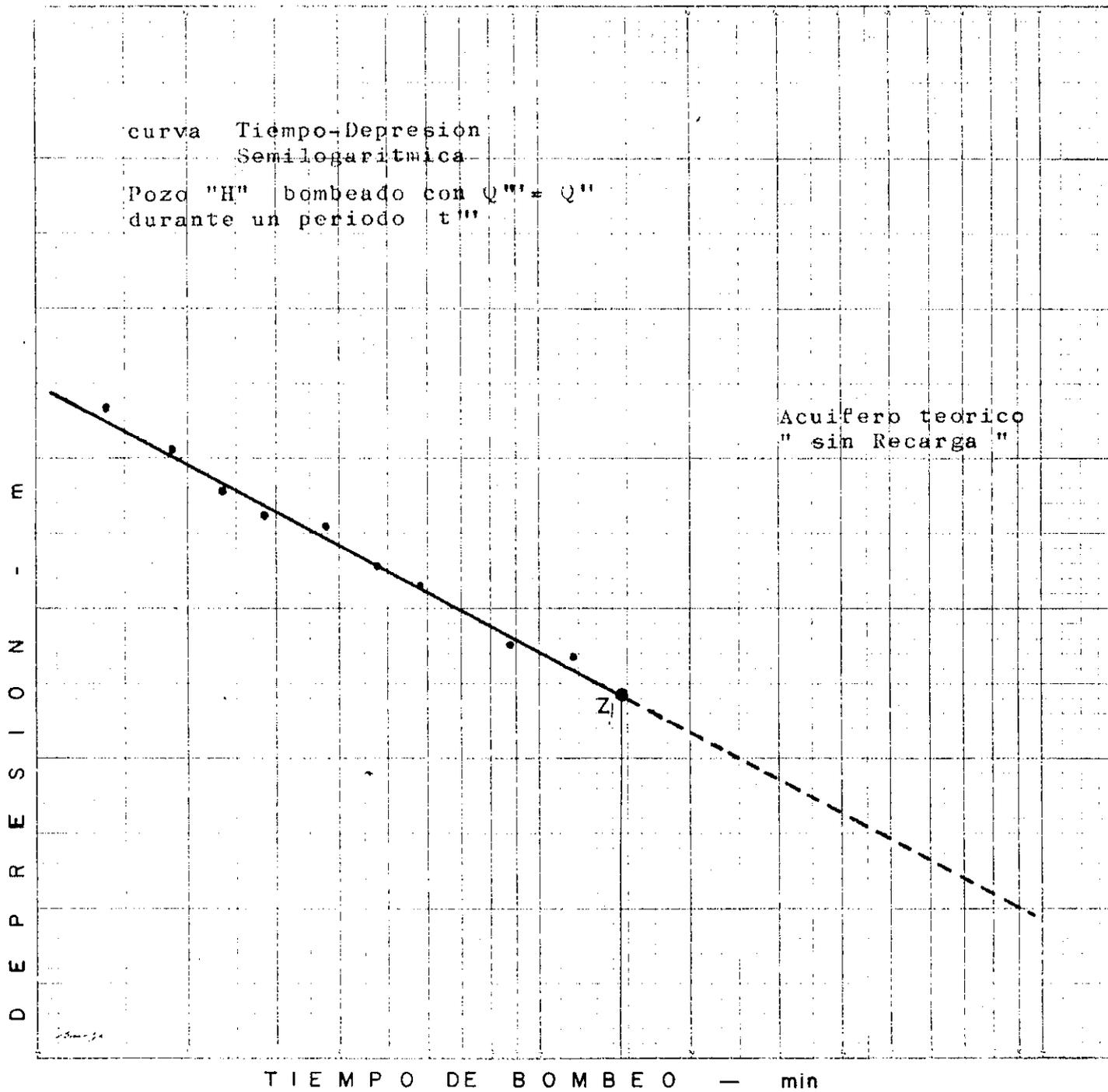


Fig.10 curva "Tiempo-Depresion Semilog" para un Pozo "H" que se bombea a Gasto  $Q''' = Q''$  permanentemente durante un periodo de  $t'''$  minutos  
Se supone que "no hay Recarga" del Acuifero



