



11474

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**Facultad de Ingeniería**

2  
2e1

**FACTORES DE DAÑO EN POZOS DESVIADOS  
PARCIALMENTE PENETRANTES**

**POR  
RAUL BARRON TORRES**

**T E S I S**

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
DE LA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA  
( PETROLERA )**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**MAYO 1991**



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

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

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

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

**FACTORES DE DAÑO EN POZOS**

**DESVIADOS PARCIALMENTE PENETRANTES**

**POR**

**RAUL BARRON TORRES**

**MAYO 1991**

DEDICADO A MI MADRE , AMPARO , A MI ESPOSA , ELDA , Y A MIS HIJAS , ELDA  
Y ANA PATRICIA.

## RECONOCIMIENTOS

EL AUTOR DESEA EXPRESAR SU AGRADECIMIENTO AL PROFESOR DR. HEBER CINCO LEY DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M. , POR SU DIRECCION , ENTENDIMIENTO Y ESTIMULO COMO ASESOR DE ESTE TRABAJO ; ASI COMO A LA GERENCIA DE PRODUCCION DE LA REGION SUR DE PETROLEOS MEXICANOS , POR LAS ATENCIONES Y RESPALDOS OTORGADOS PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

# INDICE

	Pág.
I.- RESUMEN	1
II.- INTRODUCCION	2
III.- DERIVACION MATEMATICA	3
A.- PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE FLUJO	
B.- SOLUCION DEL SISTEMA DE FLUJO	
IV.- SOLUCION PARA UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO	17
A.- DISTRIBUCION DE FLUJO YACIMIENTO SEMI-INFINITO	
B.- FACTORES DE DAÑO YACIMIENTO SEMI-INFINITO	
V.- SOLUCION PARA UN YACIMIENTO FINITO	64
A.- FACTORES DE DAÑO YACIMIENTO FINITO	
B.- EXTENSION PARA YACIMIENTOS ANISOTROPICOS	
C.- EVALUACION DE FACTORES DE DAÑO	
D.- EJEMPLO DE APLICACION	
VI.- DISCUSION DE RESULTADOS	104
VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
NOMENCLATURA	111
REFERENCIAS	113
APENDICE A: METODO DE LAS FUNCIONES DE GREEN	117
APENDICE B: PROGRAMAS DE COMPUTO	124
APENDICE C: DISCUSION SOBRE LA APLICACION DE LOS	133
TIEMPOS DE TERMINACION DEL PERIODO DE FLUJO RADIAL, INICIO DE FLUJO PSEUDORADIAL Y EL TIEMPO DE INTERSECCION DE AMBOS PERIODOS PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD VERTICAL $k_z$ .	

## I RESUMEN

Aunque se han realizado varios estudios sobre el daño de pozos desviados parcialmente penetrantes, no se han llevado a cabo estudios detallados que tomen en cuenta el efecto del daño del pozo por la invasión de fluidos de perforación hacia la formación en estos casos.

El propósito de este trabajo es realizar un estudio completo sobre el efecto del daño en un pozo desviado parcialmente penetrante. Específicamente, este estudio fue hecho sobre un yacimiento homogéneo y anisotrópico, con un pozo parcialmente penetrante de conductividad infinita. Este pozo también contiene una zona dañada debido a la reducción de la permeabilidad de la formación por la invasión de fluidos de perforación.

Un análisis del flujo relativo estabilizado contra la localización en el intervalo abierto, para varios valores del daño del pozo adimensional, nos indica que al incrementar el daño del pozo adimensional la distribución de flujo tiende a uniformizarse. Además, se demostró que el daño por penetración parcial y el daño por la reducción de permeabilidad alrededor del pozo se pueden considerar adicionales.

Se desarrolló una técnica de la evaluación de factores de daño del análisis de pruebas de presión, demostrándose la confiabilidad de la determinación de la permeabilidad vertical del análisis de pruebas de presión en pozos parcialmente penetrantes.

## II INTRODUCCION

Varios autores han estudiado el estado de flujo<sup>1-8</sup> estacionario y transitorio<sup>5,9-27</sup> hacia pozos parcialmente penetrantes. Ellos consideraron un pozo perpendicular en la formación y se concluyó que este tipo de terminación de pozos causa un decremento en la productividad del pozo. Sin embargo, como fue apuntado por Cinco Ley y colaboradores<sup>20,35</sup>, muchos pozos no penetran la formación perpendicularmente. Esta situación crea un incremento en la productividad del pozo con respecto a un pozo vertical parcialmente penetrante. Por otro lado, es común encontrar que la permeabilidad de la formación en la zona inmediata del pozo  $k_s$  es diferente a la permeabilidad real  $k$  de la formación para zonas alejadas del pozo. Cuando  $k_s < k$  se dice que el pozo está dañado; si  $k_s > k$ , el pozo está estimulado.

Al efecto causado en el flujo de fluidos por esta serie de factores se les llama factores de daño.

El propósito de este trabajo es evaluar el efecto del daño  $S$  para pozos parcialmente penetrantes utilizando la solución de conductividad infinita para el pozo en un yacimiento infinito y proponer una metodología del análisis de datos de pruebas de presión.



### III DERIVACION MATEMATICA

#### A.- PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE FLUJO

ECUACION DIFERENCIAL

CONDICION INICIAL

CONDICIONES DE FRONTERA

El estado de flujo laminar transitorio de un fluido ligeramente compresible a través de un medio poroso homogéneo e isotrópico puede ser descrito por la ecuación de difusión en coordenadas cilíndricas<sup>2º</sup>:

$$\frac{\delta^2 \Phi(r, z, t)}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \Phi(r, z, t)}{\delta r} + \frac{\delta^2 \Phi(r, z, t)}{\delta z^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\delta \Phi(r, z, t)}{\delta t} \quad (1)$$

donde  $\Phi = \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} + gz$  (POTENCIAL DE HUBBERT)

y

$$\eta = \frac{k}{\phi \mu C}$$

k,  $\phi$ ,  $\mu$ , C son constantes

La ecuación (1) fue derivada suponiendo gradientes pequeños de presión en todo el yacimiento. Si los efectos de la gravedad son despreciables, la ecuación (1) queda de la siguiente forma:

$$\frac{\delta^2 P(r, z, t)}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta P(r, z, t)}{\delta r} + \frac{\delta^2 P(r, z, t)}{\delta z^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\delta P(r, z, t)}{\delta t} \quad (2)$$

Por lo tanto, para determinar las condiciones iniciales y de fronteras del problema, nosotros consideraremos el siguiente sistema:

1.- Un medio poroso, horizontal, infinito, homogéneo e isotrópico de espesor  $h$ , porosidad  $\phi$  y permeabilidad  $k$ .  $h$ ,  $\phi$  y  $k$  son independientes de la presión y el tiempo.

2.- Un fluido ligeramente compresible de viscosidad  $\mu$  y compresibilidad  $C$  constantes.

3.- Un pozo vertical parcialmente penetrante con un intervalo productor finito  $h_w$  y radio  $r_w$  de conductividad infinita<sup>32</sup>. Esto es, el gasto de producción total del pozo  $q_w$  es constante, y la presión del pozo es uniforme en el intervalo abierto.

4.- No existe flujo a través de los límites superior e inferior del yacimiento.

5.- La presión inicial del yacimiento es  $p_i$  y no cambia cuando  $r \rightarrow \infty$ .

6.- Además, en este sistema de flujo se considera una zona de permeabilidad reducida  $k_s$  alrededor del pozo, de espesor infinitesimal debida al filtrado de los fluidos de perforación y terminación.

Una línea fuente localizada en el eje del pozo será usada para simular la producción del pozo. La figura 1 es un esquema de la

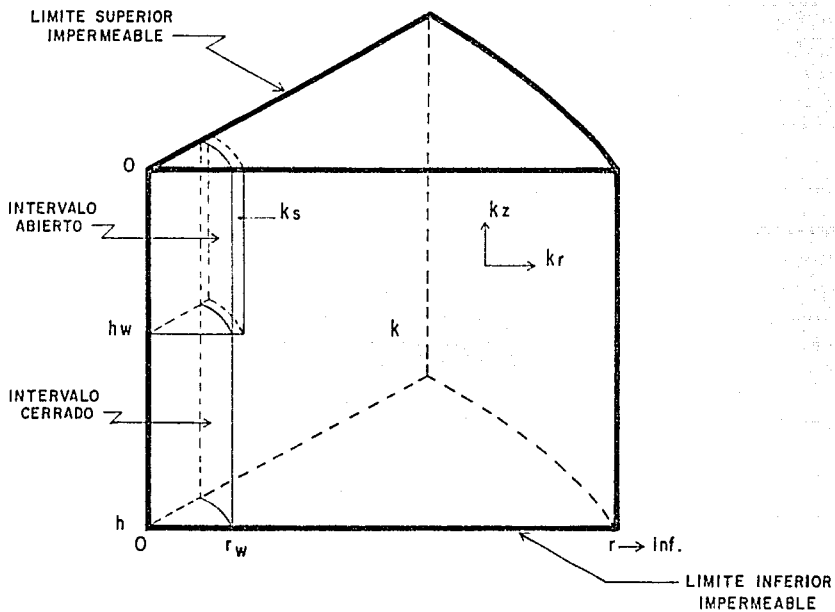


FIGURA 1 DIAGRAMA DE LA GEOMETRIA DEL SISTEMA DE FLUJO.

geometría y fronteras asociadas con la ecuación (2).

Una solución aproximada para la condición de conductividad infinita puede ser obtenida por un método usado por varios autores para el estudio de flujo estacionario<sup>2</sup> y transitorio<sup>27</sup> hacia pozos parcialmente penetrantes, y el flujo transitorio hacia fracturas verticales<sup>31</sup>.

En este método, la longitud del pozo  $h_w$  es dividida en  $N$  segmentos de longitud  $h_w/N$ . En cada uno de estos segmentos se tiene un flujo uniforme por unidad de longitud,  $q_n(z,t)$ ,  $n = 1 \dots N$ . El primer segmento se extiende de 0 a  $h_w/N$ , el segundo segmento de  $h_w/N$  a  $2h_w/N$ , el  $n$  segmento de  $[(n-1)/N]h_w$  a  $(n/N)h_w$ , y el último segmento de  $[(N-1)/N]h_w$  a  $h_w$ . La suma de los gastos  $q_n(t)$  es igual a  $q_w N/h_w$  y la presión es la misma en la parte media de cada segmento.

Para encontrar la solución de la ecuación (2) con las condiciones inicial y de fronteras antes mencionadas, nosotros usaremos las funciones de Green<sup>30</sup>. Este método fue usado primero para resolver problemas de conducción de calor. Aplicaciones de esta técnica para resolver problemas de flujo de fluidos en yacimientos de petróleo se encuentran en la literatura.

## B.- SOLUCION DEL SISTEMA DE FLUJO

En el apéndice A se muestra en forma detallada el método de las funciones de Green para resolver problemas de flujo de fluidos a través de un medio poroso.

ECUACION DIFERENCIAL ADJUNTA DEL SISTEMA:

De la ecuación (2)

$$\frac{\delta^2 G}{\delta r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\delta^2 G}{\delta r'} + \frac{\delta^2 G}{\delta z'^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\delta G}{\delta \tau} \quad (3)$$

$$0 < r' < \infty$$

$$0 < z' < h$$

$$\tau < t$$

Condición inicial: la presión en el yacimiento para  $t=0$  es  $P_i$

$$P(r, z, 0) = P_i \quad \text{para todo } r \text{ y } z$$

Condición inicial adjunta:

$$\lim_{\tau \rightarrow t} G(r', z', r, z, t - \tau) = \delta(r' - r, z' - z) \quad (4)$$

Condiciones de frontera:

La presión en el yacimiento cuando  $r \rightarrow \infty$  es  $P_i$ .

$$P(\infty, z, t) = P_i \quad \text{para todo } z \text{ y } t$$

Condición de frontera adjunta:

$$\lim_{r' \rightarrow \infty} G(r', z', r, z, t - \tau) = 0 \quad (5)$$

No existe flujo a través de los límites superior e inferior del yacimiento.

$$\left. \frac{\delta P}{\delta z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\delta P}{\delta z} \right|_{z=h} = 0 \text{ para todo } r \text{ y } t$$

Condición de frontera adjunta:

$$\left. \frac{\delta G(r', z', r, z, t - \tau)}{\delta z} \right|_{z'=0} = \left. \frac{\delta G(r', z', r, z, t - \tau)}{\delta z'} \right|_{z'=h} = 0 \quad (6)$$

### SOLUCIONES DE GREEN

En la dirección  $r'$ :

Solución yacimiento infinito

$$G(r', r, t - \tau) = \frac{e^{-r^2 / 4\eta(t-\tau)}}{4\pi\eta(t-\tau)} \quad (7)$$

En la dirección  $z'$ :

Solución yacimiento finito (condición de frontera tipo Neumann)

$$G(z', z, t - \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\eta(t-\tau)}} \quad (8)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ e^{-\frac{(z+2nh-z')^2}{4\eta(t-\tau)}} + e^{-\frac{(z+2nh+z')^2}{4\eta(t-\tau)}} \right\}$$

$$G(r', z', r, z, t - \tau) = G_r'(r', r, t - \tau) G_z'(z', z, t - \tau) \quad (9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7) y (8) en la ecuación (9):

$$G(r', z', r, z, t-\tau) = \frac{e^{-r^2/4\eta(t-\tau)}}{8(\pi\eta(t-\tau))^{3/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ e^{-\frac{(z+2nh-z')^2}{4\eta(t-\tau)}} + e^{-\frac{(z+2nh+z')^2}{4\eta(t-\tau)}} \right\} \quad (10)$$

#### SOLUCION INTEGRAL

$$\Delta P(r', z', r, z, t-\tau) = \frac{1}{\phi C} \int_0^l \int_{z_c - 1/2h_v}^{z_c + 1/2h_v} \int_{-\infty}^{\infty} q(r', z', \tau) G(r', z', r, z, t-\tau) dr' dz' d\tau \quad (11)$$

Si definimos

$$q(r', z', \tau) = \sum_{i=1}^N \frac{q_{wi}(\tau)}{h_{wi}} \delta(r) \delta(z' - z_i) \quad (12)$$

y sustituimos las ecuaciones (10) y (12) en la ecuación (11) tenemos:

$$\Delta P(r, z, t-\tau) = \frac{1}{\phi C} \sum_{i=1}^N \int_0^l \frac{q_{wi}(\tau)}{h_{wi}} \frac{e^{-r^2/4\eta(t-\tau)}}{8(\pi\eta(t-\tau))^{3/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{z_{c1} - 1/2h_{v1}}^{z_{c1} + 1/2h_{v1}} \left\{ e^{-\frac{(z+2nh-z)^2}{4\eta(t-\tau)}} + e^{-\frac{(z+2nh+z)^2}{4\eta(t-\tau)}} \right\} dz'_1 d\tau \quad (13)$$

En la ecuación (13) tenemos que la distribución de flujo  $q_{wi}$  es función del tiempo. Una posible solución para este problema se encuentra utilizando la Transformada de Laplace. Sin embargo, para tiempos grandes<sup>32</sup>, se tiene que la distribución de flujo no es función del tiempo; por lo tanto, para tiempos grandes, la ecuación (13) queda de la siguiente manera:

$$\Delta P(r, z, t-\tau) = \frac{1}{\phi C B(\pi\eta)^{3/2}} \sum_{i=1}^N \frac{q_{wi}}{h_{wi}} \int_0^l \frac{e^{-r^2/4\eta(t-\tau)}}{(t-\tau)^{3/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{\frac{z}{c_l} - 1/2h}^{\frac{z}{c_l} + 1/2h} \left\{ e^{-\frac{(z+2nh-z_i)^2}{4\eta(t-\tau)}} + e^{-\frac{(z+2nh+z_i)^2}{4\eta(t-\tau)}} \right\} dz_i d\tau \quad (14)$$

Van Everdingen<sup>33</sup> y Hurst<sup>34</sup> definieron al factor de daño S como una caída de presión adimensional  $\Delta P_S$  adicional a la existente en un pozo cuando no presenta daño:

$$\Delta P_S = S \frac{q_w \mu}{2\pi kh} \quad (15)$$

En este caso, para un pozo parcialmente penetrante, el flujo del pozo incrementa hacia la parte inferior del intervalo abierto; por lo tanto, la caída de presión por el daño S también incrementará y será una función de z. Esta situación es ilustrada por la figura 2.

Por lo tanto, incluyendo la caída de presión debida al daño S



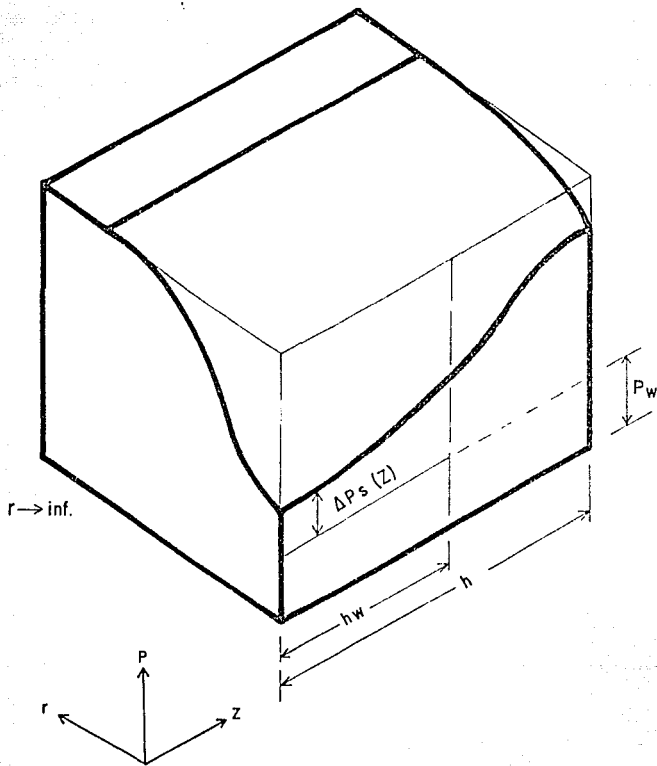


FIGURA 2 ESQUEMA DEL EFECTO DEL DAÑO S EN LA DISTRIBUCION DE PRESION EN EL YACIMIENTO.

se tiene que:

$$\Delta P(r, z, S, t-\tau) = \frac{1}{\phi C B(\pi\eta)^{3/2}} \sum_{i=1}^N \frac{q_{w_i}}{hw_i} \int_0^l \frac{e^{-r^2/4\eta(t-\tau)}}{(t-\tau)^{3/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{z_{ci}-1/2h_{vt}}^{z_{ci}+1/2h_{vt}} \left\{ e^{-\frac{(z+2nh-z_i)^2}{4\eta(t-\tau)}} + e^{-\frac{(z+2nh+z_i)^2}{4\eta(t-\tau)}} \right\} dz_i d$$

$$+ \Delta P_S(z) \quad (16)$$

donde

$$\Delta P_S(z) = S \frac{q_w(z)\mu}{2\pi kh_w(z)} \quad (17)$$

Ahora, haciendo:

$$u = \frac{z+2nh-z_i}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} \quad (18)$$

$$du = \frac{-1}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} dz_i \quad (19)$$

$$u = \frac{z+2nh+z_i}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} \quad (20)$$

$$du = \frac{1}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} dz_i \quad (21)$$

y usando la definición de función error:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \quad (22)$$

y substituyendo las ecuaciones (18) a la (22) en la ecuación (15) obtenemos:

$$\Delta P(r, z, S, t-\tau) = \frac{1}{8 \phi C \pi \eta} \sum_{i=1}^N \frac{q_{wi}}{h} \int_0^l \frac{e^{-r^2/4\eta(t-\tau)}}{(t-\tau)} \quad (23)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ -\operatorname{erf} \frac{(z+2nh-z_{ci}-1/2h_{wi})}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} + \operatorname{erf} \frac{(z+2nh-z_{ci}+1/2h_{wi})}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} \right.$$

$$\left. + \operatorname{erf} \frac{(z+2nh+z_{ci}+1/2h_{wi})}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} - \operatorname{erf} \frac{(z+2nh+z_{ci}-1/2h_{wi})}{2\eta^{1/2}(t-\tau)^{1/2}} \right\}$$

$d\tau + \Delta P_S(z)$

Definiendo las variables adimensionales

$$r_D = r / r_w \quad (24)$$

$$z_D = z / r_w \quad (25)$$

$$h_{wD} = h_w / r_w \quad (26)$$

$$h_D = h / r_w \quad (27)$$

$$t_D = kt / \phi \mu C r_w^2 \quad (28)$$

$$P_D = 2mkh\Delta P / q_w \mu \quad (29)$$

$$P_{DS} = \frac{h_D}{h_{wD}} S \frac{q(z_D)}{q} \quad (29-a)$$

$$q_i = q_w(z) / h_w(z) \quad (30)$$

$$q = q_w / h_w \quad (31)$$

La ecuación (29-a) define el efecto del daño S debido a la zona de permeabilidad reducida  $k_s$  alrededor del pozo, donde la caída de presión adimensional es dependiente del flujo; esto es, la caída de presión a través de la zona dañada es directamente proporcional al flujo y éste, a su vez, es función de la localización en el intervalo abierto. Para un pozo totalmente penetrante, la caída de presión del daño S es uniforme en todo el pozo porque la distribución de flujo es uniforme.

Sustituyendo las ecuaciones (24) a la (31) en la ecuación (23) obtenemos:

$$P_D(r_D, z_D, S, t_D - \tau) = \frac{h_D}{4h_{wD}} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q} \int_0^{l_D} \frac{e^{-\frac{z^2}{4(t_D - \tau)}}}{(t_D - \tau)} dz$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ -\operatorname{erf} \frac{(z_D + 2nh_D - z_{c1D} - 1/2h_{f1D})}{(4(t_D - \tau))^{1/2}} + \operatorname{erf} \frac{(z_D + 2nh_D - z_{c1D} + 1/2h_{f1D})}{(4(t_D - \tau))^{1/2}} \right.$$

$$\left. + \operatorname{erf} \frac{(z_D + 2nh_D + z_{c1D} + 1/2h_{f1D})}{(4(t_D - \tau))^{1/2}} - \operatorname{erf} \frac{(z_D + 2nh_D + z_{c1D} - 1/2h_{f1D})}{(4(t_D - \tau))^{1/2}} \right\}$$

$$d\tau + S \frac{q(z_D)}{q} \frac{h_D}{h_{wD}} \quad (32)$$

Para resolver la integral con respecto al tiempo definiremos:

$$u^2 = \frac{z_{iD}^2}{4t_D} \quad (33)$$

y usando la fórmula:

$$\int_0^{\infty} \operatorname{erf}(x) e^{-\frac{x^2}{x}} dx = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{u+1} + 1}{\sqrt{u+1} - 1} \quad (34)$$

Por lo tanto, cuando  $t_D$  tienda a infinito en la ecuación (32), y sustituyendo las ecuaciones (33) y (34) obtenemos para el pozo  $r_D^2 = 1$ :

$$P_D(1, z_D, S, \omega) = \frac{h_D}{4h_{wD}} \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{q}$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & - \ln \frac{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D - (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D - (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1} - 1} \\ & + \ln \frac{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D - (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D - (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2 + 1} - 1} \\ & + \ln \frac{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D + (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D + (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1} - 1} \\ & - \ln \frac{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D + (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/(z_D + 2nh_D + (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2 + 1} - 1} \end{aligned} \right]$$

$$+ \frac{h_D}{h_{wD}} S \frac{q(z_D)}{q} \quad (35)$$

La ecuación (35) representa la caída de presión adimensional total del sistema de flujo definido en estado estacionario, en donde tenemos  $(N + 1)$  incógnitas, que son la distribución del flujo y la caída de presión adimensional total, las cuales serán resueltas utilizando la condición de conductividad infinita en el pozo.

#### IV. SOLUCION PARA UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO

##### A.- DISTRIBUCION DE FLUJO YACIMIENTO SEMI-INFINITO

Para simplificar el problema, consideraremos primero un yacimiento semi-infinito. Esta solución es una aproximación y únicamente es válida para yacimientos cuya relación  $h_D/h_{wD} \gg 1$ , como se demostrará posteriormente.

De la misma manera en que se determinó la ecuación (35), podemos determinar que la ecuación que representa la caída de presión adimensional total de un pozo parcialmente penetrante en un yacimiento semi-infinito es:

$$P_D(1, z_D, S, \omega) = \frac{h_D}{4h_{wD}} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q}$$

$$\left[ - \ln \frac{\sqrt{1/(z_D - (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/(z_D - (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1} - 1} \right.$$

$$+ \ln \frac{\sqrt{1/(z_D - (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2 + 1}}{\sqrt{1/(z_D - (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2 - 1}}$$

$$+ \ln \frac{\sqrt{1/(z_D + (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 + 1}}{\sqrt{1/(z_D + (z_{cID} + 1/2h_{wID}))^2 - 1}}$$

$$\begin{aligned}
 & - \ln \left[ \frac{\sqrt{1/(z_D + (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2} + 1}{\sqrt{1/(z_D + (z_{cID} - 1/2h_{wID}))^2} - 1} \right] \\
 & + \frac{h_D}{h_{wD}} S \frac{q(z_D)}{q}
 \end{aligned} \tag{36}$$

La distribución de flujo será determinada utilizando la condición de conductividad infinita en el pozo; esto es, que la caída de presión en la parte media de cada segmento es igual, lo cual nos generará (N - 1) ecuaciones; la n-ésima ecuación es obtenida de la condición de que el gasto de producción total a todo tiempo es constante:

$$F_D \left( 1, \frac{2j-1}{2N} h_{wD}, S, \omega \right) = F_D \left( 1, \frac{2j+1}{2N} h_{wD}, S, \omega \right) \tag{37}$$

para  $j=1, N-1$

$$\sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q} = \sum_{i=1}^N \frac{q_w(z)/h_w(z)}{q_w/h_w} = N \tag{38}$$

Por definición:

$$z_{cID} + 1/2h_{wID} = \frac{i}{N} h_{wD} \tag{39}$$

$$z_{cID} - 1/2h_{wID} = \frac{i-1}{N} h_{wD} \tag{40}$$

Sustituyendo (39) y (40) en (36) y redefiniendo la siguiente variable adimensional:



$$z_D = z / h_w \quad (41)$$

obtenemos:

$$4 P_D(1, z_D, S, \omega) \frac{h_{wD}}{h_D} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q}$$

$$\left[ -\ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D - \frac{i}{N})^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D - \frac{i}{N})^2 + 1} - 1} \right.$$

$$+ \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D - \frac{i-1}{N})^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D - \frac{i-1}{N})^2 + 1} - 1}$$

$$+ \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D + \frac{i}{N})^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D + \frac{i}{N})^2 + 1} - 1}$$

$$\left. - \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D + \frac{i-1}{N})^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D + \frac{i-1}{N})^2 + 1} - 1} \right]$$

$$+ 4S \frac{q(z_D)}{q} \quad (42)$$

Por lo tanto, sustituyendo (42) en (37) obtenemos:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q} \left[ 2 \ln \frac{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j+i-1/2)^2 + 1} + 1}{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j+i-1/2)^2 + 1} - 1} \right. \\
& + 2 \ln \frac{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j-i+1/2)^2 + 1} + 1}{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j-i+1/2)^2 + 1} - 1} \\
& - 1 \ln \frac{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j+i-3/2)^2 + 1} + 1}{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j+i-3/2)^2 + 1} - 1} \\
& - 1 \ln \frac{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j-i+3/2)^2 + 1} + 1}{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j-i+3/2)^2 + 1} - 1} \\
& - 1 \ln \frac{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j+i+1/2)^2 + 1} + 1}{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j+i+1/2)^2 + 1} - 1} \\
& \left. - 1 \ln \frac{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j-i-1/2)^2 + 1} + 1}{\sqrt{N^2/h_{wD}^2 (j-i-1/2)^2 + 1} - 1} \right] \\
& + 4 S \left( \frac{q(j)}{q} - \frac{q(j+1)}{q} \right) = 0 \tag{43}
\end{aligned}$$

para  $j=1, N-1$

Las ecuaciones (43) y (38) representan un sistema de  $N$  ecuaciones con  $N$  incógnitas. Las incógnitas son el flujo relativo en cada segmento,  $q_i/q$ .

La distribución de flujo puede ser encontrada para diferentes

valores de  $h_{wD}$  resolviendo el sistema de ecuaciones definido por las ecuaciones (43) y (38), y la caída de presión adimensional puede ser calculada con la ecuación (42).

Para ejemplificar la solución del sistema de ecuaciones representaremos a la ecuación (42) por medio de una multiplicación de matrices, haciendo  $N=3$ .

$$\begin{bmatrix} A_{11}+4S & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22}+4S & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33}+4S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1/q \\ q_2/q \\ q_3/q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4P_D h_{wD}/h_D \\ 4P_D h_{wD}/h_D \\ 4P_D h_{wD}/h_D \end{bmatrix}$$

Aplicando las condiciones de las ecuaciones (37) y (38) obtenemos la siguiente representación:

$$\begin{bmatrix} A_{11}-A_{21}+4S & A_{12}-A_{22}-4S & A_{13}-A_{23} \\ A_{21}-A_{31} & A_{22}-A_{32}+4S & A_{23}-A_{33}-4S \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1/q \\ q_2/q \\ q_3/q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N \end{bmatrix}$$

En el apéndice B se presenta el programa de cómputo para determinar el perfil de flujo y la caída de presión adimensional total.

El sistema fue resuelto para valores de  $h_{wD}$  mayores de 10, lo cual se tiene generalmente en la práctica.

Algunas restricciones fueron encontradas en el número de segmentos  $N$ , aunque se pueden obtener presiones uniformes con un mínimo de 10 segmentos, algunos valores de  $q_1/q$  fueron negativos<sup>27</sup>. Por lo tanto, fue

necesario usar 50 segmentos para obtener una presión uniforme y que todos los valores de  $q_1/q$  fueran positivos<sup>27</sup>.

Para obtener la solución de flujo uniforme hacemos  $N=1$  en la ecuación (42):

$$P_D(1, z_D, S, \omega) \frac{h_{wD}}{h_D} = \frac{1}{4}$$

$$\left[ \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D+1)^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D+1)^2 + 1} - 1} - \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D-1)^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_D-1)^2 + 1} - 1} \right]$$

$$+ S \tag{44}$$

La ecuación (44) es una aproximación del problema definido anteriormente y supone que el flujo dentro del pozo es uniforme en todo el intervalo abierto. Por lo tanto, la presión no es uniforme a lo largo del intervalo, lo cual es inconsistente con la realidad. La misma suposición ha sido usada por muchos autores y el error introducido ha sido considerado despreciable. El problema, sin embargo, es conocer cuál es la posición a lo largo del intervalo perforado, en donde la presión calculada represente la presión real del pozo.

En el apéndice B se presenta el programa de cómputo para resolver la ecuación (44).

Los resultados fueron obtenidos para  $h_{wD} = 100$  y  $h_{wD} = 500$ , para diferentes valores de  $S$ , 0, 1, 10 y 100, usando ambas soluciones la solución de conductividad infinita y la solución de flujo uniforme, y dichos resultados se muestran en las tablas 1 y 2.

En las figuras 4 a la 12 se muestra una comparación de los

resultados obtenidos, y fue posible en cada caso encontrar un punto dentro del intervalo abierto en el cual la presión de ambas soluciones fueran idénticas.

