26 43

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

"UN METODO PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE UN ACUIFERO EN EL CASO DE UN CONJUNTO DE POZOS Y UN MODELO"

T E S I S

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a

FRANCISCO CORREA NIETO

MEXICO, D. F. 1981

PROGRAMA

UN METODO PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE UN ACUIFERO EN EL CASO DE UN CONJUNTO DE POZOS Y MODELO

PAGINA

I. ANTECEDENTES

a) GENERALIDADES

En la naturaleza solo hay dos fuentes de agua a disposición -- del hombre, a saber: Las de la superficie, que comprenden los lagos, ríos, y áreas de drenaje que envían agua hacia los em-- balses así como los procedimientos que permiten captar y retener el agua de lluvia. Y las subterráneas, que incluyen a los- pozos, manantiales y galerias horizontales.

En realidad las fuentes de agua subterránea y las superficiales no siempre estan separadas. Lo que en cierto lugar es agua de superficie puede convertirse en agua subterránea en otro, pudiendo a su ves emerger de nuevo como agua superficial en un tercer sitio. Esto es posible por interconexiónes hi-- dráulicas existentes.

Siempre ha sido más fácil comprender las fuentes de - superficie, puesto que se les puede ver y observar.

Es alrededor del agua subterránea que se ha creado - una aureola de misterio, de superstición y teorías infundadas, que todavía persisten, más que nada porque no se ha dispuestode maneras rapidas de comprobarlas.

Indudablemente que la falta de comprensión de las manifestaciones de agua subterránea puede atribuirse a que los antiguos científicos y filósofos, no tenían idea de dónde provenía y hacia donde se dirigía ésta. A falta de estos conocimientos ellos y sus contemporaneos tuvieron que desarrollar teorías sin comprobación muchas de éstas erróneas, para poder explicar la procedencia del agua en los pozos y el flujo de los manantiales.

Una creencia era la de que el agua de mar se convertia en agua dulce conforme ésta fluía desde el mar a los manantiales por dentro de las cavernas subterráneas. Cuando un pozo excavado lograba con éxito producir agua, el fenómeno se explicaba diciendo que éste había interceptado una de las corrientes subterráneas de agua desalada.

El progreso logrado desde entonces en cuanto a la ampliación de nuestros conocimientos sobre el agua subterránea ha sido inmenso, hemos logrado por ejemplo, una mejor comprensión de la importancia que tiene el agua subterránea como fuente de abastecimiento de las necesidades del mundo.

Las aguas naturales existentes en la superficie del suelo estan sometidas al peso de la gravedad. Se infiltran pués, por los poros, pequeñas fisuras y todas las soluciones de continuidad, con tal que abunden en el suelo y las rocas subyacentes por muy profundo que puedan descender. Así a partir de una cierta profundidad todos los intersticios entre las rocas acaban por llenarse de agua, el nivel asciende en razón de las infiltraciones, mientras que encima al contrario estan normalmente vacios.

De ello resulta que las aguas continentales no se encuentran libres fuera de los rios y de los lagos, debe existir pués una profundidad suficiente para que las infiltraciones se acumulen. El agua subterránea es en definitiva y geológicamente hablando, la roca más común y su presencia es practicamente universal.

Las aguas subterráneas precisamente por su frecuente uso continúan siendo poco conocidas.

Como existen por doquier, las captaciones se construyen en general, siguiendo normas muy alejadas de la realidad pero a pesar de ello resultan muchas veces productivas lo que ayuda a confirmar como buenas, concepciones erróneas. Sin embargo resulta evidente que las captaciones ejecutadas siguiendo normas científicas serán mucho más ventajosas.

En realidad antes de ser captadas las aguas conteni das en los poros y fisuras del subsuelo no aportan más que un recurso latente. La única manera pragmática de estudiarlas, - consiste en profundizar pozos o sondeos y aprovecharse de las- observaciones que permiten efectuar.

En la práctica para las captaciones se precisa de - dos tareas diferentes, primera . - detección o localización - de los mejores terrenos acuíferos, segunda .- ejecución de las obras conducentes a la extracción del agua contenida en los - acuíferos.

Puesto que las aguas superficiales son tangibles, resulta lo más natural que nos inclinemos a pensar que esta manifestación del agua constituye la mayor fuente para satisfacer las necesidades del mundo.

En realidad algo menos de un 3% de la disponibilidad- del agua fluida de nuestro planeta corresponde a ríos y lagos. El 97% restante, algo así como 1230Km3 de agua, se encuentra en- el subsuelo.

El agua dulce en estado líquido de lagos y rios representa la parte que se haya en tránsito, en tanto que las - fuentes subterráneas constituyen el agua almacenada. El agua - subterránea se ha venido acumulando a través de varios siglos, aumentando ligeramente su volumen cada año por efecto -

de la lluvia. Como promedio anual, el agua de los ríos es restituida unas 31 veces.

Más aún, no toda la cantidad de agua que se encuentra por debajo de la superficie de la tierra, puede extraerse de las formaciones que las contienen. Una parte se halla dentro de formaciones tan profundas que sólo los costos de bombeo invalidarían su extracción.

Otra parte yace dentro de acuíferos que se oponen de diversas maneras a la extracción y desafían la acción del bombeo.

La seguridad higiénica del agua subterranea es también efímera. El agua que proviene de los pasajes de solución en las calizas y formaciones geológicas relacionadas, o de un área de captación poluida cercana a las obras de extracción del agua subterránea, debe verse con sospecha. Las arenas y otros suelosde grano fino o de rocas, pueden ayudar a remover contaminantes y poluyentes de aguas percolantes; siempre que estas sean forzadas a desplazarse a través de espesores razonables de estructuras geológicas de esta clase. Sin embargo existen contaminantes (Nitratos, Cloruros y Floruros de alta concentración) que no se remueven ni por los mejores suelos o rocas.

Un suelo puede ofrecer un suministro más puro, económico y satisfactorio de agua del que puede abastecer la superficie de la tierra. Si se conservan las aguas disponibles y si es necesario se suplementan con una recarga adecuada, procedente de recursos superficiales puede servir bien y por extensos períodos. Si no se administran con cuidado y atención fallarán en cantidad y se deteriorarán en calidad. En algunos lugares tendrá que ser abandonada.

Un aprovechamiento sobrebombeado fallará, no importa donde se encuentre situado y un consumo en exceso cercano al mar permitirá que se introduzca agua salada hacia el acuífero sujeto a bombeo en exceso.

Aunque las cifras comparativas de los volúmenes de agua disponible tanto en la superficie como en el subsuelo no pueden adaptarse como un índice de los recursos reales, si nos revelan que la reserva subterranea es varias veces mayor que la de la superficie y que no se ha hecho suficiente incapié en el desarrollo y utilización de las vastas reservas de agua dulce que yacen bajo la superficie de la tierra; es por esto que deseando contribuir a su desarrollo y darle mayor difusión al estudio de las aguas subterráneas, presento este modesto trabajo.

b) REGIMEN ESTABLECIDO

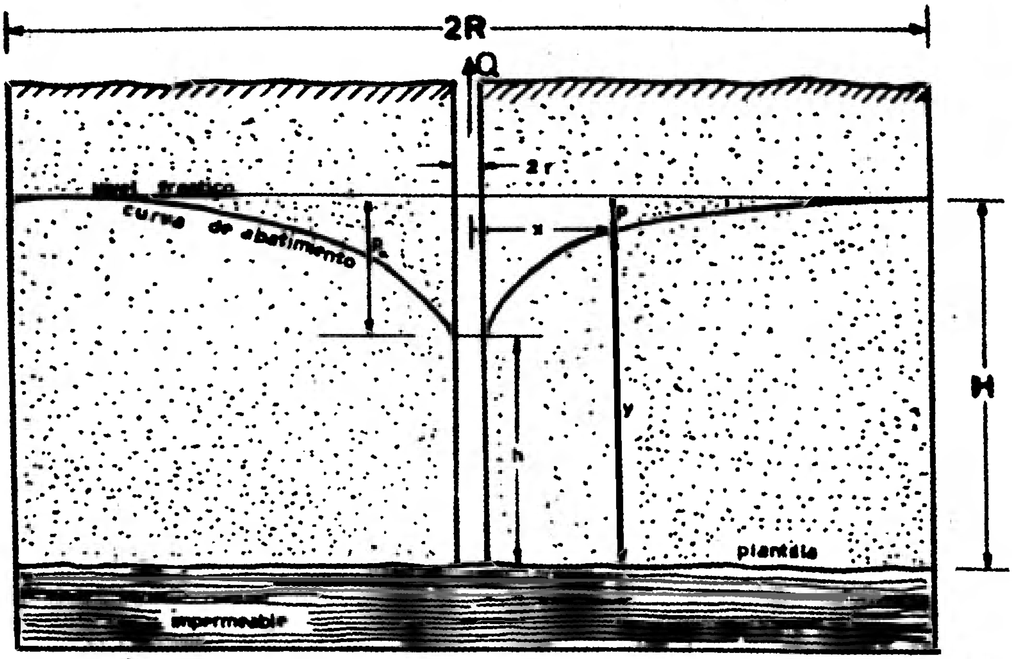
El movimiento de agua subterránea hacia un pozo puede formularse de acuerdo a los principios de Dupuit y Forcheimeir. Cuando el pozo penetra al fondo del acuífero, el flujo es estable y el nivel freático o la superficie piezométrica, según sea el caso, es horizontal. En realidad el nivel freático o la superficie piezométrica raramente son horizontales y el flujo es estable en contadas ocasiones. Los cambios interfieren en las relaciones de bombeo y recarga; y las cantidades de agua almacenada en el acuífero.

Sin embargo la utilidad de la formulación de Dupuit puede aumentarse introduciendo la teoría de flujo potencial, para cubrir acuíferos confinados en los que la superficie piezométrica esta inclinada. La teoría de flujo estable ha sido también ampliada a lechos confinantes que tienen fugas y otras situaciones.

1. REGIMEN ESTABLECIDO NO CONFINADO

Para flujo radial, desde un límite externo concéntrico, la descarga a través de cualquier superficie cilíndrica de radio 'x' y altura 'y' es:

$$Q = 2 \pi K x y (dy / dx)$$



Pozo de nivel freático en un depósito de

aguas subterráneas

En donde 'Q' es la relación de flujo al interior del pozo y 'x' e 'y' son las coordenadas de cualquier punto sobre el cono de presión de Dupuit o curva de abatimiento. Las variables componentes son $2\pi xy$, el área a través de la cual el flujo tiene lugar y $K(dy/dx)$ la velocidad.

Por integración:

$$Q \ln x = \pi K y^2 + c$$

Y para $y = h$, a $x = r$ (siendo r el radio del pozo) e $y = H$ a $x = R$ (siendo R el radio del circulo de influencia o distancia del limite externo al centro del pozo).

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{\ln (R/r)} \qquad Q = \frac{1.36 K (H^2 - h^2)}{\log (R/r)}$$

Debido a que H es constante, la cantidad (H^2-h^2) aumenta a una velocidad decreciente conforme h se reduce. En esta forma los aumentos sucesivos en el abatimiento reducen la capacidad específica de los pozos de nivel freatico. Para un valor constante de R, la relación logaritmica entre el radio del circulo de influencia, y el radio del pozo y su relación inversa al rendimiento indican que el aumento del tamaño, del pozo no aumenta grandemente su rendimiento. Por ejemplo un pozo de 60 cm. dará solamente de 15% a 30% más agua que un pozo de 7.6 cm.

2. REGIMEN ESTABLECIDO CON FLUJO CONFINADO

Para las condiciones ilustradas en la figura correspondiente, donde m es espesor del acuifero.

$$Q = 2\pi K x m (dy/dx)$$

Integrando entre limites x = r para y = h y x = R para y = H

$$Q = \frac{2\pi K m (H-h)}{\ln (R/r)}$$

$$Q = \frac{2\pi K m po}{\ln (R/r)}$$

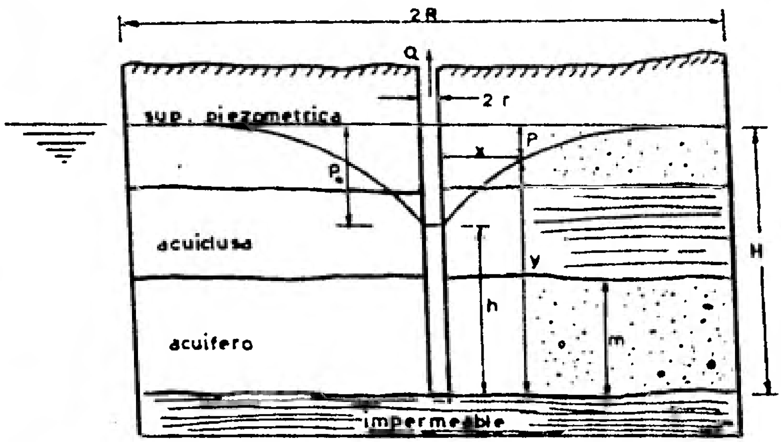
Se advierte que la descarga es proporcional al abatimiento H - h = p_o . Se ha observado que el rendimiento por unidad de abatimiento, o capacidad especffica, de pozos artesianos, permanece constante a todos los valores razonables del abatimiento.

La ecuación anterior puede reescribirse asi:

$$p_o = \frac{Q \ln (R/r)}{2\pi K m}$$

Si T = K m es la transmisibilidad en lpd por metro de anchura del acuífero, Q esta en lpm y 2ln(R/r) = F(u), la ecuación anterior se convierte en: $p_o = (1/4\pi)(Q/T)\ F(u)$

En esta forma, la fórmula para el flujo estable puede compararse con las formulaciones para flujo inestable.



Pozo artesiado con flujo radial estable desde un limite circular concéntrico.

II. REGIMEN INESTABLE DE ESCURRIMIENTO EN UN MEDIO CAPITAL RADIAL

a) ANTECEDENTES

Antiguamente se usaba el método de regimen establecido pero los resultados eran aparentes, ya que el abatimiento seguía aumentando aún a gasto constante de extracción. Ello indica que la realidad constituye un sistema que no está en equilibrio y por lo tanto constituye un sistema dependiente del tiempo.

En las fórmulas de régimen establecido no se toma en cuenta el tiempo de bombeo y es necesario esperar a que los niveles en los pozos de observación se hayan estabilizado, porlo que el uso de las fórmulas de régimen inestable constituyó un avance notable en el campo de la hidráulica de aguas subterraneas.

Esta fórmula de régimen inestable o de no equilibrio fué desarrollada por Theis en 1935. La formula de Theis fuéla primera que tomó en cuenta el efecto del tiempo de bombeo en la descarga.

Haciendo uso de la fórmula de Theis se puede predecir el abatimiento a cualquier tiempo de bombeo. La Transmisibilidad y la permeabilidad medias se pueden obtener desde las primeras etapas de una prueba de bombeo, sin tener que esperar a que los niveles en los pozos de observación se haya estabilizado.

Los coeficientes de acuífero se pueden determinar a partir de las mediciones tiempo - abatimiento, realizadas en un solo pozo, en vez de utilizar dos pozos de observación, como lo exigiría en el caso del uso de las fórmulas de regimen establecido.

El desarrollo original de la ecuación de Theis se deriva de una analogía con el flujo de calor hacia una depresión o punto en el cual se remueve calor a una velocidad uniforme.

En el presente trabajo se llega a la misma expresión de Theis desarrollando la ecuación de pozos.

La forma mas sencilla de la fórmula de Theis es la siguiente

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

En la cual: s = Abatimiento en metros en cualquier- punto de la vecindad de un pozo que se este bombeando a caudal constante.

Q = Gasto de bombeo en M^3/hr.

W(u) = Función de pozo que corresponde a la siguiente integral:

$$W(u) = \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\, du = -0.5772 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \ldots$$

En la anterior expresión.

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

En donde: r = Distancia en metros desde el centro del pozo de bombeo, al punto en que se mide el abatimiento.

S = Coeficiente de almacenamiento, adimensional.

T = Coeficiente de transmisibilidad = K m en M^3/hr./m.

t = Tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo, en horas.