**A MENUDO EXISTE UNA RECARGA**

La ausencia completa de Recarga dentro del área de influencia de un pozo, imaginada por la suposición, es una concepción que no siempre se cumple. Los Hidrógrafos de pozos que, como observaciones mantenidas durante largos períodos, se están llevando en varios Estados de los Estados Unidos tanto por el Geological Survey como al mismo tiempo por otras reparticiones que le colaboran, revelan (los Hidrógrafos) que la gran mayoría de los Acuíferos reciben Recarga ya sea en forma continua o intermitente

Por otra parte, también es cierto que, durante ciertas estaciones del año un Acuífero puede no recibir Recarga alguna. Todas las curvas T-D que hemos presentado hasta aquí representarían entonces el comportamiento de pozos durante "estaciones secas" para el Acuífero las cuales pueden durar unos 30, 60 90 o más días

Sin embargo, si se practica una Prueba de Bombeo cuidadosamente durante un período en que el Acuífero está recibiendo una Recarga apreciable la curva T-D correspondiente a la Prueba acusará evidencias de los efectos de la Recarga

**SE ESTABLECE UN FLUJO CONSTANTE**

Practiquemos el bombeo del pozo H durante un tiempo suficientemente prolongado como para construir una curva semi-logarítmica T-D real, de modo que no haya necesidad de extrapolarla. Es decir, no tomemos en cuenta la suposición "d" de Theis. El resultado será el gráfico de la figura 11. En ella se observa que la Depresión aumenta en forma regular de acuerdo, aparentemente, con la suposición "d" hasta llegar a un punto Z donde la curva cambia bruscamente de gradiente demostrando que dicha suposición ha dejado de cumplirse desde ese instante. Son las evidencias de que el Cono de Depresión o el Área de influencia del pozo, en su camino de expansión concéntrica, ha llegado hasta una fuente de recarga del acuífero que se empieza a manifestar en el punto Z

Cuando la Recarga que recibe el acuífero, dentro de la zona de influencia del pozo que se bombea, iguala en magnitud al Gasto, se produce automáticamente un equilibrio de la Depresión y, en consecuencia, el nivel de trabajo no experimentará mayor descenso mientras se continúe bombeando con ese Gasto constante que produjo el equilibrio. Este fenómeno se refleja en el gráfico de la figura 11 al transformarse la curva T-D en una línea horizontal a partir del punto Z. La segunda parte de la curva representa las condiciones de equilibrio entre la Recarga y el Gasto