La localización de esta "presión promedio efectiva" está dada como una función de  $h_{wD}$  y  $S$ , como se muestra en la siguiente tabla:

	$S=0$	$S=1$	$S=10$	$S=100$
$h_{wD}=100$	$z_{DA}=0.7258$	$z_{DA}=0.7079$	$z_{DA}=0.6821$	$z_{DA}=0.6738$
$h_{wD}=500$	$z_{DA}=0.6993$	$z_{DA}=0.6878$	$z_{DA}=0.6741$	$z_{DA}=0.6675$

Por lo tanto, la solución simple de flujo uniforme del problema de un pozo dañado parcialmente penetrante toma el valor de la solución de conductividad infinita, cuando se calcula en el punto de "presión promedio efectiva", por lo que la ecuación (42) puede escribirse de la siguiente manera:

$$P_D(1, z_D, S, \omega) \frac{h_{wD}}{h_D} = \frac{1}{4} \left[ \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_{DA}+1)^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_{DA}+1)^2 + 1} - 1} - \ln \frac{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_{DA}-1)^2 + 1} + 1}{\sqrt{1/h_{wD}^2 (z_{DA}-1)^2 + 1} - 1} \right] + S \quad (45)$$

En las figuras 3 y 8 se muestran las gráficas de la distribución de flujo estabilizado en un pozo parcialmente penetrante ( $h = \infty$ ), donde se observa una total dependencia de la distribución de flujo con  $S$ , por lo que al aumentar el daño en el pozo, la distribución de flujo tiende a uniformizarse. Las oscilaciones en las graficas de la distribución de flujo estabilizado es debido a que  $N$  tiene que ser mayor, o al menos igual que,  $h_{wD}$ .

TABLE 1.- DISTRIBUCION DE PRESTION EN ESTADO ESTACIONARIO ( $n = \infty$ ) PARA LAS SOLUCIONES DE CONDUCTIVIDAD INFINITA (GASTO VARIABLE) Y GASTO CONSTANTE ( $h_w = 100$ )

S=0			S=1			S=10			S=100			
GASTO			GASTO			GASTO			GASTO			
CONSTANTE VARIABLE			CONSTANTE VARIABLE			CONSTANTE VARIABLE			CONSTANTE VARIABLE			
ZD	$P_{Dhw}/h$	$F_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$F_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$F_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$F_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$F_{Dhw}/h$		
0.01	5.2983	0.9372	4.9245	6.2983	0.9310	5.9513	15.2983	0.9776	14.9853	105.2983	0.9971	104.9961
0.03	5.2980	0.9105	4.9245	6.2980	0.9312	5.9513	15.2980	0.9776	14.9853	105.2980	0.9971	104.9961
0.05	5.2978	0.9048	4.9245	6.2978	0.9306	5.9513	15.2978	0.9776	14.9853	105.2978	0.9971	104.9961
0.07	5.2961	0.9099	4.9245	6.2961	0.9315	5.9513	15.2961	0.9778	14.9853	105.2961	0.9971	104.9961
0.09	5.2945	0.9096	4.9245	6.2945	0.9317	5.9513	15.2945	0.9779	14.9853	105.2945	0.9971	104.9961
0.11	5.2928	0.9068	4.9245	6.2928	0.9316	5.9513	15.2928	0.9780	14.9853	105.2928	0.9971	104.9961
0.13	5.2992	0.9105	4.9245	6.2992	0.9323	5.9513	15.2992	0.9781	14.9853	105.2992	0.9972	104.9961
0.15	5.2875	0.9076	4.9245	6.2875	0.9328	5.9513	15.2875	0.9783	14.9853	105.2875	0.9972	104.9961
0.17	5.2859	0.9107	4.9245	6.2859	0.9334	5.9513	15.2859	0.9786	14.9853	105.2859	0.9972	104.9961
0.19	5.2892	0.9121	4.9245	6.2892	0.9340	5.9513	15.2892	0.9788	14.9853	105.2892	0.9972	104.9961
0.21	5.2762	0.9109	4.9245	6.2762	0.9345	5.9513	15.2762	0.9791	14.9853	105.2762	0.9972	104.9961
0.23	5.2715	0.9149	4.9245	6.2715	0.9355	5.9513	15.2715	0.9794	14.9853	105.2715	0.9972	104.9961
0.25	5.2667	0.9112	4.9245	6.2667	0.9359	5.9513	15.2667	0.9797	14.9853	105.2667	0.9974	104.9961
0.27	5.2606	0.9173	4.9245	6.2606	0.9375	5.9513	15.2606	0.9802	14.9853	105.2606	0.9975	104.9961
0.29	5.2545	0.9166	4.9245	6.2545	0.9385	5.9513	15.2545	0.9806	14.9853	105.2545	0.9975	104.9961
0.31	5.2482	0.9160	4.9245	6.2482	0.9392	5.9513	15.2482	0.9810	14.9853	105.2482	0.9975	104.9961
0.33	5.2439	0.9210	4.9245	6.2439	0.9408	5.9513	15.2439	0.9815	14.9853	105.2439	0.9976	104.9961
0.35	5.2333	0.9196	4.9245	6.2333	0.9419	5.9513	15.2333	0.9820	14.9853	105.2333	0.9977	104.9961
0.37	5.2252	0.9210	4.9245	6.2252	0.9431	5.9513	15.2252	0.9826	14.9853	105.2252	0.9978	104.9961
0.39	5.2160	0.9254	4.9245	6.2160	0.9451	5.9513	15.2160	0.9833	14.9853	105.2160	0.9979	104.9961
0.41	5.2063	0.9261	4.9245	6.2063	0.9468	5.9513	15.2063	0.9839	14.9853	105.2063	0.9980	104.9961
0.43	5.1962	0.9291	4.9245	6.1962	0.9485	5.9513	15.1962	0.9846	14.9853	105.1962	0.9981	104.9961
0.45	5.1859	0.9289	4.9245	6.1859	0.9497	5.9513	15.1859	0.9853	14.9853	105.1859	0.9982	104.9961
0.47	5.1737	0.9251	4.9245	6.1737	0.9525	5.9513	15.1737	0.9862	14.9853	105.1737	0.9982	104.9961
0.49	5.1610	0.9247	4.9245	6.1610	0.9547	5.9513	15.1610	0.9871	14.9853	105.1610	0.9984	104.9961
0.51	5.1476	0.9291	4.9245	6.1476	0.9572	5.9513	15.1476	0.9880	14.9853	105.1476	0.9985	104.9961
0.53	5.1328	0.9406	4.9245	6.1328	0.9594	5.9513	15.1328	0.9890	14.9853	105.1328	0.9987	104.9961
0.55	5.1191	0.9412	4.9245	6.1191	0.9616	5.9513	15.1191	0.9900	14.9853	105.1191	0.9988	104.9961
0.57	5.1022	0.9495	4.9245	6.1022	0.9654	5.9513	15.1022	0.9912	14.9853	105.1022	0.9990	104.9961
0.59	5.0843	0.9529	4.9245	6.0843	0.9688	5.9513	15.0843	0.9925	14.9853	105.0843	0.9991	104.9961
0.61	5.0654	0.9562	4.9245	6.0654	0.9723	5.9513	15.0654	0.9938	14.9853	105.0654	0.9993	104.9961
0.63	5.0454	0.9502	4.9245	6.0454	0.9760	5.9513	15.0454	0.9952	14.9853	105.0454	0.9995	104.9961
0.65	5.0240	0.9650	4.9245	6.0240	0.9798	5.9513	15.0240	0.9968	14.9853	105.0240	0.9997	104.9961
0.67	5.0011	0.9662	4.9245	6.0011	0.9838	5.9513	15.0011	0.9984	14.9853	105.0011	0.9999	104.9961
0.69	4.9750	0.9829	4.9245	5.9750	0.9900	5.9513	14.9750	1.0005	14.9853	104.9750	1.0002	104.9961
0.71	4.9485	0.9758	4.9245	5.9485	0.9940	5.9513	14.9485	1.0022	14.9853	104.9485	1.0005	104.9961
0.73	4.9181	0.9924	4.9245	5.9181	1.0009	5.9513	14.9181	1.0045	14.9853	104.9181	1.0007	104.9961
0.75	4.8851	0.9971	4.9245	5.8851	1.0078	5.9513	14.8851	1.0069	14.9853	104.8851	1.0011	104.9961
0.77	4.8490	1.0069	4.9245	5.8490	1.0153	5.9513	14.8490	1.0096	14.9853	104.8490	1.0014	104.9961
0.79	4.8092	1.0167	4.9245	5.8092	1.0238	5.9513	14.8092	1.0126	14.9853	104.8092	1.0018	104.9961
0.81	4.7650	1.0276	4.9245	5.7650	1.0324	5.9513	14.7650	1.0159	14.9853	104.7650	1.0022	104.9961
0.83	4.7154	1.0414	4.9245	5.7154	1.0444	5.9513	14.7154	1.0197	14.9853	104.7154	1.0027	104.9961
0.85	4.6590	1.0519	4.9245	5.6590	1.0571	5.9513	14.6590	1.0240	14.9853	104.6590	1.0032	104.9961
0.87	4.5918	1.0642	4.9245	5.5918	1.0749	5.9513	14.5918	1.0293	14.9853	104.5918	1.0039	104.9961
0.89	4.5149	1.0917	4.9245	5.5149	1.0932	5.9513	14.5149	1.0354	14.9853	104.5149	1.0047	104.9961
0.91	4.4194	1.1405	4.9245	5.4194	1.1206	5.9513	14.4194	1.0432	14.9853	104.4194	1.0056	104.9961
0.93	4.3013	1.1583	4.9245	5.3013	1.1529	5.9513	14.3013	1.0520	14.9853	104.3013	1.0068	104.9961
0.95	4.1439	1.2693	4.9245	5.1430	1.2086	5.9513	14.1400	1.0669	14.9853	104.1400	1.0082	104.9961
0.97	2.8976	1.1775	4.9245	4.8976	1.3086	5.9513	13.8976	1.0891	14.9853	103.8976	1.0107	104.9961
0.99	5.4327	2.4990	4.9245	4.4327	1.6848	5.9513	13.4327	1.1358	14.9853	103.4327	1.0154	104.9961

FIG. 3.-  $q_{ihw}/q_w$  VS ZD

( $h=INFINITO, h_w D=100$ )

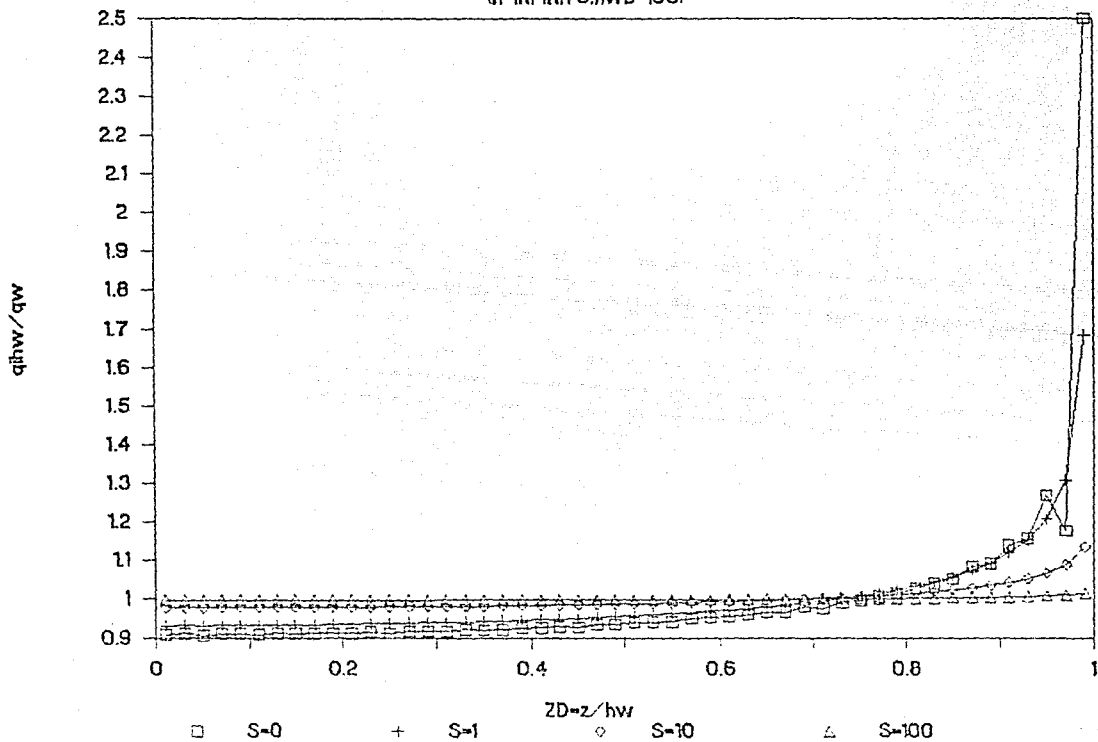


FIG. 4.- PDhw/h VS ZD

$h = \text{INFINITO}, hwD = 100, S = 0$

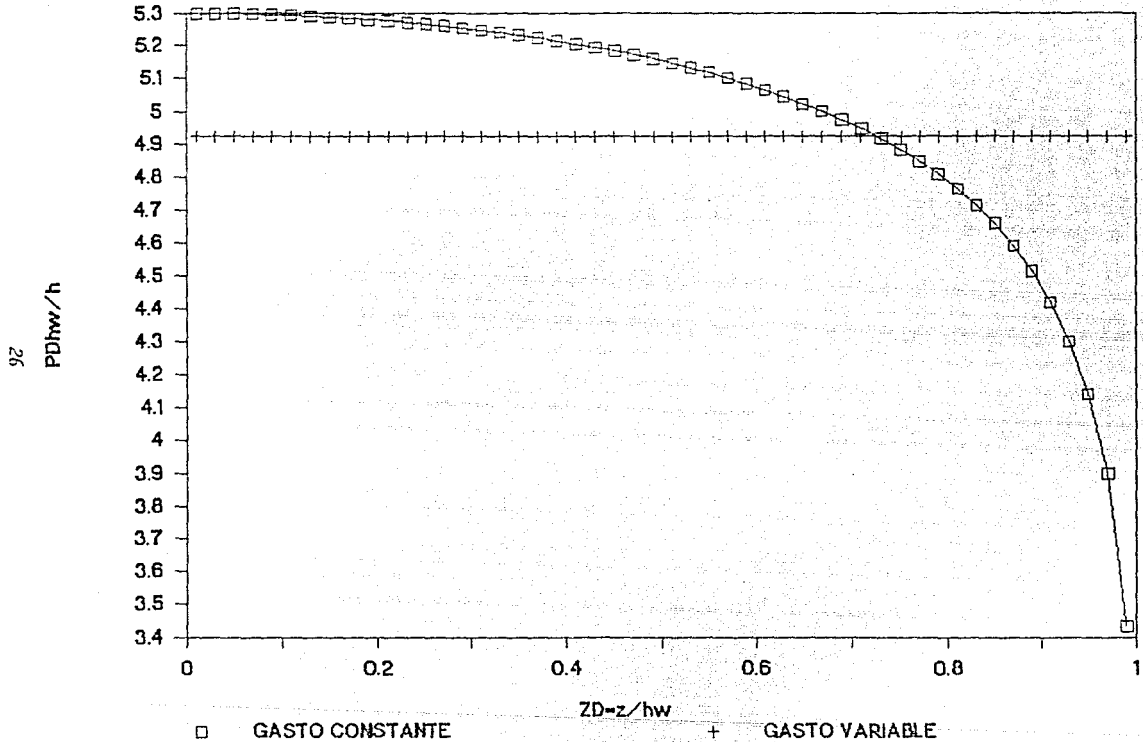




FIG. 5.-  $PDhw/h$  VS  $ZD$

$(h=HFINITO, hw/D=100, S=1)$

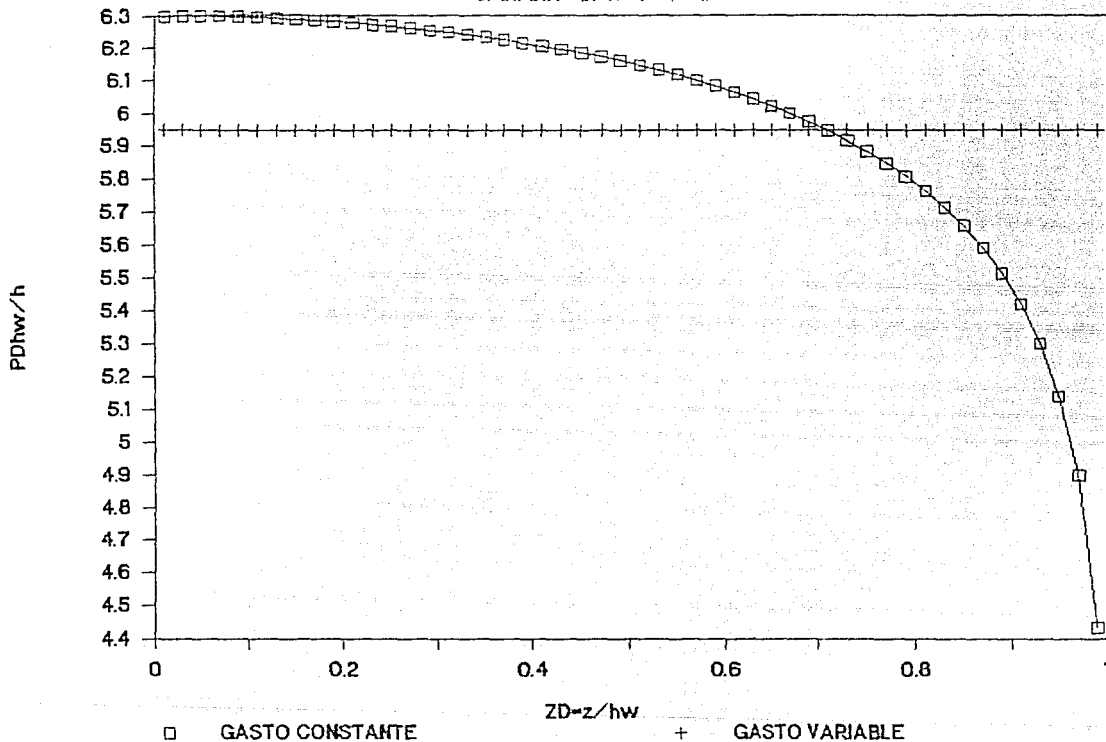


FIG. 6.- PDhw/h VS ZD

(h=INFINITO,hwD=100,S=10)

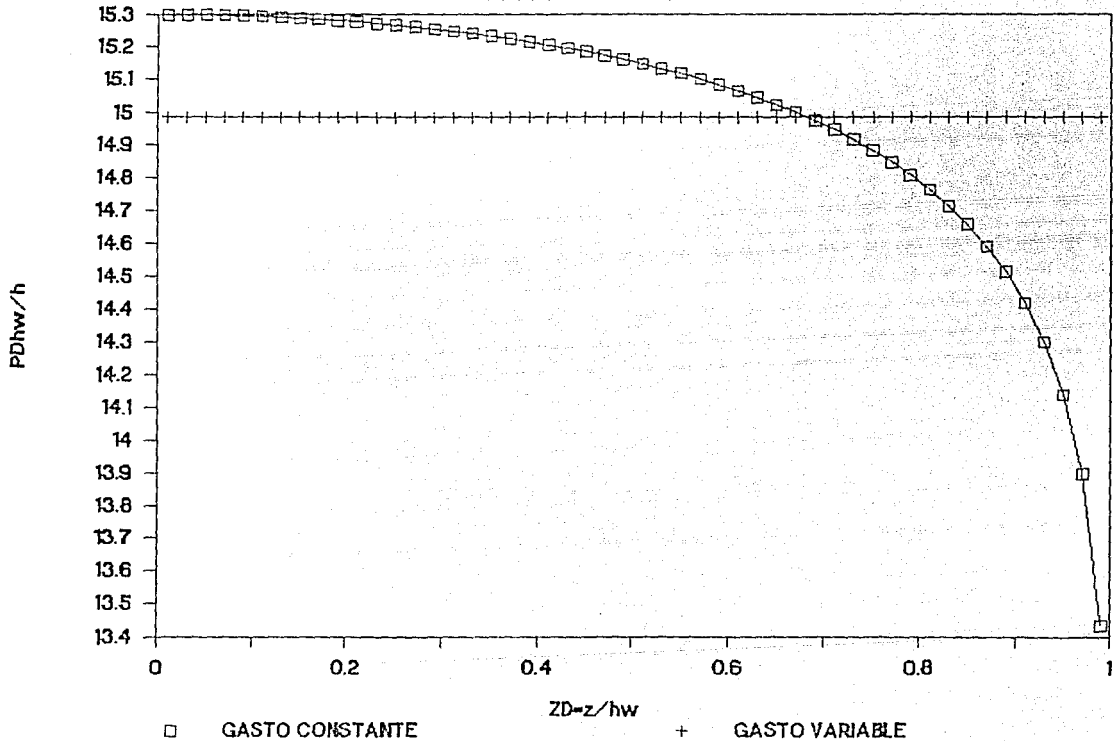


FIG. 7.- PDhw/h VS ZD

(h=INFINITO, hwD=100, S=100)

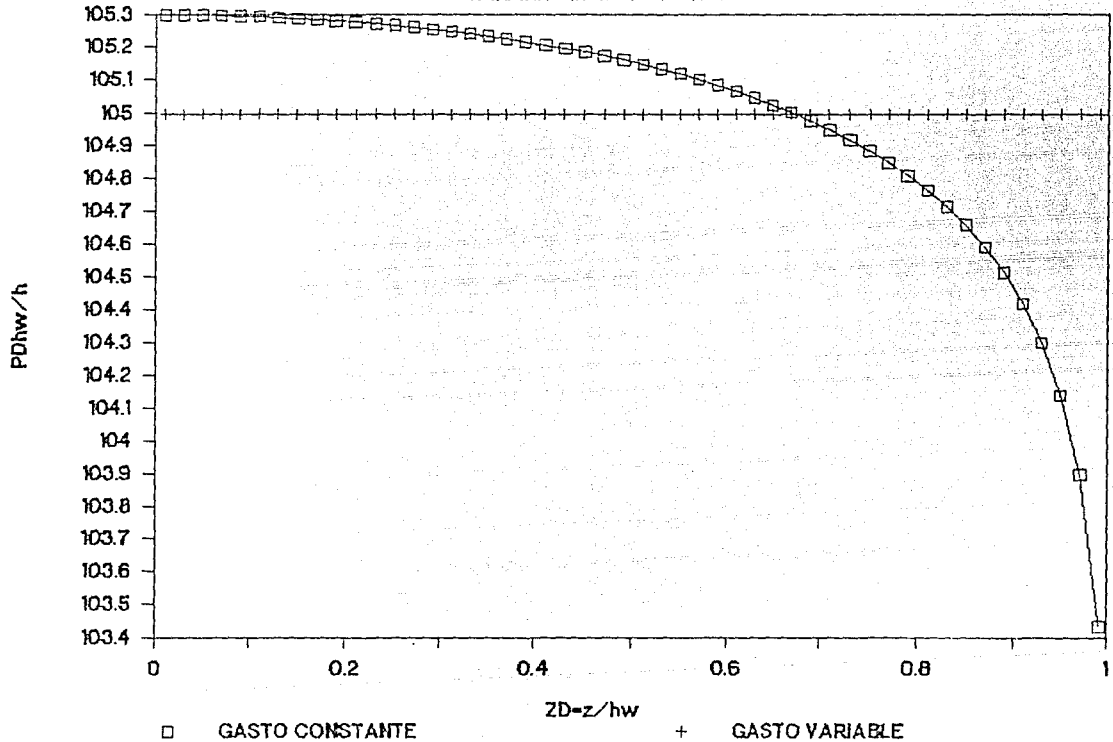
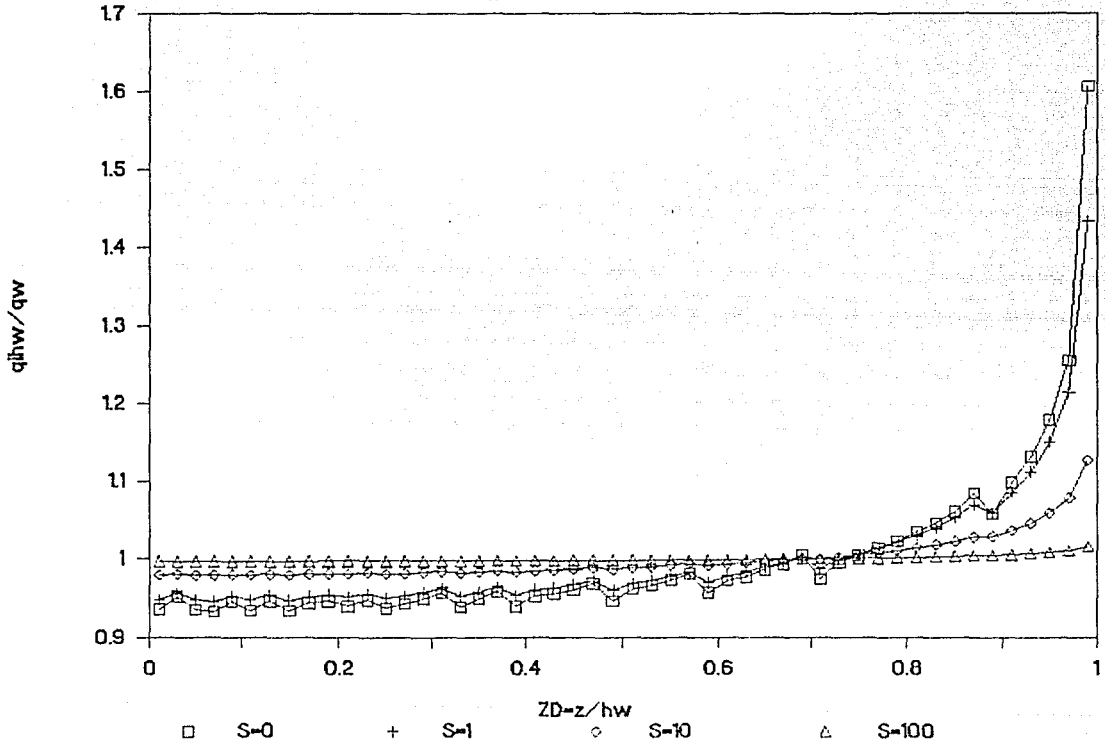


FIG. 8.-  $q_{ihw}/q_w$  VS ZD

( $h \rightarrow \infty$ ,  $hwD=500$ )



# FIG. 9.- PDhw/h VS ZD

(h=INFINITO,hwD=500,S=0)

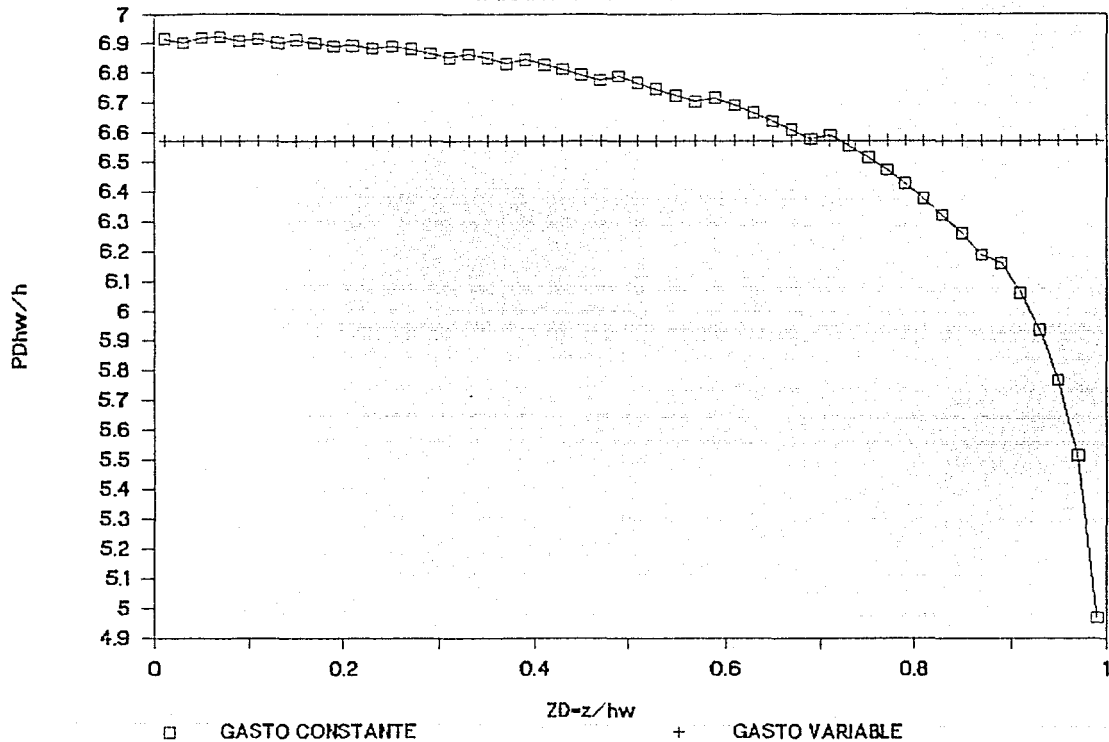
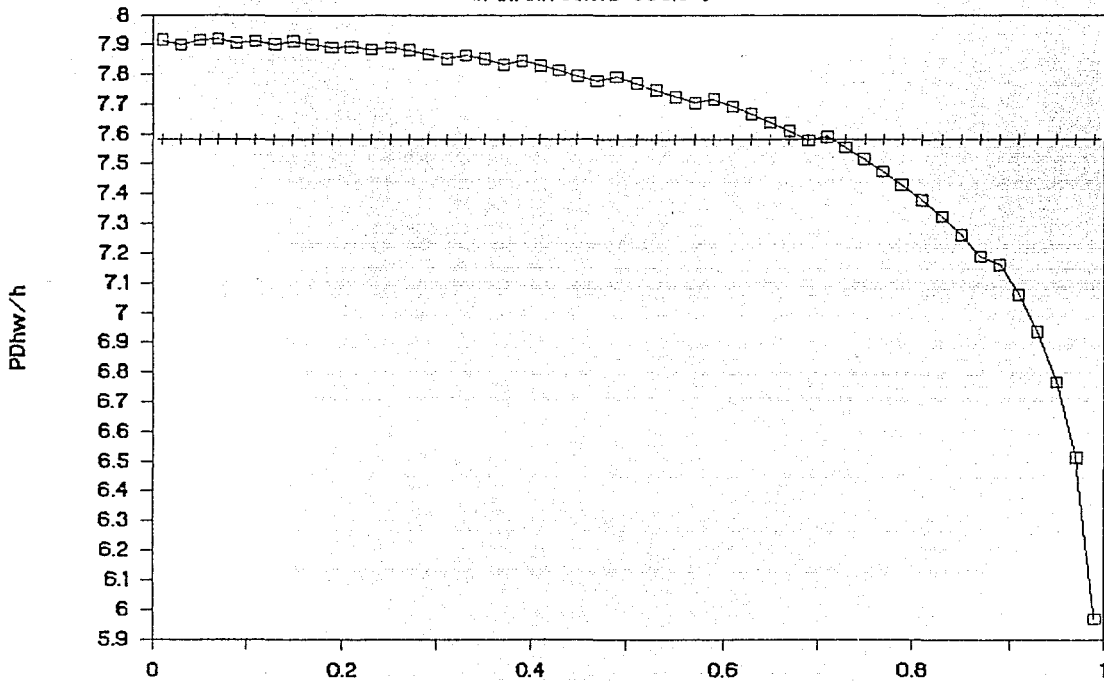


TABLA 2.- DISTRIBUCION DE PRECION EN ESTADO ESTACIONARIO ( $h = \infty$ ) PARA LAS SOLUCIONES DE CONDUCTIVIDAD INFINITA (GASTO VARIABLE) Y GASTO CONSTANTE ( $h_w = 500$ )