La derivación de la fórmula de Theis esta basada en - las siguientes suposiciones:

1. El acuífero es homogéneo y permeable en dirección- vertical y horizontal.

2. La formación del acuífero es de espesor uniforme.

3. El acuífero no recibe ninguna recarga.

4. La formación es de una extensión superficial in-- finita.

5. El pozo de bombeo es totalmente penetrante y recibe agua de todo el espesor saturado del acuífero.

6. El agua retirada del almacenamiento es descargada- instantaneamente al descender la altura de presión.

7. El acuífero es sensiblemente horizontal.

8. Los coeficientes de Transmisibilidad 'T' y de Almacenamiento 'S' son constantes.

Escencialmente estas suposiciones son las mismas - que para las formulas de equilibrio, excepto que los niveles - de agua dentro del cono de depresión no necesitan haberse estabilizado o alcanzado el equilibrio.

b) DESARROLLO A PARTIR DE LA ECUACION DE POZOS

Tenemos: Acuífero confinado

Flujo radial en un medio capilar

Flujo inestable - no equilibrado

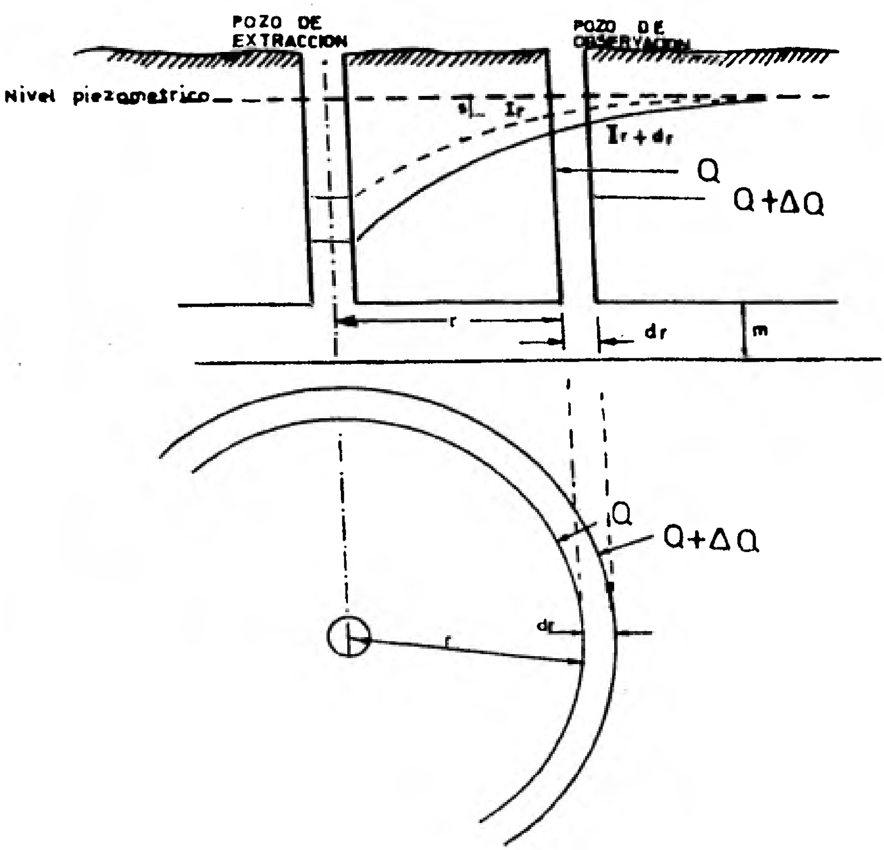
Flujo no estacionario

Fluido compresible

Regimen variado y variable

$$\boxed{\Delta Q = \frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}}$$

Ecuación de pozos



CONDICIONES BASICAS TEORICAS

1) Acuífero confinado
2) Medio poroso capilar isotropico $v = K \frac{\partial s}{\partial r}$
3) Extensión infinita
4) Acuífero sensiblemente horizontal
5) Acuífero de espesor constante
6) El pozo penetra totalmente el acuífero
7) El pozo es de diametro infinitesimal
8) El agua es compresible y el acuífero es deformable solo en la dirección vertical.

Se usarán coordenadas cilindricas, en donde:

s = Abatimiento
r = Distancia
ϕ = Angulo
t = Tiempo

$$s = F(r, \phi, t)$$

Considerar un instante (que no transcurre el tiempo)

$$s = f(r,\phi); \qquad ds = \frac{\partial s}{\partial r} dr + \frac{\partial s}{\partial \phi} d\phi$$

Como el cono es simetrico, el abatimiento 's' es independiente de ϕ $\therefore$ $ds = \frac{\partial s}{\partial r} dr$

Si se considera el cono en movimiento; $s = f\ (r,t)$

Ir = Gradiente a la distancia r

$$Ir = \frac{\partial s}{\partial r}$$

Derivando respecto a 'r'

$$\frac{dIr}{dr} = \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \quad ; \qquad d\ Ir = \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}\ dr$$

Aproximación de Taylor

$$I_{r+dr} = I_r + d\ I_r = \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial_r^2}\ dr$$

$$Q_r \neq Q_{r+dr} \quad ; \quad Q_r > Q_{r+dr}$$

Si se escribe $Q_{r+dr} - Q_r$; esa diferencia es negativa y corresponde a un incremento positivo de 'r'

Por esa razón a $\Delta Q = Q_{r+dr} - Q_r$ <u>se le llama incremento negativo de gasto</u>

En un sistema estacionario, $Q_r = Q_{r+dr}$.

Como el sistema en estudio no es estacionario y $\dot{Q}_r \neq Q_{r+dr}$ ∴ ΔQ tiene un valor que hasta ahora no habia sido posible expresar, y para ello es necesario establecer dos nuevos parametros 'S' y 'T'

DESARROLLO AXIOMATICO

S = Coeficiente de Almacenamiento.

Se define como el gasto liberado por un área horizontal unitaria de acuífero, cuando la presión o carga disminuye con rapidez unitaria o cuando el abatimiento disminuye con rapidez unitaria.

Unidades de 'S' : $S = \frac{Q/A}{ds/dt}$; $\frac{L^3/TL^2}{L\ T^{-1}} = \frac{L/T}{L/T} = 1$

parametro adimensional.

T = Coeficiente de Transmisibilidad

Se puede definir como el gasto que pasa a través de un área cilindrica vertical de acuífero, de altura m, y longitud unitaria cuando el gradiente es unitario.

Si K es el coeficiente de permeabilidad y m es el espesor del acuifero;

$$T = K\ m$$

Unidades de 'T'

$T = m\ K\ ;\ LLT^{-1} = L^2\ T^{-1}\ ;\quad m^2/seg$

EXPRESIONES PARA Q EN FUNCION DE 'T' Y 'S'

primero en función de T

$$\Delta Q = Q_{r+dr} - Q_r = 2\pi\ (r+dr)\ m\ K\ I_{r+dr} - 2\pi\ r\ m\ K\ I_r$$

$$= 2\pi\ (r+dr)\ T\ I_{r+dr} - 2\pi\ r\ T\ I_r$$

ahora en función de S

$$\Delta Q = 2\pi\ r\ dr\ S\ \frac{\partial s}{\partial t}$$; de la definición de S

Igualando las dos ultimas expresiones.

$$2\pi\ rdr\ S\ \frac{\partial s}{\partial t} = 2\pi\ T\ (r + dr) I_{r+dr} - 2\pi\ rT\ I_r$$

Dividiendo entre 2π y poniendo los valores de I_{r+dr} y de I_r

$$r\ dr\ S\ \frac{\partial s}{\partial t} = T\ (r + dr)\ \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}\ dr \right) - rT\ \frac{\partial s}{\partial r}$$

Dividiendo entre T r dr

$$\frac{S}{T} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{r + dr}{rdr} \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr\right) - \frac{1}{dr}\frac{\partial s}{\partial r}$$

Efectuando multiplicaciones

$$\frac{S}{T}\frac{\delta s}{\delta t} = \frac{r}{rdr}\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{dr}{rdr}\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{r}{rdr}\frac{\partial^2 s}{\partial_r^2} dr + \frac{dr}{rdr}\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr - \frac{1}{dr}\frac{\partial s}{\partial r}$$

$$= \frac{1}{dr}\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr - \frac{1}{dr}\frac{\partial s}{\partial r}$$

Despreciando los terminos infinitamente pequeños de - orden superior al segundo orden.

$$\boxed{\frac{S}{T}\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} = \Delta Q}$$

Ecuación diferencial de flujo en un medio proso, en - regimen transitorio.

Para resolver la ecuación anterior conviene multiplicar ambos lados por r^2

$$\frac{S}{T} r^2 \frac{\partial s}{\partial t} = r \frac{\partial s}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}$$

La solución inmediata será otra ecuación diferencial.

Debe ser integrable respecto de t

si $t = 0$; $s = 0$; $\lim_{r \to \infty} s = 0$

Por inspección; la relación que satisface todas estas condiciones es:

$$r \frac{\partial s}{\partial r} = -2\,c\,e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}}$$

$$\frac{\partial s}{\partial r} = \frac{-2c}{r}\,e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}}$$

Como en la ecuación diferencial hay derivadas respecto de t $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)$ y hay segunda derivada parcial respecto de r, para comprobar la relación, primero se derivará respecto de t.

En segundo se integrará respecto de r la misma relación supuesta, y tercero se derivará respecto de r.

Con todo lo cual deberá volverse a la ecuación diferencial.

El primer paso es para obtener una expresión en que aparezca $\frac{d}{dt}$; el tercer paso es para obtener una expresión en que aparezca $\frac{\partial^2 s}{\partial r^2}$, que es la primitiva.

Derivando respecto de t

$$\frac{\partial(\partial s/\partial r)}{\partial t} = -\frac{2c}{r} e^{\frac{-r^2S}{4Tt}} \left(\frac{r^2S/4T}{t^2}\right)$$

$$= -\frac{2c}{rt} \frac{r^2S}{4Tt} e^{\frac{-r^2S}{4Tt}}$$

$$= \frac{c}{t} \left(-\frac{2rS}{4Tt}\right) e^{\frac{-r^2S}{4Tt}}$$

Integrando respecto de r

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{c}{t} e^{\frac{-r^2S}{4Tt}}$$

Volviendo a la relación supuesta de integración por - inspección y derivando como producto respecto de r.

$$r\frac{\partial s}{\partial r} = -2c\, e^{\frac{-r^2S}{4Tt}}$$

$$r\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} = -2c\, e^{\frac{-r^2S}{4Tt}} \left(-\frac{2rS}{4Tt}\right)$$

$$r\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{c}{t} e^{\frac{-r^2S}{4Tt}} \frac{rS}{T}$$

Multiplicando por r.

$$r^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} r = \underbrace{\frac{c}{t} e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}}}_{\partial s/\partial t} r^2 \frac{S}{T}$$

$$r^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} r = \frac{S}{T} r^2 \frac{\partial s}{\partial t}$$

Que es la ecuación diferencial; y por lo tanto la relación supuesta es correcta, ya que dividiendo entre r^2, da la ecuación diferencial del incremento negativo del gasto.

LA CONSTANTE C

$$Q_{neto} = Q_{estacionario} + \text{Incremento}$$

Recordando que el incremento es negativo. Si lo escribimos como (+) el gasto estacionario es negativo.

$$Q_{neto} = -2\pi \ T \ r \frac{\partial s}{\partial r} + \int_o^r 2\pi \ r \ dr \ S \frac{\partial s}{\partial t}$$

Recordando: $\Delta Q = Q_{r+dr} - Q_r$; $(-Q_{r+dr}) = -Q_r$ + Incremento

$$(-Q_{r+dr}) = -Q_r - (-\Delta Q)$$

$$\Delta Q = 2\pi \ r \ dr \ S \frac{\partial . s}{\partial \ t}$$

$$Q_{neto} = - Qr + (Qr + dr - Qr)$$

Poniendo los valores de $r \ \frac{\partial \ s}{\partial \ r}$ y de $\frac{\partial \ s}{\partial \ t}$

$$Q_{neto} = -2\pi \ T \ (-2c \ e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}}) + 2\pi \int_0^r r \ dr \ S \frac{c}{t} \ e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}}$$

$$Q_{neto} = 4\pi \ T \ c \ e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}} + \frac{(-) 2\pi c (4T)}{2} \int_0^r e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}} r \ dr \ S \ (\frac{-2}{4Tt})$$

Al tomar limites ya se puede escribir Q_{total}, de - extracción

$$Q_T = 4\pi \ T \ c \ e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}} - 4\pi \ T \ c \ e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}} + 4\pi \ T \ c$$

$Q_T = 4\pi \ T \ c \quad : \quad c = \frac{Qt}{4\pi \ T}$ constante

Dimensiones de c ; $\frac{L^3 \ T^{-1}}{L^2 \ T^{-1}} = L$

El valor del abatimiento s una vez fijo r, (2 pozos)- se puede escribir ds en lugar de ∂s

$$ds = \frac{c}{t}\, e^{\frac{-r^2 S}{4Tt}}\, dt$$

$$\text{si}\quad \frac{r^2 S}{4T} = b \;;\quad \frac{r^2 S}{4Tt} = u$$

$$\text{entonces :}\quad \frac{b}{t} = u \;;\; -\frac{b}{t} = -u$$

$$\frac{1}{t} = \frac{u}{b} \;;\; t = \frac{b}{u} \;;\; \frac{dt}{du} = -\frac{b}{u^2} \;;\; dt = -\frac{b}{u^2}\, du$$

$$\text{si } t = 0 \;;\quad u \to \infty$$

$$\text{si } t = t \;;\quad u \to u$$

$$s = c \int_0^t \frac{1}{t}\, e^{-u} \left(-\frac{b}{u^2}\, du \right)$$

$$s = c \int_\infty^u \frac{u}{b}\, e^{-u} \left(\frac{-b}{u^2}\, du \right) \;;\quad s = -c \int_\infty^u \frac{e^{-u}}{u}\, du$$

$$s = c \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}\, du \;;\quad \text{ó}\quad \frac{s}{c} = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}\, du$$

Esta es la integral a la que llego Theis y que ahora hemos llegado a partir de la ecuación de pozos.

c) REVISION DEL NUMERO DE EULER

Mediante este procedimiento hallaremos la solución de la integral impropia : $\frac{s}{c} = \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$, a la cual llegamos en el anterior capitulo. La que desarrollaremos en serie de potencias, usando para este fín, el número de Euler.

Se define: $c = 0.5772........$

$$c = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + ... + \frac{1}{n} - \ell_n \; n$$

Se demuestra que la serie es convergente; se puede ver que la serie converge lentamente, y no se sabe si es racional o irracional.

Proccderemos a descomponer la serie en dos sumandos:

Primer sumando $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + ... + \frac{1}{n}$

Segundo sumando $l_n \; n$

Primer sumando

Toda fracción propia puede expresarse mediante una integral impropia.

$$\frac{1}{n} = \int_{0}^{\infty} e^{-nx} dx; \quad \frac{1}{1} = \int_{0}^{\infty} e^{-1x} dx; \quad \frac{1}{2} = \int_{0}^{\infty} e^{-2x} dx; \quad ... \quad \frac{1}{n} = \int_{0}^{\infty} e^{-nx} dx$$

De manera que el primer sumando se puede expresar así:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \int_0^{\infty} e^{-1x}dx + \int_0^{\infty} e^{-2x}dx + \ldots\ldots + \int_0^{\infty} e^{-nx}dx$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \int_0^{\infty} (e^{-x} + e^{-2x} + \ldots\ldots + e^{-nx})dx$$

Lo encerrado en el paréntesis es una serie geometrica de razón $r = e^{-x}$; si $x > 0$ y entero; $r < 1$, en cuyo caso:

$$S_n = \frac{r(1 - r^n)}{1 - r} \quad ; \quad S_n = \frac{e^{-x}(1-e^{-nx})}{1-e^{-x}} = \frac{e^{-x}-e^{-nx-x}}{1-e^{-x}}$$

$$\therefore \quad \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}-e^{-nx-x}}{1-e^{-x}}$$

Es el primer sumando, el cual va hacia valor infinito, pues no es sino la forma de expresar la serie: $1 + \frac{1}{2} + \ldots \frac{1}{n}$ la cual ya se sabe es divergente.

<u>Segundo sumando</u>

En forma semejante, el $\log_e n$ puede expresarse también como una integral impropia, mediante la integral de Frullani:

$$\log_e n = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x} - e^{-nx}}{x} \, dx \quad (1)$$

Agrupando los dos sumandos tenemos:

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} - \frac{e^{-nx-x}}{1-e^{-x}} - \frac{e^{-x}}{x} + \frac{e^{-nx}}{x}\right) dx$$

Multiplicando numerador y denominador del segundo ter_ mino, por e^{x}

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} - \frac{e^{-nx}}{e^{x}-1} - \frac{e^{-x}}{x} + \frac{e^{-nx}}{x}\right) dx$$

Agrupando las fracciones 1a. y 3a. y a la vez 4a. - con 2a.

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} - \frac{e^{-x}}{x}\right) dx + \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-nx}}{x} - \frac{e^{-nx}}{e^{x}-1}\right) dx$$

Se puede demostrar que la última integral es nula.- (Advanced Calculus, George A. Gibson p 478)

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} - \frac{e^{-x}}{x}\right) dx$$

Sumando y restando $\frac{1}{x(x+1)}$

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} - \frac{e^{-x}}{x} + \frac{1}{x(x+1)} - \frac{1}{x(x+1)}\right) dx$$

Reagrupandolas : 3a. y 2a. ; 1a. y 4a.