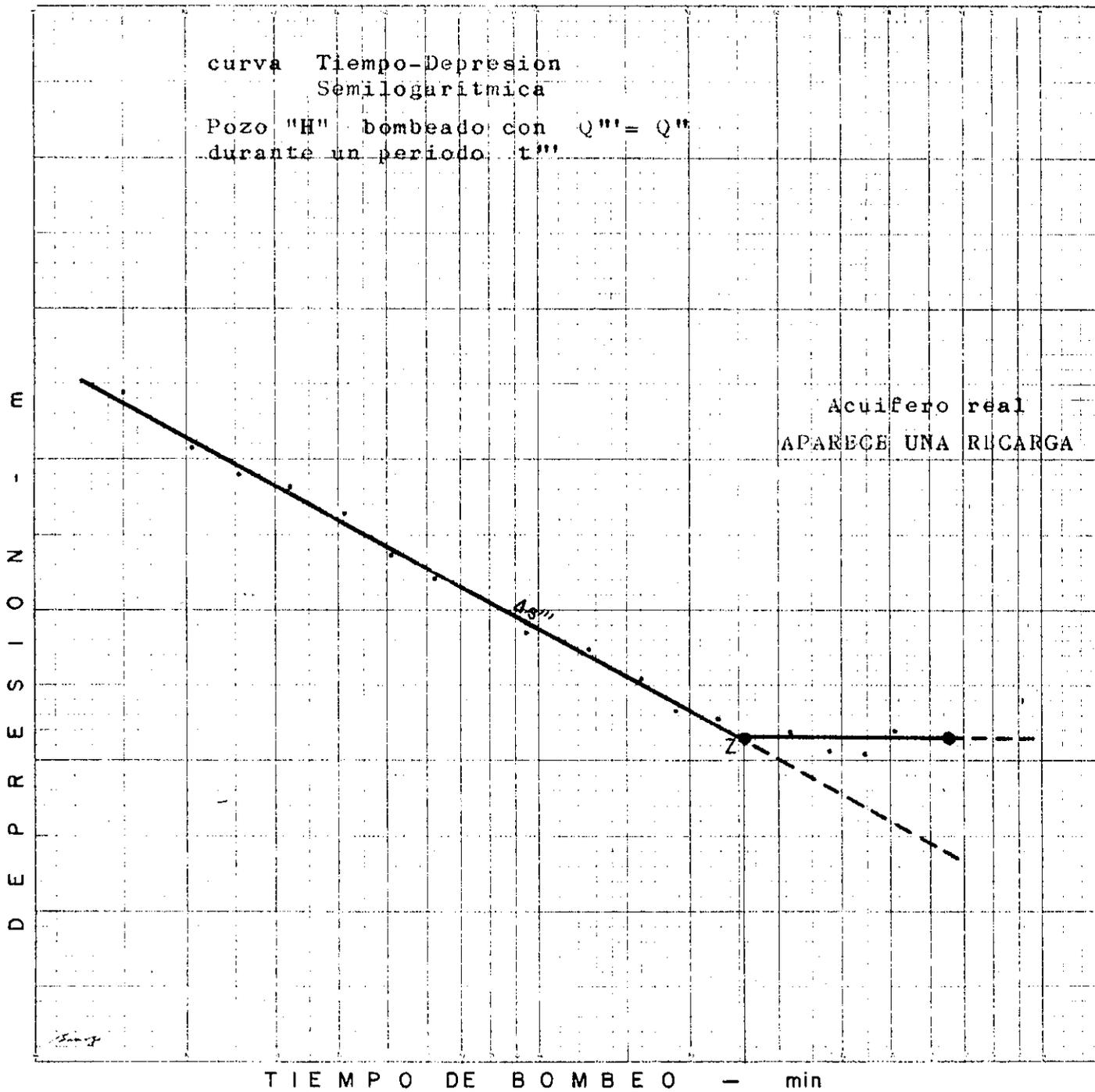


Fig.11 curva "Tiempo-Depresion Semilog" para un Pozo "H" que se bombea a Gasto  $Q''' = Q''$  durante  $t'''$  minutos

ACUIFERO REAL: hay Recarga

Al prolongar el control de la Depresion se constata una Recarga a partir del instante  $t_z$



En algunos casos ocurre que la Recarga dentro del cono de depresión es de una magnitud inferior al gasto con que se está operando el pozo. También puede suceder que el encuentro del cono de depresión con la fuente de recarga no convierte totalmente en horizontal la curva T-D. En tal caso siempre se producirá un cambio en la gradiente de la curva, la cual en consecuencia, se hará más plana o de gradiente menor. Esto simplemente significa que el cono de depresión continúa expandiéndose, una vez que alcanza la zona de Recarga, en forma mucho más lenta que durante la primera parte del período de bombeo.