ZD	S=0 GASTO		S=1 GASTO		S=10 GASTO		S=100 GASTO		
	CONSTANTE	VARIABLE	CONSTANTE	VARIABLE	CONSTANTE	VARIABLE	CONSTANTE	VARIABLE	
	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	$P_{Dhw}/h$	
0.01	6.9163	0.9257	6.5745	7.9163	0.9482	7.5835	16.9163	0.9799	16.6044
0.03	6.9020	0.9522	6.5745	7.9020	0.9569	7.5835	16.9020	0.9813	16.6044
0.05	6.9182	0.9349	6.5745	7.9182	0.9475	7.5835	16.9182	0.9797	16.6044
0.07	6.9219	0.9222	6.5745	7.9219	0.9457	7.5835	16.9219	0.9793	16.6044
0.09	6.9091	0.9454	6.5745	7.9091	0.9528	7.5835	16.9091	0.9806	16.6044
0.11	6.9154	0.9243	6.5745	7.9154	0.9474	7.5835	16.9154	0.9798	16.6044
0.13	6.9028	0.9465	6.5745	7.9028	0.9529	7.5835	16.9028	0.9809	16.6044
0.15	6.9127	0.9238	6.5745	7.9127	0.9472	7.5835	16.9127	0.9799	16.6044
0.17	6.9020	0.9434	6.5745	7.9020	0.9523	7.5835	16.9020	0.9809	16.6044
0.19	6.8918	0.9463	6.5745	7.8918	0.9548	7.5835	16.8918	0.9817	16.6044
0.21	6.8943	0.9460	6.5745	7.8943	0.9515	7.5835	16.8943	0.9813	16.6044
0.23	6.8852	0.9475	6.5745	7.8852	0.9555	7.5835	16.8852	0.9820	16.6044
0.25	6.8918	0.9274	6.5745	7.8918	0.9501	7.5835	16.8918	0.9812	16.6044
0.27	6.8836	0.9429	6.5745	7.8836	0.9531	7.5835	16.8836	0.9819	16.6044
0.29	6.8660	0.9494	6.5745	7.8660	0.9578	7.5835	16.8660	0.9831	16.6044
0.31	6.8533	0.9575	6.5745	7.8533	0.9626	7.5835	16.8533	0.9843	16.6044
0.33	6.8657	0.9399	6.5745	7.8657	0.9527	7.5835	16.8657	0.9828	16.6044
0.35	6.8526	0.9492	6.5745	7.8526	0.9581	7.5835	16.8526	0.9839	16.6044
0.37	6.8340	0.9569	6.5745	7.8340	0.9643	7.5835	16.8340	0.9854	16.6044
0.39	6.8462	0.9401	6.5745	7.8462	0.9542	7.5835	16.8462	0.9839	16.6044
0.41	6.8301	0.9528	6.5745	7.8301	0.9610	7.5835	16.8301	0.9852	16.6044
0.43	6.8150	0.9560	6.5745	7.8150	0.9639	7.5835	16.8150	0.9863	16.6044
0.45	6.7961	0.9613	6.5745	7.7961	0.9681	7.5835	16.7961	0.9877	16.6044
0.47	6.7785	0.9692	6.5745	7.7785	0.9729	7.5835	16.7785	0.9889	16.6044
0.49	6.7916	0.9466	6.5745	7.7916	0.9669	7.5835	16.7916	0.9872	16.6044
0.51	6.7592	0.9625	6.5745	7.7592	0.9695	7.5835	16.7592	0.9890	16.6044
0.53	6.7486	0.9674	6.5745	7.7486	0.9737	7.5835	16.7486	0.9905	16.6044
0.55	6.7266	0.9741	6.5745	7.7266	0.9786	7.5835	16.7266	0.9921	16.6044
0.57	6.7062	0.9812	6.5745	7.7062	0.9833	7.5835	16.7062	0.9925	16.6044
0.59	6.7185	0.9577	6.5745	7.7185	0.9708	7.5835	16.7185	0.9918	16.6044
0.61	6.6947	0.9736	6.5745	7.6947	0.9792	7.5835	16.6947	0.9936	16.6044
0.63	6.6668	0.9762	6.5745	7.6668	0.9839	7.5835	16.6668	0.9954	16.6044
0.65	6.6296	0.9870	6.5745	7.6296	0.9902	7.5835	16.6296	0.9975	16.6044
0.67	6.6106	0.9934	6.5745	7.6106	0.9956	7.5835	16.6106	0.9995	16.6044
0.69	6.5801	1.0054	6.5745	7.5801	1.0031	7.5835	16.5801	1.0017	16.6044
0.71	6.5921	0.9747	6.5745	7.5921	0.9872	7.5835	16.5921	0.9997	16.6044
0.73	6.5559	0.9963	6.5745	7.5559	0.9992	7.5835	16.5559	1.0025	16.6044
0.75	6.5177	1.0048	6.5745	7.5177	1.0065	7.5835	16.5177	1.0052	16.6044
0.77	6.4757	1.0142	6.5745	7.4757	1.0143	7.5835	16.4757	1.0021	16.6044
0.79	6.4304	1.0236	6.5745	7.4304	1.0222	7.5835	16.4304	1.0112	16.6044
0.81	6.3804	1.0349	6.5745	7.3804	1.0312	7.5835	16.3804	1.0146	16.6044
0.83	6.3247	1.0461	6.5745	7.3247	1.0410	7.5835	16.3247	1.0185	16.6044
0.85	6.2621	1.0619	6.5745	7.2621	1.0530	7.5835	16.2621	1.0229	16.6044
0.87	6.1905	1.0647	6.5745	7.1905	1.0694	7.5835	16.1905	1.0281	16.6044
0.89	6.1127	1.0576	6.5745	7.1127	1.0586	7.5835	16.1127	1.0288	16.6044
0.91	6.0623	1.0462	6.5745	7.0623	1.0651	7.5835	16.0623	1.0364	16.6044
0.93	5.9367	1.1313	6.5745	6.9367	1.1123	7.5835	15.9367	1.0458	16.6044
0.95	5.7685	1.1787	6.5745	6.7685	1.1504	7.5835	15.7685	1.0585	16.6044
0.97	5.5125	1.2544	6.5745	6.5125	1.2142	7.5835	15.5125	1.0787	16.6044
0.99	4.9685	1.6060	6.5745	6.5135	1.4330	7.5835	14.9685	1.1272	16.6044

# FIG. 10.- PDhw/h VS ZD

(h=21FNIT0.hwD=500.S=1)



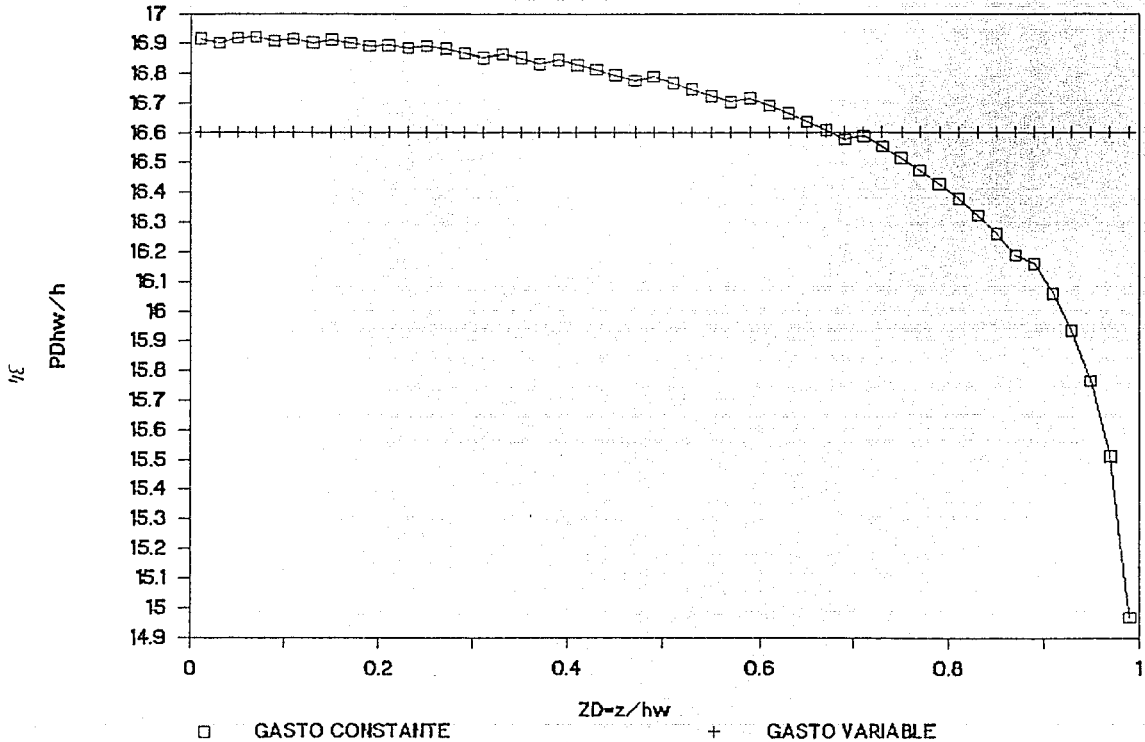
□ GASTO CONSTANTE

ZD=z/hw

+ GASTO VARIABLE

FIG. 11.- PDhw/h VS ZD

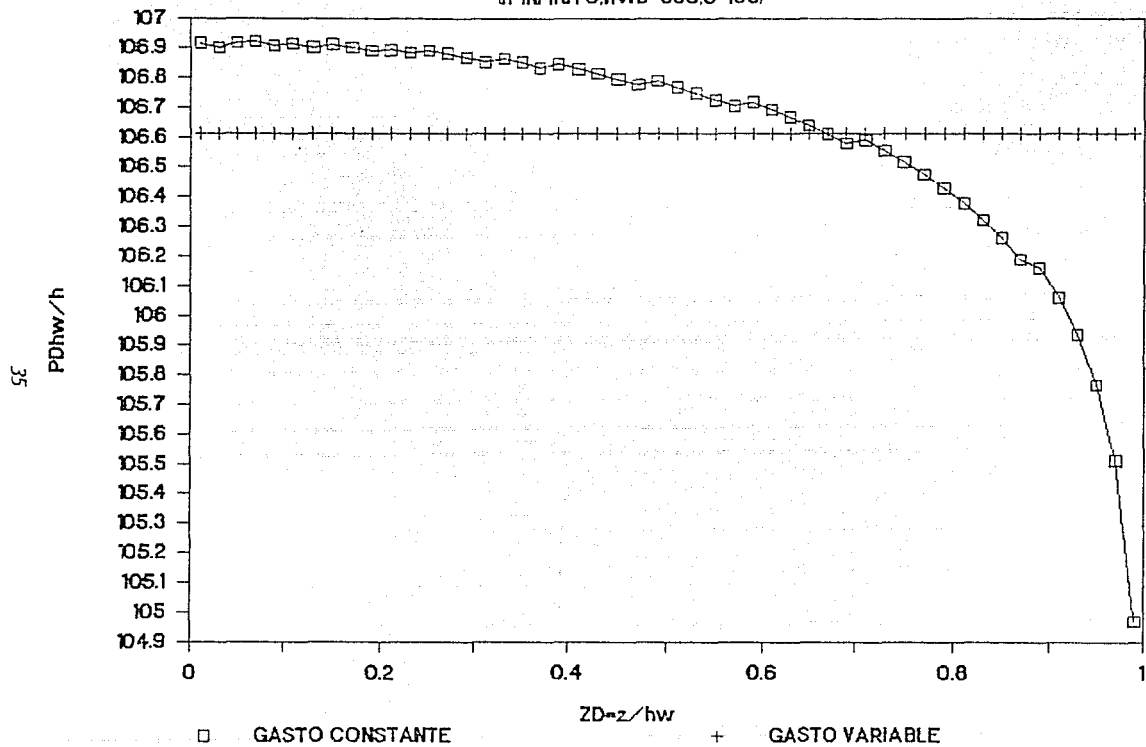
(h-INFINITO,hwD=500,S=10)





# FIG. 12.- PDhw/h VS ZD

(h=INFINITO, hwD=500, S=100)



## B.- FACTORES DE DAÑO YACIMIENTO SEMI-INFINITO

Por definición, el factor de daño  $S_{P+FP}$ , causado por un daño  $S$  y la penetración parcial del pozo, es:

$$S_{P+FP}(h_{wD}, b, S) = \lim_{t_D \rightarrow \infty} \{P_D(1, z_D, S, \infty) - P_D(t_D)\} \quad (46)$$

$P_D(1, z_D, S, \infty)$  es la presión adimensional de conductividad infinita para un pozo parcialmente penetrante y dañado, la cual es obtenida con la ecuación (42);  $P_D(t_D)$  es la solución de línea fuente para un pozo totalmente penetrante. De la ecuación (36), la solución de línea fuente puede expresarse como:

$$P_D(z_D, h_D) = \frac{1}{4} \left[ \ln \frac{\sqrt{1/(z_D+h_D)^2+1} + 1}{\sqrt{1/(z_D+h_D)^2+1} - 1} - \ln \frac{\sqrt{1/(z_D-h_D)^2+1} + 1}{\sqrt{1/(z_D-h_D)^2+1} - 1} \right] \quad (47)$$

La condición de presión uniforme en el pozo puede ser expresada en términos de  $S_{P+FP}$ :

$$S_{P+FP}\left(\frac{2j-1}{2N}\right) = S_{P+FP}\left(\frac{2j+1}{2N}\right) \quad (48)$$

para  $j=1, N-1$

Ahora, nosotros tenemos que resolver un sistema de  $N$  ecuaciones con  $N$  incógnitas, dado por las ecuaciones (48) y (38).

Para ejemplificar la solución del sistema de ecuaciones,

representaremos la ecuación (46) por medio de una multiplicación haciendo  $N=3$ :

$$\begin{bmatrix} A_{11}+4S & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22}+4S & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33}+4S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1/q \\ q_2/q \\ q_3/q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4(S_{p+fp}+P_D(1))h_{wD}/h_D \\ 4(S_{p+fp}+P_D(2))h_{wD}/h_D \\ 4(S_{p+fp}+P_D(3))h_{wD}/h_D \end{bmatrix}$$

Aplicando las condiciones de las ecuaciones (48) y (38) obtenemos la siguiente representación:

$$\begin{bmatrix} A_{11}-A_{21}+4S & A_{12}-A_{22}-4S & A_{13} & A_{23} \\ A_{21}-A_{31} & A_{22}-A_{32}+4S & A_{23}-A_{33}-4S & \\ 1 & 1 & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1/q \\ q_2/q \\ q_3/q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4(P_D(1)-P_D(2))h_{wD}/h_D \\ 4(P_D(2)-P_D(3))h_{wD}/h_D \\ N \end{bmatrix}$$

Para simplificación del sistema de ecuaciones utilizaremos la siguiente igualdad:

$$\ln \frac{\sqrt{1/A^2+1} + 1}{\sqrt{1/A^2+1} - 1} = 2 \ln A + \sqrt{A^2+1} \quad (49)$$

Por lo tanto, la ecuación (47) puede escribirse como:

$$2 P_D(z_D, h_D) = \ln \frac{z_D + h_D + \sqrt{(z_D + h_D)^2 + 1}}{z_D + h_D + \sqrt{(z_D - h_D)^2 + 1}} \quad (50)$$

y la ecuación (42) de la siguiente manera:

$$2 P_D(1, z_D, S, \omega) h_{WD}/h_D = \sum_{i=1}^N q_i/q$$

$$\left[ \ln \frac{h_{WD}(z_D - \frac{i-1}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D - \frac{i-1}{N})^2 + 1}}{h_{WD}(z_D - \frac{i}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D - \frac{i}{N})^2 + 1}} \right. \\ \left. + \ln \frac{h_{WD}(z_D + \frac{i}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D + \frac{i}{N})^2 + 1}}{h_{WD}(z_D + \frac{i-1}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D + \frac{i-1}{N})^2 + 1}} \right] + 2S \frac{q(z_D)}{q} \quad (51)$$

Ahora, substituyendo las ecuaciones (50) y (51) en (46):

$$2S_{P+FP}(h_{WD}, b, S) \frac{h_{WD}}{h_D} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q} \left[ \frac{h_{WD}(z_D - \frac{i-1}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D - \frac{i-1}{N})^2 + 1}}{h_{WD}(z_D - \frac{i}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D - \frac{i}{N})^2 + 1}} \right. \\ \left. + \ln \frac{h_{WD}(z_D + \frac{i}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D + \frac{i}{N})^2 + 1}}{h_{WD}(z_D + \frac{i-1}{N}) + \sqrt{h_{WD}^2(z_D + \frac{i-1}{N})^2 + 1}} \right] + 2S \frac{q(z_D)}{q}$$

$$- \frac{h_{WD}}{h_D} \ln \frac{z_D + h_D + \sqrt{(z_D + h_D)^2 + 1}}{z_D - h_D + \sqrt{(z_D - h_D)^2 + 1}} \quad (52)$$

Por lo tanto, aplicando la condición de la ecuación (48), obtenemos:

$$\sum_{i=1}^N q_i / q \left[ \ln \frac{A + \sqrt{A^2 + 1}}{B + \sqrt{B^2 + 1}} + \ln \frac{C + \sqrt{C^2 + 1}}{D + \sqrt{D^2 + 1}} \right] + 2S \left( \frac{q_{(j)}}{q} - \frac{q_{(j+1)}}{q} \right)$$

$$= \frac{h_{wD}}{h_D} \ln \frac{E + \sqrt{E^2 + 1}}{F + \sqrt{F^2 + 1}} \frac{EE + \sqrt{EE^2 + 1}}{FF + \sqrt{FF^2 + 1}} \quad (53)$$

para  $j=1, N-1$

donde  $b = h_{wD}/h_D$        $R = h_D/h_{wD}$

$A = h_{wD}/N (j+i-1/2)$

$AA = h_{wD}/N (j+i+1/2)$

$B = h_{wD}/N (j-i-1/2)$

$BB = h_{wD}/N (j-i+1/2)$

$C = h_{wD}/N (j-i+1/2)$

$CC = h_{wD}/N (j-i+3/2)$

$D = h_{wD}/N (j+i-3/2)$

$DD = h_{wD}/N (j+1-1/2)$

$E = h_{wD}/N (j-1/2+RN)$

$EE = h_{wD}/N (j+1/2+RN)$

$F = h_{wD}/N (j-1/2-RN)$

$FF = h_{wD} (j+1/2-RN)$

Esta solución es una aproximación del problema real, ya que el yacimiento es finito y en este caso se está considerando semi-infinito.

Las ecuaciones (53) y (38) representan un sistema de  $N$  ecuaciones con  $N$  incógnitas. Las incógnitas son el flujo relativo en cada segmento,  $q_i/q$ .

La distribución de flujo puede ser encontrada para diferentes

valores de  $h_{wD}$ ,  $b$  y  $S$  resolviendo el sistema de ecuaciones definido por las ecuaciones (53) y (38), y el daño adimensional  $S_{p+fp}$  puede ser calculado con la ecuación (52).

En el apéndice B se presenta el programa de cómputo para determinar el perfil de flujo y el daño adimensional  $S_{p+fp}$ .

Los resultados fueron obtenidos para  $h_{wD} = 50$  y  $h_{wD} = 100$  para diferentes valores de  $b$ ,  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/10$ ,  $1/20$ ,  $1/40$ . Dichos resultados se muestran en las tablas 3 a la 12 y en las figuras 13 a la 22 se presentan una gráfica de la distribución de flujo.

Para validar las soluciones obtenidas se realizó una corrida con  $S=0$  y  $b=1$  para  $h_{wD}=50$  y  $h_{wD}=100$ , obteniéndose una distribución de flujo uniforme y un daño adimensional  $S_{p+fp}=0$  en ambos casos. Además, de acuerdo a las figuras 13 a la 22 se demuestra que la simple solución de flujo uniforme de un pozo parcialmente penetrante dañado toma el valor correspondiente al caso de presión uniforme, cuando se resuelve en el punto de presión promedio efectiva en el pozo. Este punto está localizado aproximadamente 75% de la longitud del pozo cuando el intervalo productor está en la cima o en el fondo de la formación.

Por lo tanto, podemos escribir la ecuación (52) de la siguiente manera:

$$S_{f+fp}(h_{wD}, b, S) = \frac{1}{b} \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{(1.75)h_{wD} + \sqrt{(3.0625)h_{wD}^2 + 1}}{(-0.25)h_{wD} + \sqrt{(0.0625)h_{wD}^2 + 1}} \right] + \frac{S}{b}$$

$$- \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{(0.75+1/b)h_{wD} + \sqrt{(0.75+1/b)^2 h_{wD}^2 + 1}}{(0.75-1/b)h_{wD} + \sqrt{(0.75-1/b)^2 h_{wD}^2 + 1}} \right] \quad (54)$$

TABLA 3.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y Sp+ph/w PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO (b=0.5, h=50)

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	GASTO VARIABLE	Sp+ph/w	GASTO VARIABLE	Sp+ph/w	GASTO VARIABLE	Sp+ph/w	GASTO VARIABLE	Sp+ph/w	GASTO VARIABLE	Sp+ph/w
0.01	0.8929	1.5861	0.9258	2.6331	0.9646	6.6626	0.9785	11.6709	0.9973	101.6809
0.02	0.8892	1.5861	0.9259	2.6331	0.9647	6.6626	0.9786	11.6709	0.9973	101.6809
0.05	0.8940	1.5861	0.9260	2.6331	0.9648	6.6626	0.9786	11.6709	0.9973	101.6809
0.07	0.8910	1.5861	0.9261	2.6331	0.9649	6.6626	0.9787	11.6709	0.9974	101.6809
0.09	0.8915	1.5861	0.9264	2.6331	0.9650	6.6626	0.9788	11.6709	0.9974	101.6809
0.11	0.8944	1.5861	0.9269	2.6331	0.9653	6.6626	0.9789	11.6709	0.9974	101.6809
0.13	0.8902	1.5861	0.9271	2.6331	0.9655	6.6626	0.9791	11.6709	0.9974	101.6809
0.15	0.8967	1.5861	0.9279	2.6331	0.9658	6.6626	0.9793	11.6709	0.9974	101.6809
0.17	0.8934	1.5861	0.9281	2.6331	0.9661	6.6626	0.9795	11.6709	0.9975	101.6809
0.19	0.8923	1.5861	0.9287	2.6331	0.9664	6.6626	0.9797	11.6709	0.9975	101.6809
0.21	0.8968	1.5861	0.9295	2.6331	0.9668	6.6626	0.9800	11.6709	0.9975	101.6809
0.23	0.8928	1.5861	0.9303	2.6331	0.9673	6.6626	0.9802	11.6709	0.9976	101.6809
0.25	0.9022	1.5861	0.9310	2.6331	0.9678	6.6626	0.9806	11.6709	0.9976	101.6809
0.27	0.8920	1.5861	0.9317	2.6331	0.9683	6.6626	0.9809	11.6709	0.9977	101.6809
0.29	0.9052	1.5861	0.9330	2.6331	0.9689	6.6626	0.9813	11.6709	0.9977	101.6809
0.31	0.8946	1.5861	0.9338	2.6331	0.9695	6.6626	0.9817	11.6709	0.9978	101.6809
0.33	0.9053	1.5861	0.9352	2.6331	0.9702	6.6626	0.9822	11.6709	0.9978	101.6809
0.35	0.9028	1.5861	0.9365	2.6331	0.9710	6.6626	0.9827	11.6709	0.9979	101.6809
0.37	0.9047	1.5861	0.9378	2.6331	0.9718	6.6626	0.9832	11.6709	0.9980	101.6809
0.39	0.9064	1.5861	0.9393	2.6331	0.9727	6.6626	0.9837	11.6709	0.9980	101.6809
0.41	0.9092	1.5861	0.9410	2.6331	0.9737	6.6626	0.9844	11.6709	0.9981	101.6809
0.43	0.9107	1.5861	0.9426	2.6331	0.9747	6.6626	0.9850	11.6709	0.9982	101.6809
0.45	0.9108	1.5861	0.9444	2.6331	0.9757	6.6626	0.9857	11.6709	0.9983	101.6809
0.47	0.9155	1.5861	0.9466	2.6331	0.9769	6.6626	0.9865	11.6709	0.9984	101.6809
0.49	0.9176	1.5861	0.9489	2.6331	0.9782	6.6626	0.9873	11.6709	0.9985	101.6809
0.51	0.9192	1.5861	0.9511	2.6331	0.9796	6.6626	0.9882	11.6709	0.9986	101.6809
0.53	0.9222	1.5861	0.9537	2.6331	0.9811	6.6626	0.9891	11.6709	0.9987	101.6809
0.55	0.9272	1.5861	0.9565	2.6331	0.9827	6.6626	0.9901	11.6709	0.9989	101.6809
0.57	0.9272	1.5861	0.9594	2.6331	0.9844	6.6626	0.9912	11.6709	0.9990	101.6809
0.59	0.9247	1.5861	0.9627	2.6331	0.9862	6.6626	0.9924	11.6709	0.9992	101.6809
0.61	0.9349	1.5861	0.9663	2.6331	0.9883	6.6626	0.9937	11.6709	0.9993	101.6809
0.63	0.9431	1.5861	0.9702	2.6331	0.9904	6.6626	0.9951	11.6709	0.9995	101.6809
0.65	0.9442	1.5861	0.9744	2.6331	0.9928	6.6626	0.9966	11.6709	0.9997	101.6809
0.67	0.9523	1.5861	0.9792	2.6331	0.9955	6.6626	0.9982	11.6709	0.9999	101.6809
0.69	0.9571	1.5861	0.9844	2.6331	0.9983	6.6626	1.0000	11.6709	1.0001	101.6809
0.71	0.9630	1.5861	0.9900	2.6331	1.0014	6.6626	1.0019	11.6709	1.0004	101.6809
0.73	0.9706	1.5861	0.9964	2.6331	1.0048	6.6626	1.0041	11.6709	1.0007	101.6809
0.75	0.9785	1.5861	1.0035	2.6331	1.0087	6.6626	1.0064	11.6709	1.0010	101.6809
0.77	0.9872	1.5861	1.0116	2.6331	1.0120	6.6626	1.0091	11.6709	1.0013	101.6809
0.79	0.9983	1.5861	1.0209	2.6331	1.0178	6.6626	1.0120	11.6709	1.0017	101.6809
0.81	1.0089	1.5861	1.0215	2.6331	1.0235	6.6626	1.0153	11.6709	1.0021	101.6809
0.83	1.0244	1.5861	1.0441	2.6331	1.0297	6.6626	1.0192	11.6709	1.0025	101.6809
0.85	1.0389	1.5861	1.0590	2.6331	1.0371	6.6626	1.0236	11.6709	1.0021	101.6809
0.87	1.0632	1.5861	1.0772	2.6331	1.0459	6.6626	1.0288	11.6709	1.0027	101.6809
0.89	1.0736	1.5861	1.1004	2.6331	1.0568	6.6626	1.0351	11.6709	1.0044	101.6809
0.91	1.1514	1.5861	1.1309	2.6331	1.0704	6.6626	1.0429	11.6709	1.0053	101.6809
0.93	1.0560	1.5861	1.1743	2.6331	1.0884	6.6626	1.0530	11.6709	1.0064	101.6809
0.95	1.5261	1.5861	1.2445	2.6331	1.1141	6.6626	1.0670	11.6709	1.0079	101.6809
0.97	0.4203	1.5861	1.3856	2.6331	1.1548	6.6626	1.0881	11.6709	1.0101	101.6809
0.99	3.8688	1.5861	1.7420	2.6331	1.2279	6.6626	1.1241	11.6709	1.0126	101.6809

FIG. 13.-  $q_{ihw}/q_w$  VS  $ZD$   
 YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.5hwD-50$ )

4/2

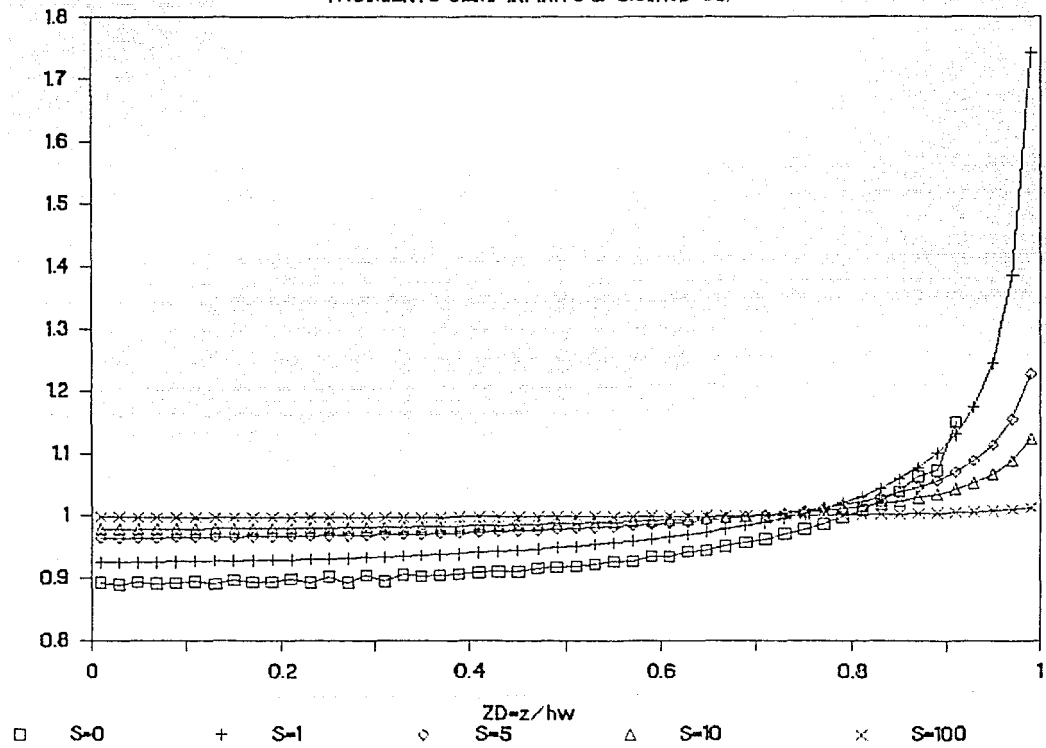


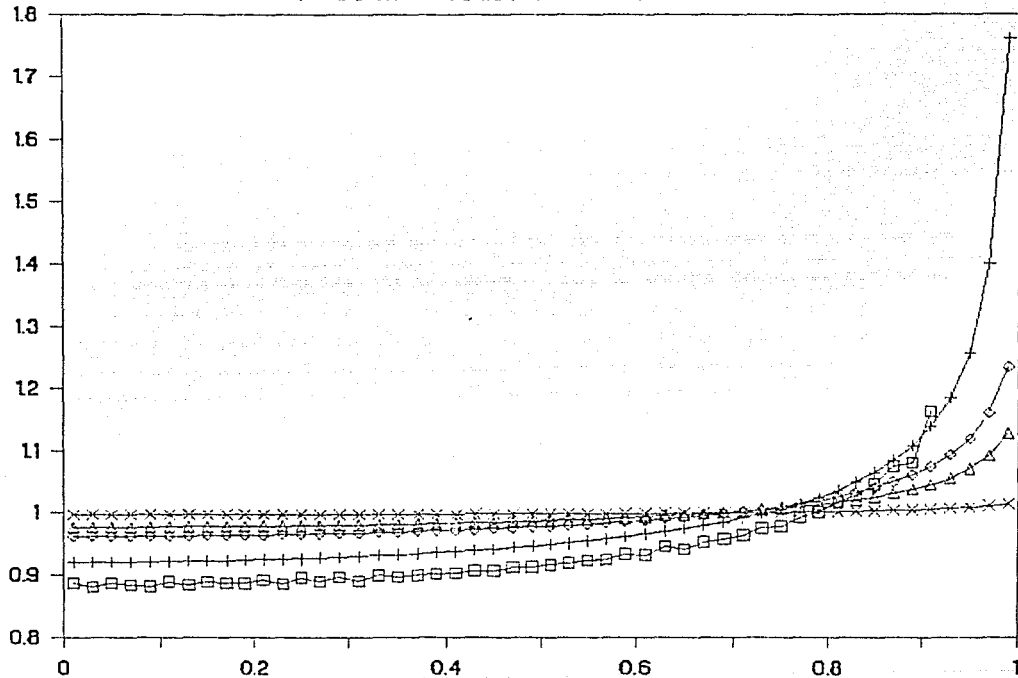


TABLA 4.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y Sp+fw/h PARA UN POZO  
 PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO (b=0.25, h=50)