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{x(x+1)} - \frac{e^{-x}}{x}\right) dx + \int_0^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} - \frac{1}{x(x+1)}\right) dx$$

La última integral es nula ; (ver Advanced Calculus; Gibson p 479)

$$c = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{x(x+1)}\right) - \frac{e^{-x}}{x}) \quad dx$$

Poniendo limites de integración de 0 a x y de x a ∞

$$c = \int_0^{x} \left(\frac{dx}{x(x+1)} + \int_x^{\infty} \frac{dx}{x(x+1)} - \int_0^{x} \frac{e^{-x}}{x} dx - \int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx\right.$$

Se puede ver que el último termino es precisamente la integral impropia que se desea desarrollar en serie de potencias; despejandola:

$$\int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = -c + \int_0^{x} \frac{dx}{x(x+1)} + \int_x^{\infty} \frac{dx}{x(x+1)} - \int_0^{x} \frac{e^{-x}}{x} dx$$

Descomponiendo el 2o. sumando del miembro de la derecha, en fracciones parciales; además, restando y sumando $\frac{dx}{x}$ al ultimo:

$$\int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x}\,dx = -c + \int_0^{x} \frac{dx}{x} - \int_0^{x} \frac{dx}{x+1} + \int_0^{\infty} \frac{dx}{x(x+1)} - \int_0^{x} \frac{e^{-x}-1}{x}\,dx - \int_0^{x} \frac{dx}{x}$$

Con lo cual se anulan, el 2o. y el último; quedando:

$$\int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x}\,dx = -c - \int_0^{x} \frac{dx}{x+1} + \int_x^{\infty} \frac{dx}{x(x+1)} - \int_0^{x} \frac{e^{-x}-1}{x}\,dx \quad \text{-----} \quad (A)$$

En el miembro de la derecha queda solo una integral impropia.

$$\int_x^{\infty} \frac{dx}{x(x+1)} = \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2+x+(1/2)^2-(1/2)^2}$$

$$= \int_x^{\infty} \frac{dx}{(x+\frac{1}{2})^2-(\frac{1}{2})^2}$$

Es de la forma

$$\int \frac{du}{u^2-a^2} = \frac{1}{2a}\ln\frac{u-a}{u+a} + c$$

$$u = x + \frac{1}{2}\ ; \qquad a = \frac{1}{2}; \qquad du = dx$$

$$\lim_{b\to\infty} \int_x^{b} \frac{dx}{(x+1/2)^2-(1/2)^2} = \lim_{b\to\infty} \left[\ln\frac{x}{x+1}\right]_x^b$$

$$= \lim_{b\to\infty} \left[\ln\frac{b}{b+1} - \ln\frac{x}{x+1}\right]$$

$$= \lim_{b\to\infty} \left[\ln \frac{b}{b+1}\right] - \ln \frac{x}{x+1}$$

$$= \lim_{b\to\infty} \left[\ln \frac{1}{1}\right] - \ln \frac{x}{x+1}$$

$$= 0 - \ln \frac{x}{x+1} = -\ln x + \ln (x+1)$$

Sustituyendo este valor en (A)

$$\int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x}\,dx = -c - \ln(x+1) - \ln x + \ln(x+1) - \int_0^x \frac{e^{-x}-1}{x}\,dx$$

$$= -c - \ln x - \int_0^x \frac{e^{-x}-1}{x}\,dx$$

La fracción de la última integral se puede desarro- llar en serie, mediante la expresión de Maclaurin.

$$\frac{e^{-x}-1}{x} = -\frac{1}{1!} + \frac{x}{2!} - \frac{x^2}{3!} + \dots$$

$$\int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x}\,dx = -c - \ln x - \int_0^x \left(-\frac{1}{1!} + \frac{x}{2!} - \frac{x^2}{3!} + \dots\right) dx$$

$$= -c - \ln x - \left[-x + \frac{x^2}{2.2!} - \frac{x^3}{3.3!} + \dots\dots\right]$$

$$= -c - \ln x + x - \frac{x^2}{2.2!} + \frac{x^3}{3.3!}$$

Poniendo u en lugar de x

$$\int_{u}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\, du = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \;.....$$

Esta es la solución de la integral impropia, a la que llegó también Theis.

III. METODO PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE UN ACUIFERO EN EL CASO DE UN CONJUNTO DE POZOS (METODO DE SUPERPOSICION).

a). EXPRESION DE JACOB

Tenemos: $s = \dfrac{Q}{4 \pi T} W(u); \quad u = \dfrac{S r^2}{4 Tt}$

$$W(u) = \int_u^\infty = \frac{e^{-u}}{u} du = -0.5772 - L_n u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \ldots$$

No se comete un error muy grande al eliminar los ultimos terminos, siempre y cuando $u < 0.02$ (suposición de Jacob)

Por lo tanto eliminando los últimos terminos nos queda:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} (- 0.5772 - L_n u) .$$

b). DESARROLLO DE LA FORMULA

Tomando en cuenta la expresión anterior tenemos que:

$$0.5772 = L_n x \; ; \; y \text{ Antilog } 0.5772 = x$$

y por lo tanto:

$$x = 1.78104 \; ; \quad \text{de donde } L_n \; 1.78104 = 0.5772$$

y así, sustituyendo y siguiendo el desarrollo algebraico inclui do a continuación, tenemos:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(- L_n \; 1.78104 - L_n \; u \right)$$

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(- L_n \; u - L_n \; 1.78 \right)$$

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(- L_n \frac{S \; r^2}{4 \; Tt} - L_n \; 1.78 \right)$$

Usando una de las leyes de los logaritmos, tenemos:

$$- L_n \frac{S \; r^2}{4 \; T \; t} = L_n \frac{4 \; T \; t}{S \; r^2} \; ; \quad \text{por lo tanto:}$$

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(L_n \frac{4 \; T \; t}{r^2 \; S} - L_n \; 1.78 \right)$$

Aplicando nuevamente logaritmos.

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(L_n \frac{4 \; T \; t \, / \, r^2 S}{1.78} \right)$$

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(L_n \; 2.24588 \frac{T \; t}{r^2 S} \right)$$

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left(L_n \; 2.24588 \frac{T}{S} - L_n \frac{r^2}{t} \right)$$

$$s = -\frac{Q}{4 \pi T} \left(L_n \frac{r^2}{t} - L_n \; 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

Pasando a logaritmos de base 10 nos queda:

$$s = -\frac{2.3 \; Q}{4 \pi T} \left(\log \frac{r^2}{t} - \log 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

$$\frac{s}{Q} = -\frac{2.3}{4 \pi T} \left(\log \frac{r^2}{t} - \log \frac{2.25 \; T}{S} \right) \text{------} \quad (A)$$

<u>Principio de superposición</u>

Tenemos un pozo de observación y dos pozos de extracción, de la siguiente manera:

$$C_1 = \frac{2.3 \; Q1}{4 \pi T} \; ; \qquad C_2 = \frac{2.3 \; Q2}{4 \pi T}$$

$$s_1 = - C_1 \left(\log \frac{r_1^2}{t_1} - \log 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

$$s_2 = - C_2 \left(\log \frac{r_2^2}{t_2} - \log \; 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

$$s_1 + s_2 = - \frac{2.3 \; Q1}{4 \pi T} \log \frac{r_1^2}{t_1} - \frac{2.3 \; Q2}{4 \pi T} \log \frac{r_2^2}{t_2} + \frac{2.3 \; Q1}{4 \pi T} \log 2.25 \frac{T}{S} +$$

$$+ \frac{2.3 \; Q2}{4 \pi T} \log \; 2.25 \frac{T}{S}$$

Dividiendo entre: $Q_1 + Q_2 = Q_t$

$$\frac{s_1 + s_2}{Q_t} = \frac{-2.3\ Q_1}{4\pi T\ Q_t} \log \frac{r_1^2}{t_1} - \frac{2.3\ Q_2}{4\pi T Q_t} \log \frac{r_2^2}{t_2} + \frac{2.3\ Q_1}{4\pi T Q_t} \log 2.25\ \frac{T}{S} + \frac{2.3\ Q_2}{4\pi T\ Q_t} \log 2.25\ \frac{T}{S}$$

$$\frac{s_1 + s_2}{Q_t} = -\frac{2.3}{4\pi T} \left(\frac{Q_1}{Q_t} \log \frac{r_1^2}{t_1} + \frac{Q_2}{Q_t} \log \frac{r_2^2}{t_2}\right) + \frac{2.3}{4\pi T} \log 2.25\ \frac{T}{S} \times \left(\frac{Q_1}{Q_t} + \frac{Q_2}{Q_t}\right)$$

Generalizando para un pozo de observación y varios de estracción:

$$\frac{\Sigma s_i}{\Sigma Q_i} = -\frac{2.3}{4\pi T} \left[\left(\sum_i^n \frac{Q_i}{Q_t} \log \frac{r_i^2}{t_i} - \log 2.25\ \frac{T}{S}\ \underbrace{\left(\frac{\Sigma Q_i}{Q_t}\right)}_{=1} \right) \right]$$

$$\frac{\Sigma s_i}{\Sigma Q_i} = -\frac{2.3}{4\pi T} \left(\sum_1^n \frac{Q_i}{Q_t} \log \frac{r_i^2}{t_i} - \log 2.25\ \frac{T}{S}\right) \text{ ----------- (B)}$$

Comparando A y B. El abatimiento total en el pozo de observación por unidad de gasto total, es igual a la suma de los productos de las fracciones de los gastos de cada pozo, (respecto del gasto total) por sus respectivos logaritmos, de- los cocientes de los cuadrados de sus distancias a sus tiem- - pos.

Este principio fuê comprobado por Cooper y Jacob.

Si se logran dos pruebas con sus s_i se pueden resolver como simultaneas, para obtener "S" y "T".

c) EJEMPLO DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

Primeramente encontraremos los coeficientes de Transmisibilidad "T" y Almacenamiento "S", usando el principio - de superposición. Después aplicaremos los valores de "T" y - "S" y encontraremos el abatimiento de cada pozo, trabajando independientemente y comprobaremos sumando cada uno de los abatimientos, que serán igual al abatimiento del pozo de observación.

Datos:

Se tiene tres pozos de bombeo y uno de observación, - con los que haremos dos pruebas.

distancias al pozo de observación:

r_1 = 100 m.

r_2 = 150 m.

r_3 = 200 m.

Primera prueba

Q_1 = 40 lt/s	Abat. (pozo obs.) = 46.00 m.
Q_2 = 60 lt/s	Tiempo = 15 días
Q_3 = 20 lt/s	

Segunda prueba

Q_1 = 50 lt/s	Abatimiento =63.74 m.
Q_2 = 75 lt/s	Tiempo = 20 días
Q_3 = 25 lt/s	

Utilizando la ecuación para un conjunto de pozos.

$$\frac{\Sigma s_i}{\Sigma Q_i} = - \frac{2.3}{4\pi T} \left(\sum_{1}^{n} \frac{Q_i}{Q_t} \log \frac{r_i^2}{t_i} - \log 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

Primera prueba

Q_i/Q_t	$\log (r_i^2 / t_i)$	$(Q_i/Q_t) \log(r_i^2/t_i)$
$\frac{40}{120} = \frac{1}{3}$	$\log \frac{100^2}{15 \times 86400} = -2.11261$	- 0.70420
$\frac{1}{2}$	-1.76042	- 0.88021
$\frac{1}{6}$	-1.51055	- 0.25176
		- 1.83617

$s_i = 46.00$ m. $Q_i = 0.120$ m^3/s

$$\frac{s_i}{Q_i} = 383.33 = -\frac{2.3}{4\pi T}(-1.83617 - \log 2.25\frac{T}{S}) \ldots (1)$$

Segunda prueba

$\frac{1}{3}$	-2.23754	-0.74584
$\frac{1}{2}$	-1.88536	-0.94268
$\frac{1}{6}$	-1.63548	-0.27258
		-1.96110

$s_i = 63.74$ m. ; $Q_i = 0.150$ m^3/s

$$\frac{s_i}{Q_i} = 424.94 = -\frac{2.3}{4\pi T}(-1.9611 - \log 2.25\frac{T}{S}) \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

Resolviendo simultaneamente las ecuaciones. Restando la ecuación (1) de la (2). tenemos:

$$424.94 - 383.33 = -\frac{2.3}{4\pi T}(-1.9611 + 1.83617)$$

Despejando el valor de "T" tenemos:

$$T = -\frac{2.3}{4\pi x 41.61}(-0.12493); \quad \underline{\underline{T = 0.00055\ m^3/s/m}}.$$

Ahora encontraremos el valor de "S" sustituyendo el valor de "T" en la ecuación (1).

$$383.33 = -\frac{2.3}{4\pi x 5.5\ x 10^{-4}}(-1.83617 - \log 2.25\ \frac{5.5\ x\ 10^{-4}}{S})$$

$$383.33 = -332.7785\ (-1.8361 - \log 2.25\ x\ 5.5\ x\ 10^{-4} + \log S)$$

$$\log S = -\frac{383.33}{332.77} + 1.8361 + \log 2.25 \times 5.5 \times 10^{-4}$$

$$S = \text{antilog } 2.225 \ ; \qquad \underline{\underline{S = 0.006}}$$

Ya conocidos los valores de "T" y "S" procederemos a comprobar el Principio de Súperposición.

Usando la ecuación (A), y trabajando independientemente:

$$s = -\frac{2.3\ Q}{4\ \pi\ T}(\log \frac{r^2}{t} - \log \frac{2.25\ T}{S})$$

		Abatimiento en cada pozo (m)
En la primera prueba t = 15 días	Para el pozo 1 trab. ind.	s_1 = 19.00
	" " 2 "	$+s_2$ = 21.46
	" " 3 "	s_3 = 5.49
		45.95

En la segunda prueba t=20 días	Para el pozo No. 1	s_1 = 25.82
	Para el pozo No. 2	$+s_2$ = 29.95
	Para el pozo No. 3	s_3 = 7.90
		63.67 m.

Con lo anterior comprobamos el Principio de Superposición ya que:

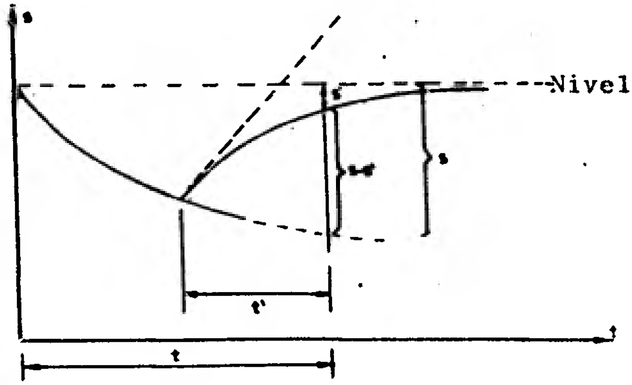
Para la primera prueba s_i = 45.95 m. ≐ 46.00 m.

Para la segunda prueba s_i = 63.67 m. ≐ 63.74 m.

Con lo anterior demostramos la validez del principio de Superposición.

d) METODO DE RECUPERACIONES

El método para encontrar las constantes de un acuífero en el caso de un conjunto de pozos (Método de superposición) también es valido para cuando tenemos lecturas de recuperaciones en vez de abatimientos. En realidad este método se desarrolló a partir de la observación de las recuperaciones en un pozo.



Lo que se mide

s' = abat. residual

$s' = s-(s-s')$

$s-s'$ = Recuperación

$$s = c\left(-C - \text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt}\right) : \qquad s = -cC - c\text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s - s' = c\left(-C - \text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt'}\right) : \qquad s-s' = -cC - c\text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt'}$$

$$s' = -c\text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt} + c\text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt'}$$

en donde:

$c = \frac{Q}{4\pi T}$ y haciendo operaciones

$C = 0.5772$

$$s' = c\ \text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt'} - c\ \text{Ln}\,\frac{r^2 S}{4Tt}$$

usando logaritmos:

$s' = c\ \text{Ln}\,\frac{t}{t'}$; sustituyendo el valor de c

$$s' = \frac{Q}{4\pi T}\ \text{Ln}\,\frac{t}{t'}$$

Graficando los valores de s' (abatimientos residuales) en escala aritmética, contra valores de $\frac{t}{t'}$, en escala logaritmica, se puede obtener T:

para dos puntos tenemos: s'_1 , t'_1 y s'_2 , t'_2

$$T = \frac{Q}{4\pi(s'_2 - s'_1)} \quad 2.3 \log \frac{t'_1}{t'_2}$$

recondando $\quad s - s' = c\ (-C - \mathrm{Ln}\ \frac{r^2\ S}{4\ T\ t'})$

Recuperación= Expresión de Jacob para abatimientos, pero con tiempos t' contados a partir del instante en que se interrumpe el funcionamiento de la bomba.

Posteriormente cuando se experimente solo variando el gasto (disminuyendolo) en Δ Q, se tendran solo variaciones de nivel (recuperaciones parciales).

Volviendo a la expresión de abatimientos de Jacob y modificandola (solo de forma), para un pozo de extracción y un pozo de observación a una distancia r .

$$s = \frac{Q}{4\ \pi\ T} (-\ 0.5772 - \mathrm{Ln}\ u)$$

$0.5772 = \mathrm{Ln}\ x$: $\quad$ Antilog $0.5772 = x$; $x = 1.78104$

$$\mathrm{Ln}\ 1.78104 = 0.5772$$

$$s = \frac{Q}{4\ \pi\ T} (-\ \mathrm{Ln}\ 1.78104 - \mathrm{Ln}\ u)$$

$$u = \frac{Sr^2}{4\ T\ t}$$

$$s = \frac{Q}{4\ \pi\ T} \left(\mathrm{Ln} \frac{4\ T\ t}{r^2 S} - \mathrm{Ln}\ 1.78104 \right)$$

$$s = \frac{Q}{4\ \pi\ T} \left(\mathrm{Ln} \frac{4Tt\ /\ r^2 S}{1.78104}\right) = \frac{Q}{4\pi T} \left(\mathrm{Ln}\ 2.24588 \frac{T\ t}{r^2\ S}\right)$$

$$s = \frac{Q}{4\ \pi\ T} \left(\mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T}{S} - \mathrm{Ln} \frac{r^2}{t}\right)$$

$$s = -\frac{Q}{4\ \pi\ T} \left(\mathrm{Ln} \frac{r^2}{t} - \mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T}{S}\right)$$

$$s = -\frac{2.3\ Q}{4\ \pi\ T} \left(\log \frac{r^2}{t} - \log \frac{2.25\ \ T}{s} \right)$$

$$\frac{s}{Q} = -\frac{2.3}{4\ \pi\ T} \left(\log \frac{r^2}{t} - \log \frac{2.25\ T}{S}\right) \text{-------- (A)}$$

Con la expresiÓn para recuperaciones puede hacerse lo mismo y obtener expresiones identicas.