Prolongando la segunda parte de la curva, será posible predecir la depresión futura para cualquier período de bombeo, siempre que se mantenga constante el Gasto. Cuando algún accidente o característica existente en el acuífero, provoque un cambio en la gradiente de la curva correspondiente a la prueba de bombeo, se podrán determinar sólo gráficamente las depresiones futuras para cualquier período de bombeo continuado, guiándose por el procedimiento que acabamos de explicar; de lo cual resultan las siguientes alternativas como consecuencia de la interpretación de un gráfico construido con los datos reales dados por el bombeo:

- a. Si la gradiente de la curva no cambia, cualquier depresión futura se puede determinar por medio de la "FÓRMULA DE THEIS", o bien, del "Método Gráfico"
- b. Si la gradiente experimenta un cambio, la fórmula de Theis no será aplicable para ningún período de tiempo posterior al del cambio

Debemos puntualizar que los cálculos de transmisibilidad T del acuífero deben hacerse en base a la Gradiente  $\Delta s$  correspondiente a la primera parte de la curva T-D pues, cualquier valor de la gradiente para la parte de la curva que queda más allá del punto de inflexión  $x$  no tendrá ningún valor en el análisis de las informaciones proporcionadas por la prueba de bombeo. En este último caso, no tiene ninguna aplicación válida ni la fórmula de Theis ni la de Jacob



## RECARGA PROVENIENTE DE UN RÍO

El desarrollo de un Estado de Equilibrio que implica la estabilización del Cono de Depresión alrededor de un pozo de bombeo, puede ser encauzado por una de las tres circunstancias generales:

1. Cuando el Acuífero recibe Recarga de un río o lago (ver fig. 12)
2. Cuando al cesar el bombeo el Cono de Depresión no ha alcanzado aun la zona de Recarga proveniente del río y, por lo tanto, no se presentan evidencias de los efectos de una Recarga; entonces el Nivel Depresido en el pozo continúa descendiendo con el bombeo. Esta condición está representada por la primera parte de la fig. 11
3. Cuando el Cono de Depresión en el transcurso de su expansión invade la zona, ubicada debajo del río, que se encuentra en conexión hidráulica con el Acuífero, se establece naturalmente una Gradiente Hidráulica entre el Agua Subterránea del Acuífero y el agua del río; entonces el agua del río percola por gravedad a través de una formación permeable hacia el Acuífero, impulsada por la acción de esta Gradiente Hidráulica. En esta forma el agua del río recarga el Acuífero con una razón que aumenta a medida que el Cono de Depresión se expande

Cuando la Recarga que recibe el Acuífero iguala al Costo del pozo, sucede que tanto el Cono de Depresión como el Nivel de Trabajo se estabilizan. Esta condición está representada gráficamente por la parte horizontal de la curva de fig. 11, la cual representa al mismo tiempo la situación ilustrada en fig. 12

## INFILTRACION VERTICAL

Otro fenómeno que interviene en el establecimiento del equilibrio entre la Recarga y El Costo es la Recarga Vertical que ocurre a través de toda el área de influencia que rodea al pozo en bombeo

Supongamos, por ejemplo, que nos encontramos en presencia de un Acuífero del tipo no-artesiano, es decir, no sometido a presión hidráulica. En él hemos perforado un pozo. En el lugar del acuífero existen arenas permeables desde la superficie del terreno hasta el Nivel Estático y, lo mismo, debajo de la zona de saturación. Imaginemos ahora que, mientras el Cono de Depresión se extiende a causa de un bombeo constante, actúa



simultáneamente la percolación Vertical originada por el agua de lluvia que se precipita del área del Cono de Depresión. El final de este cuadro será que, tan pronto como el volumen de agua que se infiltra hacia el Acuífero, en la zona de influencia del pozo, logra igualar al Costo, el Cono de Depresión cesa de crecer ocurriendo que, al mismo tiempo, el Nivel Deprimido del pozo tanto como el nivel del Acuífero se estabilizan

Parece que los casos más frecuentes de Recarga que originan los efectos recién descritos, se deben a la infiltración vertical proveniente de capas de material saturado sobrepuestas al Acuífero en el cual se perforó el pozo que se bombea. A menzón las capas superiores de material, dentro de la zona de saturación, poseen una Permeabilidad inferior a la que tienen las capas más profundas desde las cuales el pozo extrae el agua. Con frecuencia la diferencia entre los valores de la Permeabilidad correspondientes a la capa superior e inferior es tal, que el material superior no se considera como parte integrante del Acuífero