ZB	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	VARIABLE	Sp+fw/h	VARIABLE	Sp+fw/h	VARIABLE	Sp+fw/h	VARIABLE	Sp+fw/h	VARIABLE	Sp+fw/h
0.01	0.8859	2.7140	0.9208	3.7624	0.9622	7.7931	0.9770	12.8017	0.9971	102.8122
0.02	0.8890	2.7140	0.9206	3.7624	0.9622	7.7931	0.9770	12.8017	0.9971	102.8122
0.03	0.8870	2.7140	0.9207	3.7624	0.9622	7.7931	0.9771	12.8017	0.9972	102.8122
0.04	0.8844	2.7140	0.9208	3.7624	0.9622	7.7931	0.9771	12.8017	0.9972	102.8122
0.07	0.8916	2.7139	0.9210	3.7624	0.9625	7.7931	0.9772	12.8017	0.9972	102.8122
0.11	0.8891	2.7139	0.9219	3.7624	0.9626	7.7931	0.9774	12.8017	0.9972	102.8122
0.13	0.8943	2.7139	0.9223	3.7624	0.9631	7.7931	0.9776	12.8017	0.9972	102.8122
0.15	0.8886	2.7139	0.9228	3.7624	0.9634	7.7931	0.9776	12.8017	0.9973	102.8122
0.17	0.8872	2.7139	0.9233	3.7624	0.9637	7.7931	0.9769	12.8017	0.9973	102.8122
0.19	0.8964	2.7139	0.9239	3.7624	0.9641	7.7931	0.9783	12.8017	0.9973	102.8122
0.21	0.8923	2.7139	0.9247	3.7624	0.9645	7.7931	0.9786	12.8017	0.9974	102.8122
0.23	0.8853	2.7139	0.9255	3.7624	0.9650	7.7931	0.9789	12.8017	0.9974	102.8122
0.25	0.8958	2.7139	0.9255	3.7624	0.9656	7.7931	0.9792	12.8017	0.9974	102.8122
0.27	0.8886	2.7139	0.9274	3.7624	0.9652	7.7931	0.9786	12.8017	0.9975	102.8122
0.29	0.8965	2.7139	0.9285	3.7624	0.9658	7.7931	0.9801	12.8017	0.9975	102.8122
0.31	0.8906	2.7139	0.9297	3.7624	0.9676	7.7931	0.9805	12.8017	0.9976	102.8122
0.33	0.8895	2.7139	0.9312	3.7624	0.9684	7.7931	0.9810	12.8017	0.9977	102.8122
0.35	0.8966	2.7139	0.9326	3.7624	0.9692	7.7931	0.9816	12.8017	0.9977	102.8122
0.37	0.8997	2.7139	0.9341	3.7624	0.9701	7.7931	0.9822	12.8017	0.9978	102.8122
0.39	0.9017	2.7139	0.9359	3.7624	0.9711	7.7931	0.9828	12.8017	0.9979	102.8122
0.41	0.9026	2.7139	0.9377	3.7624	0.9722	7.7931	0.9835	12.8017	0.9980	102.8122
0.42	0.9066	2.7139	0.9396	3.7624	0.9732	7.7931	0.9842	12.8017	0.9981	102.8122
0.45	0.9066	2.7139	0.9418	3.7624	0.9745	7.7931	0.9850	12.8017	0.9982	102.8122
0.47	0.9123	2.7139	0.9441	3.7624	0.9759	7.7931	0.9859	12.8017	0.9983	102.8122
0.49	0.9134	2.7139	0.9465	3.7624	0.9772	7.7931	0.9868	12.8017	0.9984	102.8122
0.51	0.9166	2.7139	0.9492	3.7624	0.9786	7.7931	0.9877	12.8017	0.9985	102.8122
0.53	0.9199	2.7139	0.9521	3.7624	0.9805	7.7931	0.9888	12.8017	0.9987	102.8122
0.55	0.9244	2.7139	0.9552	3.7624	0.9822	7.7931	0.9899	12.8017	0.9989	102.8122
0.57	0.9257	2.7139	0.9586	3.7624	0.9841	7.7931	0.9911	12.8017	0.9990	102.8122
0.59	0.9242	2.7139	0.9622	3.7623	0.9862	7.7931	0.9924	12.8017	0.9992	102.8122
0.61	0.9325	2.7139	0.9662	3.7623	0.9884	7.7931	0.9938	12.8017	0.9994	102.8121
0.63	0.9460	2.7139	0.9706	3.7623	0.9908	7.7931	0.9953	12.8017	0.9996	102.8121
0.65	0.9416	2.7139	0.9747	3.7623	0.9932	7.7931	0.9969	12.8017	0.9998	102.8121
0.67	0.9533	2.7139	0.9800	3.7623	0.9961	7.7930	0.9986	12.8017	1.0000	102.8121
0.69	0.9579	2.7139	0.9857	3.7623	0.9992	7.7930	1.0005	12.8017	1.0002	102.8121
0.71	0.9546	2.7139	0.9919	3.7623	1.0025	7.7930	1.0026	12.8017	1.0005	102.8121
0.73	0.9757	2.7139	0.9989	3.7623	1.0065	7.7930	1.0049	12.8017	1.0008	102.8121
0.75	0.9788	2.7139	1.0062	3.7623	1.0103	7.7930	1.0074	12.8017	1.0011	102.8121
0.77	0.9526	2.7139	1.0150	3.7623	1.0148	7.7930	1.0102	12.8017	1.0014	102.8121
0.79	1.0014	2.7139	1.0249	3.7623	1.0200	7.7930	1.0134	12.8017	1.0016	102.8121
0.81	1.0178	2.7139	1.0264	3.7623	1.0258	7.7930	1.0169	12.8017	1.0023	102.8121
0.83	1.0291	2.7139	1.0492	3.7623	1.0324	7.7930	1.0209	12.8017	1.0027	102.8121
0.85	1.0451	2.7139	1.0651	3.7623	1.0402	7.7930	1.0255	12.8017	1.0033	102.8121
0.87	1.0749	2.7139	1.0844	3.7623	1.0494	7.7930	1.0309	12.8017	1.0039	102.8121
0.89	1.0602	2.7139	1.1050	3.7623	1.0605	7.7930	1.0374	12.8017	1.0047	102.8121
0.91	1.1133	2.7139	1.1297	3.7623	1.0746	7.7930	1.0454	12.8017	1.0056	102.8121
0.93	1.0760	2.7139	1.1646	3.7623	1.0932	7.7930	1.0558	12.8016	1.0067	102.8121
0.95	1.1444	2.7139	1.2560	3.7623	1.1193	7.7930	1.0700	12.8016	1.0083	102.8121
0.97	0.9257	2.7139	1.4000	3.7623	1.1607	7.7930	1.0915	12.8016	1.0105	102.8121
0.99	3.9277	2.7139	1.7613	3.7623	1.2345	7.7930	1.1278	12.8016	1.0140	102.8121

FIG. 14.-  $q_{ihw}/q_w$  VS ZD

YACIMIENTO SEMI-INFINITO  $b=0.25 \cdot hwD=50$



□ S=0      + S=1      ◇ S=5      △ S=10      × S=100

TABLA 5.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y S+fo PARA UN POZO  
 PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $\alpha=0.1, h=50$ )

ID	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO
		So+fohw/h		So+fohw/h		So+fohw/h		So+fohw/h		So+fohw/h
0.01	0.8352	3.5181	0.9199	4.5667	0.9617	8.5976	0.9768	13.6062	0.9971	103.6169
0.02	0.8797	3.5181	0.9198	4.5667	0.9618	8.5975	0.9768	13.6062	0.9971	103.6167
0.05	0.8264	3.5181	0.9201	4.5667	0.9619	8.5975	0.9769	13.6062	0.9971	103.6167
0.07	0.8525	3.5181	0.9202	4.5667	0.9620	8.5975	0.9769	13.6062	0.9971	103.6167
0.09	0.8241	3.5180	0.9206	4.5667	0.9622	8.5975	0.9771	13.6062	0.9972	103.6167
0.11	0.8648	3.5180	0.9210	4.5667	0.9625	8.5975	0.9772	13.6062	0.9972	103.6167
0.12	0.8846	3.5180	0.9216	4.5667	0.9628	8.5975	0.9774	13.6062	0.9972	103.6167
0.15	0.8672	3.5180	0.9222	4.5667	0.9631	8.5975	0.9776	13.6062	0.9972	103.6167
0.17	0.8675	3.5180	0.9228	4.5667	0.9635	8.5975	0.9779	13.6062	0.9973	103.6167
0.19	0.8637	3.5180	0.9236	4.5667	0.9639	8.5975	0.9782	13.6062	0.9973	103.6167
0.21	0.8984	3.5180	0.9247	4.5667	0.9644	8.5975	0.9785	13.6062	0.9973	103.6167
0.23	0.8777	3.5180	0.9244	4.5667	0.9646	8.5975	0.9787	13.6062	0.9974	103.6167
0.25	0.8966	3.5180	0.9257	4.5667	0.9653	8.5975	0.9790	13.6062	0.9974	103.6167
0.27	0.8868	3.5180	0.9267	4.5667	0.9659	8.5975	0.9794	13.6062	0.9975	103.6167
0.29	0.8959	3.5180	0.9279	4.5667	0.9666	8.5975	0.9799	13.6062	0.9975	103.6167
0.31	0.8977	3.5180	0.9292	4.5667	0.9673	8.5975	0.9804	13.6062	0.9976	103.6167
0.33	0.8999	3.5180	0.9297	4.5667	0.9682	8.5975	0.9809	13.6062	0.9977	103.6167
0.35	0.8960	3.5180	0.9322	4.5667	0.9690	8.5975	0.9815	13.6062	0.9977	103.6167
0.37	0.8992	3.5180	0.9328	4.5667	0.9700	8.5975	0.9821	13.6062	0.9978	103.6167
0.39	0.9015	3.5180	0.9356	4.5667	0.9710	8.5975	0.9827	13.6062	0.9979	103.6167
0.41	0.9034	3.5180	0.9375	4.5667	0.9721	8.5975	0.9834	13.6062	0.9980	103.6167
0.43	0.9064	3.5180	0.9395	4.5667	0.9733	8.5975	0.9842	13.6062	0.9981	103.6167
0.45	0.9073	3.5180	0.9417	4.5667	0.9745	8.5975	0.9850	13.6062	0.9982	103.6167
0.47	0.9102	3.5180	0.9442	4.5666	0.9759	8.5975	0.9858	13.6062	0.9983	103.6167
0.49	0.9197	3.5180	0.9469	4.5666	0.9773	8.5975	0.9868	13.6062	0.9984	103.6167
0.51	0.9097	3.5180	0.9485	4.5666	0.9788	8.5975	0.9876	13.6062	0.9985	103.6167
0.53	0.9214	3.5180	0.9516	4.5666	0.9803	8.5975	0.9887	13.6062	0.9987	103.6167
0.55	0.9230	3.5180	0.9548	4.5666	0.9821	8.5975	0.9898	13.6062	0.9988	103.6167
0.57	0.9256	3.5180	0.9583	4.5666	0.9840	8.5975	0.9910	13.6062	0.9990	103.6167
0.59	0.9334	3.5180	0.9620	4.5666	0.9861	8.5975	0.9924	13.6062	0.9992	103.6167
0.61	0.9231	3.5180	0.9660	4.5666	0.9883	8.5975	0.9935	13.6062	0.9994	103.6167
0.63	0.9421	3.5180	0.9704	4.5666	0.9907	8.5975	0.9953	13.6062	0.9996	103.6167
0.65	0.9445	3.5180	0.9751	4.5666	0.9934	8.5975	0.9969	13.6062	0.9998	103.6167
0.67	0.9529	3.5180	0.9800	4.5666	0.9962	8.5975	0.9987	13.6062	1.0000	103.6167
0.69	0.9560	3.5180	0.9860	4.5666	0.9992	8.5975	1.0006	13.6062	1.0002	103.6167
0.71	0.9666	3.5180	0.9923	4.5666	1.0027	8.5975	1.0038	13.6062	1.0005	103.6167
0.73	0.9715	3.5180	0.9992	4.5666	1.0065	8.5975	1.0051	13.6062	1.0008	103.6167
0.75	0.9885	3.5180	1.0073	4.5666	1.0106	8.5975	1.0076	13.6061	1.0011	103.6167
0.77	0.9855	3.5180	1.0149	4.5666	1.0150	8.5975	1.0102	13.6062	1.0014	103.6167
0.79	1.0048	3.5180	1.0250	4.5666	1.0201	8.5975	1.0125	13.6061	1.0018	103.6167
0.81	1.0147	3.5180	1.0345	4.5666	1.0260	8.5975	1.0170	13.6061	1.0022	103.6167
0.83	1.0314	3.5180	1.0499	4.5666	1.0327	8.5975	1.0210	13.6061	1.0028	103.6167
0.85	1.0467	3.5180	1.0657	4.5666	1.0405	8.5975	1.0257	13.6061	1.0033	103.6167
0.87	1.0726	3.5180	1.0849	4.5666	1.0498	8.5975	1.0311	13.6061	1.0040	103.6167
0.89	1.0825	3.5180	1.1091	4.5666	1.0610	8.5975	1.0377	13.6061	1.0047	103.6167
0.91	1.1648	3.5180	1.1409	4.5666	1.0751	8.5975	1.0457	13.6061	1.0056	103.6167
0.93	1.0687	3.5180	1.1856	4.5666	1.0937	8.5975	1.0561	13.6061	1.0069	103.6167
0.95	1.5500	3.5180	1.2976	4.5666	1.1200	8.5975	1.0704	13.6061	1.0083	103.6167
0.97	0.4341	3.5180	1.4017	4.5666	1.1614	8.5975	1.0919	13.6061	1.0105	103.6167
0.99	2.9373	3.5180	1.7339	4.5666	1.2354	8.5975	1.1283	13.6061	1.0141	103.6167

FIG. 15.-  $q_{ihw}/q_w$  VS ZD

YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.1hwD-50$ )

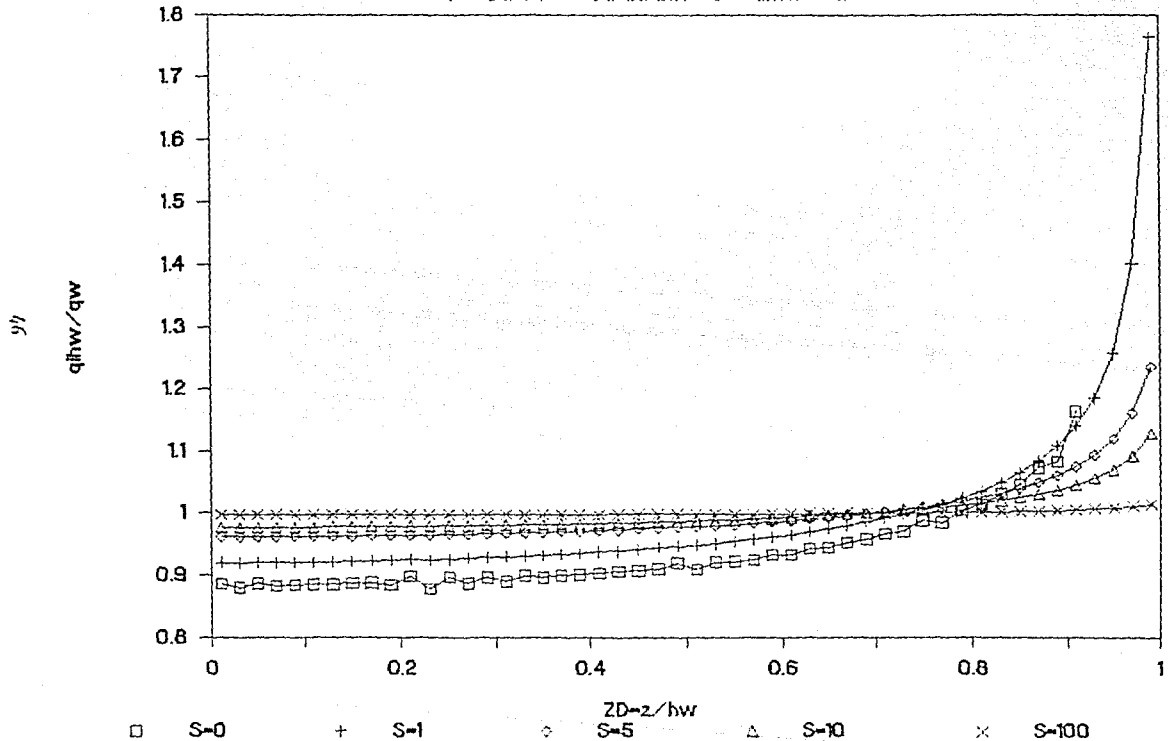
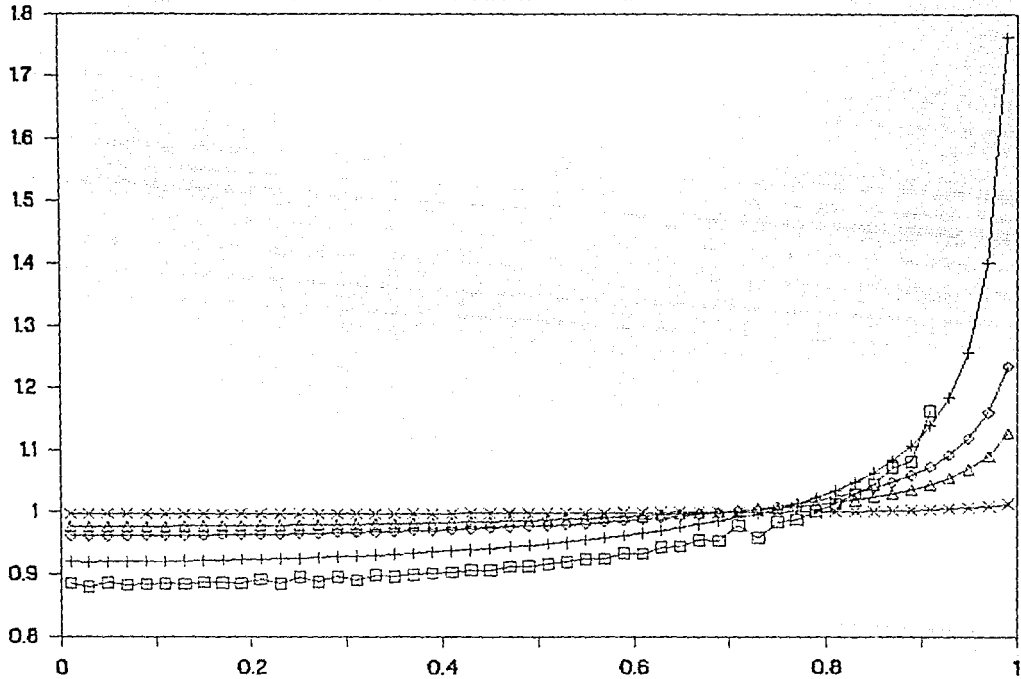


TABLE 6. - DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y Soffwh/h PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.05, h_0=50$ )

ID	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	VARIABLE	So+foh/h	VARIABLE	So+foh/h	VARIABLE	So+foh/h	VARIABLE	So+foh/h	VARIABLE	So+foh/h
0.01	0.8256	3.8284	0.9200	4.8770	0.9618	5.9078	0.9768	13.9164	0.9971	103.9269
0.03	0.8793	3.8284	0.9199	4.8770	0.9618	5.9078	0.9768	13.9164	0.9971	103.9269
0.05	0.8865	3.8284	0.9201	4.8770	0.9619	5.9078	0.9769	13.9164	0.9971	103.9269
0.07	0.8826	3.8284	0.9203	4.8770	0.9620	5.9078	0.9770	13.9164	0.9971	103.9269
0.09	0.8841	3.8284	0.9206	4.8770	0.9622	5.9078	0.9771	13.9164	0.9972	103.9269
0.11	0.8848	3.8284	0.9210	4.8770	0.9625	5.9078	0.9772	13.9164	0.9972	103.9269
0.13	0.8844	3.8284	0.9215	4.8770	0.9627	5.9078	0.9774	13.9164	0.9972	103.9269
0.15	0.8873	3.8284	0.9221	4.8770	0.9631	5.9078	0.9776	13.9164	0.9972	103.9269
0.17	0.8885	3.8284	0.9227	4.8770	0.9634	5.9078	0.9779	13.9164	0.9972	103.9269
0.19	0.8895	3.8284	0.9234	4.8770	0.9638	5.9078	0.9781	13.9164	0.9973	103.9269
0.21	0.8917	3.8284	0.9242	4.8770	0.9643	5.9078	0.9784	13.9164	0.9973	103.9269
0.23	0.8947	3.8284	0.9250	4.8769	0.9648	5.9078	0.9788	13.9164	0.9974	103.9269
0.25	0.8982	3.8284	0.9261	4.8769	0.9654	5.9078	0.9791	13.9164	0.9974	103.9269
0.27	0.8989	3.8284	0.9270	4.8769	0.9660	5.9078	0.9795	13.9164	0.9975	103.9269
0.29	0.8960	3.8284	0.9282	4.8769	0.9667	5.9077	0.9800	13.9164	0.9975	103.9269
0.31	0.8952	3.8284	0.9294	4.8769	0.9674	5.9077	0.9804	13.9164	0.9976	103.9269
0.33	0.8991	3.8284	0.9299	4.8769	0.9682	5.9077	0.9810	13.9164	0.9977	103.9269
0.35	0.8963	3.8284	0.9324	4.8769	0.9691	5.9077	0.9815	13.9164	0.9978	103.9269
0.37	0.8994	3.8284	0.9340	4.8769	0.9700	5.9077	0.9821	13.9164	0.9978	103.9269
0.39	0.9015	3.8282	0.9357	4.8769	0.9710	5.9077	0.9828	13.9164	0.9979	103.9269
0.41	0.9025	3.8282	0.9375	4.8769	0.9721	5.9077	0.9835	13.9164	0.9980	103.9269
0.43	0.9067	3.8283	0.9386	4.8769	0.9733	5.9077	0.9842	13.9164	0.9981	103.9269
0.45	0.9065	3.8283	0.9417	4.8769	0.9745	5.9077	0.9850	13.9164	0.9982	103.9269
0.47	0.9123	3.8283	0.9441	4.8769	0.9759	5.9077	0.9859	13.9164	0.9983	103.9269
0.49	0.9124	3.8283	0.9466	4.8769	0.9773	5.9077	0.9868	13.9164	0.9984	103.9269
0.51	0.9167	3.8283	0.9493	4.8769	0.9789	5.9077	0.9878	13.9164	0.9986	103.9269
0.53	0.9200	3.8283	0.9522	4.8769	0.9805	5.9077	0.9888	13.9164	0.9987	103.9269
0.55	0.9245	3.8283	0.9553	4.8769	0.9823	5.9077	0.9899	13.9164	0.9989	103.9269
0.57	0.9260	3.8283	0.9587	4.8769	0.9842	5.9077	0.9912	13.9164	0.9990	103.9269
0.59	0.9241	3.8283	0.9624	4.8769	0.9862	5.9077	0.9925	13.9164	0.9992	103.9269
0.61	0.9277	3.8283	0.9664	4.8769	0.9885	5.9077	0.9939	13.9164	0.9994	103.9269
0.63	0.9438	3.8283	0.9708	4.8769	0.9909	5.9077	0.9954	13.9164	0.9996	103.9269
0.65	0.9447	3.8283	0.9755	4.8769	0.9935	5.9077	0.9970	13.9164	0.9998	103.9269
0.67	0.9549	3.8283	0.9807	4.8769	0.9964	5.9077	0.9989	13.9164	1.0000	103.9269
0.69	0.9546	3.8283	0.9865	4.8769	0.9995	5.9077	1.0007	13.9164	1.0002	103.9269
0.71	0.9790	3.8283	0.9932	4.8769	1.0029	5.9077	1.0028	13.9164	1.0005	103.9269
0.73	0.9897	3.8282	0.9978	4.8769	1.0061	5.9077	1.0049	13.9164	1.0008	103.9269
0.75	0.9854	3.8282	1.0060	4.8769	1.0102	5.9077	1.0074	13.9164	1.0011	103.9269
0.77	0.9895	3.8283	1.0148	4.8769	1.0148	5.9077	1.0102	13.9164	1.0014	103.9269
0.79	1.0029	3.8283	1.0248	4.8769	1.0209	5.9077	1.0124	13.9164	1.0018	103.9269
0.81	1.0149	3.8283	1.0363	4.8769	1.0259	5.9077	1.0169	13.9164	1.0023	103.9269
0.83	1.0308	3.8283	1.0496	4.8769	1.0326	5.9077	1.0209	13.9164	1.0027	103.9269
0.85	1.0462	3.8282	1.0654	4.8769	1.0404	5.9077	1.0256	13.9164	1.0032	103.9269
0.87	1.0731	3.8283	1.0846	4.8769	1.0498	5.9077	1.0310	13.9162	1.0039	103.9269
0.89	1.0820	3.8283	1.1087	4.8769	1.0608	5.9077	1.0376	13.9163	1.0047	103.9269
0.91	1.1043	3.8283	1.1404	4.8769	1.0749	5.9077	1.0456	13.9163	1.0056	103.9269
0.93	1.0662	3.8283	1.1852	4.8769	1.0926	5.9077	1.0560	13.9163	1.0066	103.9269
0.95	1.0462	3.8283	1.2571	4.8769	1.1197	5.9077	1.0703	13.9163	1.0083	103.9269
0.97	0.9239	3.8283	1.4011	4.8769	1.1611	5.9077	1.0917	13.9162	1.0105	103.9268
0.99	3.9290	3.8283	1.7622	4.8769	1.2351	5.9077	1.1281	13.9163	1.0140	103.9268

FIG. 16.-  $q_{ihw}/q_w$  VS ZD

YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.05.hwD=50$ )



□ S=0      + S=1      ◇ S=5      △ S=10      × S=100

TABLA 7.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_p + f_{chw}/h$  PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.025, h_w=50$ )

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	GASTO VARIABLE	$S_p + f_{chw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_p + f_{chw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_p + f_{chw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_p + f_{chw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_p + f_{chw}/h$
0.01	0.8255	4.0069	0.9199	5.0495	0.9518	9.0804	0.9769	14.0890	0.9971	104.0976
0.03	0.8297	4.0069	0.9195	5.0495	0.9618	9.0804	0.9768	14.0890	0.9971	104.0976
0.05	0.8334	4.0069	0.9200	5.0495	0.9619	9.0804	0.9768	14.0890	0.9971	104.0976
0.07	0.8324	4.0069	0.9202	5.0495	0.9620	9.0804	0.9769	14.0890	0.9971	104.0976
0.09	0.8340	4.0069	0.9205	5.0495	0.9622	9.0802	0.9770	14.0890	0.9972	104.0976
0.11	0.8347	4.0068	0.9209	5.0495	0.9624	9.0803	0.9772	14.0890	0.9972	104.0976
0.13	0.8342	4.0068	0.9214	5.0495	0.9627	9.0803	0.9774	14.0890	0.9972	104.0976
0.15	0.8371	4.0068	0.9220	5.0495	0.9629	9.0803	0.9776	14.0890	0.9972	104.0976
0.17	0.8363	4.0068	0.9225	5.0495	0.9634	9.0803	0.9778	14.0890	0.9973	104.0976
0.19	0.8354	4.0068	0.9232	5.0495	0.9635	9.0803	0.9781	14.0890	0.9973	104.0976
0.21	0.8315	4.0068	0.9241	5.0495	0.9642	9.0803	0.9784	14.0890	0.9973	104.0976
0.23	0.8345	4.0068	0.9249	5.0495	0.9647	9.0803	0.9787	14.0890	0.9974	104.0976
0.25	0.8350	4.0068	0.9250	5.0495	0.9652	9.0802	0.9791	14.0890	0.9974	104.0976
0.27	0.8376	4.0069	0.9259	5.0495	0.9659	9.0802	0.9795	14.0890	0.9975	104.0976
0.29	0.8358	4.0068	0.9260	5.0495	0.9656	9.0803	0.9799	14.0890	0.9975	104.0976
0.31	0.8399	4.0068	0.9293	5.0495	0.9673	9.0803	0.9804	14.0890	0.9976	104.0976
0.33	0.8399	4.0068	0.9308	5.0495	0.9682	9.0803	0.9809	14.0890	0.9977	104.0976
0.35	0.8363	4.0068	0.9322	5.0495	0.9690	9.0803	0.9815	14.0890	0.9977	104.0976
0.37	0.8392	4.0068	0.9328	5.0495	0.9699	9.0803	0.9821	14.0890	0.9978	104.0976
0.39	0.8402	4.0068	0.9335	5.0495	0.9710	9.0803	0.9827	14.0890	0.9979	104.0976
0.41	0.8422	4.0069	0.9374	5.0495	0.9720	9.0802	0.9834	14.0890	0.9980	104.0976
0.43	0.8464	4.0068	0.9393	5.0495	0.9732	9.0803	0.9841	14.0890	0.9981	104.0976
0.45	0.8462	4.0068	0.9415	5.0495	0.9744	9.0803	0.9849	14.0890	0.9982	104.0976
0.47	0.8419	4.0068	0.9429	5.0494	0.9758	9.0803	0.9858	14.0890	0.9982	104.0976
0.49	0.8420	4.0068	0.9465	5.0494	0.9772	9.0803	0.9865	14.0890	0.9984	104.0976
0.51	0.8462	4.0068	0.9490	5.0494	0.9787	9.0803	0.9877	14.0890	0.9986	104.0976
0.53	0.8495	4.0069	0.9519	5.0494	0.9804	9.0803	0.9887	14.0890	0.9987	104.0976
0.55	0.8241	4.0068	0.9551	5.0494	0.9822	9.0803	0.9899	14.0890	0.9989	104.0976
0.57	0.8255	4.0068	0.9564	5.0494	0.9841	9.0803	0.9911	14.0890	0.9991	104.0976
0.59	0.8335	4.0068	0.9621	5.0494	0.9861	9.0803	0.9924	14.0890	0.9992	104.0976
0.61	0.8322	4.0068	0.9660	5.0494	0.9884	9.0803	0.9938	14.0890	0.9994	104.0976
0.63	0.8431	4.0068	0.9704	5.0494	0.9908	9.0803	0.9953	14.0890	0.9996	104.0976
0.65	0.8445	4.0068	0.9751	5.0494	0.9924	9.0803	0.9969	14.0890	0.9998	104.0976
0.67	0.8527	4.0068	0.9802	5.0494	0.9962	9.0803	0.9987	14.0890	1.0000	104.0976
0.69	0.8531	4.0068	0.9859	5.0494	0.9993	9.0803	1.0005	14.0890	1.0002	104.0976
0.71	0.8656	4.0068	0.9921	5.0494	1.0027	9.0803	1.0027	14.0890	1.0005	104.0976
0.73	0.8733	4.0068	0.9991	5.0494	1.0064	9.0803	1.0050	14.0890	1.0009	104.0976
0.75	0.8822	4.0068	1.0068	5.0494	1.0105	9.0803	1.0078	14.0890	1.0011	104.0976
0.77	0.8920	4.0069	1.0155	5.0494	1.0151	9.0803	1.0104	14.0890	1.0015	104.0976
0.79	1.0002	4.0065	1.0254	5.0494	1.0202	9.0803	1.0125	14.0890	1.0018	104.0976
0.81	1.0158	4.0068	1.0248	5.0494	1.0261	9.0803	1.0171	14.0890	1.0022	104.0976
0.83	1.0215	4.0066	1.0501	5.0494	1.0229	9.0802	1.0211	14.0890	1.0028	104.0976
0.85	1.0479	4.0066	1.0659	5.0494	1.0406	9.0802	1.0259	14.0890	1.0032	104.0976
0.87	1.0738	4.0066	1.0951	5.0494	1.0498	9.0803	1.0312	14.0890	1.0040	104.0976
0.89	1.0827	4.0066	1.1092	5.0494	1.0611	9.0803	1.0377	14.0890	1.0047	104.0976
0.91	1.1149	4.0065	1.1409	5.0494	1.0751	9.0802	1.0458	14.0890	1.0055	104.0976
0.93	1.0589	4.0066	1.1657	5.0494	1.0937	9.0803	1.0561	14.0890	1.0068	104.0976
0.95	1.5500	4.0068	1.2576	5.0494	1.1200	9.0802	1.0704	14.0890	1.0082	104.0976
0.97	0.4242	4.0068	1.4015	5.0494	1.1614	9.0803	1.0919	14.0890	1.0105	104.0976
0.99	3.9369	4.0068	1.7339	5.0494	1.2254	9.0802	1.1283	14.0890	1.0141	104.0976