Recuperación: $s - s' = c \left(-\ C - \mathrm{Ln} \frac{r^2\ \ S}{4\ \ T\ \ t'}\right)$

tenemos que: $\mathrm{Ln}\ 1.78104 = 0.5772 = C$

$$s - s' = c \left(-\ \mathrm{Ln}\ 1.78104 - \mathrm{Ln} \frac{r^2\ \ S}{4\ \ T\ \ t'}\right)$$

$$s - s' = c \left(\mathrm{Ln} \frac{4\ T\ t'}{r^2\ S} - \mathrm{Ln}\ 1.78104 \right)$$

$$s - s' = c \left(\mathrm{Ln} \frac{4Tt'/r^2 S}{1.78104} \right) = c \left(\mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T\ t'}{r^2\ S} \right)$$

$$s - s' = c \left(\mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T}{S} - \mathrm{Ln} \frac{r^2}{t'} \right)$$

$$s - s' = -c \left(\mathrm{Ln} \frac{r^2}{t'} - \mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

Sustituyendo el valor de c.

$$s - s' = - \frac{Q}{4 \pi T} \left(\mathrm{Ln} \frac{r^2}{t'} - \mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

en donde: $s - s'$ = Recuperación

s' = Abatimientos Residuales

t' = Tiempos contados a partir del instante en que se para la bomba.

Si se conviene en llamar s a las recuperaciones y t a los tiempos a partir del momento en que se para la bomba, la expresión:

$$s = - \frac{Q}{4 \pi T} \left(\mathrm{Ln} \frac{r^2}{t} - \mathrm{Ln}\ 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

se puede usar para recuperaciones en lugar de abatimientos.

No olvidar que lo que se mide son abatimientos residuales.

Un pozo de observación y dos pozos de extracción, sea que se trate de abatimientos o recuperaciones con la advertencia de la nomenclatura mencionada.

Es decir, si se trata de abatimientos los tiempos se cuentan desde que se inicie el bombeo, y "s" son los abatimientos de niveles, tal como se miden: profundidades respecto del nivel freatico.

Si se trata de recuperaciones los tiempos t' se cuentan a partir del instante en que se para la bomba, y las recuperaciones s son las diferencias del abatimiento contado desde el abatimiento respecto del instante en que se inicia el bombeo, menos el abatimiento residual que se mide.

$$c_1 = \frac{2.3\ Q}{4\ \pi\ T} \quad ; \quad c_2 = \frac{2.3\ Q}{4\ \pi\ T}$$

Trabajando independientemente. Un solo s_1 con su correspondiente t_1

$$s_1 = -\ c_1 \left(\log \frac{r_1^2}{t_1} - \log 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

$$s_2 = -\ c_2 \left(\log \frac{r_2^2}{t_2} - \log 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

IV. OTROS METODOS PARA OBTENER LAS CONSTANTES "T" Y "S"

a) METODO DE SUPERPOSICION DE CURVAS

En base a las formulas de Theis:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \; ; \qquad u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

El propio Theis desarrolló un metodo gráfico de solución para determinar los parámetros T y S, siguiendo la siguiente secuela:

a) Trazar una curva tipo W(u) - 1/u en papel con doble trazado logaritmico.

b) Construir la gráfica, abatimiento —— tiempo (cuando se tiene un solo pozo de observación), con los datos obtenidos en el campo.

c) Superponer las gráficas, manteniendo los ejes paralelos, y buscar la coincidencia de las curvas de campo y la curva tipo.

d) Seleccionar un punto de ajuste, y obtener sus coordenadas.

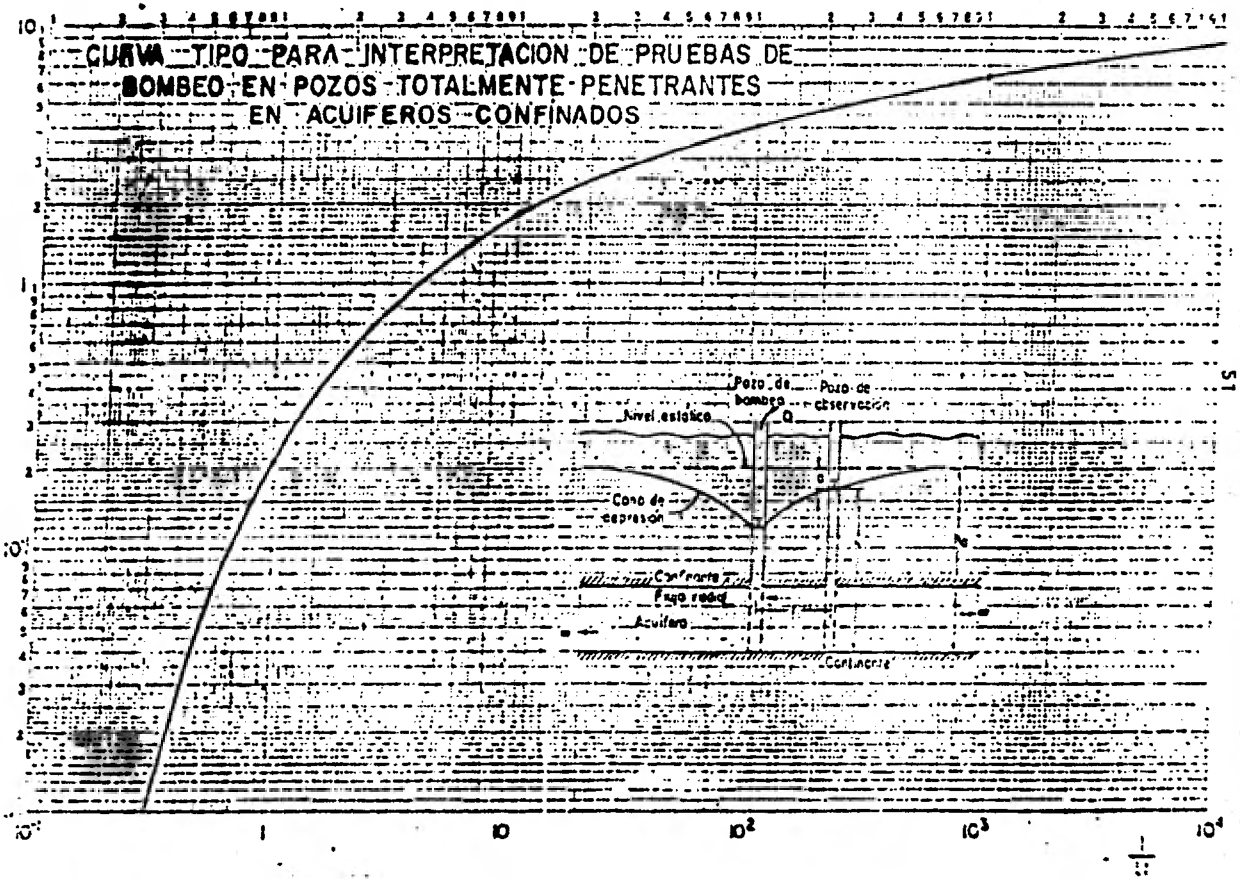
e) Substituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones de Theis, y despejar los valores de T y S.

Por lo general los puntos correspondientes a los primeros tiempos de la prueba, son los que presentan una mayor discrepancia entre las condiciones reales, y las hipótesis establecidas para la obtención de la fórmula, ya que existe un cierto retraso entre el abatimiento de la superficie piezométrica, y la liberación del agua, retraso que puede ser mayor en esa parte de la prueba, en la que los niveles se abaten rapidamente.

Por otro lado, el caudal puede variar apreciablemente por el incremento brusco de la carga de bombeo, etc.; para tiempos mayores de bombeo estas discrepancias se van minimizando, y se tiene un mejor ajuste entre la teoría y las condiciones reales.

A continuación, presento las gráficas de la curva tipo y la curva de campo, necesarias para encontrar las constantes. También presento, las tablas en las que se encuentran los valores de la función de pozo en relación con los de u.

Junto con la curva de campo, presento las observaciones realizadas en una prueba de bombeo, y la interpretación con un ajuste a la curva tipo (pag. 54).



CURVA TIPO PARA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN POZOS TOTALMENTE PENETRANTES EN ACUIFEROS CONFINADOS

FIG.-3

TABLA Nº 1

TABLAS DE LA FUNCION DE POZO

N	N × 10^{-15}	N × 10^{-14}	N × 10^{-13}	N × 10^{-12}	N × 10^{-11}	N × 10^{-10}	N × 10^{-9}	N × 10^{-8}
1,0	33,9616	31,6590	29,3561	27,0535	24,7512	22,4486	20,1460	17,8435
1,1	33,8662	31,5637	29,2611	26,9585	24,6559	22,3533	20,0507	17,7482
1,2	33,7792	31,4767	29,1741	26,8715	24,5689	22,2663	19,9637	17,6611
1,3	33,6992	31,3966	29,0940	26,7914	24,4889	22,1863	19,8837	17,5811
1,4	33,6251	31,3225	29,0199	26,7173	24,4147	22,1122	19,8096	17,5070
1,5	33,5561	31,2535	28,9509	26,6483	24,3458	22,0432	19,7406	17,4380
1,6	33,4916	31,1890	28,8864	26,5838	24,2812	21,9786	19,6760	17,3735
1,7	33,4309	31,1283	28,8258	26,5232	24,2206	21,9180	19,6154	17,3128
1,8	33,3738	31,0712	28,7686	26,4660	24,1634	21,8608	19,5583	17,2557
1,9	33,3197	31,0171	28,7145	26,4120	24,1094	21,8068	19,5042	17,2016
2,0	33,2684	30,9658	28,6632	26,3607	24,0581	21,7555	19,4529	17,1503
2,1	33,2196	30,9170	28,6145	26,3119	24,0093	21,7067	19,4041	17,1015
2,2	33,1731	30,8705	28,5679	26,2653	23,9628	21,6602	19,3576	17,0550
2,3	33,1286	30,8261	28,5235	26,2209	23,9183	21,6157	19,3131	17,0106
2,4	33,0861	30,7835	28,4809	26,1783	23,8758	21,5732	19,2706	16,9680
2,5	33,0453	30,7427	28,4401	26,1375	23,8349	21,5323	19,2298	16,9272
2,6	33,0060	30,7035	28,4009	26,0983	23,7957	21,4931	19,1905	16,8880
2,7	32,9683	30,6657	28,3631	26,0606	23,7580	21,4554	19,1528	16,8502
2,8	32,9319	30,6294	28,3268	26,0242	23,7216	21,4190	19,1164	16,8138
2,9	32,8968	30,5943	28,2917	25,9891	23,6865	21,3839	19,0813	16,7788
3,0	32,8629	30,5604	28,2578	25,9552	23,6526	21,3500	19,0474	16,7449
3,1	32,8302	30,5276	28,2250	25,9224	23,6198	21,3172	19,0146	16,7121
3,2	32,7984	30,4958	28,1932	25,8907	23,5881	21,2855	18,9829	16,6803
3,3	32,7676	30,4651	28,1625	25,8599	23,5573	21,2547	18,9521	16,6495
3,4	32,7378	30,4352	28,1326	25,8300	23,5274	21,2249	18,9223	16,6197
3,5	32,7088	30,4062	28,1036	25,8010	23,4985	21,1959	18,8933	16,5907
3,6	32,6806	30,3780	28,0755	25,7729	23,4703	21,1677	18,8651	16,5625
3,7	32,6532	30,3506	28,0481	25,7455	23,4429	21,1403	18,8377	16,5351
3,8	32,6266	30,3240	28,0214	25,7188	23,4162	21,1136	18,8110	16,5085
3,9	32,6006	30,2980	27,9954	25,6928	23,3902	21,0877	18,7851	16,4825
4,0	32,5753	30,2727	27,9701	25,6675	23,3649	21,0623	18,7598	16,4572
4,1	32,5506	30,2480	27,9454	25,6428	23,3402	21,0376	18,7351	16,4325
4,2	32,5265	30,2239	27,9213	25,6187	23,3161	21,0136	18,7110	16,4084
4,3	32,5029	30,2004	27,8978	25,5952	23,2926	20,9900	18,6874	16,3848
4,4	32,4800	30,1774	27,8748	25,5722	23,2696	20,9670	18,6644	16,3619
4,5	32,4575	30,1549	27,8523	25,5497	23,2471	20,9446	18,6420	16,3394
4,6	32,4355	30,1329	27,8303	25,5277	23,2252	20,9226	18,6200	16,3174
4,7	32,4140	30,1114	27,8088	25,5062	23,2037	20,9011	18,5985	16,2959
4,8	32,3929	30,0904	27,7878	25,4852	23,1826	20,8800	18,5774	16,2748
4,9	32,3723	30,0697	27,7672	25,4646	23,1620	20,8594	18,5568	16,2542
5,0	32,3521	30,0495	27,7470	25,4444	23,1418	20,8392	18,5366	16,2340
5,1	32,3323	30,0297	27,7271	25,4246	23,1220	20,8194	18,5168	16,2142
5,2	32,3129	30,0103	27,7077	25,4051	23,1026	20,8000	18,4974	16,1948
5,3	32,2939	29,9913	27,6887	25,3861	23,0835	20,7809	18,4783	16,1758
5,4	32,2752	29,9726	27,6700	25,3674	23,0648	20,7622	18,4597	16,1571

N	N × 10^{-7}	N × 10^{-6}	N × 10^{-5}	N × 10^{-4}	N × 10^{-3}	N × 10^{-2}	N × 10^{-1}	N
1,0	15,5400	13,2383	10,9357	8,6332	6,3315	4,0379	1,8229	[illegible]
1,1	15,4456	13,1430	10,8404	8,5379	6,2363	3,9436	1,7371	[illegible]
1,2	15,3586	13,0560	10,7534	8,4509	6,1494	3,8576	1,6595	[illegible]
1,3	15,2785	12,9759	10,6734	8,3709	6,0695	3,7785	1,5889	[illegible]
1,4	15,2044	12,9018	10,5993	8,2968	5,9955	3,7054	1,5241	[illegible]
1,5	15,1354	12,8328	10,5303	8,2278	5,9266	3,6374	1,4645	[illegible]
1,6	15,0700	12,7683	10,4657	8,1634	5,8621	3,5739	1,4092	[illegible]
1,7	15,0103	12,7077	10,4051	8,1027	5,8016	3,5143	1,3578	[illegible]
1,8	14,9531	12,6505	10,3479	8,0455	5,7446	3,4581	1,3098	[illegible]
1,9	14,8990	12,5964	10,2939	7,9915	5,6906	3,4050	1,2649	[illegible]
2,0	14,8477	12,5451	10,2426	7,9402	5,6394	3,3547	1,2227	[illegible]
2,1	14,7989	12,4964	10,1938	7,8914	5,5907	3,3069	1,1829	[illegible]
2,2	14,7524	12,4498	10,1473	7,8449	5,5443	3,2614	1,1454	[illegible]
2,3	14,7080	12,4054	10,1028	7,8004	5,5000	3,2179	1,1099	[illegible]
2,4	14,6654	12,3628	10,0603	7,7579	5,4575	3,1763	1,0762	[illegible]
2,5	14,6246	12,3220	10,0194	7,7172	5,4167	3,1365	1,0443	[illegible]
2,6	14,5854	12,2828	9,9802	7,6779	5,3776	3,0983	1,0139	[illegible]
2,7	14,5476	12,2450	9,9425	7,6401	5,3400	3,0615	0,9849	[illegible]
2,8	14,5113	12,2087	9,9061	7,6038	5,3037	3,0261	0,9573	[illegible]
2,9	14,4762	12,1736	9,8710	7,5687	5,2687	2,9920	0,9309	[illegible]
3,0	14,4423	12,1397	9,8371	7,5348	5,2349	2,9591	0,9057	[illegible]
3,1	14,4095	12,1069	9,8043	7,5020	5,2022	2,9273	0,8815	[illegible]
3,2	14,3777	12,0751	9,7726	7,4703	5,1706	2,8965	0,8583	[illegible]
3,3	14,3470	12,0444	9,7418	7,4395	5,1399	2,8668	0,8361	[illegible]
3,4	14,3171	12,0145	9,7120	7,4097	5,1102	2,8379	0,8147	[illegible]
3,5	14,2881	11,9855	9,6830	7,3807	5,0813	2,8099	0,7942	[illegible]
3,6	14,2600	11,9574	9,6548	7,3526	5,0532	2,7827	0,7745	[illegible]
3,7	14,2325	11,9300	9,6274	7,3252	5,0259	2,7563	0,7554	[illegible]
3,8	14,2059	11,9033	9,6007	7,2985	4,9993	2,7306	0,7371	[illegible]
3,9	14,1799	11,8773	9,5748	7,2725	4,9735	2,7056	0,7194	[illegible]
4,0	14,1546	11,8520	9,5495	7,2472	4,9482	2,6813	0,7024	[illegible]
4,1	14,1299	11,8273	9,5248	7,2225	4,9236	2,6576	0,6859	[illegible]
4,2	14,1058	11,8032	9,5007	7,1985	4,8997	2,6344	0,6700	[illegible]
4,3	14,0823	11,7797	9,4771	7,1749	4,8762	2,6119	0,6546	[illegible]
4,4	14,0593	11,7567	9,4541	7,1520	4,8533	2,5899	0,6397	[illegible]
4,5	14,0368	11,7342	9,4317	7,1295	4,8310	2,5684	0,6253	[illegible]
4,6	14,0148	11,7122	9,4097	7,1075	4,8091	2,5474	0,6114	[illegible]
4,7	13,9933	11,6907	9,3882	7,0860	4,7877	2,5268	0,5979	[illegible]
4,8	13,9723	11,6697	9,3671	7,0650	4,7667	2,5068	0,5848	[illegible]
4,9	13,9516	11,6491	9,3465	7,0444	4,7462	2,4871	0,5721	[illegible]
5,0	13,9314	11,6289	9,3263	7,0242	4,7261	2,4679	0,5598	[illegible]
5,1	13,9116	11,6091	9,3065	7,0044	4,7064	2,4491	0,5478	[illegible]
5,2	13,8922	11,5896	9,2871	6,9850	4,6871	2,4306	0,5362	[illegible]
5,3	13,8732	11,5706	9,2681	6,9659	4,6681	2,4126	0,5250	[illegible]
5,4	13,8545	11,5519	9,2494	6,9473	4,6495	2,3948	0,5140	[illegible]

Para la gama de valores de u que interesen, el [illegible] de la columna correspondiente en la primera columna se encontrarán en la misma columna elegida, los va[illegible] N potencias de 10, y en la misma fila de los valores de N que aparecen [illegible] correspondientes de la función de pozo W(u).