Sin embargo, cuando el área del Cono de Depresión cubre una extensión de varios cientos de metros cuadrados, la infiltración total que percola a través del material superior, aunque éste sea de baja Permeabilidad, puede llegar a igualar la magnitud del Costo dando en consecuencia, origen al estado de equilibrio en los Niveles Deprimidos

Es nuestra opinión, respaldada por la experiencia, que este tipo de interrelación e influencias, también ocurren en formaciones lenticulares

#### ESPEJO DE AGUA CON INCLINACION

Otra situación que puede dar origen a la estabilización virtual del Nivel Deprimido es, el curso de agua subterránea que fluye dentro del acuífero pasando por el pozo. Este fenómeno está materializado por un Espejo de Agua Inclinado, llamado también Superficie Piezométrica

La magnitud de la pendiente de esta superficie es traducida por el monto de la Gradiente Hidráulica que, a causa del bombeo, se ha desarrollado entre las áreas de Recarga y Descarga del Acuífero

Por otra parte se ha constatado que la mayoría de los espejos de agua o Superficies Piezométricas con una inclinación natural relativamente plana, no afectan en forma apreciable a las curvas que representan el comportamiento del pozo. Sin embargo, una pendiente relativamente fuerte provocará distorsiones en el Cono de Depresión alrededor del pozo. En tal caso la zona de influencia en lugar de ser circular tenderá a adquirir una forma elíptica en forma tal que, a partir del pozo,



el radio de esta pseudo elipse aparece más largo en dirección aguas abajo que el radio aguas arriba correspondiente al mismo diámetro. Esto se produce porque, en el caso del espejo con fuerte pendiente, el agua escurre direccionalmente con caracteres de una corriente, en lugar de presentarse como una extensa y tranquila sábana de agua que llegaría al pozo desde todas las direcciones con velocidad similar. Al bombear el pozo extraemos parte de ese flujo natural que de otra manera pasaría de largo por el lugar del pozo

Nuestra discusión sobre los efectos que la Descarga o Gasto producen sobre la forma de la curva T-D, ha sido basada en las mediciones tomadas en el pozo de explotación II cuyos resultados se presentan gráficamente en la fig. 11. Se subentende que las medidas tomadas en un pozo de observación ubicado en las cercanías del anterior presentarían gráficos semejantes a los de aquel

Por otra parte, los datos obtenidos del Pozo de Observación son siempre más representativos y correctos que los del pozo de explotación. Por lo tanto la curva T-D correspondiente a un pozo de observación reflejará con mayor exactitud el comportamiento del acuífero

Cuando se necesita calcular el valor de la Transmisibilidad T del acuífero, empleamos el valor de  $s$  correspondiente a la primera parte de la curva T-D, de fig. 11, construida con los datos tomados en el Pozo de Observación. Teóricamente la Gradiente  $s$  para las curvas de los pozos de Bombeo y Observación deberían ser una misma

Como conclusión, hacemos resaltar el hecho que, de nuestras discusiones se deduce como de trascendental importancia la necesidad de tomar en los comienzos de una Prueba de Bombeo a Gasto constante, medidas de la Depresión con la mayor frecuencia y con el máximo cuidado y precisión posibles

Debe tratarse de obtener cantidad suficiente de datos fidedignos, especialmente durante la primera parte de la Prueba, a fin de poder interpretar con claridad el comportamiento tanto del pozo como del acuífero. Se impone esta práctica como un medio de obtener los datos requeridos antes que se hagan presentes los efectos provenientes ya sea de la Recarga o de otras influencias circundantes las cuales vendrán a modificar totalmente las condiciones hidráulicas teóricas sobre las cuales se fundamenta la Teoría del Análisis que ha sido materia del presente trabajo