# FIG. 17.- $q_{ihw}/q_w$ VS $ZD$

YACMENTO SEMI-INFINITO  $b=0.25, hwD=50$

50

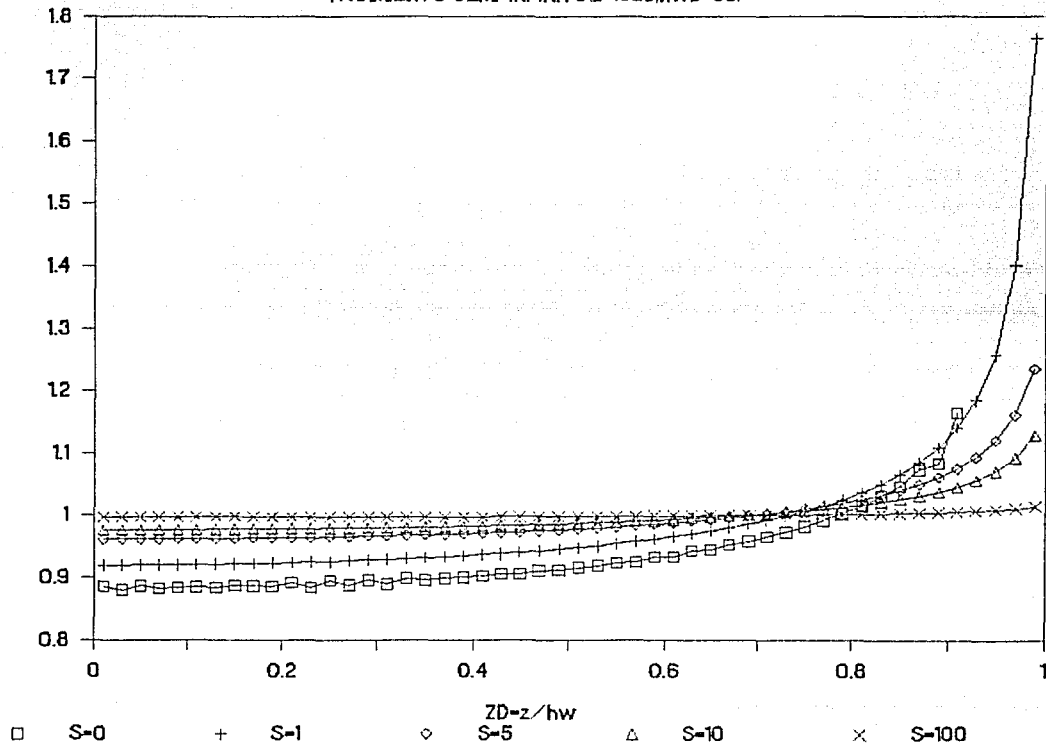




TABLE 3.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_0+sp_h/w$  PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.5, h_w=100$ )

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_h/w$	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_h/w$	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_h/w$	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_h/w$	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_h/w$
0.01	0.9126	1.9541	0.9356	2.9800	0.9668	7.0047	0.9792	12.0126	0.9973	102.0226
0.02	0.9173	1.9541	0.9356	2.9800	0.9671	7.0047	0.9794	12.0126	0.9973	102.0226
0.05	0.9134	1.9541	0.9362	2.9800	0.9670	7.0047	0.9793	12.0126	0.9973	102.0226
0.07	0.9163	1.9541	0.9364	2.9800	0.9671	7.0047	0.9794	12.0126	0.9973	102.0226
0.09	0.9123	1.9541	0.9360	2.9800	0.9671	7.0047	0.9794	12.0126	0.9973	102.0226
0.11	0.9164	1.9540	0.9370	2.9800	0.9675	7.0046	0.9796	12.0125	0.9974	102.0226
0.12	0.9156	1.9540	0.9371	2.9800	0.9677	7.0046	0.9798	12.0125	0.9974	102.0226
0.15	0.9152	1.9540	0.9376	2.9800	0.9679	7.0046	0.9799	12.0125	0.9974	102.0226
0.17	0.9191	1.9540	0.9384	2.9800	0.9683	7.0046	0.9802	12.0125	0.9974	102.0226
0.19	0.9151	1.9540	0.9384	2.9800	0.9685	7.0046	0.9803	12.0125	0.9975	102.0226
0.21	0.9204	1.9540	0.9395	2.9800	0.9690	7.0046	0.9806	12.0125	0.9975	102.0226
0.23	0.9176	1.9540	0.9398	2.9800	0.9693	7.0046	0.9809	12.0125	0.9975	102.0226
0.25	0.9199	1.9540	0.9406	2.9800	0.9698	7.0046	0.9812	12.0125	0.9976	102.0226
0.27	0.9228	1.9540	0.9419	2.9800	0.9704	7.0046	0.9816	12.0125	0.9976	102.0226
0.29	0.9194	1.9540	0.9419	2.9800	0.9707	7.0046	0.9816	12.0125	0.9977	102.0226
0.31	0.9237	1.9540	0.9434	2.9800	0.9714	7.0046	0.9823	12.0125	0.9977	102.0226
0.33	0.9247	1.9540	0.9446	2.9800	0.9721	7.0046	0.9827	12.0125	0.9978	102.0226
0.35	0.9241	1.9540	0.9451	2.9800	0.9727	7.0046	0.9831	12.0125	0.9979	102.0226
0.37	0.9269	1.9540	0.9468	2.9800	0.9735	7.0046	0.9837	12.0125	0.9979	102.0226
0.39	0.9279	1.9540	0.9479	2.9800	0.9743	7.0046	0.9842	12.0125	0.9980	102.0226
0.41	0.9306	1.9540	0.9496	2.9800	0.9752	7.0046	0.9849	12.0125	0.9981	102.0226
0.43	0.9302	1.9540	0.9507	2.9800	0.9761	7.0046	0.9854	12.0125	0.9982	102.0226
0.45	0.9249	1.9540	0.9551	2.9800	0.9773	7.0046	0.9862	12.0125	0.9983	102.0226
0.47	0.9258	1.9540	0.9547	2.9800	0.9783	7.0046	0.9869	12.0125	0.9984	102.0226
0.49	0.9277	1.9540	0.9565	2.9800	0.9795	7.0046	0.9876	12.0125	0.9985	102.0226
0.51	0.9409	1.9540	0.9587	2.9800	0.9808	7.0046	0.9884	12.0125	0.9986	102.0226
0.53	0.9427	1.9540	0.9608	2.9799	0.9821	7.0046	0.9893	12.0125	0.9987	102.0226
0.55	0.9454	1.9540	0.9633	2.9799	0.9836	7.0046	0.9903	12.0125	0.9988	102.0226
0.57	0.9494	1.9540	0.9662	2.9799	0.9852	7.0046	0.9914	12.0125	0.9990	102.0226
0.59	0.9531	1.9540	0.9691	2.9799	0.9870	7.0046	0.9925	12.0125	0.9991	102.0226
0.61	0.9546	1.9540	0.9718	2.9799	0.9887	7.0046	0.9926	12.0125	0.9993	102.0226
0.63	0.9612	1.9540	0.9757	2.9799	0.9908	7.0046	0.9950	12.0125	0.9995	102.0226
0.65	0.9629	1.9540	0.9790	2.9799	0.9929	7.0046	0.9964	12.0125	0.9997	102.0226
0.67	0.9701	1.9540	0.9836	2.9799	0.9954	7.0046	0.9980	12.0125	0.9999	102.0226
0.69	0.9741	1.9540	0.9879	2.9799	0.9980	7.0046	0.9997	12.0125	1.0001	102.0226
0.71	0.9801	1.9540	0.9928	2.9799	1.0009	7.0046	1.0015	12.0125	1.0004	102.0226
0.72	0.9864	1.9540	0.9984	2.9799	1.0040	7.0046	1.0025	12.0125	1.0006	102.0226
0.75	0.9943	1.9540	1.0047	2.9799	1.0076	7.0046	1.0058	12.0125	1.0009	102.0226
0.77	1.0016	1.9540	1.0115	2.9799	1.0115	7.0046	1.0083	12.0125	1.0012	102.0226
0.79	1.0112	1.9540	1.0195	2.9799	1.0159	7.0046	1.0111	12.0125	1.0015	102.0226
0.81	1.0222	1.9540	1.0287	2.9799	1.0210	7.0046	1.0142	12.0125	1.0020	102.0226
0.83	1.0251	1.9540	1.0395	2.9799	1.0268	7.0046	1.0179	12.0125	1.0025	102.0226
0.85	1.0497	1.9540	1.0520	2.9799	1.0336	7.0046	1.0221	12.0125	1.0026	102.0227
0.87	1.0679	1.9540	1.0674	2.9799	1.0416	7.0046	1.0270	12.0125	1.0026	102.0227
0.89	1.0908	1.9540	1.0866	2.9799	1.0515	7.0046	1.0330	12.0125	1.0044	102.0227
0.91	1.1212	1.9540	1.1114	2.9799	1.0639	7.0046	1.0404	12.0125	1.0053	102.0227
0.92	1.1555	1.9540	1.1458	2.9799	1.0804	7.0046	1.0501	12.0125	1.0064	102.0227
0.95	1.2513	1.9540	1.1979	2.9799	1.1040	7.0046	1.0637	12.0125	1.0079	102.0227
0.97	1.1843	1.9540	1.2958	2.9799	1.1435	7.0046	1.0855	12.0125	1.0102	102.0227
0.99	2.4631	1.9540	1.8666	2.9799	1.2349	7.0046	1.1318	12.0125	1.0149	102.0227

FIG. 18.-  $q_{ihw}/q_w$  VS ZD

YACIMIENTO SEMI-INF. ( $b=0.5hwD=100$ )

52

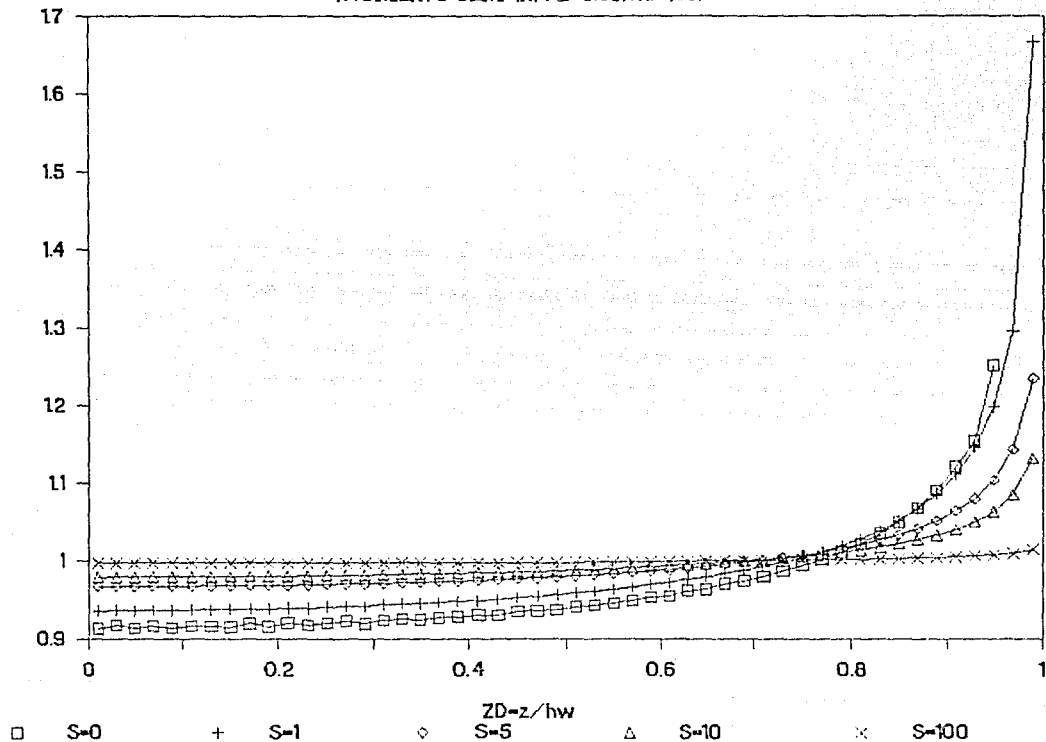


TABLA 9.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_0 + f_{ohw}/h$  PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.25, h=0=100$ )

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	GASTO VARIABLE	$S_0 + f_{ohw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + f_{ohw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + f_{ohw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + f_{ohw}/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + f_{ohw}/h$
0.01	0.8074	3.2559	0.9310	4.2827	0.9645	8.3083	0.9778	13.3165	0.9971	103.3273
0.03	0.9103	3.2559	0.9321	4.2827	0.9647	8.3082	0.9779	13.3165	0.9971	103.3273
0.05	0.9107	3.2559	0.9325	4.2827	0.9649	8.3083	0.9780	13.3165	0.9971	103.3273
0.07	0.9077	3.2559	0.9314	4.2827	0.9646	8.3082	0.9779	13.3165	0.9971	103.3273
0.09	0.9092	3.2559	0.9319	4.2827	0.9649	8.3083	0.9780	13.3165	0.9971	103.3273
0.11	0.9092	3.2559	0.9324	4.2827	0.9651	8.3082	0.9782	13.3165	0.9972	103.3273
0.13	0.9129	3.2559	0.9334	4.2827	0.9655	8.3083	0.9784	13.3165	0.9972	103.3273
0.15	0.9066	3.2559	0.9324	4.2827	0.9654	8.3083	0.9784	13.3165	0.9972	103.3273
0.17	0.9126	3.2559	0.9339	4.2827	0.9659	8.3083	0.9787	13.3165	0.9972	103.3273
0.19	0.9097	3.2559	0.9343	4.2827	0.9663	8.3083	0.9790	13.3165	0.9972	103.3272
0.21	0.9152	3.2559	0.9358	4.2827	0.9670	8.3083	0.9794	13.3165	0.9973	103.3272
0.23	0.9153	3.2559	0.9366	4.2827	0.9675	8.3083	0.9797	13.3165	0.9974	103.3272
0.25	0.9121	3.2559	0.9361	4.2827	0.9676	8.3082	0.9799	13.3165	0.9974	103.3272
0.27	0.9168	3.2559	0.9377	4.2827	0.9683	8.3082	0.9803	13.3165	0.9975	103.3272
0.29	0.9158	3.2559	0.9389	4.2827	0.9690	8.3083	0.9808	13.3165	0.9975	103.3272
0.31	0.9220	3.2559	0.9407	4.2827	0.9699	8.3083	0.9813	13.3165	0.9976	103.3272
0.33	0.9165	3.2559	0.9403	4.2827	0.9702	8.3083	0.9815	13.3165	0.9976	103.3272
0.35	0.9214	3.2559	0.9421	4.2826	0.9711	8.3083	0.9821	13.3165	0.9977	103.3272
0.37	0.9216	3.2559	0.9428	4.2826	0.9720	8.3083	0.9828	13.3165	0.9978	103.3272
0.39	0.9282	3.2559	0.9461	4.2826	0.9731	8.3083	0.9834	13.3165	0.9979	103.3272
0.41	0.9232	3.2559	0.9461	4.2826	0.9737	8.3083	0.9839	13.3165	0.9980	103.3272
0.43	0.9282	3.2559	0.9494	4.2826	0.9749	8.3083	0.9846	13.3165	0.9981	103.3272
0.45	0.9305	3.2559	0.9507	4.2826	0.9762	8.3083	0.9855	13.3165	0.9982	103.3272
0.47	0.9356	3.2559	0.9533	4.2826	0.9775	8.3082	0.9863	13.3165	0.9983	103.3272
0.49	0.9327	3.2559	0.9541	4.2826	0.9785	8.3083	0.9870	13.3165	0.9984	103.3272
0.51	0.9389	3.2559	0.9570	4.2826	0.9800	8.3083	0.9880	13.3165	0.9985	103.3272
0.53	0.9408	3.2559	0.9597	4.2826	0.9816	8.3083	0.9890	13.3165	0.9987	103.3272
0.55	0.9465	3.2559	0.9620	4.2826	0.9834	8.3082	0.9902	13.3165	0.9988	103.3272
0.57	0.9460	3.2559	0.9648	4.2826	0.9846	8.3082	0.9911	13.3165	0.9990	103.3272
0.59	0.9512	3.2559	0.9684	4.2826	0.9868	8.3082	0.9924	13.3165	0.9991	103.3272
0.61	0.9575	3.2559	0.9725	4.2826	0.9890	8.3082	0.9938	13.3165	0.9993	103.3272
0.63	0.9676	3.2559	0.9750	4.2826	0.9908	8.3082	0.9951	13.3165	0.9995	103.3272
0.65	0.9845	3.2559	0.9796	4.2826	0.9933	8.3082	0.9967	13.3165	0.9997	103.3272
0.67	0.9697	3.2559	0.9844	4.2826	0.9961	8.3082	0.9984	13.3165	0.9999	103.3272
0.69	0.9780	3.2559	0.9899	4.2826	0.9990	8.3082	1.0003	13.3165	1.0002	103.3272
0.71	0.9798	3.2559	0.9940	4.2826	1.0018	8.3082	1.0021	13.3165	1.0004	103.3272
0.73	0.9890	3.2559	1.0005	4.2826	1.0053	8.3082	1.0044	13.3165	1.0007	103.3272
0.75	0.9992	3.2559	1.0078	4.2826	1.0092	8.3082	1.0068	13.3165	1.0011	103.3272
0.77	1.0033	3.2559	1.0140	4.2826	1.0131	8.3082	1.0093	13.3165	1.0014	103.3272
0.79	1.0155	3.2559	1.0231	4.2826	1.0179	8.3082	1.0123	13.3165	1.0016	103.3272
0.81	1.0294	3.2559	1.0334	4.2826	1.0234	8.3082	1.0157	13.3165	1.0022	103.3272
0.83	1.0382	3.2559	1.0434	4.2826	1.0292	8.3082	1.0194	13.3165	1.0027	103.3272
0.85	1.0562	3.2559	1.0573	4.2826	1.0364	8.3082	1.0238	13.3165	1.0032	103.3272
0.87	1.0775	3.2559	1.0738	4.2826	1.0449	8.3082	1.0291	13.3165	1.0039	103.3272
0.89	1.0985	3.2558	1.0925	4.2825	1.0548	8.3082	1.0351	13.3165	1.0046	103.3272
0.91	1.1306	3.2558	1.1168	4.2826	1.0677	8.3082	1.0428	13.3165	1.0054	103.3272
0.93	1.1679	3.2558	1.1546	4.2825	1.0847	8.3082	1.0528	13.3165	1.0067	103.3272
0.95	1.2619	3.2558	1.2068	4.2826	1.1065	8.3082	1.0665	13.3164	1.0082	103.3272
0.97	1.1765	3.2558	1.3089	4.2826	1.1487	8.3082	1.0827	13.3164	1.0107	103.3272
0.99	2.4849	3.2556	1.6829	4.2826	1.2412	8.3082	1.1354	13.3164	1.0152	103.3272

FIG. 19.-  $q_{ihw}/q_w$  VS  $ZD$

YACIMIENTO SEMI-INF. ( $b=0.25, hwD=100$ )

1/5

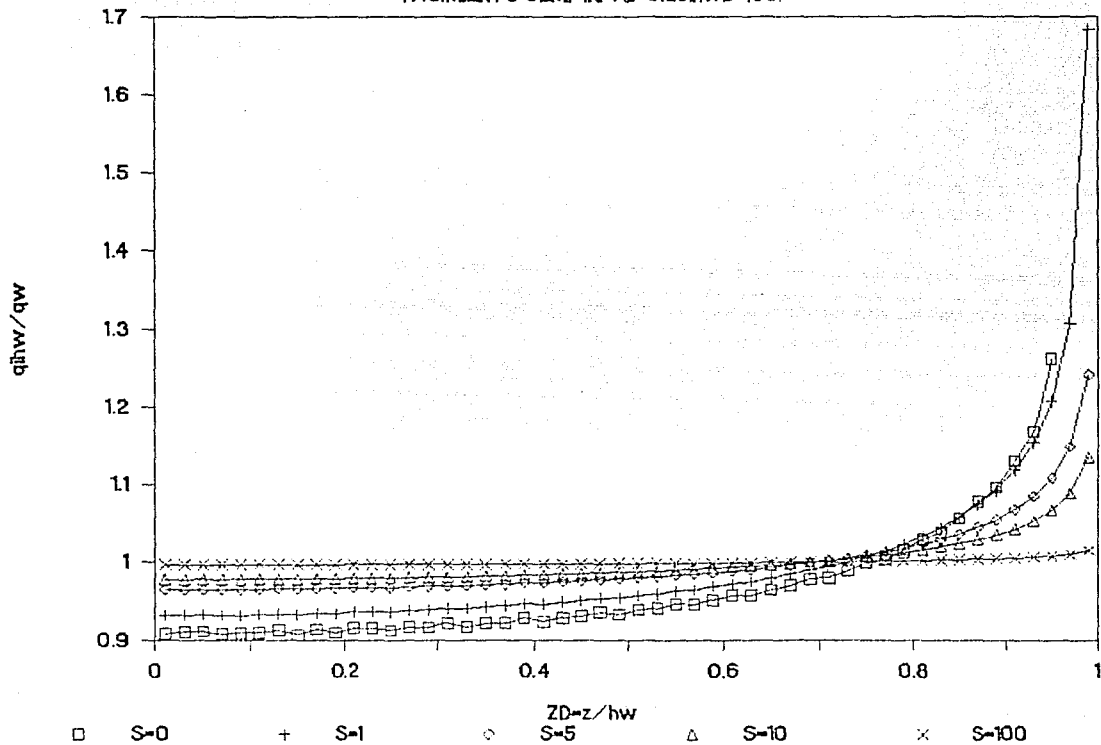


TABLE 10.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_0+sp_{fwh}/h$  PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.1, h_0=100$ )

ZD	S=0			S=1			S=5			S=10			S=100		
	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_{fwh}/h$	GASTO	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_{fwh}/h$	GASTO	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_{fwh}/h$	GASTO	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_{fwh}/h$	GASTO	GASTO VARIABLE	$S_0+sp_{fwh}/h$	GASTO
0.01	0.9072	4.1644	0.9710	5.1912	0.9644	9.2169	0.9777	14.2252	0.9971	104.2360					
0.05	0.9072	4.1644	0.9315	5.1912	0.9645	9.2169	0.9777	14.2252	0.9971	104.2360					
0.05	0.9074	4.1644	0.9314	5.1912	0.9645	9.2169	0.9778	14.2252	0.9971	104.2360					
0.07	0.9103	4.1644	0.9319	5.1912	0.9647	9.2169	0.9779	14.2252	0.9971	104.2360					
0.09	0.9088	4.1644	0.9319	5.1912	0.9648	9.2169	0.9780	14.2252	0.9971	104.2360					
0.11	0.9091	4.1644	0.9322	5.1912	0.9650	9.2169	0.9781	14.2252	0.9972	104.2360					
0.13	0.9099	4.1644	0.9326	5.1912	0.9653	9.2169	0.9783	14.2252	0.9972	104.2360					
0.15	0.9095	4.1644	0.9332	5.1912	0.9656	9.2169	0.9785	14.2252	0.9972	104.2360					
0.17	0.9137	4.1644	0.9342	5.1912	0.9660	9.2169	0.9788	14.2252	0.9973	104.2360					
0.19	0.9098	4.1643	0.9343	5.1912	0.9664	9.2169	0.9790	14.2252	0.9973	104.2360					
0.21	0.9153	4.1643	0.9356	5.1912	0.9669	9.2169	0.9793	14.2252	0.9973	104.2360					
0.23	0.9126	4.1643	0.9359	5.1912	0.9673	9.2169	0.9796	14.2252	0.9974	104.2360					
0.25	0.9151	4.1643	0.9371	5.1912	0.9679	9.2169	0.9800	14.2252	0.9974	104.2360					
0.27	0.9171	4.1643	0.9381	5.1912	0.9685	9.2169	0.9804	14.2252	0.9975	104.2359					
0.29	0.9164	4.1643	0.9390	5.1912	0.9691	9.2169	0.9808	14.2252	0.9975	104.2359					
0.31	0.9201	4.1643	0.9405	5.1912	0.9699	9.2169	0.9813	14.2252	0.9976	104.2359					
0.33	0.9196	4.1643	0.9417	5.1912	0.9706	9.2169	0.9818	14.2252	0.9977	104.2359					
0.35	0.9269	4.1643	0.9437	5.1912	0.9715	9.2169	0.9823	14.2252	0.9977	104.2359					
0.37	0.9153	4.1643	0.9415	5.1912	0.9713	9.2169	0.9824	14.2252	0.9976	104.2359					
0.39	0.9243	4.1643	0.9440	5.1912	0.9724	9.2169	0.9830	14.2252	0.9979	104.2359					
0.41	0.9242	4.1643	0.9456	5.1912	0.9734	9.2169	0.9837	14.2252	0.9979	104.2359					
0.43	0.9268	4.1643	0.9475	5.1912	0.9748	9.2169	0.9844	14.2252	0.9980	104.2359					
0.45	0.9294	4.1643	0.9496	5.1912	0.9757	9.2169	0.9852	14.2252	0.9982	104.2359					
0.47	0.9319	4.1643	0.9517	5.1912	0.9769	9.2169	0.9860	14.2252	0.9983	104.2359					
0.49	0.9342	4.1643	0.9540	5.1912	0.9783	9.2169	0.9869	14.2252	0.9984	104.2359					
0.51	0.9379	4.1643	0.9565	5.1912	0.9797	9.2169	0.9878	14.2252	0.9985	104.2359					
0.53	0.9400	4.1643	0.9589	5.1912	0.9812	9.2169	0.9888	14.2251	0.9987	104.2359					
0.55	0.9431	4.1643	0.9617	5.1912	0.9829	9.2169	0.9899	14.2251	0.9988	104.2359					
0.57	0.9477	4.1643	0.9649	5.1911	0.9847	9.2169	0.9911	14.2251	0.9990	104.2359					
0.59	0.9506	4.1643	0.9680	5.1911	0.9866	9.2169	0.9923	14.2251	0.9991	104.2359					
0.61	0.9548	4.1643	0.9715	5.1911	0.9887	9.2169	0.9936	14.2251	0.9993	104.2359					
0.63	0.9598	4.1643	0.9754	5.1911	0.9909	9.2169	0.9951	14.2251	0.9995	104.2359					
0.65	0.9641	4.1643	0.9795	5.1911	0.9933	9.2169	0.9967	14.2251	0.9997	104.2359					
0.67	0.9698	4.1643	0.9841	5.1911	0.9959	9.2169	0.9983	14.2251	0.9999	104.2359					
0.69	0.9754	4.1643	0.9890	5.1911	0.9988	9.2169	1.0002	14.2251	1.0002	104.2359					
0.71	0.9820	4.1643	0.9945	5.1911	1.0019	9.2169	1.0022	14.2251	1.0004	104.2359					
0.73	0.9890	4.1643	1.0006	5.1911	1.0054	9.2169	1.0044	14.2251	1.0007	104.2359					
0.75	0.9971	4.1643	1.0073	5.1911	1.0092	9.2169	1.0068	14.2251	1.0011	104.2359					
0.77	1.0058	4.1643	1.0148	5.1911	1.0134	9.2169	1.0095	14.2251	1.0014	104.2359					
0.79	1.0160	4.1643	1.0234	5.1911	1.0181	9.2169	1.0125	14.2251	1.0018	104.2359					
0.81	1.0277	4.1643	1.0332	5.1911	1.0235	9.2169	1.0158	14.2251	1.0022	104.2359					
0.83	1.0410	4.1643	1.0445	5.1911	1.0296	9.2169	1.0196	14.2251	1.0027	104.2359					
0.85	1.0570	4.1643	1.0579	5.1911	1.0367	9.2169	1.0240	14.2251	1.0033	104.2359					
0.87	1.0762	4.1643	1.0740	5.1911	1.0451	9.2169	1.0292	14.2251	1.0039	104.2359					
0.89	1.0998	4.1643	1.0940	5.1911	1.0554	9.2169	1.0354	14.2251	1.0047	104.2359					
0.91	1.1318	4.1643	1.1197	5.1911	1.0682	9.2169	1.0431	14.2251	1.0056	104.2359					
0.93	1.1671	4.1643	1.1551	5.1911	1.0851	9.2169	1.0531	14.2251	1.0068	104.2359					
0.95	1.2658	4.1643	1.2697	5.1911	1.1093	9.2169	1.0670	14.2251	1.0083	104.2359					
0.97	1.1781	4.1643	1.3094	5.1911	1.1494	9.2169	1.0891	14.2251	1.0107	104.2359					
0.99	2.4977	4.1643	1.6844	5.1911	1.2418	9.2169	1.1358	14.2251	1.0154	104.2359					

# FIG. 20.- $q_{ihw}/q_w$ VS $ZD$

YACIMIENTO SEMI-INF. ( $b=0.1, h_w D=100$ )

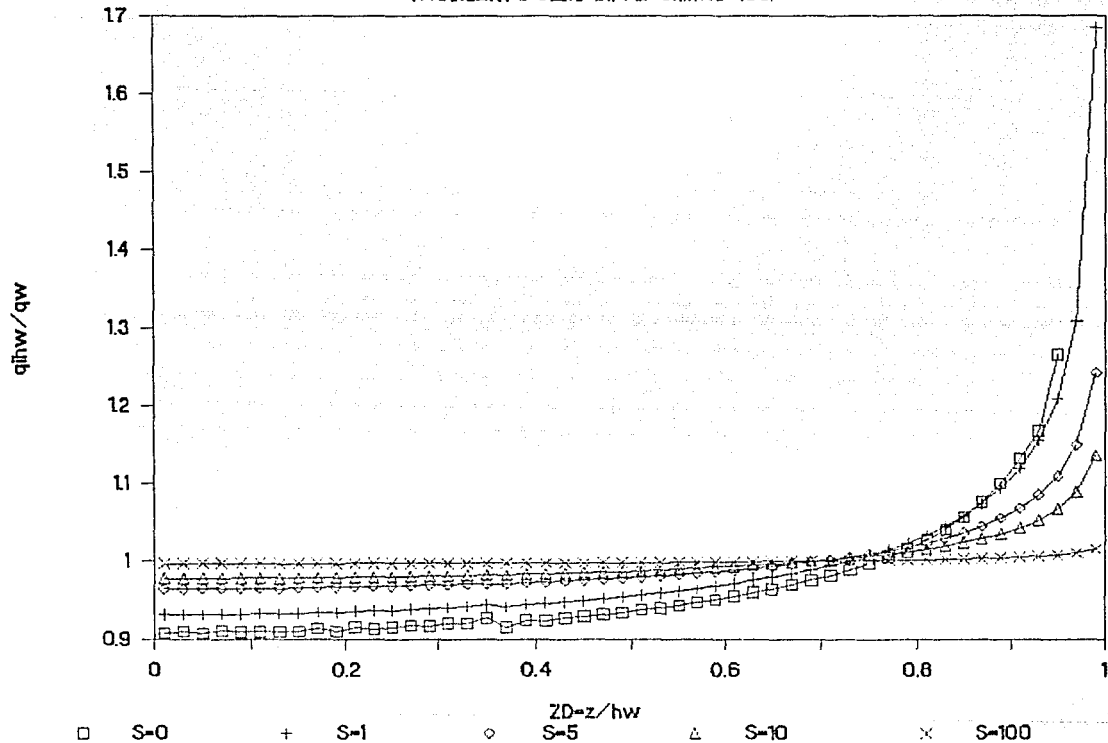
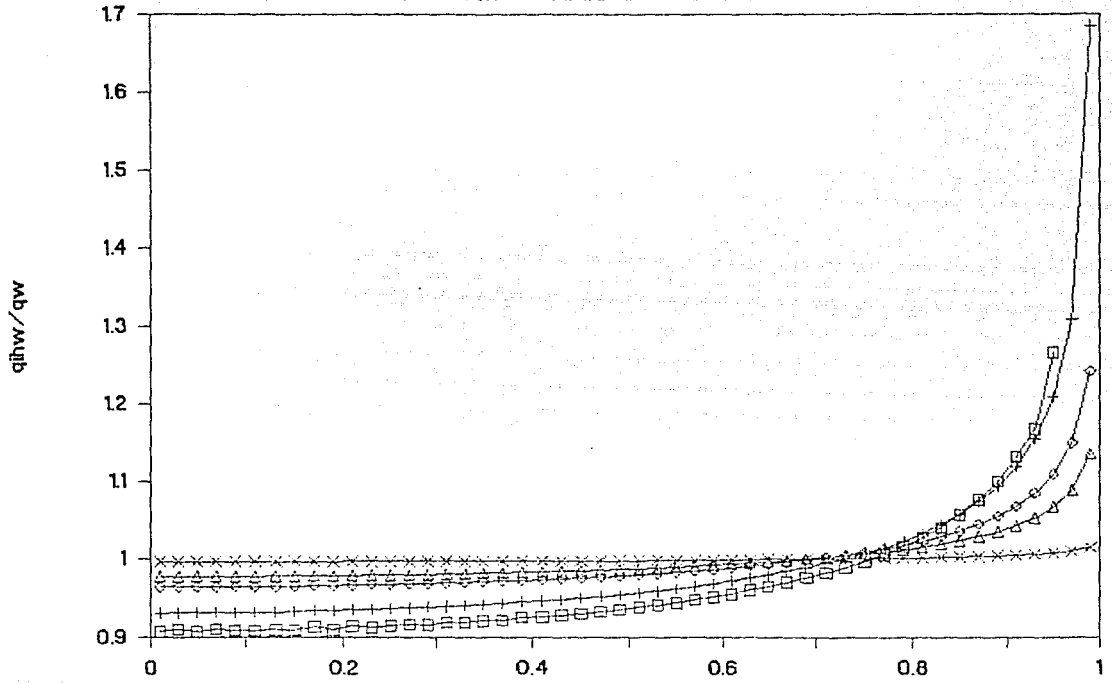