TABLAS DE LA FUNCION DE POZO (CONTINUACION)

N \ u	N × 10^-15	N × 10^-14	N × 10^-13	N × 10^-12	N × 10^-11	N × 10^-10	N × 10^-9	N × 10^-8	N × 10^-7	N × 10^-6	N × 10^-5	N × 10^-4	N × 10^-3	N × 10^-2	N × 10^-1	N
5,5	32,2568	29,9542	27,6516	25,3491	23,0465	20,7439	18,4413	16,1387	13,8361	11,5336	9,2310	6,9289	4,6313	2,3775	0,5034	[illegible]
5,6	32,2388	29,9362	27,6336	25,3310	23,0285	20,7259	18,4233	16,1207	13,8181	11,5155	9,2130	6,9109	4,6134	2,3604	0,4930	[illegible]
5,7	32,2211	29,9185	27,6159	25,3133	23,0108	20,7082	18,4056	16,1030	13,8004	11,4978	9,1953	6,8932	4,5958	2,3437	0,4830	[illegible]
5,8	32,2037	29,9011	27,5985	25,2959	22,9934	20,6908	18,3882	16,0856	13,7830	11,4804	9,1779	6,8758	4,5785	2,3273	0,4732	[illegible]
5,9	32,1866	29,8840	27,5814	25,2789	22,9763	20,6737	18,3711	16,0685	13,7659	11,4633	9,1608	6,8588	4,5615	2,3111	0,4637	[illegible]
6,0	32,1698	29,8672	27,5646	25,2620	22,9595	20,6569	18,3543	16,0517	13,7491	11,4465	9,1440	6,8420	4,5448	2,2953	0,4544	0,000360
6,1	32,1533	29,8507	27,5481	25,2455	22,9429	20,6403	18,3378	16,0352	13,7326	11,4300	9,1275	6,8254	4,5283	2,2803	0,4454	[illegible]
6,2	32,1370	29,8344	27,5318	25,2293	22,9267	20,6241	18,3215	16,0189	13,7163	11,4138	9,1112	6,8092	4,5122	2,2647	0,4366	[illegible]
6,3	32,1210	29,8184	27,5158	25,2133	22,9107	20,6081	18,3055	16,0029	13,7003	11,3978	9,0952	6,7932	4,4962	2,2494	0,4280	[illegible]
6,4	32,1053	29,8027	27,5001	25,1975	22,8949	20,5923	18,2898	15,9872	13,6846	11,3820	9,0795	6,7775	4,4806	2,2346	0,4197	[illegible]
6,5	32,0898	29,7872	27,4846	25,1820	22,8794	20,5768	18,2742	15,9717	13,6691	11,3665	9,0640	6,7620	4,4652	2,2201	0,4115	[illegible]
6,6	32,0745	29,7719	27,4693	25,1667	22,8642	20,5616	18,2590	15,9564	13,6538	11,3512	9,0487	6,7467	4,4501	2,2058	0,4036	[illegible]
6,7	32,0595	29,7569	27,4543	25,1517	22,8491	20,5465	18,2439	15,9414	13,6388	11,3362	9,0337	6,7317	4,4351	2,1917	0,3959	[illegible]
6,8	32,0446	29,7421	27,4395	25,1369	22,8343	20,5317	18,2291	15,9265	13,6240	11,3214	9,0189	6,7169	4,4204	2,1779	0,3883	[illegible]
6,9	32,0300	29,7275	27,4249	25,1223	22,8197	20,5171	18,2145	15,9119	13,6094	11,3068	9,0043	6,7023	4,4059	2,1643	0,3810	[illegible]
7,0	32,0157	29,7131	27,4105	25,1079	22,8053	20,5027	18,2001	15,8976	13,5950	11,2924	8,9899	6,6879	4,3916	2,1508	0,3738	[illegible]
7,1	32,0015	29,6989	27,3963	25,0937	22,7911	20,4885	18,1860	15,8834	13,5808	11,2782	8,9757	6,6737	4,3775	2,1376	0,3668	[illegible]
7,2	31,9875	29,6849	27,3823	25,0797	22,7771	20,4746	18,1720	15,8694	13,5668	11,2642	8,9617	6,6598	4,3636	2,1246	0,3599	[illegible]
7,3	31,9737	29,6711	27,3685	25,0659	22,7633	20,4608	18,1582	15,8556	13,5530	11,2504	8,9479	6,6460	4,3500	2,1118	0,3532	[illegible]
7,4	31,9601	29,6575	27,3549	25,0523	22,7497	20,4472	18,1446	15,8420	13,5394	11,2368	8,9343	6,6324	4,3364	2,0991	0,3467	[illegible]
7,5	31,9467	29,6441	27,3415	25,0389	22,7363	20,4337	18,1311	15,8286	13,5260	11,2234	8,9209	6,6190	4,3231	2,0867	0,3403	[illegible]
7,6	31,9334	29,6308	27,3282	25,0257	22,7231	20,4205	18,1179	15,8153	13,5127	11,2102	8,9076	6,6057	4,3100	2,0744	0,3341	[illegible]
7,7	31,9203	29,6178	27,3152	25,0126	22,7100	20,4074	18,1048	15,8022	13,4997	11,1971	8,8946	6,5927	4,2970	2,0623	0,3280	[illegible]
7,8	31,9074	29,6049	27,3023	24,9997	22,6971	20,3945	18,0919	15,7893	13,4868	11,1842	8,8817	6,5798	4,2842	2,0503	0,3221	[illegible]
7,9	31,8947	29,5921	27,2895	24,9869	22,6844	20,3818	18,0792	15,7766	13,4740	11,1714	8,8689	6,5671	4,2716	2,0386	0,3163	[illegible]
8,0	31,8821	29,5795	27,2769	24,9744	22,6718	20,3692	18,0666	15,7640	13,4614	11,1589	8,8563	6,5545	4,2591	2,0269	0,3106	[illegible]
8,1	31,8697	29,5671	27,2645	24,9619	22,6594	20,3568	18,0542	15,7516	13,4490	11,1464	8,8439	6,5421	4,2468	2,0155	0,3050	[illegible]
8,2	31,8574	29,5548	27,2523	24,9497	22,6471	20,3445	18,0419	15,7393	13,4367	11,1342	8,8317	6,5298	4,2346	2,0042	0,2996	[illegible]
8,3	31,8453	29,5427	27,2401	24,9375	22,6350	20,3324	18,0298	15,7272	13,4246	11,1220	8,8195	6,5177	4,2226	1,9930	0,2943	[illegible]
8,4	31,8333	29,5307	27,2282	24,9256	22,6230	20,3204	18,0178	15,7152	13,4126	11,1101	8,8076	6,5057	4,2107	1,9820	0,2891	[illegible]
8,5	31,8215	29,5189	27,2163	24,9137	22,6112	20,3086	18,0060	15,7034	13,4008	11,0982	8,7957	6,4939	4,1990	1,9711	0,2840	[illegible]
8,6	31,8098	29,5072	27,2046	24,9020	22,5995	20,2969	17,9943	15,6917	13,3891	11,0865	8,7840	6,4822	4,1874	1,9604	0,2790	[illegible]
8,7	31,7982	29,4957	27,1931	24,8905	22,5879	20,2853	17,9827	15,6801	13,3776	11,0750	8,7725	6,4707	4,1759	1,9498	0,2742	[illegible]
8,8	31,7868	29,4842	27,1816	24,8791	22,5765	20,2739	17,9713	15,6687	13,3661	11,0636	8,7610	6,4593	4,1646	1,9393	0,2694	[illegible]
8,9	31,7755	29,4729	27,1703	24,8678	22,5652	20,2626	17,9600	15,6574	13,3548	11,0523	8,7497	6,4480	4,1534	1,9290	0,2647	[illegible]
9,0	31,7643	29,4618	27,1592	24,8566	22,5540	20,2514	17,9488	15,6462	13,3437	11,0411	8,7386	6,4368	4,1423	1,9187	0,2602	[illegible]
9,1	31,7533	29,4507	27,1481	24,8455	22,5429	20,2404	17,9378	15,6352	13,3326	11,0300	8,7275	6,4258	4,1313	1,9087	0,2557	[illegible]
9,2	31,7424	29,4398	27,1372	24,8346	22,5320	20,2294	17,9268	15,6243	13,3217	11,0191	8,7166	6,4148	4,1205	1,8987	0,2513	[illegible]
9,3	31,7315	29,4290	27,1264	24,8238	22,5212	20,2186	17,9160	15,6135	13,3109	11,0083	8,7058	6,4040	4,1098	1,8888	0,2470	[illegible]
9,4	31,7209	29,4183	27,1157	24,8131	22,5105	20,2079	17,9053	15,6028	13,3002	10,9976	8,6951	6,3933	4,0992	1,8791	0,2429	[illegible]
9,5	31,7103	29,4077	27,1051	24,8025	22,4999	20,1973	17,8948	15,5922	13,2896	10,9870	8,6845	6,3827	4,0887	1,8695	0,2387	[illegible]
9,6	31,6998	29,3972	27,0946	24,7920	22,4895	20,1869	17,8843	15,5817	13,2791	10,9765	8,6740	6,3723	4,0784	1,8599	0,2347	[illegible]
9,7	31,6894	29,3868	27,0843	24,7817	22,4791	20,1765	17,8739	15,5713	13,2688	10,9662	8,6637	6,3620	4,0681	1,8505	0,2308	[illegible]
9,8	31,6792	29,3766	27,0740	24,7714	22,4688	20,1663	17,8637	15,5611	13,2585	10,9559	8,6534	6,3517	4,0579	1,8412	0,2269	[illegible]
9,9	31,6690	29,3664	27,0639	24,7613	22,4587	20,1561	17,8535	15,5509	13,2483	10,9458	8,6433	6,3416	4,0479	1,8320	0,2231	[illegible]

Para la gama de valores de u que interesen, elíjase la columna correspondiente a u = 1 × potencia de 10, y en la misma fila de los valores de N (que aparecen en la primera columna) se encontrarán, en la misma columna elegida, los valores correspondientes de la función de pozo W(u).

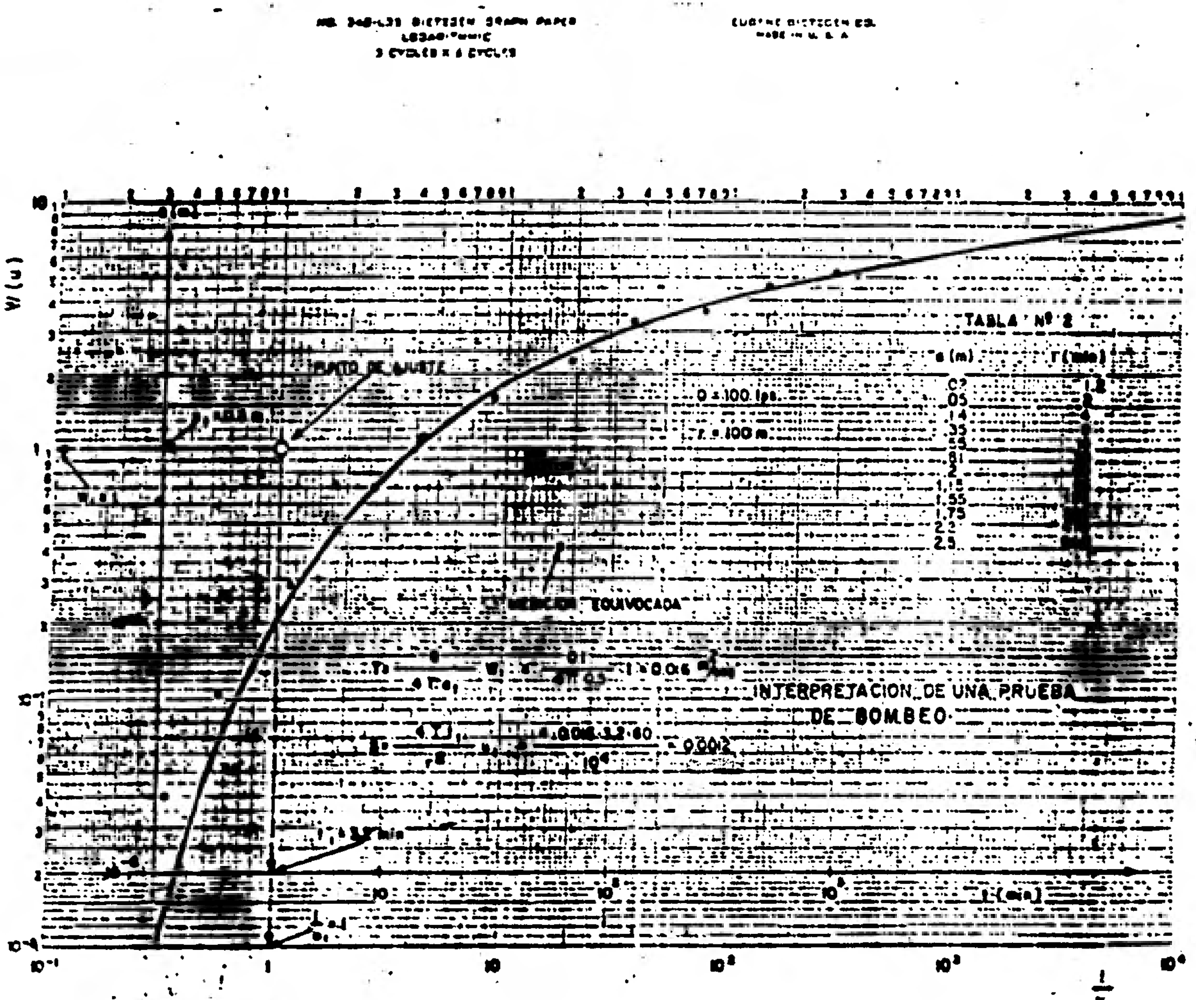


TABLA Nº 2
PUNTO DE AJUSTE
Q = 100 lps
MEDICION EQUIVOCADA
INTERPRETACION DE UNA PRUEBA DE BOMBEO
t (min)

FIGURA 4

b) METODO DE JACOB

Trabajando con la fórmula de Theis, Jacob encontró que para tiempos largos ($t > 5 S r^2 / T$), los valores de u resultan lo suficientemente pequeños para que la fórmula de Theis, pueda modificarse sin error significativo a la forma siguiente:

$$a = \frac{2.3\,Q}{4\,\pi\,T} \log \frac{2.25\,Tt}{r^2\,S}$$

A partir de esta fórmula, desarrolló el método gráfico de interpretación que lleva su nombre, y que consiste en lo siguiente:

1. Construir la gráfica abatimiento (en escala aritmética) contra tiempo (en escala logaritmica).

2. Pasar una recta por los puntos que se alinean y determinar su pendiente. Los tiempos correspondientes a los primeros mínutos de la prueba generalmente se apartan de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ($t>5\ S\ r^2\ /\ T$) para los cuales no es valida la fórmula de Jacob.

3. Si la pendiente de la recta de ajuste es m, la transmisibilidad puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$T = \frac{0.183\ Q}{m}$$

4. Determinar el valor del tiempo t_o, para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.

5. Calcular el coeficiente de almacenamiento mediante la expresión:

$$S = \frac{2.25\ T\ to}{r^2}$$

En la figura explicativa, se muestra la aplicación del metodo cuando se tiene un solo pozo de observación.