TABLE 11.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_0$ +fph/h PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.05, h_D=100$ )

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO	VARIABLE	GASTO
	Sp+fph/h		Sp+fph/h		Sp+fph/h		Sp+fph/h		Sp+fph/h	
0.01	0.9068	4.5083	0.9307	5.5352	0.9641	9.5609	0.9775	14.5692	0.9971	104.5800
0.05	0.9093	4.5082	0.9311	5.5352	0.9643	9.5609	0.9776	14.5692	0.9971	104.5800
0.05	0.9068	4.5083	0.9310	5.5352	0.9643	9.5609	0.9776	14.5692	0.9971	104.5800
0.07	0.9097	4.5085	0.9315	5.5352	0.9645	9.5609	0.9777	14.5692	0.9971	104.5800
0.07	0.9092	4.5083	0.9314	5.5352	0.9646	9.5609	0.9778	14.5692	0.9971	104.5800
0.11	0.9085	4.5083	0.9316	5.5352	0.9647	9.5609	0.9779	14.5692	0.9971	104.5800
0.15	0.9092	4.5083	0.9321	5.5352	0.9650	9.5609	0.9781	14.5692	0.9972	104.5800
0.15	0.9088	4.5083	0.9326	5.5351	0.9653	9.5609	0.9783	14.5692	0.9972	104.5800
0.17	0.9129	4.5083	0.9326	5.5351	0.9657	9.5609	0.9786	14.5692	0.9972	104.5800
0.19	0.9090	4.5082	0.9337	5.5351	0.9660	9.5609	0.9789	14.5692	0.9973	104.5800
0.21	0.9144	4.5083	0.9349	5.5351	0.9666	9.5609	0.9791	14.5692	0.9973	104.5800
0.23	0.9117	4.5082	0.9352	5.5351	0.9670	9.5609	0.9794	14.5692	0.9973	104.5800
0.25	0.9142	4.5083	0.9365	5.5351	0.9675	9.5609	0.9799	14.5692	0.9974	104.5800
0.27	0.9160	4.5083	0.9373	5.5351	0.9681	9.5609	0.9802	14.5692	0.9975	104.5800
0.29	0.9153	4.5083	0.9381	5.5351	0.9687	9.5609	0.9806	14.5692	0.9975	104.5800
0.31	0.9186	4.5083	0.9395	5.5351	0.9694	9.5609	0.9810	14.5692	0.9976	104.5800
0.33	0.9187	4.5082	0.9405	5.5351	0.9701	9.5609	0.9815	14.5692	0.9976	104.5800
0.35	0.9208	4.5083	0.9418	5.5351	0.9709	9.5609	0.9820	14.5692	0.9977	104.5800
0.37	0.9212	4.5083	0.9422	5.5351	0.9718	9.5609	0.9826	14.5692	0.9978	104.5800
0.39	0.9251	4.5083	0.9450	5.5351	0.9728	9.5609	0.9832	14.5692	0.9979	104.5800
0.41	0.9255	4.5083	0.9465	5.5351	0.9737	9.5609	0.9839	14.5692	0.9980	104.5800
0.43	0.9277	4.5083	0.9482	5.5351	0.9749	9.5609	0.9846	14.5692	0.9981	104.5799
0.45	0.9303	4.5083	0.9503	5.5351	0.9760	9.5609	0.9854	14.5692	0.9982	104.5799
0.47	0.9327	4.5083	0.9523	5.5351	0.9772	9.5609	0.9862	14.5692	0.9982	104.5799
0.49	0.9350	4.5083	0.9545	5.5351	0.9785	9.5609	0.9870	14.5692	0.9984	104.5799
0.51	0.9355	4.5082	0.9570	5.5351	0.9800	9.5609	0.9880	14.5691	0.9985	104.5799
0.53	0.9407	4.5083	0.9594	5.5351	0.9815	9.5609	0.9890	14.5691	0.9987	104.5799
0.55	0.9437	4.5083	0.9622	5.5351	0.9831	9.5609	0.9900	14.5691	0.9988	104.5799
0.57	0.9482	4.5083	0.9653	5.5351	0.9849	9.5609	0.9912	14.5691	0.9990	104.5799
0.59	0.9512	4.5083	0.9684	5.5351	0.9869	9.5609	0.9924	14.5691	0.9991	104.5799
0.61	0.9553	4.5083	0.9719	5.5351	0.9889	9.5609	0.9928	14.5691	0.9993	104.5799
0.63	0.9605	4.5083	0.9758	5.5351	0.9911	9.5609	0.9952	14.5691	0.9995	104.5799
0.65	0.9646	4.5083	0.9799	5.5351	0.9925	9.5609	0.9968	14.5691	0.9997	104.5799
0.67	0.9702	4.5083	0.9844	5.5351	0.9961	9.5608	0.9985	14.5691	1.0000	104.5799
0.69	0.9758	4.5083	0.9894	5.5351	0.9950	9.5608	1.0003	14.5691	1.0002	104.5799
0.71	0.9823	4.5082	0.9949	5.5351	1.0021	9.5608	1.0023	14.5691	1.0005	104.5799
0.73	0.9893	4.5082	1.0008	5.5351	1.0055	9.5608	1.0045	14.5691	1.0007	104.5799
0.75	0.9974	4.5082	1.0076	5.5351	1.0092	9.5608	1.0069	14.5691	1.0011	104.5799
0.77	1.0061	4.5082	1.0151	5.5351	1.0125	9.5608	1.0096	14.5691	1.0014	104.5799
0.79	1.0162	4.5082	1.0236	5.5351	1.0162	9.5608	1.0125	14.5691	1.0016	104.5799
0.81	1.0280	4.5082	1.0324	5.5351	1.0226	9.5608	1.0159	14.5691	1.0022	104.5799
0.83	1.0413	4.5082	1.0447	5.5351	1.0297	9.5608	1.0197	14.5691	1.0027	104.5799
0.85	1.0572	4.5082	1.0601	5.5351	1.0388	9.5608	1.0241	14.5691	1.0033	104.5799
0.87	1.0764	4.5082	1.0741	5.5351	1.0492	9.5608	1.0293	14.5691	1.0039	104.5799
0.89	1.1000	4.5082	1.0941	5.5351	1.0654	9.5608	1.0355	14.5691	1.0047	104.5799
0.91	1.1320	4.5082	1.1199	5.5351	1.0883	9.5608	1.0432	14.5691	1.0056	104.5799
0.93	1.1673	4.5082	1.1552	5.5351	1.0652	9.5608	1.0531	14.5691	1.0068	104.5799
0.95	1.2659	4.5082	1.2087	5.5351	1.1094	9.5608	1.0670	14.5691	1.0084	104.5799
0.97	1.1782	4.5082	1.2065	5.5351	1.1495	9.5608	1.0891	14.5691	1.0108	104.5799
0.99	2.4978	4.5082	1.2645	5.5351	1.2416	9.5608	1.1356	14.5691	1.0154	104.5799

FIG. 21.-  $q_{ihw}/q_w$  VS  $ZD$

YACMENTO SEMI-IRF. ( $b=0.05, h_w D=100$ )



□ S=0      + S=1      ◇ S=5      △ S=10      × S=100

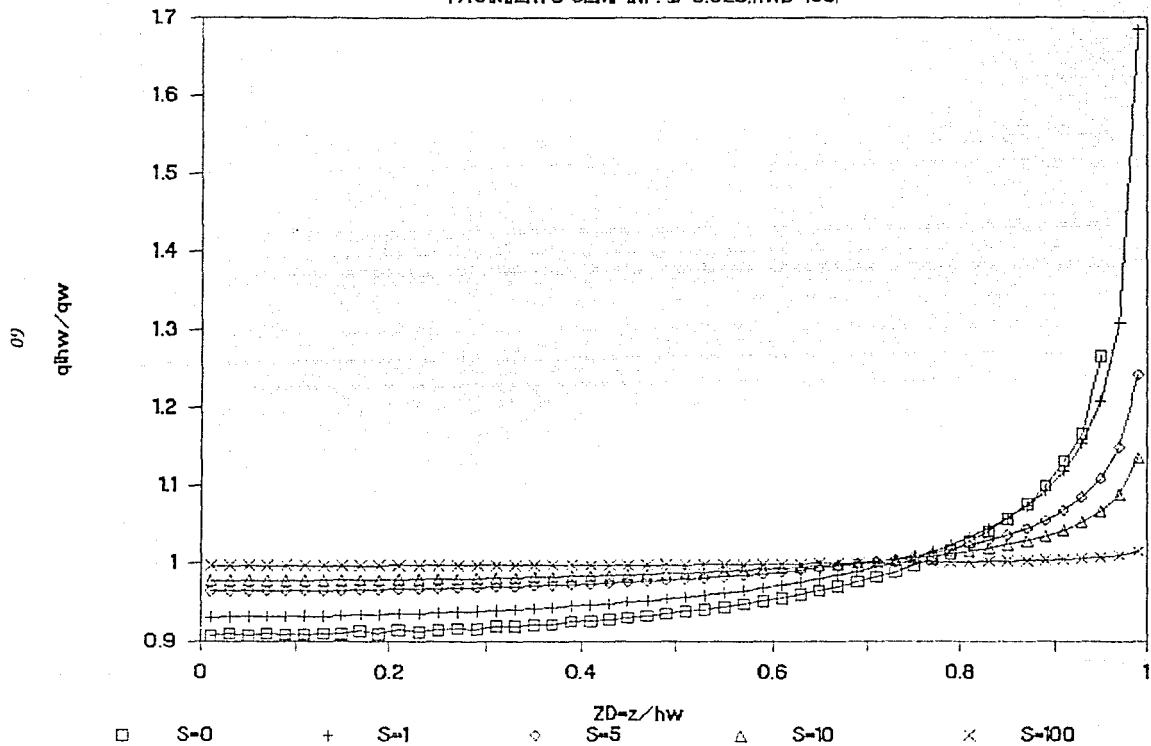


TABLA 12.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_0 + \rho h_w/h$  PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO ( $b=0.025, h_w D=100$ )

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	GASTO VARIABLE	$S_0 + \rho h_w/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + \rho h_w/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + \rho h_w/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + \rho h_w/h$	GASTO VARIABLE	$S_0 + \rho h_w/h$
0.01	0.9070	4.7078	0.9208	5.7346	0.9642	9.7604	0.9776	14.7686	0.9971	104.7794
0.03	0.9094	4.7078	0.9312	5.7346	0.9643	9.7604	0.9776	14.7686	0.9971	104.7794
0.05	0.9069	4.7078	0.9311	5.7346	0.9644	9.7604	0.9777	14.7686	0.9971	104.7794
0.07	0.9098	4.7078	0.9316	5.7346	0.9645	9.7604	0.9778	14.7686	0.9971	104.7794
0.09	0.9082	4.7078	0.9315	5.7346	0.9646	9.7604	0.9778	14.7686	0.9971	104.7794
0.11	0.9086	4.7078	0.9317	5.7346	0.9648	9.7604	0.9780	14.7686	0.9971	104.7794
0.13	0.9093	4.7078	0.9321	5.7346	0.9650	9.7604	0.9781	14.7686	0.9972	104.7794
0.15	0.9088	4.7078	0.9327	5.7346	0.9654	9.7604	0.9783	14.7686	0.9972	104.7794
0.17	0.9130	4.7078	0.9336	5.7346	0.9658	9.7603	0.9785	14.7686	0.9972	104.7794
0.19	0.9090	4.7078	0.9338	5.7346	0.9661	9.7603	0.9788	14.7686	0.9973	104.7794
0.21	0.9145	4.7078	0.9350	5.7346	0.9666	9.7603	0.9791	14.7686	0.9973	104.7794
0.23	0.9117	4.7078	0.9353	5.7346	0.9670	9.7603	0.9794	14.7686	0.9973	104.7794
0.25	0.9142	4.7078	0.9364	5.7346	0.9675	9.7603	0.9798	14.7686	0.9974	104.7794
0.27	0.9161	4.7078	0.9374	5.7346	0.9681	9.7603	0.9802	14.7686	0.9975	104.7794
0.29	0.9153	4.7078	0.9382	5.7346	0.9687	9.7603	0.9806	14.7686	0.9975	104.7794
0.31	0.9187	4.7078	0.9395	5.7346	0.9694	9.7603	0.9810	14.7686	0.9975	104.7794
0.33	0.9167	4.7078	0.9406	5.7346	0.9701	9.7603	0.9815	14.7686	0.9976	104.7794
0.35	0.9208	4.7078	0.9419	5.7346	0.9709	9.7603	0.9820	14.7686	0.9977	104.7794
0.37	0.9212	4.7078	0.9432	5.7346	0.9718	9.7603	0.9826	14.7686	0.9978	104.7794
0.39	0.9251	4.7078	0.9451	5.7346	0.9728	9.7603	0.9832	14.7686	0.9979	104.7794
0.41	0.9255	4.7078	0.9465	5.7346	0.9737	9.7603	0.9839	14.7686	0.9980	104.7794
0.43	0.9278	4.7077	0.9483	5.7346	0.9748	9.7603	0.9846	14.7686	0.9981	104.7794
0.45	0.9303	4.7077	0.9503	5.7346	0.9760	9.7603	0.9854	14.7686	0.9982	104.7794
0.47	0.9327	4.7077	0.9523	5.7346	0.9772	9.7603	0.9862	14.7686	0.9983	104.7794
0.49	0.9350	4.7077	0.9545	5.7346	0.9786	9.7603	0.9870	14.7686	0.9984	104.7794
0.51	0.9386	4.7077	0.9570	5.7346	0.9800	9.7603	0.9880	14.7686	0.9985	104.7794
0.53	0.9407	4.7077	0.9594	5.7346	0.9815	9.7603	0.9890	14.7686	0.9987	104.7794
0.55	0.9437	4.7077	0.9622	5.7346	0.9831	9.7603	0.9900	14.7686	0.9988	104.7794
0.57	0.9482	4.7077	0.9653	5.7346	0.9849	9.7603	0.9912	14.7686	0.9990	104.7794
0.59	0.9512	4.7077	0.9684	5.7346	0.9868	9.7603	0.9924	14.7686	0.9991	104.7794
0.61	0.9552	4.7077	0.9719	5.7346	0.9889	9.7603	0.9938	14.7686	0.9992	104.7794
0.63	0.9602	4.7077	0.9758	5.7346	0.9911	9.7603	0.9952	14.7686	0.9995	104.7794
0.65	0.9645	4.7077	0.9797	5.7346	0.9935	9.7603	0.9968	14.7686	0.9997	104.7794
0.67	0.9702	4.7077	0.9844	5.7346	0.9961	9.7603	0.9984	14.7686	0.9999	104.7794
0.69	0.9757	4.7077	0.9893	5.7346	0.9989	9.7603	1.0001	14.7686	1.0002	104.7794
0.71	0.9823	4.7077	0.9948	5.7346	1.0021	9.7603	1.0023	14.7686	1.0005	104.7794
0.73	0.9893	4.7077	1.0008	5.7346	1.0055	9.7603	1.0045	14.7686	1.0007	104.7794
0.75	0.9974	4.7077	1.0075	5.7346	1.0093	9.7603	1.0069	14.7686	1.0011	104.7794
0.77	1.0061	4.7077	1.0150	5.7346	1.0135	9.7603	1.0095	14.7686	1.0014	104.7794
0.79	1.0162	4.7077	1.0236	5.7346	1.0182	9.7603	1.0125	14.7686	1.0019	104.7794
0.81	1.0279	4.7077	1.0333	5.7346	1.0235	9.7603	1.0159	14.7686	1.0022	104.7794
0.83	1.0412	4.7077	1.0446	5.7346	1.0297	9.7603	1.0197	14.7686	1.0027	104.7794
0.85	1.0571	4.7077	1.0580	5.7346	1.0369	9.7603	1.0241	14.7686	1.0033	104.7794
0.87	1.0763	4.7077	1.0741	5.7346	1.0452	9.7603	1.0293	14.7686	1.0039	104.7794
0.89	1.0999	4.7077	1.0940	5.7346	1.0554	9.7603	1.0355	14.7686	1.0047	104.7794
0.91	1.1219	4.7077	1.1190	5.7346	1.0682	9.7603	1.0431	14.7686	1.0056	104.7794
0.93	1.1672	4.7077	1.1551	5.7346	1.0851	9.7602	1.0531	14.7686	1.0068	104.7794
0.95	1.2658	4.7077	1.2086	5.7346	1.1093	9.7603	1.0670	14.7686	1.0083	104.7794
0.97	1.1781	4.7077	1.3084	5.7346	1.1494	9.7603	1.0891	14.7686	1.0107	104.7794
0.99	2.4975	4.7077	1.8644	5.7346	1.2418	9.7603	1.1257	14.7686	1.0154	104.7794

# FIG. 22.- $q_{ihw}/q_w$ VS $ZD$

YACIMIENTO SEMI-INF. ( $b=0.025, hwD=100$ )



Para validar los resultados de la ecuación (54) se realizó una comparación de los resultados obtenidos en este estudio con los obtenidos por otros autores (tabla 13) para  $S=0$ . La figura 23 muestra una gráfica de  $S_p$  contra  $b$  para varios valores de  $h_{WD}$  (tabla 14).

TABLA 13. - COMPARACION DE VALORES DE DAÑO POR PENETRACION PARCIAL DE ESTE ESTUDIO CON KUCHUK/KIRWAN, STRELTOVA Y BRONS/MARTINE,  $S=0$

$h_{WD} = 50$

b	ESTE ESTUDIO	KUCHUK/KIRWAN	STRELTOVA	BRONS/MARTINE
0.1	35.022	34.911	36.067	34.898
0.2	14.760	14.646	15.222	15.686
0.4	5.007	4.891	5.169	4.692
0.6	1.985	1.871	2.033	2.949
0.8	0.635	0.537	0.614	1.034
1.0	0	-	-	-

$h_{WD} = 100$

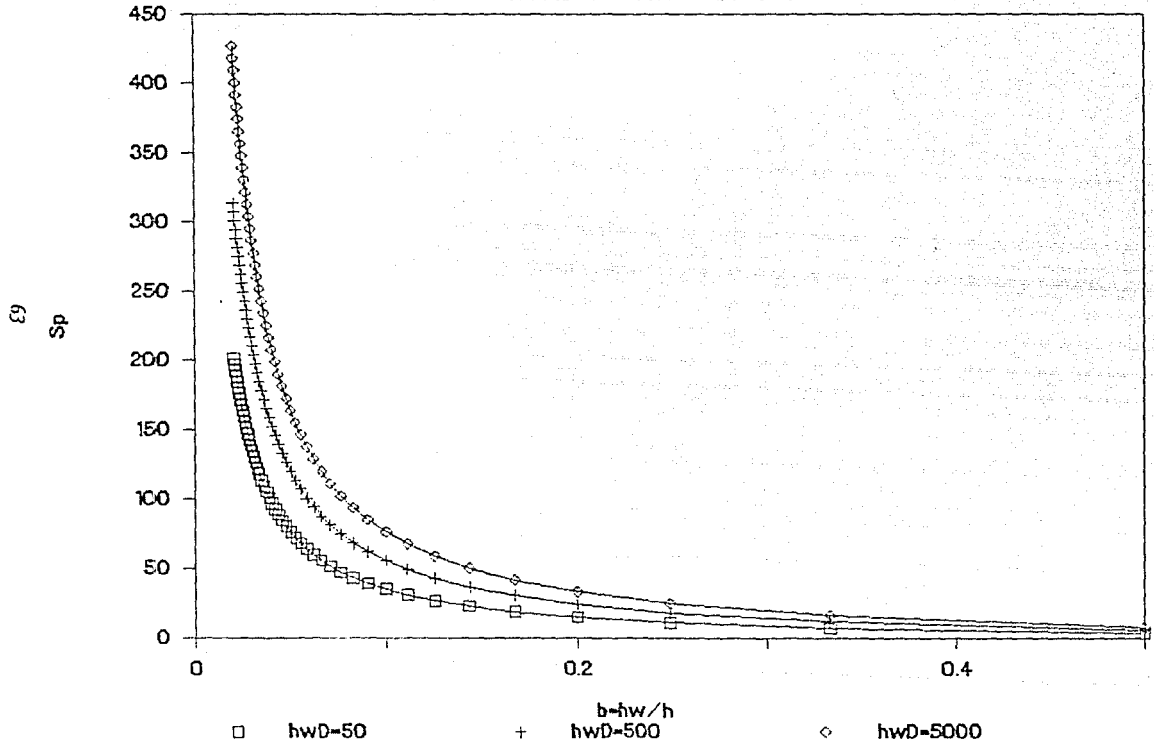
0.1	41.254	41.440	42.256	41.137
0.2	17.529	17.563	17.970	18.453
0.4	6.045	6.002	6.196	5.732
0.6	2.446	2.377	2.487	3.411
0.8	0.808	0.737	0.782	1.207
1	0	-	-	-

TABLA 14.- PSEUDODANO POR PENETRACION PARCIAL Sp PARA POZOS  
TERMINADOS EN LA CIMA O EN EL FONDO DE LA FORMACION

h/d	50	100	250	500	1000	5000
1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.9999	3.16	3.85	4.77	5.46	6.16	7.77
0.9998	6.91	8.29	10.12	11.51	12.90	16.11
0.9997	10.80	12.87	15.62	17.70	19.78	24.61
0.9996	14.75	17.53	21.19	23.97	26.74	33.18
0.9995	18.87	22.23	26.81	30.27	33.74	41.79
0.9994	23.80	28.96	32.45	36.61	40.77	50.43
0.9993	28.86	31.71	38.12	42.97	47.82	59.09
0.9992	30.93	36.47	43.80	49.35	54.89	67.77
0.9991	35.02	41.25	49.50	55.74	61.97	76.46
0.9990	39.12	46.04	55.20	62.14	69.07	85.16
0.9833	43.22	50.84	60.92	68.54	76.17	93.87
0.9749	47.34	55.65	66.64	74.96	83.27	102.59
0.9714	51.45	60.46	72.37	81.38	90.39	111.31
0.9667	55.58	65.27	78.10	87.80	97.51	120.04
0.9625	59.71	70.09	83.83	94.23	104.63	128.77
0.9583	63.84	74.92	89.58	100.67	111.76	137.51
0.9556	67.97	79.75	95.32	107.10	118.89	146.25
0.9526	72.11	84.58	101.07	113.54	126.02	154.99
0.9500	76.25	89.41	106.82	119.99	133.16	163.73
0.9475	80.40	94.25	112.57	126.43	140.29	172.48
0.9455	84.54	99.09	118.32	132.88	147.44	181.23
0.9435	88.69	103.93	124.08	139.33	154.58	189.99
0.9417	92.84	108.77	129.84	145.78	161.72	198.74
0.9400	96.99	113.61	135.60	152.23	168.87	207.50
0.9385	101.15	118.46	141.36	158.69	176.02	216.25
0.9370	105.30	123.31	147.13	165.15	183.17	225.01
0.9357	109.46	128.15	152.89	171.60	190.32	233.77
0.9345	113.61	133.01	158.66	178.06	197.47	242.54
0.9333	117.77	137.86	164.42	184.52	204.63	251.30
0.9323	121.93	142.71	170.19	190.99	211.78	260.06
0.9313	126.09	147.56	175.96	197.45	218.94	268.83
0.9303	130.26	152.42	181.73	203.91	226.09	277.59
0.9294	134.42	157.27	187.50	210.38	233.25	286.36
0.9286	138.58	162.13	193.28	216.84	240.41	295.13
0.9278	142.75	166.98	199.05	223.31	247.57	303.90
0.9270	146.91	171.84	204.82	229.78	254.73	312.67
0.9263	151.08	176.70	210.60	236.24	261.89	321.44
0.9256	155.24	181.56	216.37	242.71	269.05	330.21
0.9250	159.41	186.42	222.15	249.18	276.21	338.98
0.9244	163.58	191.28	227.93	255.65	283.38	347.75
0.9238	167.75	196.14	233.70	262.12	290.54	356.53
0.9233	171.92	201.00	239.48	268.59	297.70	365.30
0.9227	176.09	205.87	245.26	275.06	304.87	374.07
0.9222	180.26	210.73	251.04	281.53	312.03	382.85
0.9217	184.43	215.59	256.82	288.01	319.20	391.62
0.9213	188.60	220.46	262.60	294.48	326.36	400.40
0.9209	192.77	225.32	268.38	300.95	333.53	409.17
0.9204	196.94	230.18	274.16	307.43	340.70	417.95
0.9200	201.12	235.05	279.94	313.90	347.87	426.73

# FIG. 23.- $S_p$ VS $b$

POZOS TERMINADOS EN LA CIMA (FONDO)



## V.- SOLUCION PARA UN YACIMIENTO FINITO

### A.- FACTORES DE DAÑO YACIMIENTO FINITO

Para este caso, la solución de línea fuente de acuerdo a la ecuación (35) puede ser expresada como:

$$P_D(z_D, h_D) = \frac{1}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \ln \frac{\sqrt{1/(z_D+2nh_D+h_D)^2+1} + 1}{\sqrt{1/(z_D+2nh_D+h_D)^2+1} - 1} - \ln \frac{\sqrt{1/(z_D+2nh_D-h_D)^2+1} + 1}{\sqrt{1/(z_D+2nh_D-h_D)^2+1} - 1} \right] \quad (55)$$

Aplicando la ecuación (49), la ecuación (55) puede escribirse como:

$$2P_D(z_D, h_D) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \ln \frac{z_D+2nh_D+h_D + \sqrt{(z_D+2nh_D+h_D)^2+1}}{z_D+2nh_D-h_D + \sqrt{(z_D+2nh_D-h_D)^2+1}} \right] \quad (56)$$

y la ecuación (35) de la siguiente manera:

$$2P_D(1, z_D, S, \omega) \frac{h_w D}{h_D} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q}$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1n \frac{z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i}{N})^2 + 1}}{z_D + 2nh_D - h_{wD} \frac{i}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D - h_{wD} \frac{i}{N})^2 + 1}} \right. \\ \left. + 1n \frac{z_D + 2nh_D - h_{wD} \frac{i-1}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D - h_{wD} \frac{i-1}{N})^2 + 1}}{z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i-1}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i-1}{N})^2 + 1}} \right] + 2S \frac{q(z_D)}{q} \quad (57)$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones (56) y (57) en (46):

$$2S_{P+rp}(h_{wD}, b, S) \frac{h_{wD}}{h_D} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1n \frac{z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i}{N})^2 + 1}}{z_D + 2nh_D - h_{wD} \frac{i}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D - h_{wD} \frac{i}{N})^2 + 1}} \right. \\ \left. + 1n \frac{z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i-1}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i-1}{N})^2 + 1}}{z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i-1}{N} + \sqrt{(z_D + 2nh_D + h_{wD} \frac{i-1}{N})^2 + 1}} \right] \\ + 2S \frac{q(z_D)}{q} - \frac{h_{wD}}{h_D} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1n \frac{z_D + 2nh_D + h_{wD} + \sqrt{(z_D + 2nh_D + h_{wD})^2 + 1}}{z_D + 2nh_D + h_{wD} + \sqrt{(z_D + 2nh_D - h_{wD})^2 + 1}} \right] \quad (58)$$

Por lo tanto, aplicando la condición de la ecuación (48) obtenemos:

$$\sum_{i=1}^N \frac{q_j}{q} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \ln \frac{A + \sqrt{A^2 + 1}}{B + \sqrt{B^2 + 1}} + \ln \frac{C + \sqrt{C^2 + 1}}{D + \sqrt{D^2 + 1}} \right] + 2S \left( \frac{q(j)}{q} - \frac{q(j+1)}{q} \right) = \frac{h_{wD}}{h_D} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \ln \frac{E + \sqrt{E^2 + 1}}{F + \sqrt{F^2 + 1}} \quad (59)$$

$$\frac{\Lambda \Lambda + \sqrt{\Lambda \Lambda^2 + 1}}{B B + \sqrt{B B^2 + 1}} \quad \frac{C C + \sqrt{C C^2 + 1}}{D D + \sqrt{D D^2 + 1}}$$

$$\frac{E E + \sqrt{E E^2 + 1}}{F F + \sqrt{F F^2 + 1}}$$

para  $j=1, N-1$ .

donde

$$A = \frac{h_{wD}}{N} (j-1/2 + 2nRN + i)$$

$$\Lambda \Lambda = \frac{h_{wD}}{N} (j+1/2 + 2nRN + i)$$

$$B = \frac{h_{wD}}{N} (j-1/2 + 2nRN - i)$$

$$B B = \frac{h_{wD}}{N} (j+1/2 + 2nRN - i)$$

$$C = \frac{h_{wD}}{N} (j-1/2 + 2nRN - i + 1)$$

$$C C = \frac{h_{wD}}{N} (j+1/2 + 2nRN - i + 1)$$

$$D = \frac{h_{wD}}{N} (j-1/2 + 2nRN + i - 1)$$

$$D D = \frac{h_{wD}}{N} (j+1/2 + 2nRN + i - 1)$$

$$E = \frac{h_{wD}}{N} (j-1/2 + 2nRN + RN)$$

$$E E = \frac{h_{wD}}{N} (j+1/2 + 2nRN + RN)$$



$$F = \frac{h_{wD}}{N} (j - 1/2 + 2nRN - RN) \quad FF = \frac{h_{wD}}{N} (j + 1/2 + 2nRN - RN)$$

Nuevamente se tiene un sistema de N ecuaciones con N incógnitas. En este caso, la solución de las ecuaciones (59) y (38) nos determina el diagrama de flujo y la solución de la ecuación (58) nos da el daño adimensional  $S_{p+fp}$ . En el apéndice B se presenta el programa de cómputo para determinar el perfil de flujo y el daño adimensional  $S_{p+fp}$  para un pozo parcialmente penetrante con una zona dañada a su alrededor de permeabilidad  $k_s$  menor que la permeabilidad de la formación  $k$ . El número de términos que se utilizó en la serie infinita fue de 11 (-5, -4, ..., 5), con los cuales se obtiene una buena aproximación<sup>32</sup>. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos para un yacimiento semi-infinito (tablas 15 y 16, figura 24), por lo que podemos escribir la ecuación (58) de la siguiente forma:

$$S_{p+fp}(h_{wD}, b, S) = \frac{1}{2} \frac{1}{b} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \ln \frac{h_{wD}(1.75+2/bn) + \sqrt{(1.75+2/bn)^2 h_{wD}^2 + 1}}{h_{wD}(-0.25+2/bn) + \sqrt{(-0.25+2/bn)^2 h_{wD}^2 + 1}} \right]$$

$$+ \frac{S}{b} - \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \ln \frac{h_{wD}(0.75+2/bn+1/b) + \sqrt{(0.75+2/bn+1/b)^2 h_{wD}^2 + 1}}{h_{wD}(0.75+2/bn-1/b) + \sqrt{(0.75+2/bn-1/b)^2 h_{wD}^2 + 1}} \right]$$

(60)

La ecuación (60) únicamente es válida cuando el intervalo abierto al flujo esté localizado en la cima (fondo) de la formación productora.

TABLA 15.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y  $S_p+q_{ph}/h$  PARA UN POZO  
PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO FINITO ( $b=0.1, mD=100$ )

ZD	S=0		S=1		S=5		S=10		S=100	
	GASTO	VARIABLE $S_p+q_{ph}/h$	GASTO	VARIABLE $S_p+q_{ph}/h$	GASTO	VARIABLE $S_p+q_{ph}/h$	GASTO	VARIABLE $S_p+q_{ph}/h$	GASTO	VARIABLE $S_p+q_{ph}/h$
0.05	0.9108	4.1351	0.9320	5.1545	0.9646	9.1770	0.9773	14.1847	0.9971	104.1946
0.10	0.9115	4.1351	0.9326	5.1545	0.9649	9.1770	0.9780	14.1847	0.9971	104.1946
0.14	0.9128	4.1351	0.9326	5.1545	0.9655	9.1770	0.9784	14.1847	0.9972	104.1946
0.18	0.9139	4.1351	0.9346	5.1545	0.9662	9.1770	0.9789	14.1847	0.9972	104.1946
0.22	0.9153	4.1351	0.9360	5.1545	0.9670	9.1770	0.9794	14.1847	0.9973	104.1946
0.25	0.9183	4.1351	0.9381	5.1544	0.9682	9.1770	0.9801	14.1847	0.9974	104.1946
0.30	0.9199	4.1351	0.9399	5.1544	0.9694	9.1770	0.9810	14.1846	0.9976	104.1946
0.34	0.9222	4.1351	0.9425	5.1544	0.9709	9.1770	0.9820	14.1846	0.9977	104.1946
0.38	0.9264	4.1351	0.9454	5.1544	0.9726	9.1770	0.9831	14.1846	0.9979	104.1946
0.42	0.9305	4.1350	0.9488	5.1544	0.9747	9.1770	0.9845	14.1846	0.9980	104.1946
0.46	0.9349	4.1350	0.9526	5.1544	0.9770	9.1770	0.9860	14.1846	0.9982	104.1946
0.50	0.9401	4.1350	0.9571	5.1544	0.9797	9.1770	0.9877	14.1846	0.9985	104.1946
0.54	0.9463	4.1350	0.9623	5.1544	0.9827	9.1770	0.9897	14.1846	0.9988	104.1946
0.58	0.9532	4.1350	0.9683	5.1544	0.9863	9.1770	0.9921	14.1846	0.9991	104.1947
0.62	0.9619	4.1350	0.9754	5.1544	0.9904	9.1769	0.9947	14.1846	0.9994	104.1947
0.66	0.9715	4.1350	0.9837	5.1544	0.9953	9.1769	0.9979	14.1846	0.9999	104.1947
0.70	0.9835	4.1350	0.9939	5.1544	1.0010	9.1769	1.0015	14.1846	1.0004	104.1947
0.74	0.9980	4.1350	1.0059	5.1544	1.0079	9.1769	1.0059	14.1846	1.0009	104.1947
0.78	1.0162	4.1350	1.0212	5.1544	1.0164	9.1769	1.0113	14.1846	1.0016	104.1947
0.82	1.0401	4.1350	1.0410	5.1544	1.0271	9.1769	1.0181	14.1846	1.0025	104.1947
0.86	1.0728	4.1350	1.0681	5.1544	1.0415	9.1769	1.0269	14.1846	1.0036	104.1947
0.90	1.1254	4.1350	1.1088	5.1543	1.0622	9.1769	1.0395	14.1845	1.0051	104.1947
0.94	1.1907	4.1350	1.1801	5.1543	1.0969	9.1769	1.0598	14.1845	1.0075	104.1947
0.98	1.7819	4.1350	1.4662	5.1543	1.1872	9.1769	1.1081	14.1845	1.0126	104.1947

# FIG. 24.- $q_{ihw}/q_w$ VS ZD

YACIMIENTO FINITO ( $b=0.1 \cdot hw$ -100)

69

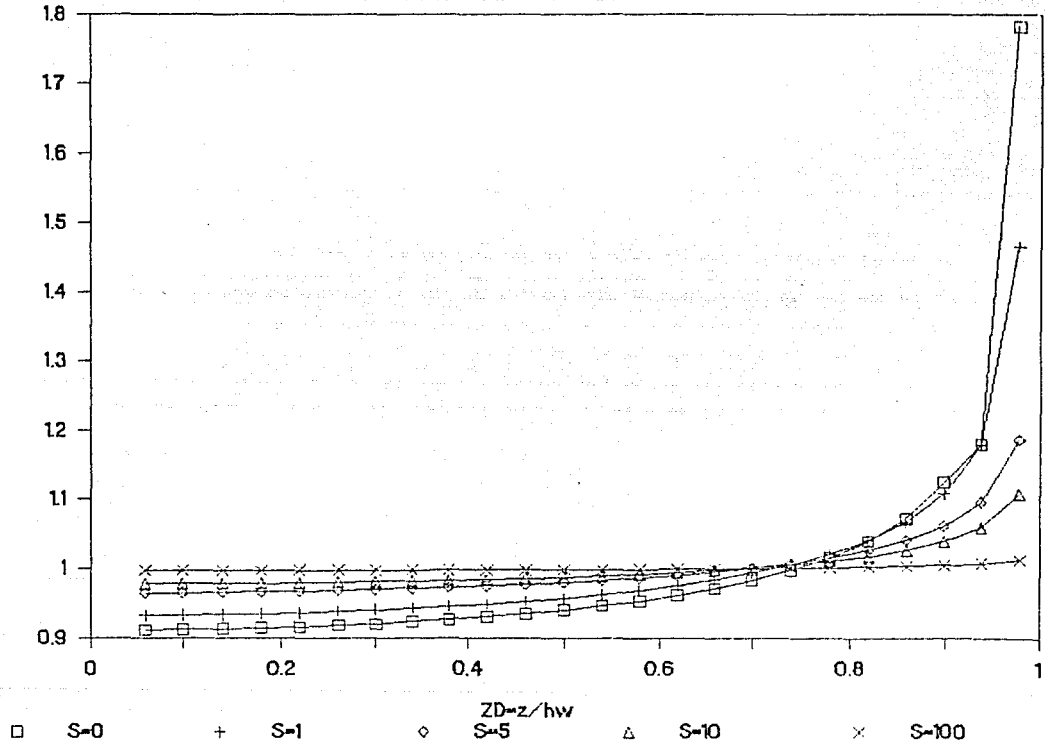


Tabla 16.- DISTRIBUCION DE FLUJO ESTABILIZADO Y Sp+fpw/h PARA UN PGZO PARCIALMENTE PENETRANTE EN UN YACIMIENTO FINITO (S=0, h=d=160)

ZD	b=0.150		b=0.050		b=0.033		b=0.025		b=0.020		b=0.010	
	GASTO VARIABLE	Sp+fpw/h	GASTO VARIABLE	Sp+fpw/h	GASTO VARIABLE	Sp+fpw/h	GASTO VARIABLE	Sp+fpw/h	GASTO VARIABLE	Sp+fpw/h	GASTO VARIABLE	Sp+fpw/h
0.05	0.9100	4.1251	0.9112	4.5202	0.9112	4.6521	0.9113	4.7210	0.9113	4.9377	0.9113	4.9353
0.10	0.9115	4.1351	0.9119	4.5201	0.9119	4.6531	0.9120	4.7210	0.9120	4.9377	0.9120	4.9351
0.14	0.9128	4.1351	0.9131	4.5201	0.9131	4.6531	0.9132	4.7209	0.9132	4.9377	0.9132	4.9353
0.18	0.9139	4.1351	0.9142	4.5201	0.9142	4.6531	0.9143	4.7209	0.9143	4.9377	0.9143	4.9352
0.22	0.9153	4.1351	0.9155	4.5201	0.9156	4.6531	0.9156	4.7209	0.9156	4.9377	0.9156	4.9352
0.26	0.9165	4.1351	0.9168	4.5201	0.9168	4.6530	0.9168	4.7209	0.9168	4.9377	0.9168	4.9352
0.30	0.9199	4.1351	0.9200	4.5201	0.9201	4.6530	0.9201	4.7209	0.9201	4.9377	0.9201	4.9352
0.34	0.9232	4.1351	0.9233	4.5201	0.9233	4.6530	0.9234	4.7209	0.9234	4.9377	0.9234	4.9352
0.38	0.9264	4.1351	0.9265	4.5201	0.9265	4.6530	0.9265	4.7209	0.9265	4.9377	0.9265	4.9352
0.42	0.9305	4.1350	0.9306	4.5201	0.9306	4.6530	0.9306	4.7209	0.9306	4.9377	0.9306	4.9352
0.46	0.9349	4.1350	0.9349	4.5201	0.9349	4.6530	0.9350	4.7209	0.9350	4.9377	0.9350	4.9352
0.50	0.9401	4.1350	0.9401	4.5201	0.9401	4.6530	0.9401	4.7209	0.9401	4.9377	0.9401	4.9352
0.54	0.9463	4.1350	0.9463	4.5201	0.9463	4.6530	0.9463	4.7209	0.9463	4.9376	0.9463	4.9352
0.58	0.9532	4.1350	0.9532	4.5201	0.9532	4.6530	0.9532	4.7209	0.9532	4.9376	0.9532	4.9352
0.62	0.9619	4.1350	0.9618	4.5201	0.9618	4.6530	0.9618	4.7209	0.9617	4.9376	0.9617	4.9352
0.66	0.9715	4.1350	0.9714	4.5201	0.9714	4.6530	0.9714	4.7209	0.9714	4.9376	0.9714	4.9352
0.70	0.9825	4.1350	0.9833	4.5201	0.9833	4.6530	0.9833	4.7209	0.9833	4.9376	0.9833	4.9352
0.74	0.9950	4.1350	0.9979	4.5200	0.9978	4.6530	0.9978	4.7209	0.9978	4.9376	0.9978	4.9352
0.78	1.0162	4.1350	1.0160	4.5200	1.0160	4.6530	1.0160	4.7209	1.0160	4.9376	1.0160	4.9352
0.82	1.0401	4.1350	1.0399	4.5200	1.0398	4.6530	1.0398	4.7209	1.0398	4.9376	1.0398	4.9352
0.86	1.0725	4.1350	1.0725	4.5200	1.0724	4.6530	1.0724	4.7209	1.0724	4.9376	1.0724	4.9352
0.90	1.1254	4.1350	1.1251	4.5200	1.1250	4.6529	1.1250	4.7208	1.1249	4.9376	1.1249	4.9352
0.94	1.1807	4.1350	1.1803	4.5200	1.1802	4.6529	1.1802	4.7208	1.1802	4.9376	1.1802	4.9352
0.98	1.7319	4.1350	1.7312	4.5200	1.7311	4.6529	1.7310	4.7208	1.7310	4.9376	1.7310	4.9352

## B.- EXTENSION PARA YACIMIENTOS ANISOTRÓPICOS

Nosotros podemos considerar un medio poroso en el cual las permeabilidades horizontales  $k_x$  y  $k_y$  en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente son iguales, pero diferentes de la permeabilidad  $k_z$ . El flujo transitorio de un fluido ligeramente compresible a través de un medio poroso homogéneo y anisotrópico es descrito por la ecuación:

$$\frac{\delta^2 p(r, z, t)}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta p(r, z, t)}{\delta r} + \frac{k_z}{k_r} \frac{\delta^2 p(r, z, t)}{\delta z'^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\delta p(r, z, t)}{\delta t} \quad (61)$$

Los efectos gravitacionales fueron considerados despreciables en la ecuación (61). Si nosotros definimos  $z' = z \sqrt{k_r/k_z}$ , la ecuación (61) se reduce a la ecuación (2).

Por lo tanto, todos los resultados obtenidos en las secciones previas también pueden aplicarse cuando el pozo parcialmente penetrante dañado está en un medio poroso anisotrópico. Sin embargo, para este caso redefiniremos las siguientes variables adimensionales:

$$z_D = \frac{z}{r_w} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} \quad (62)$$

$$h_{wD} = \frac{r_w}{r} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} \quad (63)$$

$$h_D = \frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} \quad (64)$$

$$t_D = \frac{k_r t}{\theta \mu C r_w^2} \quad (65)$$

$$P_D = \frac{2\pi k_r h \Delta P}{q_w \mu} \quad (66)$$

### C. EVALUACION DE FACTORES DE DAÑO

Gringarten y Ramey<sup>25</sup> han demostrado que para tiempos pequeños la ecuación (13) se reduce a la siguiente expresión:

$$b P_D(r_D, z_D, t_D) = -\frac{1}{2} E_1(-r_D^2 / 4t_D) \quad (67)$$

Esto es que para tiempos pequeños el pozo parcialmente penetrante se comporta como un pozo totalmente penetrante. Si nosotros consideramos, además, una caída adicional de presión debida a la reducción de la permeabilidad de la formación debida a la invasión de fluidos de perforación, la ecuación (67) queda de la siguiente manera:

$$b P_D(r_D, z_D, t_D, S) = -\frac{1}{2} E_1(-r_D^2 / 4t_D) + S \quad (68)$$

Esta ecuación es válida si<sup>25</sup>:

$$t_D \leq 0.05 \delta_D^2 \quad (69)$$

y

$$z_{CD} - 0.5h_{WD} < z_D < z_{CD} + 0.5h_{WD} \quad (70)$$

El símbolo  $\delta_D$  representa la distancia vertical adimensional entre el punto en el cual la presión es medida y el extremo más cercano del intervalo abierto. Nosotros podemos representar a  $\delta_D$  como una función de  $z_{DH}$  de la siguiente manera:

$$\delta_D = 1 - z_{DA} \quad (71)$$

Por lo tanto,  $\delta$  es función de  $h_{wD}$  y  $S$ . Cuando incrementa  $S$ , el tiempo en el cual la ecuación (68) es válida incrementará:

$$t_D \leq 0.05 (1 - z_{DA})^2 \quad (72)$$

De acuerdo a los resultados observados en este estudio,  $z_{DA} \cong 0.75$ . Ahora, sustituyendo variables reales utilizando el sistema de unidades inglés:

$$\frac{t_D}{h_{wD}^2} = 0.000264 \frac{k_z t_1}{\phi \mu c h_w^2} \leq 0.003125 \quad (73)$$

De acuerdo a la ecuación (73) se concluye que el tiempo durante el cual un pozo parcialmente se comporta como totalmente penetrante es función de  $k_z$  y  $h_w$  cuando  $S$  tiende a cero.

Para valores grandes de tiempo:

$$t_D / r_D^2 > 25 \quad (74)$$

y

$$t_D \geq 0.5 h_D^2 \quad (75)$$

La ecuación (13) puede ser escrita como:



$$P_D(r_D, z_D, t_D) = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{t_D}{r_D^2} + 0.80907 \right) + S_P \quad (76)$$

donde  $S_P$  es la caída de presión adimensional adicional debida a la convergencia de los fluidos debida a la penetración parcial. Ahora, si nosotros consideramos el daño adimensional del pozo  $S$ , se ha demostrado en este estudio que la ecuación (76) queda de la siguiente manera:

$$P_D(r_D, z_D, t_D, S) = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{t_D}{r_D^2} + 0.80907 \right) + S_P + \frac{S}{b} \quad (77)$$

Sustituyendo variables reales en la ecuación (75) utilizando el sistema de unidades inglés:

$$\frac{t_D}{h_D^2} = 0.000264 \frac{k_z t_2}{\phi \mu c h_i^2} \geq 0.5 \quad (78)$$

Por lo tanto, el tiempo en el cual empieza a ser válida la ecuación (77) es función de  $k_z$  y  $h$ .

De acuerdo a las soluciones anteriores, se indica que el comportamiento de flujo puede ser dividido en 3 periodos de flujo:

(1) Un periodo de flujo radial, durante el cual el yacimiento se comporta como si el espesor de la formación es igual a la longitud del intervalo abierto.

(2) Una zona de transición, en la cual puede presentarse un flujo esférico o semi-esférico (Raghavan y Clark<sup>36</sup>).

(3) Un periodo de flujo pseudoradial.

Si se cuenta con datos de presión tanto de flujo radial como pseudoradial, las técnicas convencionales semilog pueden ser usadas. Para analizar el periodo de flujo esférico puede utilizarse el método desarrollado por Raghavan and Clark<sup>30</sup> que posteriormente se describe.

Se ha demostrado que para

$$t_D/r_D^2 > 70 \quad (79)$$

la ecuación (68) puede ser escrita de la siguiente forma con un error del 1%:

$$b P_D(r_D, z_D, t_D, S) = \frac{1}{2} (\ln \frac{t_D}{r_D^2} + 0.80907) + S \quad (80)$$

Sustituyendo variables reales en la ecuación (80) y utilizando el sistema de unidades inglés:

$$\Delta P = 162.6 \frac{q B \mu}{k_r h_w} \left( \log t + \frac{\log k_r}{\phi \mu C r_w^2} - 3.2275 + 0.875 \right) \quad (81)$$

La ecuación (81) nos indica que la recta semi-log del flujo radial tiene una pendiente igual a:

$$m_1 = 162.6 \frac{q B \mu}{k_r h_w} \quad (82)$$

dónde  $m_1$  es la pendiente medida de una gráfica de  $(\Delta P)_1$  contra  $\log(t)$ .

De esta pendiente, la permeabilidad radial  $k_r$  puede ser calculada si conocemos el intervalo abierto (éste debe ser medido con molinete):

$$k_r = 162.6 \frac{q B \mu}{m_1 h_w} \quad (83)$$

Notese que para determinar  $k_r$  no necesitamos conocer el espesor de la formación  $h$ , el cual puede ser desconocido si ningún pozo del campo ha penetrado totalmente la formación productora. Rearreglando la ecuación (81) podemos encontrar una expresión para determinar el daño del pozo  $S$  para  $t=1$  hora:

$$S = 1.151 \left( \frac{(\Delta P_1)_1}{m_1} - \log \frac{k_r}{\phi \mu C r_w^2} + 3.2275 \right) \quad (84)$$

Ahora, sustituyendo variables reales en la ecuación (77) y utilizando el sistema de unidades inglés:

$$\Delta P = 162.6 \frac{q B \mu}{k_r h} \left( \log t + \log \frac{k_r}{\phi \mu C r_w^2} - 3.2275 + 0.87 \left( S_p + \frac{S}{b} \right) \right) \quad (85)$$

La ecuación (85) nos indica que la recta semi-log del flujo pseudo-radial tiene una pendiente igual a:

$$m_2 = 162.6 \frac{q B \mu}{k_r h} \quad (86)$$

La permeabilidad radial  $k_r$  puede ser calculada de esta pendiente:

$$k_r = 162.6 \frac{q B \mu}{m_2 h} \quad (87)$$

Para determinar  $k_r$  se requiere conocer el espesor de la formación

h, el cual puede ser calculado de la siguiente relación:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{h_w}{h} = b \quad (88)$$

Por lo tanto:

$$h = h_w \frac{m_1}{m_2} \quad (89)$$

donde h es el espesor neto de la formación que aporta fluidos al pozo.

Rearreglando la ecuación (85) podemos encontrar una expresión para determinar el daño total  $\frac{S}{b} + S_p$  para t=1 hora:

$$S_T = S_p + \frac{S}{b} = 1.151 \left( \frac{(\Delta P_1)_e}{m_2} - \log \frac{k_r}{\phi \mu C r_w^2} + 3.2275 \right) \quad (90)$$

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados de este estudio:

$$S_p = S_T - \frac{S}{b} \quad (91)$$

Ahora, nosotros podemos determinar la permeabilidad vertical ya que conocemos el valor de  $S_p$  y b utilizando la solución de Papatzacos<sup>37</sup> o la solución de Cinco Ley, Ramey y Miller<sup>35</sup>, como se verá en el ejemplo de aplicación.

Para el caso de un pozo desviado:

$$S_T = S_p + S_d + \frac{S}{b} \quad (90-a)$$

ANÁLISIS DEL PERIODO DE FLUJO ESFÉRICO O SEMIESFÉRICO

Carshaw y Jaeger<sup>38</sup> (y Moran y Flinka<sup>39</sup>) demostraron que la caída de presión debida a una esfera localizada en un medio poroso anisotrópico infinito puede ser expresada por

$$\Delta P(r_s, t) = \frac{141.2 q\mu B}{2r_s k_r} \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{0.25 \phi \mu C r_s^2 k_r}{0.000264 k_r t k_z} \right)^{1/2} \right] \quad (92)$$

donde ( $r_s = \sqrt{r^2 k_z / k_r + z^2}$ ) es la distancia radial en el sistema de coordenadas esféricas. Usando las definiciones de presión y tiempo adimensional

$$P_D(r_{sD}, t_D) = \frac{h}{2r_s} \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{0.25 k_r r_s^2}{r_w^2 k_z t_D} \right)^{1/2} \right] \quad (93)$$

Dos métodos de obtener el radio esférico ideal del pozo ( $S=0$ ) han sido presentados en la literatura<sup>40,41</sup>. La primera aproximación iguala las áreas abiertas al flujo, cilíndricas y esféricas. Para este caso, los radios cilíndricos y esféricos son relacionados por Culham<sup>40</sup>:

$$r_{swi} = \sqrt{r_w h_w / 2} \quad + \quad \sqrt{k_z / k_r} \quad (94-a)$$

La segunda aproximación iguala la distribución de presión debida a fuerzas esféricas y cilíndricas iguales. Esta expresión, presentada por Rodríguez-Nieto y Carter<sup>41</sup> es

$$r_{swi} = h_w \left[ \ln \left( \frac{0.5 + \sqrt{0.25 + 1/h_w^2}}{-0.5 + \sqrt{0.25 + 1/h_w^2}} \right) \right]^{-1} \quad (94-b)$$

Ambas ecuaciones, (94-a) y (94-b), incorporan el efecto de anisotropía del medio. La ecuación (94-b) tiene una base teórica; sin embargo, la (94-a) no la tiene. Raghavan y Clark<sup>30</sup> demostraron que la aproximación sugerida por Rodríguez-Nieto y Carter<sup>41</sup> es superior a la sugerida por Culham<sup>40</sup>.

Por lo tanto, utilizando la definición de espesor adimensional de la formación podemos escribir la ecuación (93) como

$$P_D(r_{swD}, t_D) \cong P_D(1, z_D, t_D) = H_D \operatorname{erfc} \left[ \frac{h_D}{4H_D} \sqrt{\frac{1}{t_D}} \right] \quad (95)$$

donde  $H_D = h/2r_{swi}$ . Como es bien conocido, para pequeños valores del argumento ( $< 0.1$ ), la función error complementaria puede ser representada como sigue:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \quad (96)$$

Por lo tanto, la ecuación (92) puede ser escrita como

$$\Delta P(r_{swi}, t) = \frac{141.2 \text{ } q\mu B}{2 r_{swi} k_r} - \frac{2452.91 \text{ } q\mu B \sqrt{\phi\mu C}}{k_r k_z^{1/2}} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (97)$$

y la ecuación (95) como

$$P_D(1, z_D, t_D) = H_D - \frac{h_D}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1}{t_D}} \quad (98)$$

La ecuación (97) indica que la caída de presión es una función lineal de  $1/\sqrt{t}$ . La pendiente de  $\Delta P$  vs.  $1/\sqrt{t}$  es la siguiente:

$$m_{sp} = \frac{2452.91 \text{ q}\mu\text{B}\sqrt{\phi\mu\text{C}}}{k_r k_z^{1/2}} \quad (99)$$

La ecuación (99) contiene dos incógnitas ( $k_r$  y  $k_z$ ). Normalmente,  $k_r$  puede ser calculada de los periodos de flujo radial y pseudoradial. Por lo tanto, podemos determinar la permeabilidad vertical  $k_z$

$$k_z = \left( \frac{2452.91 \text{ q}\mu\text{B}\sqrt{\phi\mu\text{C}}}{k_r m_{sp}} \right)^2 \quad (100)$$

La ecuación (97) deberá ser usada únicamente si consideramos el daño del pozo S despreciable, o de lo contrario tendrá que ser tomado en cuenta.

Si suponemos el daño S adicional de la misma forma que en el periodo de flujo radial y pseudoradial

$$b_{sp} = \frac{141.2 \text{ q}\mu\text{B}}{2r_{sw} k_r} = \frac{141.2 \text{ q}\mu\text{B}}{k_r h} \left( \frac{h}{2r_{swi}} + \frac{S}{b} \right) \quad (101)$$

Por lo tanto, considerando el daño adimensional S podemos escribir la ecuación (97) como

$$\Delta P(r_{swi}, t, S) = \frac{141.2 \text{ q}\mu\text{B}}{k_r} \left( \frac{1}{2r_{swi}} + \frac{S}{h_w} \right) - \frac{2452.91 \text{ q}\mu\text{B}\sqrt{\phi\mu\text{C}}}{k_r k_z^{1/2}} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (102)$$

La ordenada al origen de  $\Delta P$  vs.  $1/\sqrt{t}$  es la siguiente:

$$b_{sp} = \frac{141.2 \text{ q}\mu\text{B}}{k_r} \left( \frac{1}{2r_{swi}} + \frac{S}{h_w} \right) \quad (103)$$

de donde podemos determinar el daño adimensional S:

$$S = \frac{b_{sp} k_r h_w}{141.2 \text{ q}\mu\text{B}} - \frac{h_w}{2r_{swi}} \quad (104)$$

Por lo tanto, podemos concluir que la pendiente  $m_{sp}$  es independiente del daño adimensional S, y que cuando el daño adimensional S es diferente de cero, el radio esférico real del pozo puede ser aproximado por la siguiente expresión:

$$r_{sw} = \left( \frac{2S}{h_w} + \frac{1}{r_{swi}} \right)^{-1} \quad (105)$$

Y la permeabilidad horizontal  $k_r$ :

$$k_r = \frac{141.3 \text{ q}\mu\text{B}}{2 \left( \frac{2S}{h_w} + \frac{1}{r_{swi}} \right)^{-1}} b_{sp} \quad (106)$$

Para determinar la permeabilidad horizontal  $k_r$ , sin embargo, la permeabilidad vertical  $k_z$  debe ser conocida porque  $r_{swi}$  es función de  $k_z$ . Esto requerirá un cálculo por ensayo y error utilizando las



ecuaciones (94-b), (99) y (106), que únicamente podrá realizarse cuando el daño adimensional  $S$ , sea conocido. Para el caso en que el intervalo abierto esté localizado en la cima o en el fondo de la formación, entonces el flujo tiende a ser semi-esférico, más que esférico. En este caso hay que considerar que el pozo produce el doble de su producción.

## D.- EJEMPLO DE APLICACION

### ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LA CURVA DE INCREMENTO DEL POZO UNAM 1 (TECOMINOACAN 446)

Para realizar el análisis de los datos de presión se utilizó el Sistema Automatizado de Pruebas de Presión (SAPP) desarrollado por el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Nacional Autónoma de México.

De la interpretación de la curva de incremento de presión realizada el 11 de octubre de 1989 se concluye lo siguiente:

1.- El comportamiento de la función derivada define la presencia de un pozo parcialmente penetrante, determinándose tres periodos de flujo<sup>41</sup> (figura 27):

- a) flujo radial (n = 0)
- b) periodo de transición (n = -0.32)
- c) flujo pseudoradial (n = 0)

2.- Del análisis del flujo radial se determinó que el pozo está estimulado, como se muestra a continuación:

#### análisis semilogaritmico (MDH y Horner)

MDH (figura 29)

$$k_r h = 1099 \text{ md-pie}$$

HORNER (figura 31)

$$k_r h = 1094 \text{ md-pie}$$

$$k_r = 8.38 \text{ md}$$

$$k_r = 8.33 \text{ md}$$

$$S = -2.64$$

$$S = -2.66$$

$$\Delta P_s = -612.6 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_s = -618.9 \text{ lb/pg}^2$$

$$EF = 1.29$$

3.- En el periodo de transición no se alcanzó flujo esférico debido a que la relación entre el intervalo abierto al flujo y el espesor de la formación  $b$  no es menor a 0:1, como se demostrará posteriormente, y, por lo tanto, no fue analizado.

4.- Del periodo de flujo radial y pseudoradial se determinó la relación entre el intervalo abierto al flujo y el espesor de la formación  $b$ , el espesor efectivo de la formación  $h$ , el pseudodaño por penetración parcial  $S_p$  y la permeabilidad vertical  $k_z$ .

$$b = 0.46$$

$$h = 235.2 \text{ pies}$$

$$S_p = 7.90$$

$$k_z = 0.38 \text{ md}$$

análisis semilogarítmico (MDH y HORNER) y curva tipo de flujo radial

MDH (figura 30)

HORNER (figura 32)

CURVA TIPO (figura 28)

$$k_r h = 2328 \text{ md-pie}$$

$$k_r h = 2339 \text{ md-pie}$$

$$k_r h = 2042 \text{ md-pie}$$

$$k_r = 8.37 \text{ md}$$

$$k_r = 8.38 \text{ md}$$

$$k_r = 7.16 \text{ md}$$

$$S_T = 2.16$$

$$S_T = 2.17$$

$$S_T = 0.22$$

$$\Delta P_{ST} = 230.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{ST} = 230.9 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{ST} = 102.1 \text{ lb/pg}^2$$

$$EF = 0.94$$

5.- El resultado obtenido de permeabilidad vertical del flujo radial y pseudoradial transitorios nos indican que se trata de un yacimiento anisotrópico, además de determinarse que el pozo está estimulado, por lo que este ejemplo demuestra la confiabilidad de la determinación de la permeabilidad vertical de pruebas de presión en pozos parcialmente penetrantes. En este caso, para poder analizar el periodo de transición, es necesario determinar el perfil de flujo en este periodo, el cual es función de tiempo y espacio debido a que no se alcanzó el flujo esférico (gasto constante), siendo éste un tema de posteriores trabajos.

#### 6.- RESULTADOS OBTENIDOS

$$k_r = 8.38 \text{ md}$$

$$k_z = 0.38 \text{ md}$$

$$S_T = 2.16$$

$$S_p = 7.90$$

$$S_\theta = 0$$

$$S = -2.64$$

$$h = 225.2 \text{ pies}$$

P O Z O U. N. A. M. 1

CURVA DE INCREMENTO

11/10/80

DATOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS

$$P_i = 9812 \text{ lb/pg}^2$$

$$T_y = 289^\circ\text{F}$$

$$P_b = 3545 \text{ lb/pg}^2$$

$$R_{Si} = 196 \text{ pies}^3/\text{pie}^3$$

$$B_{oi} = 1.601 \text{ pies}^3/\text{pie}^3$$

$$P = 5282 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wf} = 4753.64 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wfc} = 4720.82$$

$$B_o = 1.725 \text{ pies}^3/\text{pie}^3$$

(figura 26)

$$\mu_o = 0.235 \text{ cp}$$

$$C = 20.96 \times 10^{-6} (\text{lb/pg}^2)^{-1}$$

$$\phi = 0.032$$

$$S_w = 0.106$$

$$r_w = 0.27 \text{ pies}$$

$$h_w = 131.2 \text{ pies}$$

$$q_o = 4441 \text{ bls}/\text{dia}$$

$$t_p = 34824 \text{ hrs}$$

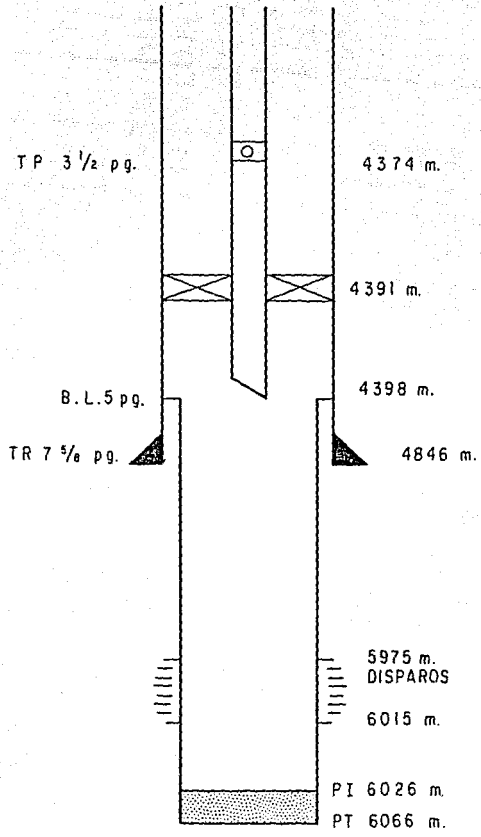


FIGURA 25. ESTADO MECANICO DEL POZO UNAM 1.