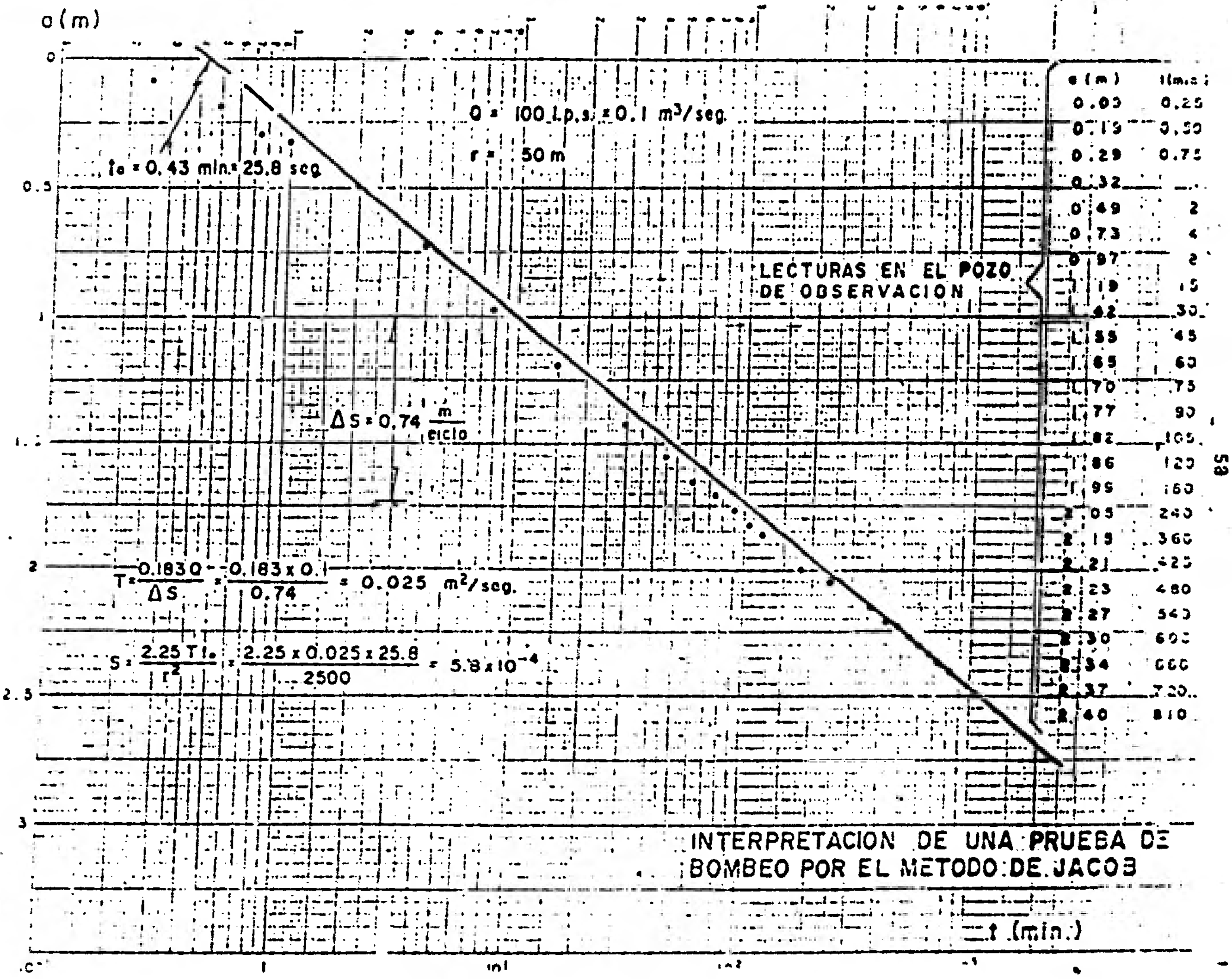
El método anterior también puede seguirse, cuando se conocen los abatimientos en varios pozos de observación para un tiempo dado. En este caso se grafica el abatimiento (en escala aritmética) contra la distancia (en escala logaritmica).

Los coeficientes buscados se obtienen mediante las fórmulas:

$$T = \frac{0.366\ Q}{m} \qquad y \qquad S = \frac{2.25\ T\ t}{r_o^2}$$

En donde r_o corresponde al valor para el cual la prolongación de la recta de ajuste, intercepta la línea de abatimiento nulo.

La forma mas general del metodo, se aplica cuando se tienen observaciones en varios pozos de observación para diferentes tiempos. En este caso, los valores de la relación t/r^2 se anotan en el eje logaritmico, y se sigue la secuela descrita anteriormente.



a (m)	t (min.)
0.03	0.25
0.19	0.50
0.29	0.75
0.32	
0.49	2
0.73	4
0.97	8
1.19	15
1.42	30
1.55	45
1.65	60
1.70	75
1.77	90
1.82	105
1.86	120
1.95	160
2.05	240
2.19	360
2.21	420
2.23	480
2.27	540
2.30	600
2.34	660
2.37	720
2.40	810

INTERPRETACION DE UNA PRUEBA DE BOMBEO POR EL METODO DE JACOB

V. MODELO PARA UN CONJUNTO DE POZOS

Una poderosa herramienta usada al analizar los datos de la prueba de bombeo (cuando una amplia variedad de condiciones fundan su existencia), es el principio de "Superposición".

Este principio asume que: 'El total de los abatimientos producidos, en algún punto en una descarga multiple de pozos en un campo, es igual a la suma de los abatimientos producidos por cada pozo solo.'

Los resultados de las pruebas en los pozos de bombeo, y por lo tanto el principio de superposición, fueron comprobados por Cooper H. H. y Jacob C.E. en 1946.

Usando el principio de superposición desarrollado anteriormente llegamos a la siguiente ecuación de un conjunto de n pozos bombeados simultaneamente.

$$\frac{\Sigma \Delta s_i}{\Sigma Q_i} = - \frac{2.3}{4 \pi T} \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta Q_i}{Q_t} \log \frac{r_i^2}{t_i} - \log 2.25 \frac{T}{S} \right)$$

en donde:

$\frac{s_i}{Q_i}$ = Abatimiento específico en un campo de pozos de bombeo o recuperación específica.

r_i^2 = Cuadrado de la distancia entre el pozo de observación y cada uno de los pozos de bombeo.

t_i = Tiempo de duración de la prueba de bombeo.

$Q_t = \Sigma Q_i$ = Suma de los gastos extraídos de los pozos, en todo el campo.

T = Coeficiente de transmisibilidad.

S = Coeficiente de Almacenamiento.

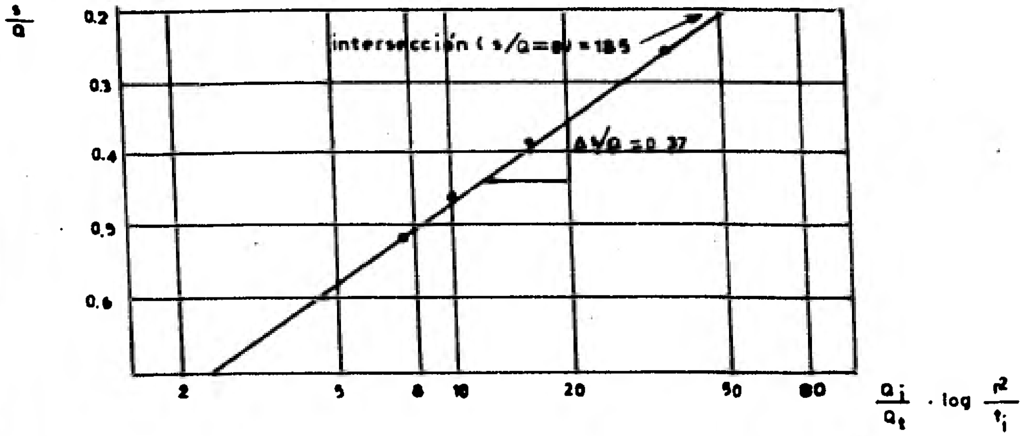
Lograndose dos pruebas con sus s_i y Q_i se puede resolver la anterior ecuación como dos ecuaciones simultaneas; ya que en esa expresión solo hay dos incognitas T y S.

Sin embargo es mejor obtener tres o cuatro medidas o pruebas, para el hidrograma y trazar una línea recta aproximado con minimos cuadrados o alguna otra curva.

La solución será derivada graficamente; Graficando:

$$\frac{Q_i}{Q_t} \log \frac{r^2}{t_i} \qquad \text{contra} \qquad \frac{s_i}{Q_t}$$

en papel semilogaritmico; de la siguiente manera:



Los datos de las pruebas de bombeo se arreglan en - una tabla para mayor facilidad y este arreglo usarlo para re-- solver la ecuación en una computadora digital, dada la gran - cantidad de operaciones que se tienen que hacer.

La transmisibilidad "T" y el almacenamiento "S" pueden obtenerse de la gráfica con las siguientes relaciones:

$$T = \frac{2.3 / 4\pi}{\Delta (s_i / Q_t) / \log \text{ciclo}}$$

$$S = 2.25\, T / \overline{(r^2 / t)}_o$$

En donde: $\overline{(r^2 / t)}_o = \left(\frac{Q_i}{Q_t} \log \frac{r_i^2}{t_i}\right)_o$ o sea la

intersección de la línea recta con $s_i / Q_t = 0$

Este método es muy versatil, pues el procedimiento de análisis es el mismo para diez descargas diferentes en un simple pozo de bombeo, como para diez pozos de bombeo en descarga constante ó también nos sirve si observamos abatimientos o recuperaciones.

MODELO

Colocando al campo de pozos en coordenadas cartesianas podemos obtener el abatimiento en cualquier punto o pozo del campo; debido al bombeo de los pozos restantes.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \text{Ln } u) \qquad y \quad u = \frac{S\, r^2}{4\, T\, t}$$

obtenemos nuestro modelo:

$$s\ (x,\ y,\ t) = \frac{1}{4\ \pi\ T} \sum_{k=1}^{n} Q_k\ (-0.5772 - \mathrm{Ln}\ (\frac{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}{4\ T\ t}\ S)\ )$$

En donde:

x_k e y_k : Son coordenadas del kaesimo pozo de bombeo.

$s\ (x,\ y,\ t)$: Es el abatimiento en un punto x, y en algún - tiempo t debido a n pozos de bombeo.

Se puede usar como en este caso una sola transmisibilidad o usar transmisibilidades direccionales T_x y T_y en cuyo-caso tendremos:

$$s\ (x,\ y,\ t) = \frac{1}{4\pi\sqrt{T_x\ T_y}} \sum_{k=1}^{n} Q_k(-0.5772-\mathrm{Ln}\ \ (\frac{(x-x_k)^2}{T_x} + \frac{(y-yk)^2}{T_Y})\ \frac{S}{4t})$$

VI. EJEMPLO NUMERICO PARA EL MODELO DE CAMPO DE POZOS

En realidad se trata de la resolución de dos problemas:

1º Encontrar las constantes del acuífero (T y S) en un campo de pozos, usando el principio de Superposición.

2º Ya conocidas las constantes del acuífero, encontrar el abatimiento en un punto cualquier del campo de pozos (aplicación del modelo).

Para desarrollar el ejemplo necesitamos los siguientes datos:

1º r = Distancia de todos los pozos al punto de observación
ΔQ = Variación de los gastos en los pozos de bombeo.
s = Abatimiento o recuperación en el pozo de observación
t = Tiempo de duración de las pruebas.

2º Con los datos anteriores encontrar T y S del acuífero; ahora colocando ejes cartesianos al campo de pozos podemos encontrar el abatimiento en cualquier punto del acuífero y necesitaremos:

- Coordenadas cartesianas de todos los pozos
- Tiempo para el que se desea conocer el abatimiento
- Coordenadas del punto en que se desea conocer el comportamiento del acuífero.
- Constantes T y S.

DATOS:

Tenemos un conjunto de pozos; uno de observación y cuatro de bombeo. Los datos son vaciados en una tabla para mayor facilidad en su manejo.

(1) No Pozo	(2) r (dist.) (m)	(3) t (seg)	(4) s(abat) (m)	(5) r^2/t	(6) log (r^2/t)	(7) ΔQ_i (m.c.s.)	(8) ΔQ_i(log r^2/t)	(9) (8)/Qt	(10) Antilog (9)	(11) s/Q_t
1	2655.42	691200		10.20	1.008	0.0339	0.0342			
2	1850.75	691200		4.95	0.694	0.0351	0.0244			
3	1931.21	691200		5.39	0.732	0.0555	0.0406			
4	1689.81	691200		4.13	0.616	0.0849	0.0523			
			2.01			0.2094	0.1515	0.7235	5.29	9.6000
1	2655.42	1555200		4.53	0.656	0.0339	0.0222			
2	1850.75	1555200		2.20	0.342	0.0351	0.0120			
3	1931.21	1555200		2.40	0.380	0.0555	0.0211			
4	1689.81	1555200		1.84	0.264	0.0849	0.0244			
			2.96			0.2094	0.0777	0.3711	2.35	14.136
1	2655.42	2419200		2.91	0.463	0.0339	0.0157			
2	1850.75	2419200		1.41	0.149	0.0351	0.0052			
3	1931.21	2419200		1.54	0.187	0.0555	0.0104			
4	1689.81	2419200		1.18	0.072	0.0849	0.0061			
			3.51			0.2094	0.0374	0.1786	1.51	16.762
1	2655.42	3283200		2.15	0.332	0.0339	0.0112			
2	1850.75	3283200		1.04	0.017	0.0351	0.0006			
3	1931.21	3283200		1.14	0.057	0.0555	0.00316			
4	1689.81	3283200		0.87	-0.060	0.0849	-0.00509			
			3.93			0.2094	0.00987	0.0471	1.11	18.768

$$\frac{\Sigma \Delta s_i}{\Sigma Q_i} = -\frac{2.3}{4\pi T}\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta Q_i}{Q_t}\log\frac{r_i^2}{t_i} - \log 2.25\frac{T}{S}\right]$$

AJUSTE DE LA CURVA USANDO MINIMOS CUADRADOS

	Y	X	X^2	XY	Ycalc
	9.600	0.7235	0.5234	6.945	9.514
	14.136	0.3711	0.1377	5.245	14.261
	16.762	0.1786	0.0319	2.993	16.854
	18.768	0.0471	0.0022	0.8839	18.625
sumas	59.266	1.3203	0.6952	16.0669	
medias	14.816	0.33007	0.1738	4.0167	

$$\Sigma R_i^2 = \Sigma \left[\alpha + \beta\ (X_i - \overline{X}) - Y_i \right]$$

$$\alpha = \overline{Y} = 14.816$$

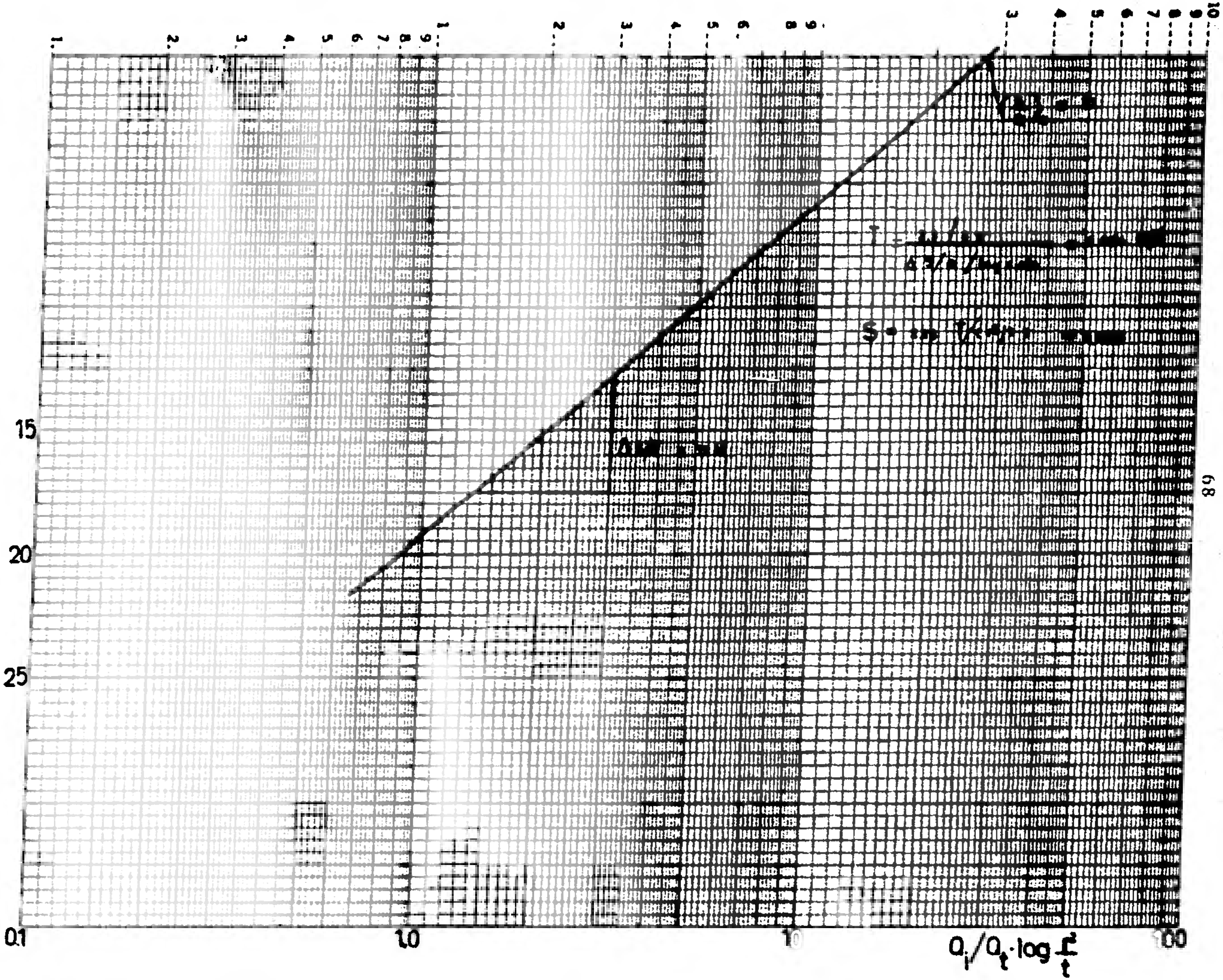
$$\beta = \frac{\Sigma X_i Y_i - n\overline{X}\ \overline{Y}}{\Sigma X_i^2 - n\ \overline{X}^2} = \frac{16.0669 - 4x0.33x14.816}{0.695218 - 4\ (0.33007)^2} = -13.467$$

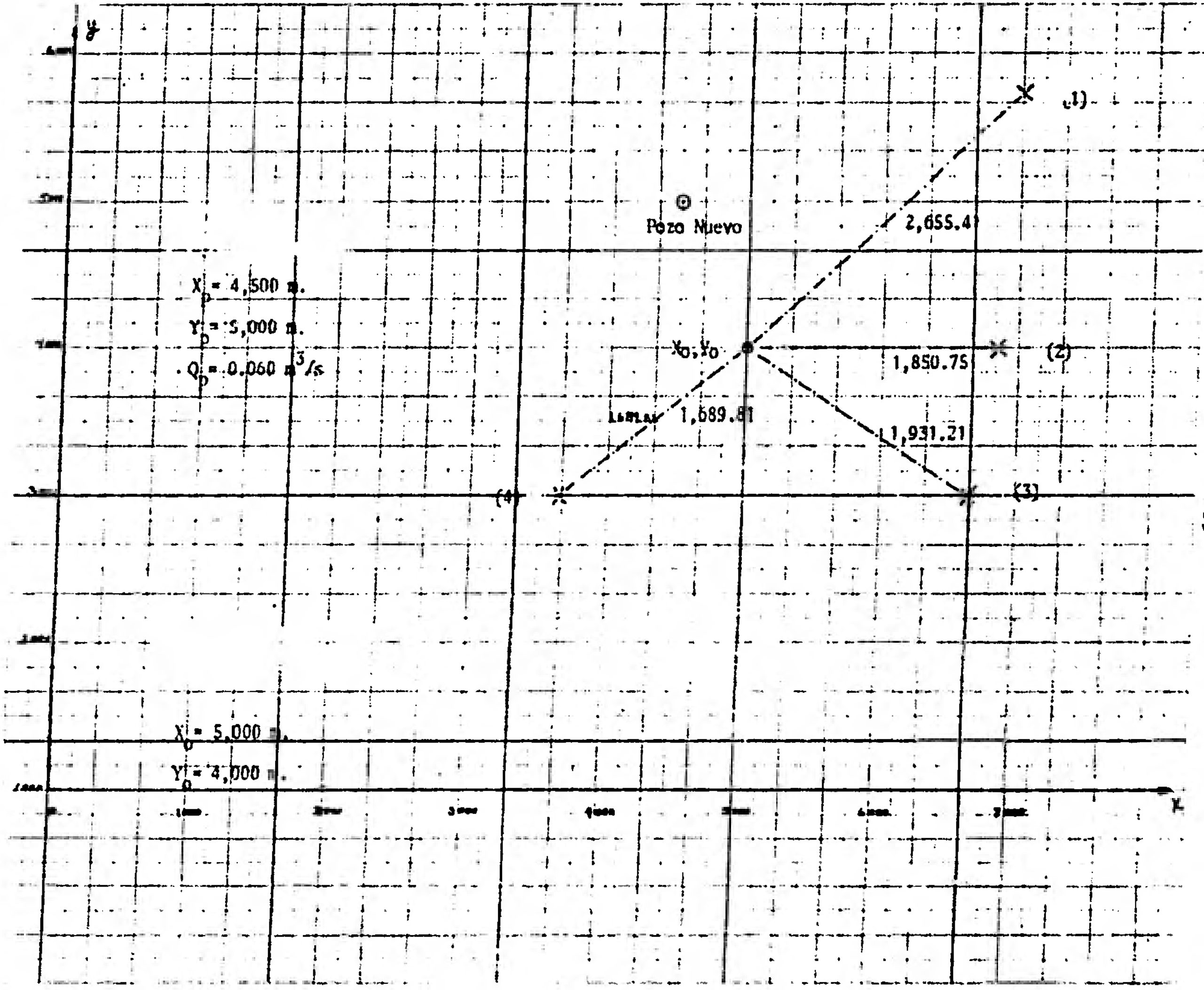
$$Y_c = 14.816 + (-13.47)\ (X-0.33)$$

$$Y_c = 19.26 - 13.47\ X$$

Ahora graficaremos en papel semilogaritmico los valo--res:

X	Antilog X	Y
0.7235	5.29	9.514
0.3711	2.35	14.261
0.1786	1.51	16.854
0.0471	1.11	18.625


15
20
25
0.1
1.0
10
100
$Q_i/Q_t \cdot \log \frac{r^2}{t}$


y
Pozo Nuevo
2,655.4
Xp = 4,500 m.
Yp = 5,000 m.
Qp = 0.060 m3/s
Xo,Yo
1,850.75
(1)
(2)
(3)
(4)
1,689.81
1,931.21
Xo = 5,000 m.
Yo = 4,000 m.
x

Supongamos que vamos a abrir un nuevo pozo y deseamos saber cual será el abatimiento en ese lugar en un tiempo determinado (3 años), bombeandose a gasto constante (60 ℓt/s). Para lo cual calcularemos el abatimiento en el lugar del nuevo pozo, debido al bombeo de los pozos que ya funcionan. Después calcularemos el abatimiento total; debido a todos los pozos y el nuevo que se abrirá.

$$s\,(x,y,t) = \frac{1}{4\,\pi T} \sum_{k=1}^{n} Qk \left(-0.5772 - Ln \frac{\left((X-Xp)^2 + (Y-Yp)^2 \times S \right)}{4\,T\,t} \right)$$

Datos:

Xp = 4500.00 m.	Yp = 5000.00 m.	Qp = 0.060 m^3/s
X1 = 7000.00	Y1 = 5746.78	Q1 = 0.0339
X2 = 6850.75	Y2 = 4000.00	Q2 = 0.0351
X3 = 6652.14	Y3 = 3000.00	Q3 = 0.0555
X4 = 3637.85	Y4 = 3000.00	Q4 = 0.0849

t = 3 años = 94.608×10^6 seg. diametro = 0.60 m

Con las constantes encontradas anteriormente, entramos a la fórmula.

T = 0.0136 m^2/seg

S = 0.00113

$$s = \frac{1}{4\pi T} \times \quad 0.0339 \ (-0.5772 - \text{Ln} \ (\frac{(7000-4500)^2 + (5746.78-5000)^2}{4 \times 0.0136 \times 94.608 \times 10^6}$$

$$\times \ 0.00113)$$

$$0.0351 \ (-0.5772 - \text{Ln} \ (\frac{(6850.75-4500)^2 + (4000-5000)^2}{4 \ T \ t} \times 0.00113)$$

$$0.0555 \ (-0.5772 - \text{Ln} \ (\frac{(6652.14 - 4500)^2 + (3000-5000)^2}{4 \ T \ t} \times 0.00113)$$

$$0.0849 \ (-0.5772 - \text{Ln} \ (\frac{(3637.85 - 4500)^2 + (3000 - 5000)^2}{4 \ T \ t} \times 0.00113)$$

$$\begin{array}{r} 0.20098 \\ 0.20957 \\ + \ 0.31586 \\ 0.53401 \\ \hline 1.26042 \end{array}$$

$$s = \frac{1}{4\pi T} \quad (1.26042) \quad = 7.375 \text{ m.}$$

Debido a los otros Pozos.

Tomando en cuenta el nuevo Pozo tenemos:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{k=1}^{n} Qk \left(-0.5772 - Ln \left(\frac{(X-Xk)^2 + (Y-Yk)^2}{4\ T\ t} S\right)\right) +$$

$$+ Qp \left(-0.5772 - Ln \left(\frac{(d/2)^2}{4Tt} S\right)\right)$$

en donde:

d= diametro del pozo

$$0.060 \left(- 0.5772 - Ln \left(\frac{(0.60/2)^2}{4x0.0136x94.608x10^6} 0.00113\right)\right) = 1.44421$$

y sumpa = (1.26042 + 1.44421) = 2.70463

de donde

$$s = \frac{1}{4\pi T} (2.70463) = \underline{15.82 \text{ m.}}$$

Abatimiento total, debido a todos los pozos y el nuevo pozo que se abrirá.

VII. PROGRAMA PARA LA COMPUTADORA

En este capítulo se desarrolla un programa para encontrar las constantes de formación de acuiferos, tanto libres como confinados: Coeficientes de Transmisibilidad y Almacenamiento.

También con este programa se calculará el abatimiento para cualquier tiempo deseado. Está basado en el modelo matemático desarrollado en el capítulo V.

El programa resolverá el ejemplo numérico de capítulo anterior, para ejemplificar, y entender, su desarrollo; pero sabiendo que este mismo programa sirve para cualquier número de pozos; podemos trabajar ya sea con abatimientos o con recuperaciones y es aplicable tanto a acuíferos libres como a acuíferos confinados. Para encontrar el abatimiento, solo es necesario proporcionar las coordenadas del punto en que deseamos conocer el abatimiento, para el tiempo o tiempos deseados.

Los coeficientes de formación se calculan alimentando a la computadora con los datos de las pruebas (se recomienda hacer mas de dos pruebas) en todos los pozos, la cual los graficará y ajustará una recta por medio de los mínimos cuadrados (subrutina MNC) y con la pendiente de la recta aplicada a la fórmula encontramos el Coeficiente de Transmisibidad, y a partir de este calculamos el Coeficiente de Almacenamiento.

Enseguida presento el diagrama de flujo del programa, el cual se corrió en la computadora IBM 11/30 del centro de cálculo de la Facultad de Ingeniería. También presento la codificación hecha por la propia computadora, con los datos y respuestas impresas.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBRUTINA MNC

(MINIMOS CUADRADOS)

Subroutine MNC (x,y,N,A,B)

Dimensión X(50), Y (50)

SUM X = 0

SUM X^2 = 0

SUM Y = 0

SUM Y^2 = 0

I = 1, N

Sumx = Sumx + X (I)

Sumy = Sumy + Y (I)

$Sumx^2 = Sumx^2 + X(I)^2$

ZN = N

SUM XY = SUM X Y + X (I) * Y (I)

DEL = ZN * SUM X^2 - $(Sum\ X)^2$

A = (Sum Y * SUM X^2 - SUM X * SUM XY) / DEL

B = (ZN * SUM X Y - SUM X * SUM Y) / DEL

A= ABS (-A/B) ← Para obtener el valor de la abcisa cuando la ordenada = o

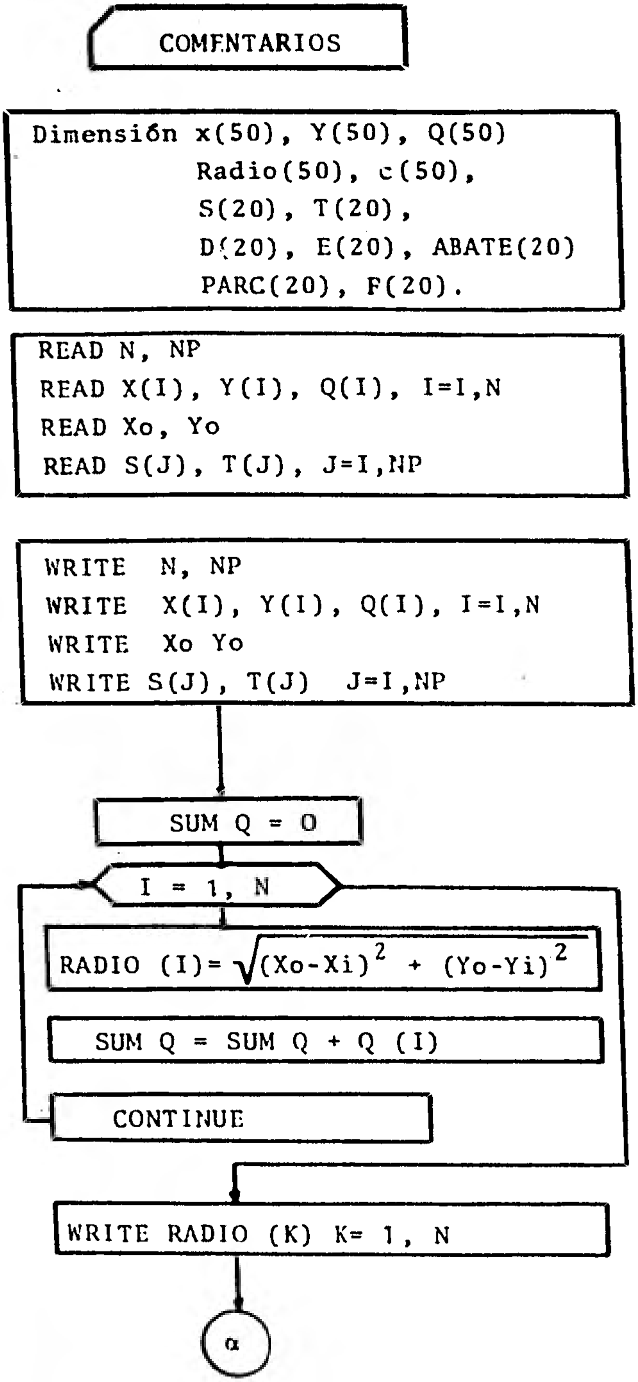
A= ANTILOG (A) ← Por haber trabajado con logaritmos

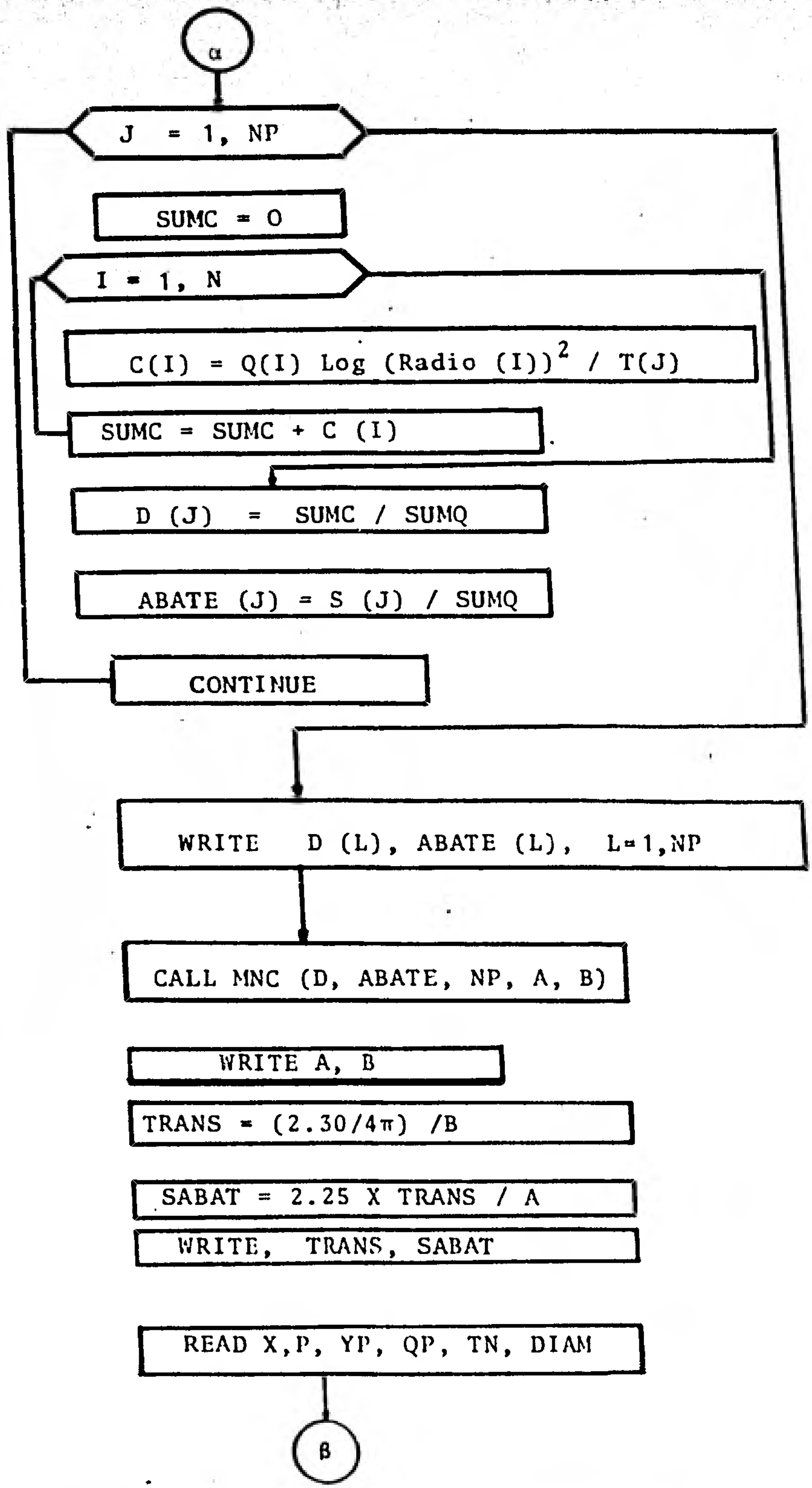
B= ABS (B) ← Por ser pendiente negativa

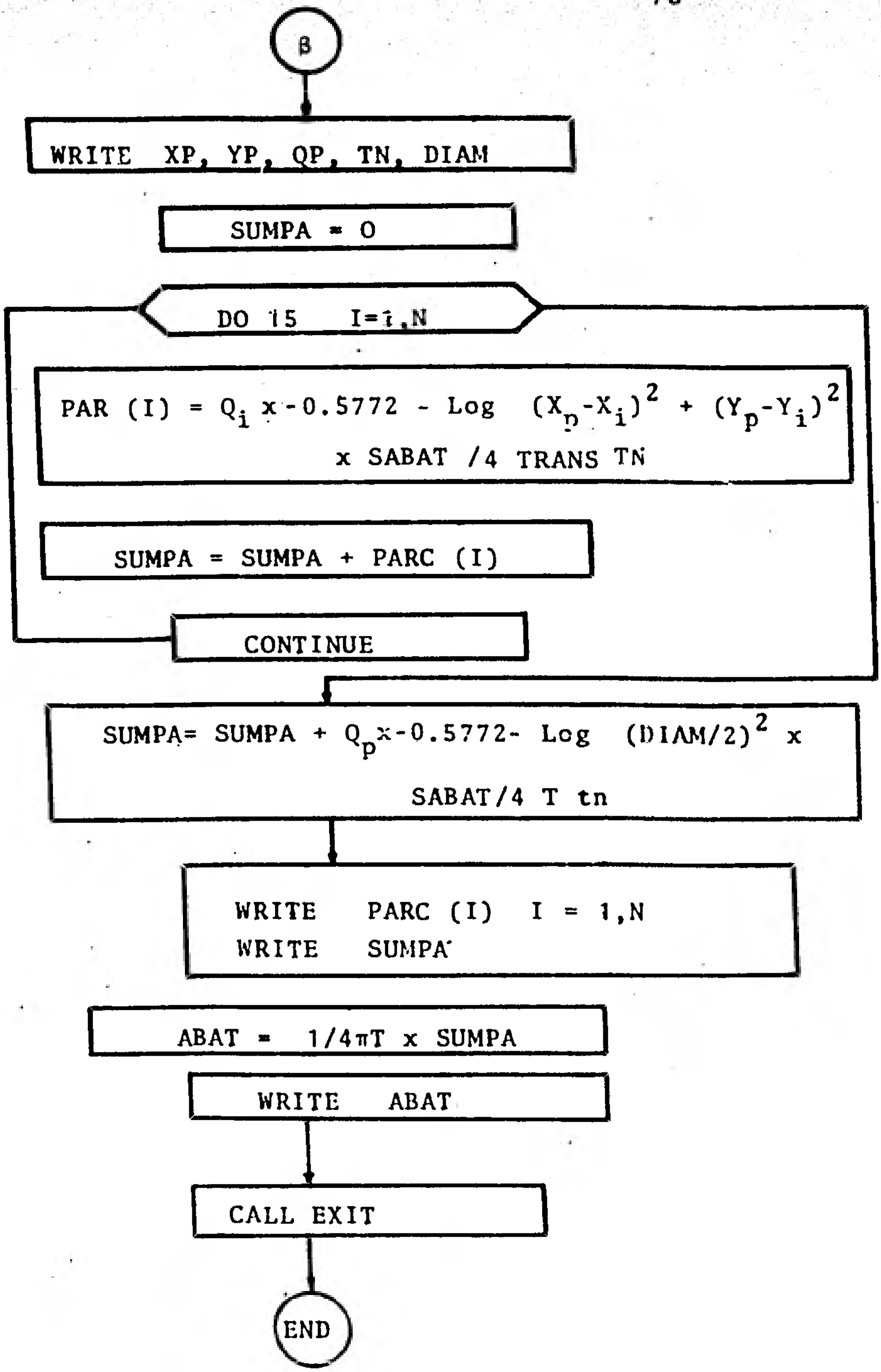
RETURN

END

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA FUENTE




α
J = 1, NP
SUMC = 0
I = 1, N
C(I) = Q(I) Log (Radio (I))2 / T(J)
SUMC = SUMC + C (I)
D (J) = SUMC / SUMQ
ABATE (J) = S (J) / SUMQ
CONTINUE
WRITE D (L), ABATE (L), L=1,NP
CALL MNC (D, ABATE, NP, A, B)
WRITE A, B
TRANS = (2.30/4π) /B
SABAT = 2.25 X TRANS / A
WRITE, TRANS, SABAT
READ X,P, YP, QP, TN, DIAM
β


B
WRITE XP, YP, QP, TN, DIAM
SUMPA = 0
DO 15 I=1,N
PAR (I) = Q_i x -0.5772 - Log $(X_p-X_i)^2$ + $(Y_p-Y_i)^2$
x SABAT /4 TRANS TN
SUMPA = SUMPA + PARC (I)
CONTINUE
SUMPA= SUMPA + Q_px-0.5772- Log $(DIAM/2)^2$ x
SABAT/4 T tn
WRITE PARC (I) I = 1,N
WRITE SUMPA
ABAT = 1/4πT x SUMPA
WRITE ABAT
CALL EXIT
END

```
PAGE   1   FAC ING
// JOB T                                   FAC ING    0311 *CECAFI*9A441*
LOG DRIVE   CART SPEC   CART AVAIL   PHY DRIVE
V2 M11   ACTUAL  8K   CONFIG  8K
// * CAMPO DE POZOS  FRANCISCO CORREA NIETO   7245924 3   280481
// FORTRAN
C-ERRS...NUMP.C...  P R O P O S I C I O N E S   F O R T R A N   F U E N T E  ...  IDENTFCN   *NOTAS DEL COMPILADOR*
              SUBROUTINE MYC(X,Y,N,A,B)
              DIMENSION X(50),Y(50)
              SUMX=0
              SUMY=0
              SUMXX=0
              SUMXY=0
              DO 10 I=1,N
              SUMX=SUMX+X(I)
              SUMY=SUMY+Y(I)
              SUMXX=SUMXX+X(I)**2
              ZN=N
           10 SUMXY=SUMXY+X(I)*Y(I)
              DEL=ZN*SUMXX-SUMX**2
              A=(SUMY*SUMXX-SUMX*SUMXY)/DEL
              B=(ZN*SUMXY-SUMX*SUMY)/DEL
              A=ABS(-A/B)
              A=10**A
              B=ABS(B)
              RETURN
              END
OPCIONES INDICADAS
  ONE WORD INTEGERS
  STANDARD PRECISION
  SAVE
USO DE MEMORIA PARA  =  MYC
  COMMON      0,      VARIABLES Y TEMPORALES-    16,   CONSTANTES Y PROGRAMA-   178
EL PUNTO RELATIVO DE ENTRADA ES 0016 (HEX)
FIN DE LA COMPILACION
*STORE      WS  UA  MYC          ** SUBPROGRAMA DISPONIBLE SOLO SI NO SIGUE UN ERROR TIPO "D" **
CART ID 0042   DB ADDR  3704   DB CNT   000F
// FOR
C-ERRS...NUMP.C...  P R O P O S I C I O N E S   F O R T R A N   F U E N T E  ...  IDENTFCN   *NOTAS DEL COMPILADOR*
        C      PROGRAMA PARA OBTENER LAS CONSTANTES DE FORMACION DE UN  ACUIFERO,T,S
        C      FRANCISCO  CORREA  NIETO.
               DIMENSION X(50),Y(50),D(50),RADIO(50),C(50),S(20),T(20)
              X,C(20),IDATE(20),PARC(10)
               CALL INFO
               READ(2,100) N,NP
               READ(2,150)(X(I),Y(I),C(I),I=1,N)
               READ(2,250) XO,YO
```

C-ERRS...NUMP.C... P R O P O S I C I O N E S F O R T R A N F U E N T E ... IDENTFCN *NOTAS DEL COMPILADOR*

```
      [illegible]
  100 FORMAT(2I4)
  200 FORMAT(F10.3,F15.2)
  250 FORMAT(2F10.2)
      WRITE(5,199) N,NP
  199 FORMAT(10X,'DATOS'//5X,2HN=I4,3X,3HNP=I4//)
      WRITE(5,299) (X(I),Y(I),C(I),I=1,N)
  299 FORMAT(5X,2HX=F9.2,' M.'4X,2HY=F9.2' M.'4X,2HQ=F8.6' M3/S.C.S.'//)
      WRITE(5,399) XC,YC
  399 FORMAT(////5X,' POZO DE OBSERVACION'//5X,'XC ='F10.2' M.'3X,'YC ='
     1F10.2' M.'////)
      WRITE(5,499)(S(J),T(J),J=1,NP)
  499 FORMAT(/////5X,'VARIACION DE NIVEL =',F7.3,' METROS',2X,'TIEMPO ='
     1F12.2,' SEGUNDOS'//)
      SUMQ=0
  150 FORMAT(2F10.2,F8.6)
      DO 1 I=1,N
      RADIO(I)=SQRT((XO-X(I))**2+(YO-Y(I))**2)
      SUMQ=SUMQ+Q(I)
    1 CONTINUE
      WRITE(5,599) (RADIO(K),K=1,N)
  599 FORMAT(////5X,'RADIO =',F12.4' METROS'//)
      DO 10 J=1,NP
      SUMC=0
      DO 5 I=1,N
      C(I)=C(I)*ALOG10(RADIO(I)**2/T(J))
  600 FORMAT(10X,' DATOS DEL ... 
     1F10.2' M.   CP ='F10.6,' M3/S.C.S.'//5X,'TIEMPO ='F12.2' SEGUNDOS
     1    DIAMETRO =',F6.2,' METROS'//////)
      SUMPA=0
      DO 15 I=1,N
  900 PAR(I)=C(I)*(-0.5772-ALOG((XP-X(I))**2+(YP-Y(I))**2)*SABAT
      WRITE(5,1000) SUMPA
 1000 FORMAT(5X,'SUMPA = 'F10.5////)
```

C-ERRS...NUMP.C... P R O P O S I C I O N E S   F O R T R A N   F U E N T E ... IDENTFCN *NOTAS DEL COMPILADOR*

```
          WRITE(5,707) ABAT
      707 FORMAT(5X,'ABATIMIENTO =',F8.2,2X,'METROS')
          CALL EXIT
          END

OPCIONES INDICADAS
 ONE WORD INTEGERS
 STANDARD PRECISION
 SAVE
 IOCS-
   1403 PRINTER
   CARD

LTD DE MEMORIA PARA -
 COMMON-      0,      VARIABLES Y TEMPORALES-   748,   CONSTANTES Y PROGRAMA-   982

FIN DE LA COMPILACION

// XEQ

        DATOS

   N=   4   NP=   4

   X=  7000.00 M.    Y=  5156.78 M.    Q=0.031900 MIO.C.S.

   X=  6850.75 M.    Y=  4000.00 M.    Q=0.035100 MIO.C.S.

   X=  5252.14 M.    Y=  3000.00 M.    Q=0.055500 MIO.C.S.

   X=  3537.85 M.    Y=  3000.00 M.    Q=0.064500 MIO.C.S.


   POZO DE OBSERVACION
  XO =   5202.00 M.   YO =   4000.00 M.


  VARIACION DE NIVEL =  2.012 METROS        TIEMPO =   691200.12 SEGUNDOS
```

```
VARIACION DE NIVEL =  2.960 METROS        TIEMPO =  1555200.25 SEGUNDOS

VARIACION DE NIVEL =  3.510 METROS        TIEMPO =  2419200.50 SEGUNDOS

VARIACION DE NIVEL =  3.930 METROS        TIEMPO =  3283200.50 SEGUNDOS

RADIO =   2625.4169 METROS

RADIO =   1850.7500 METROS

RADIO =   1931.2082 METROS

RADIO =   1669.8038 METROS

      PUNTOS DE LA GRAFICA
E =    0.223673    ABATE =     9.606406

      PUNTOS DE LA GRAFICA
E =    0.371436    ABATE =    14.135828
```

PUNTOS CE LA GRAFICA

PUNTOS CE LA GRAFICA

E = 0.646921 ABATE = 16.767913

INTERCEPC = 27.042419 PENCIENTE = 33.451CAO

TRANSMISIBILICAD = 0.013606 ALMACENAMIENTO = 0.001132

CATCS CEL POZO NUEVC

XP = 4500.0C M. YP = 5CC0.CC M. CP = 0.CACCCO M.C.S.

TIEMPC = 94600010.10SEGUNDOS CIAMETRC =0.60 METRCS

8

PARCIAL = C.20093

PARCIAL = C.20952

PARCIAL = 0.31578

PARCIAL = 0.53390

SUMMA = 2.70427

ABATIMIENTC = 15.81 METROS

VIII. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

COMENTARIOS

El agua suberranea es un recurso natural muy importante y que hasta ahora no se le ha dado la debida importancia en nuestro país, como menciono durante el desarrollo de este trabajo, el agua subterranea es mayor en volumen que el agua superficial y mas aun no se necesita gastar las fabulosas sumas de dinero, como es el caso de aprovechamientos superficiales.

El estudio del agua subterranea por medio de las fórmulas de régimen establecido fue un avance muy grande en el estudio de esta materia, sin embargo estas fórmulas no toman en cuenta el efecto del tiempo que va afectando al acuífero aunque a simple vista parezca que el acuífero ya no se abate, se observa un abatimiento a través de los años y que llegará hasta el fondo del acuífero; Entonces si se extraerá solamente la cantidad de agua que recibe el acuífero, que es lo que supone la teoría de régimen establecido.

El estudio con las fórmulas de regimen inestable en que interviene el tiempo fue un gran avance dentro del estudio moderno de las aguas subterraneas, en estas fórmulas interviene el tiempo afectando fundamentalmente las consideraciones de régimen establecido y en donde el abatimiento en un pozo de -- bombeo es función directa del tiempo de bombeo.

Aunque las fórmulas de régimen inestable desarrolladas por Theis estan basadas en la suposición de acuífero confinado, son también válidas para acuíferos libres.

El método de superposición que presento en este trabajo es un desarrollo basado en las fórmulas de Theis y en la suposición de Jacob para un conjunto de pozos, suponiendo que en cada pozo tenemos un abatimiento y el efecto de todos ellos en uno de observación, es igual a la suma de los abatimientos de cada pozo. Esta aseveración fue comprobada por Cooper y Jacob en 1946 en un campo de pozos en California.

En el desarrollo de este trabajo destacan principalmente dos temas, a saber: primero el desarrollo de la fórmula de Theis a partir del número de Euler primeramente, en el cual descomponemos en dos sumandos la serie, después la expresamos como integral impropia y la desarrollamos, hasta llegar a la fórmula de Theis:

$$\int_{u}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\, du = -0.5772 - \operatorname{Ln} u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Enseguida a partir de la ecuación de pozos, la cual - es una ecuación diferencial la que integramos y desarrollamos- hasta llegar nuevamente a la fórmula de Theis (ecuación 1).

De esta manera llegamos a la mentada fórmula por dos - caminos completamente diferentes.

El segundo tema sobresaliente es el modelo, basado en el principio de superposición, el cual es de gran ayuda cuando trabajamos con un número grande de pozos y podemos resolver -- utilizando el modelo y con la ayuda de una computadora digital, también es de interés el modelo para computadora que presento- en lenguaje Fortran, en el cual se hace uso del modelo para -- campo de pozos, y con el cual se pueden obtener las característ icas del acuífero: Transmisibidad y Almacenamiento; también - se obtiene el abatimiento en un punto cualquiera, para un tiem po dado.

Aunque en este Modelo no se toman en cuenta las recargas al acuífero, la velocidad de recarga es mucho menos que -- las extracciones, y siempre nos dará resultados dentro de la - seguridad.

La aplicación de este modelo es válida para cuando -- aún no se ha agotado el almacenamiento del acuifero, en cuyo - caso solamente se extraerá la cantidad de recarga y serán aplicables las fórmulas de régimen establecido.

CONCLUSIONES

La teoría de Theis sirve para acuíferos libres, aunque fue desarrollada para acuíferos confinados; siempre y cuando la gráfica (s,t) en escala semilogarítmica nos de una recta.

La teoría de Theis, aunque no incluye las recargas nos da resultados muy reales y errores pequeños, y dentro de la seguridad; pues los abatimientos serán menores que los predichos.

Usaremos las teorías de <u>flujo establecido</u> cuando el abatimiento ha agotado el almacenamiento del acuífero; entonces el abatimiento ya no será función del tiempo.

Este método que presento es aplicable a un campo de pozos que se pueda considerar un sistema de flujo no establecido; esto es, para un acuífero en que los abatimientos de los pozos aún dependan del tiempo. (Por ejemplo Chiconautla de 1956 a la fecha se ha abatido 20 m y continúa el proceso).

El método que presento es práctico, porque no es necesario parar la producción del campo, basta con reducir un poco el gasto y medir recuperaciones.

Me permito hacer notar mi aportación en este trabajo- que es: La Demostración del Principio y el Programa de Computadora.

IX. BIBLIOGRAFIA

1. DENNIS E. WILLIAMS. Modern Techniques in ground - Water - studies revista Journal (July 1971) pp. 433-436
   Capítulo V y VI

2. MONTEJANO URANGA FRANCISCO. Apuntes ineditos
   Capítulo II-b-c y III-a-b-d

3. FAIR, GORDON MASKEW. Geyer, Jhon Charles. Okun Daniel Alexander. Vol. I. Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales. Cap. 9 y 10.
   Capítulo I-a-b

4. JOHNSON DIVISION, UOP INC. El agua Subterranea y los pozos (Cap. 1 y 6).
   Capítulo I-a, II-a

5. TINAJERO J. ANTONIO. Apuntes de la clase de Geohidrologia (1977)
   Capítulo IV-a-b

QUETZALCOATL

Quetzalcóatl, fue quizás el más complejo y fascinante de todos los Dioses mesoamericanos. Su concepto primordial, sin duda muy antiguo en el área, parece haber sido el de un monstruo serpiente celeste con funciones dominantes de fertilidad y creatividad. A este núcleo se agregaron gradualmente otros aspectos: la leyenda lo había mezclado con la vida y los hechos del gran rey sacerdote Topiltzin, cuyo título sacerdotal era el propio nombre del Dios del que fue especial devoto. En el momento de la conquista, Quetzalcóatl, considerado como Dios único desempeñaba varias funciones: Creador, Dios del viento, Dios del planeta Venus, héroe cultural, arquetipo del sacerdocio, patrón del calendario y de las actividades intelectuales en general, etc. Un análisis adicional es necesario para poder desenredar los hilos aparentemente independientes que existen al origen de su complicada personalidad.

IMPRESO EN LOS TALLERES DE
EDITORIAL QUETZALCOATL, S.A.
MEDICINA [illegible] ENTRADA [illegible] PASEO [illegible]
FACULTAD [illegible] FACULTAD DE MEDICINA [illegible]
MEXICO [illegible]