# FIG. 26.- Pws VS Dt

AJUSTE DE LA Pwf

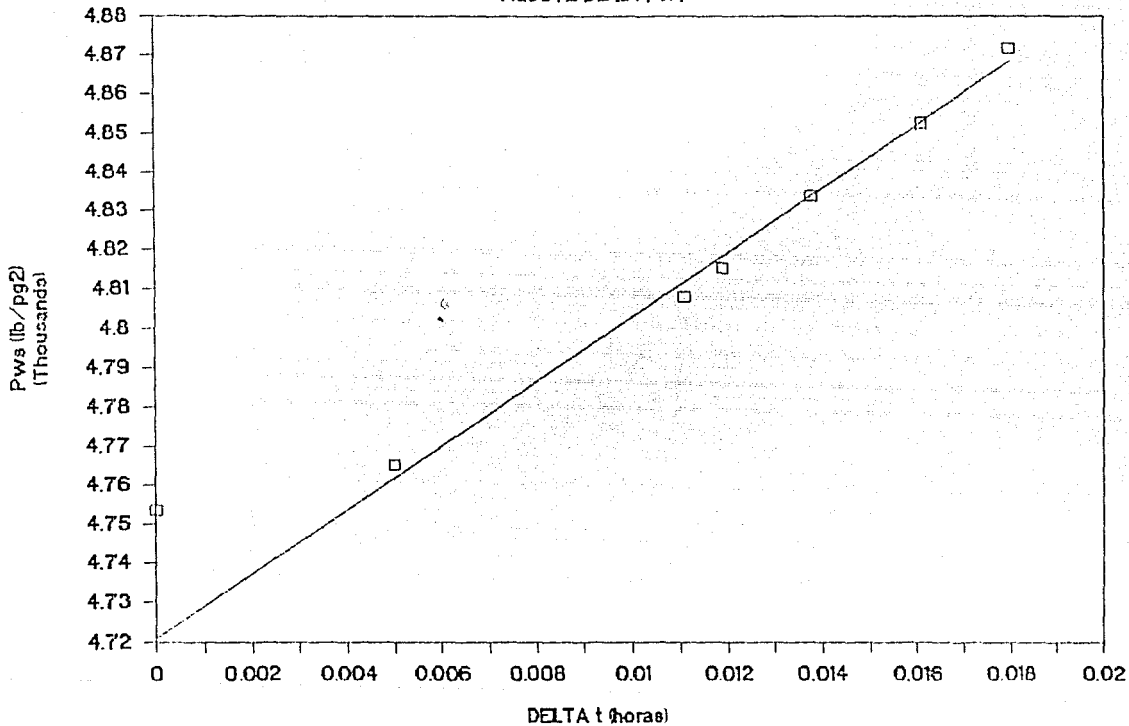
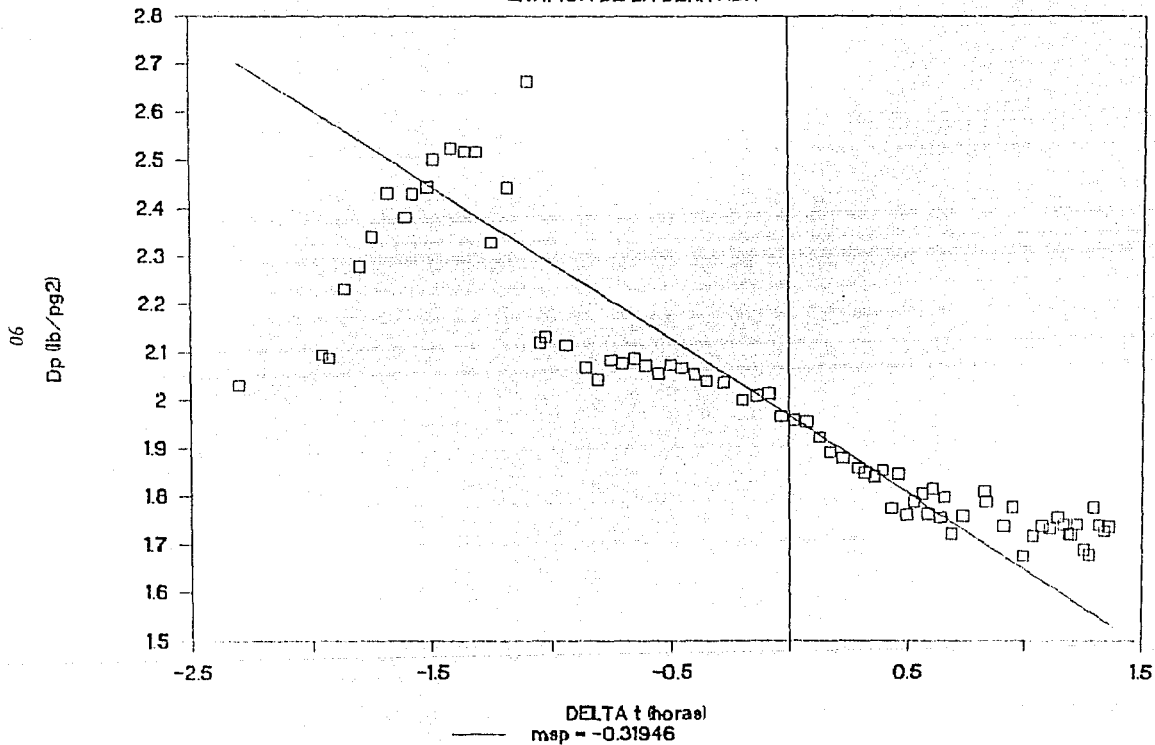


FIG. 27.-  $tDP'$  VS  $Dt$

GRAFICA DE LA DERIVADA





RESULTADOS

CAPACIDAD DE FLUJO (Rn) md-ft	2042.
PERMEABILIDAD md	7.15
FACTOR DE DAND	0.82
COEF. ALMAC. $\times 10^{-3}$	30.4
COEF. ALMC. ADIM.	1947.5
TIPR SENTLOS	0.7

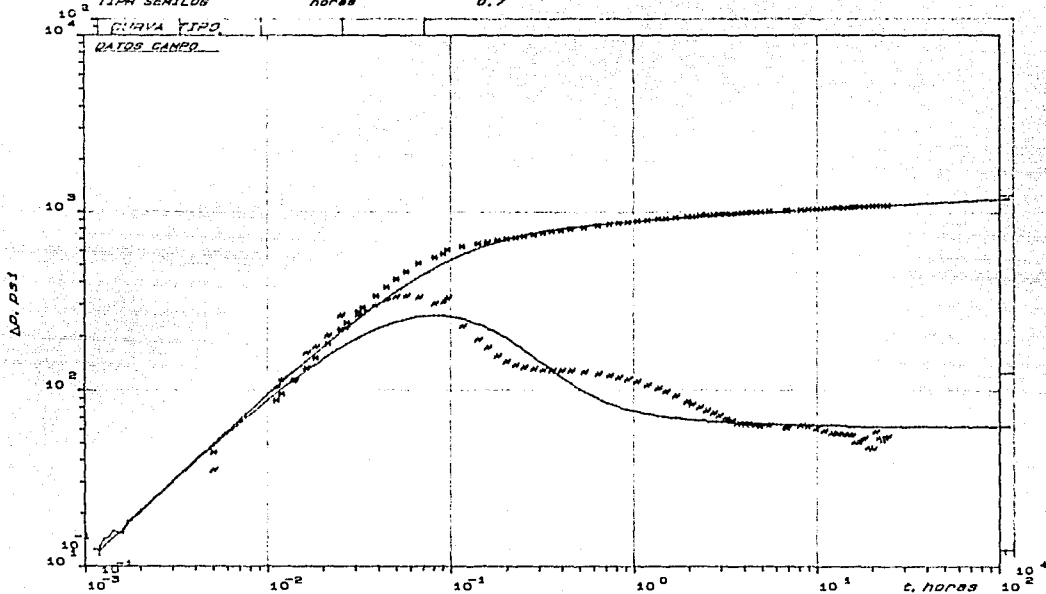


FIG. NO. 28 .-AJUSTE DE LA CORRELACION CORINE/SAPP EN LA PRUEBA DE PRESION DEL POZO U. N. A. M. 1  
11/OCT/89

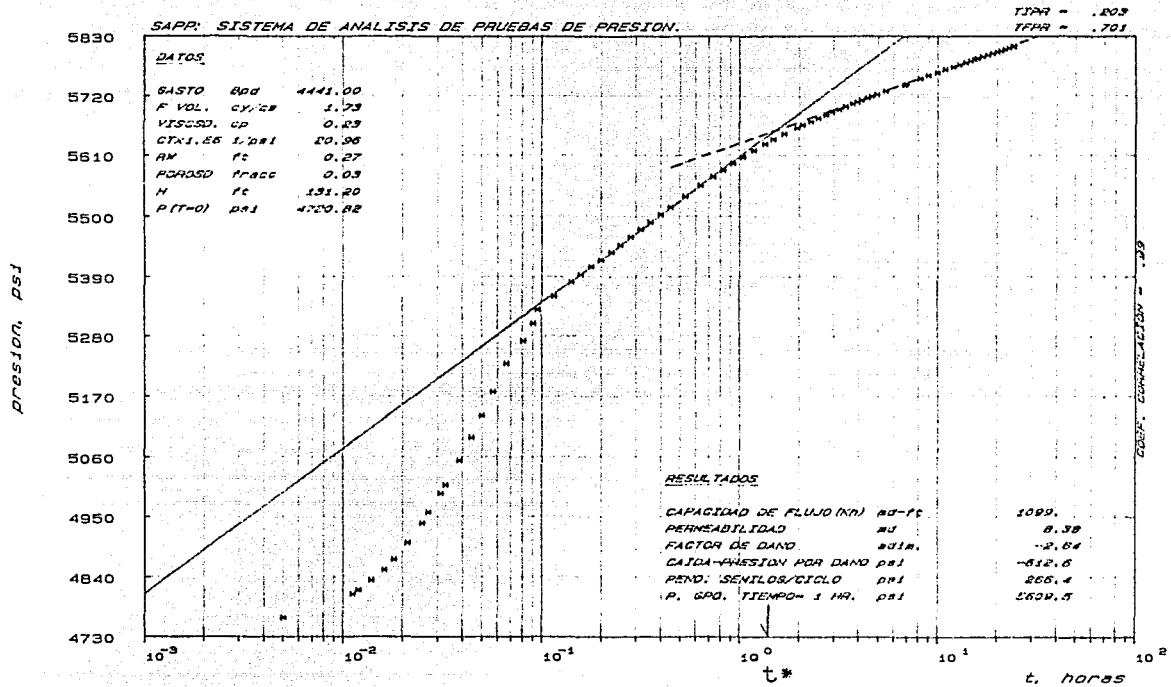


FIG. NO. 29 .- APLICACION DE LA TECNICA MDH A LOS DATOS DEL POZO  
U. N. A. M. 1  
11/OCT/89

SAPP: SISTEMA DE ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION.

TIPR = 14.251  
TAPP = 54.051

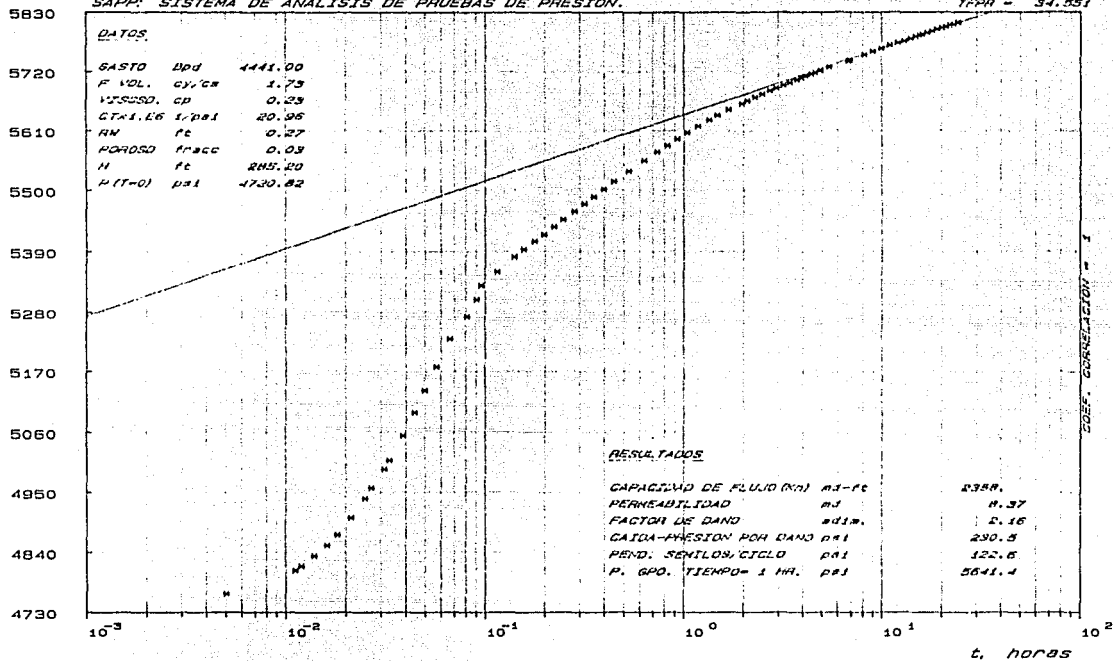


FIG. NO. 30 -- APLICACION DE LA TECNICA MDH A LOS DATOS DEL POZO  
U. N. A. M. 1  
11/OCT/89

TIPR = .197  
TAPR = .604

SAPP: SISTEMA DE ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION.

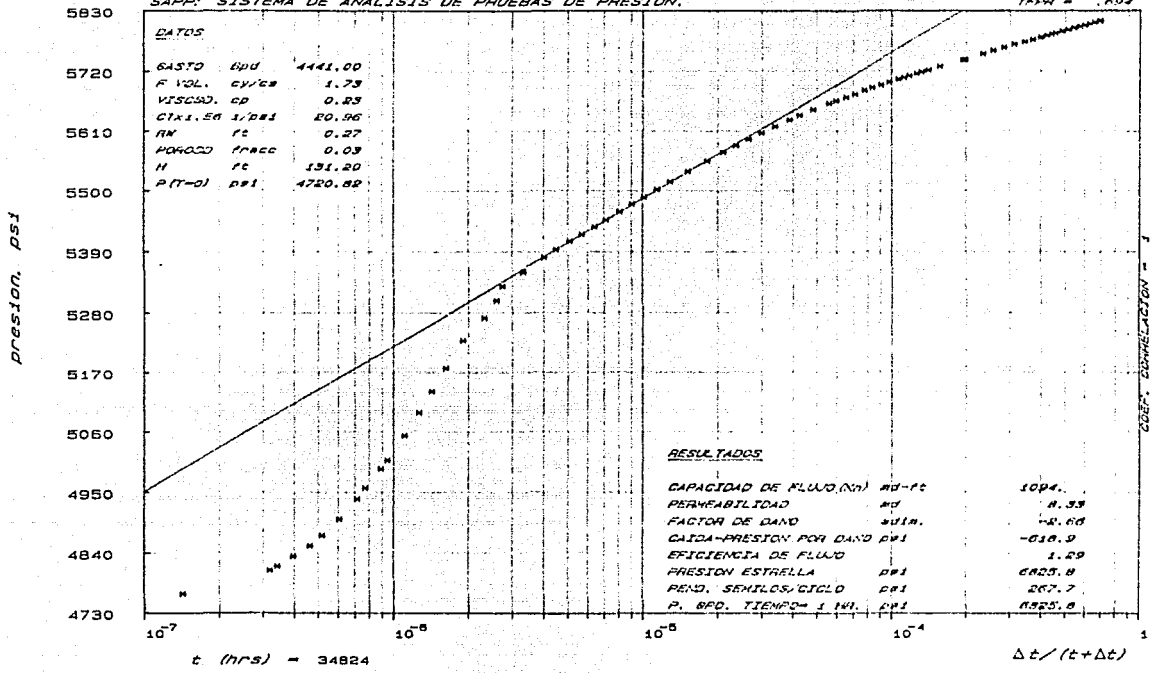


FIG. NO. 31.-APLICACION DE LA TECNICA DE HORNER A LOS DATOS DEL POZO  
U. N. A. M. 1  
11/OCT/89

1/6

presión, psi

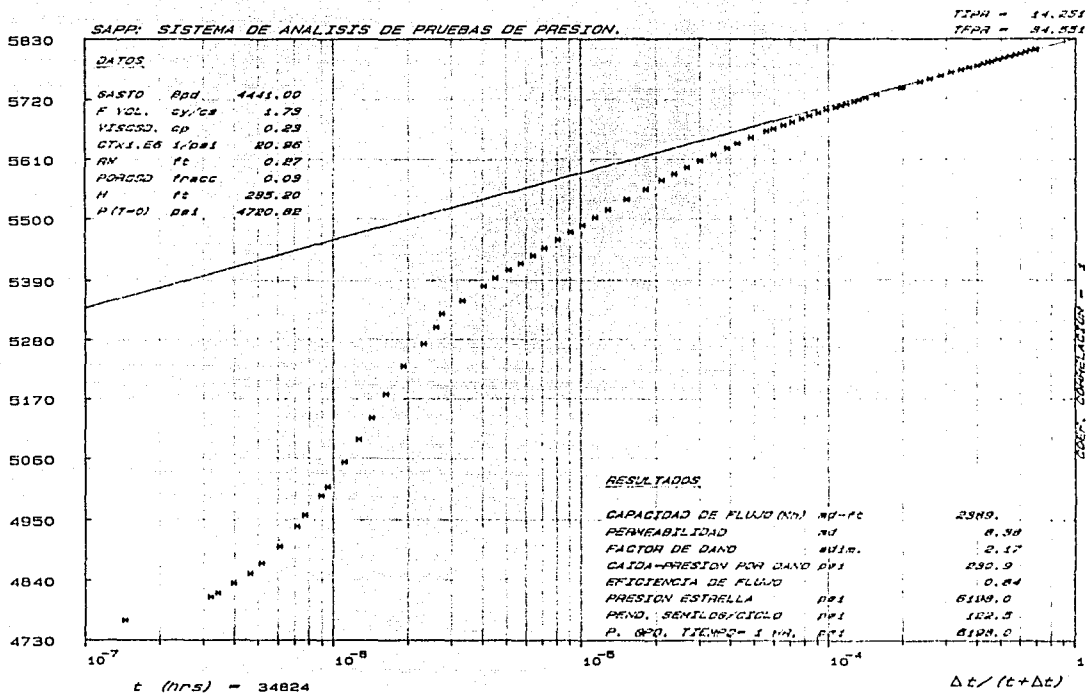


FIG. NO. 32.-APLICACION DE LA TECNICA DE HORNER A LOS DATOS DEL POZO U. N. A. M. 1 11/OCT/89

SISTEMA DE ANALISIS DE RESINAS DE PESTICIDA. (SARF)  
Versión 1.1 - 1989

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

MODELO : UMAN 1  
FECHA : 11/OCT/89

ANALISTA : ENOL BARRÓN TORRES  
OPERADOR : R E M E X

Forma : UNANI  
 Fecha : 11/00/05

Forma (mg.)	Frasco (par)	Cantidad de Frasco	Costo (RpD)
0.0000	4735.12	44.30	0.00
0.0011	4805.12	57.30	0.00
0.0017	4843.50	94.77	0.00
0.0023	4843.50	118.03	0.00
0.0031	4838.71	131.87	0.00
0.0039	4871.73	150.91	0.00
0.0047	4791.53	181.34	0.00
0.0054	4786.12	217.30	0.00
0.0063	4758.02	237.84	0.00
0.0071	4993.54	273.22	0.00
0.0079	5009.05	288.24	0.00
0.0088	5053.59	353.76	0.00
0.0097	5095.74	374.94	0.00
0.0099	5135.04	414.22	0.00
0.0101	5176.25	457.53	0.00
0.0103	5230.32	509.50	0.00
0.0105	5271.37	553.55	0.00
0.0107	5302.94	538.12	0.00
0.0109	5339.29	607.47	0.00
0.0112	5353.33	632.46	0.00
0.0115	5379.79	658.77	0.00
0.0118	5394.15	673.33	0.00
0.0121	5409.75	697.93	0.00
0.0124	5420.95	700.15	0.00
0.0127	5435.15	714.35	0.00
0.0130	5447.92	727.10	0.00
0.0133	5452.76	742.13	0.00
0.0136	5476.42	755.60	0.00
0.0139	5487.32	768.23	0.00
0.0142	5503.10	782.23	0.00
0.0145	5516.90	793.03	0.00
0.0148	5536.09	815.21	0.00
0.0151	5575.44	831.24	0.00
0.0154	5571.27	850.31	0.00
0.0157	5582.17	862.31	0.00
0.0160	5594.31	875.77	0.00
0.0163	5607.05	881.83	0.00
0.0166	5619.74	897.23	0.00
0.0169	5633.70	910.73	0.00
0.0172	5637.23	913.44	0.00
0.0175	5649.97	929.01	0.00
0.0178	5661.71	941.00	0.00
0.0181	5666.27	947.44	0.00
0.0184	5675.27	952.07	0.00
0.0187	5679.33	959.00	0.00

SISTEMA DE ANALISE DE COLEÇAO DE PRESSAO (SAP)

VERSÃO 1.01

Ponto : UN001  
 Fecha : 11/05/99

Tiempo (Segs)	Presión (mmHg)	Salida de Pulsos	Salida (Segs)
0.0100	5728.74	974.38	0.00
0.0100	5728.11	974.38	0.00
0.0100	5729.08	974.38	0.00
0.0100	5729.31	974.38	0.00
0.0100	5729.22	974.38	0.00
0.0100	5729.45	974.38	0.00
0.0100	5729.60	974.38	0.00
0.0100	5729.71	974.38	0.00
0.0100	5729.87	974.38	0.00
0.0100	5729.20	1001.28	0.00
0.0100	5729.66	1007.80	0.00
0.0100	5740.19	1019.37	0.00
0.0100	5741.31	1020.49	0.00
0.0100	5751.86	1031.04	0.00
0.0100	5757.54	1036.75	0.00
0.0100	5763.13	1042.34	0.00
0.0100	5768.74	1048.12	0.00
0.0100	5773.13	1052.61	0.00
0.0100	5777.38	1058.46	0.00
0.0100	5781.37	1060.55	0.00
0.0100	5784.32	1063.70	0.00
0.0100	5787.06	1066.24	0.00
0.0100	5788.32	1068.00	0.00
0.0100	5792.04	1071.23	0.00
0.0100	5795.06	1074.24	0.00
0.0100	5798.06	1077.24	0.00
0.0100	5800.73	1079.94	0.00
0.0100	5803.49	1082.38	0.00
0.0100	5805.74	1084.93	0.00
0.0100	5808.13	1087.31	0.00
0.0100	5810.67	1089.57	0.00
0.0100	5812.08	1090.21	0.00



## SECUENCIA DE CALCULO

De las gráficas  $\Delta P$  vs.  $\log \Delta t$  (figuras 29 y 30) obtenemos las pendientes flujo radial transitorio  $m_1$  y flujo pseudoradial transitorio  $m_2$ .

$$m_2 = 122.6 \text{ psi/ciclo}$$

$$m_1 = 266.4 \text{ psi/ciclo}$$

Con la ecuación (88) podemos determinar la relación entre el intervalo abierto al flujo y el espesor de la formación:

$$b = \frac{122.6}{266.4} = 0.46$$

Por lo tanto, usando la ecuación (89):

$$h = \frac{131.2}{0.46} = 285.2 \text{ pies}$$

De acuerdo a la fórmula (91):

$$S_p = 2.16 + \frac{2.64}{0.46} = 7.90$$

Ahora, utilizando la solución de Papatzacos<sup>37</sup>, podemos determinar la permeabilidad vertical.

Despejando  $k_z$  de la ecuación (53):

$$k_z = k_r \left( \frac{h_w}{h_{wD} r_w} \right)^2 \quad (107)$$

La solución de Papatzacos para determinar  $S_p$  es la siguiente:

$$S_p = \left( \frac{1}{b} - 1 \right) \ln \frac{\pi}{2} \frac{h_{wD}}{b} + \frac{1}{b} \ln \left[ \frac{b}{2+b} \left( \frac{A-1}{B-1} \right)^{1/2} \right] \quad (108)$$

donde:

$$A = 1/(z_{1D} + b/4) \quad (109)$$

$$B = 1/(z_{1D} + 3b/4) \quad (110)$$

$$z_{1D} = z_1/h \quad (111)$$

$z_1$  es la distancia de la cima de la formación a la cima del intervalo disparado. Para este caso:

$$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{h_w}{2} \quad (112)$$

Despejando  $h_{wD}$  de la ecuación (108):

$$h_{wD} = e^{\left\{ \frac{S_p - \frac{1}{b} \ln \left[ \frac{b}{2+b} \left( \frac{A-1}{B-1} \right)^{1/2} \right]}{(1/b-1)} \right\}} \frac{2b}{\pi} \quad (113)$$

Sustituyendo valores:

$$z_1 = \frac{285.2}{2} - \frac{135.2}{2} = 77$$

$$z_{1D} = \frac{77}{295.2} = 0.27$$

$$A = 1 / (0.27 + (0.25)(0.46)) = 2.597$$

$$B = 1 / (0.27 + (0.75)(0.46)) = 1.626$$

$$h_{wD} = e^{\left\{ \frac{7.90 - \frac{1}{0.46} \ln \left[ \frac{0.46}{2+0.46} \left( \frac{2.597-1}{1.626-1} \right)^{1/2} \right]}{\left( \frac{1}{0.46} - 1 \right)} \right\}} \frac{2(0.46)}{\pi}$$

$$h_{wD} = 2297$$

$$k_z = (8.38) \left( \frac{(131.2)}{(2297)(0.27)} \right)^2 = 0.38 \text{ md}$$

Otra forma de determinar la permeabilidad vertical es utilizar la solución de Cinco Ley , Ramey y Miller.<sup>35</sup>

Los resultados presentados por Cinco Ley , Ramey y Miller están en función de los parámetros adimensionales siguientes:

espesor adimensional

$$h_D = h / r_w \sqrt{k_r / k_z} \quad (64)$$

altura adimensional del punto medio del intervalo

$$z_{wD} = z_w / r_w \sqrt{k_r / k_z} \quad (62-a)$$

razón de penetración

$$h_{wD} \cos \theta_w \quad (63-a)$$

$$\text{donde } h_{wD} = h_w / r_w \sqrt{k_r / k_z} \quad (63)$$

Cinco Ley , Ramey y Miller demostraron que el factor de pseudodaño por convergencia y por inclinación del pozo en forma individual  $S_p$  y  $S_\theta$  o en conjunto  $S_{\theta+p}$  presentan una relación lineal cuando se grafican

contra logaritmo de  $h_D$ .

Para este ejemplo:

$$\frac{z_{wD}}{h_{wD}} = \frac{z_w}{h_w} = \frac{142.6}{285.2} = 0.5$$

$$\frac{h_{wD} \cos \theta_w}{h_D} = \frac{h_w}{h} \cos \theta_w = b \cos \theta_w = 0.46 \cos(0) = 0.46$$

De las tablas 1 y 2<sup>35</sup>:

$\theta_w$	$h_D$	$\frac{z_{wD}}{h_D}$	$h_{wD} \cos \theta_w / h_D$	$S_P$
$0^\circ$	100	0.5	0.46	2.90
$0^\circ$	1000	0.5	0.46	5.85

VALORES UTILIZADOS PARA INTERPOLAR  
LOS VALORES DE  $S_P$

$z_{wD}/h_D$	$h_{wD} \cos \theta / h_D$	$h_D=100$	$h_D=1000$
0.5	0.1	15.215	35.246
0.5	0.25	5.611	13.655
0.5	0.5	2.369	4.777
0.5	1	0	0

Tomando en cuenta la relación lineal de  $S_{\theta+P}$  con  $h_D$ :

$$S_{\theta+P} = S_{\theta+P_{100}} + (S_{\theta+P_{1000}} - S_{\theta+P_{100}}) \log(h_D/100)$$

$$7.90 = 2.90 + (5.85 - 2.90) \log(h_D/100)$$

$$h_D = \left[ 10 \left( \frac{7.90-2.90}{5.85-2.90} \right) \right] 100$$

$$h_D = 4954$$

Despejando  $k_z$  de la ecuación (64):

$$k_z = k_r \left( \frac{h}{h_D r_w} \right)^2$$

$$k_z = 8.38 \left( \frac{285.2}{(4954)(0.27)} \right)^2 = 0.38 \text{ md}$$

## VI DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo serán presentados los resultados obtenidos en este estudio. En las primeras secciones se discutirá cómo diferentes parámetros afectan la distribución de flujo y el daño adimensional  $S_{P+fp}$ . La última sección discutirá la influencia de la penetración parcial y el daño del pozo  $S$  en la interpretación de los datos de presión.

De acuerdo al estudio realizado, se determinó que el perfil de flujo y el daño adimensional  $S_{P+fp}$  de un pozo parcialmente penetrante es función de los siguientes parámetros:

- 1) Relación de penetración,  $b$
- 2) Espesor adimensional del pozo,  $h_{wD}$
- 3) Daño del pozo adimensional,  $S$

El método usado para analizar el efecto de cada parámetro es variar un parámetro manteniendo los otros parámetros constantes.

Para validar la solución obtenida se realizó una corrida con  $S=0$  y  $b=1$  para diferentes valores de  $h_{wD}$ , obteniéndose una distribución de flujo uniforme y un daño adimensional  $S_{P+fp} = 0$  en todos los casos. Además de compararse los resultados obtenidos para  $S=0$  para diferentes valores de  $h_{wD}$  y  $b$ , con los reportados en la literatura.

El intervalo abierto adimensional representa un efecto de

anisotropía. La definición de  $h_{wD}$  fue dada por la ecuación (63):

$$h_{wD} = \frac{h'_w}{r_w} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} \quad (63)$$

Cuando la permeabilidad vertical  $k_z$  disminuye relativamente con respecto a la permeabilidad radial  $k_r$ ,  $h_{wD}$  se incrementa. Por lo tanto, para valores grandes de  $h_{wD}$  corresponden a valores bajos de permeabilidad vertical y cuando  $h_{wD}$  tiene valores pequeños corresponde a sistemas isotrópicos o sea  $\sqrt{k_r/k_z} \cong 1$ .

Como es de esperarse, la distribución de flujo en el intervalo abierto es función de  $h_{wD}$ . En la figura 33 se demuestra que cuando  $h_{wD}$  aumenta, la distribución de flujo relativo estabilizado tiende a uniformizarse. La condición límite es cuando  $h_{wD} \rightarrow \infty$  corresponderá para una permeabilidad vertical cero. El resultado será una distribución de flujo relativo uniforme donde el efecto de penetración parcial desaparece. Este es el caso de yacimientos muy estratificados. Para todos los valores de  $h_{wD}$  el punto de correlación entre la solución de flujo uniforme y la solución de conductividad infinita es aproximadamente de 75% de la longitud del pozo cuando el intervalo productor está en la cima o en el fondo de la formación.

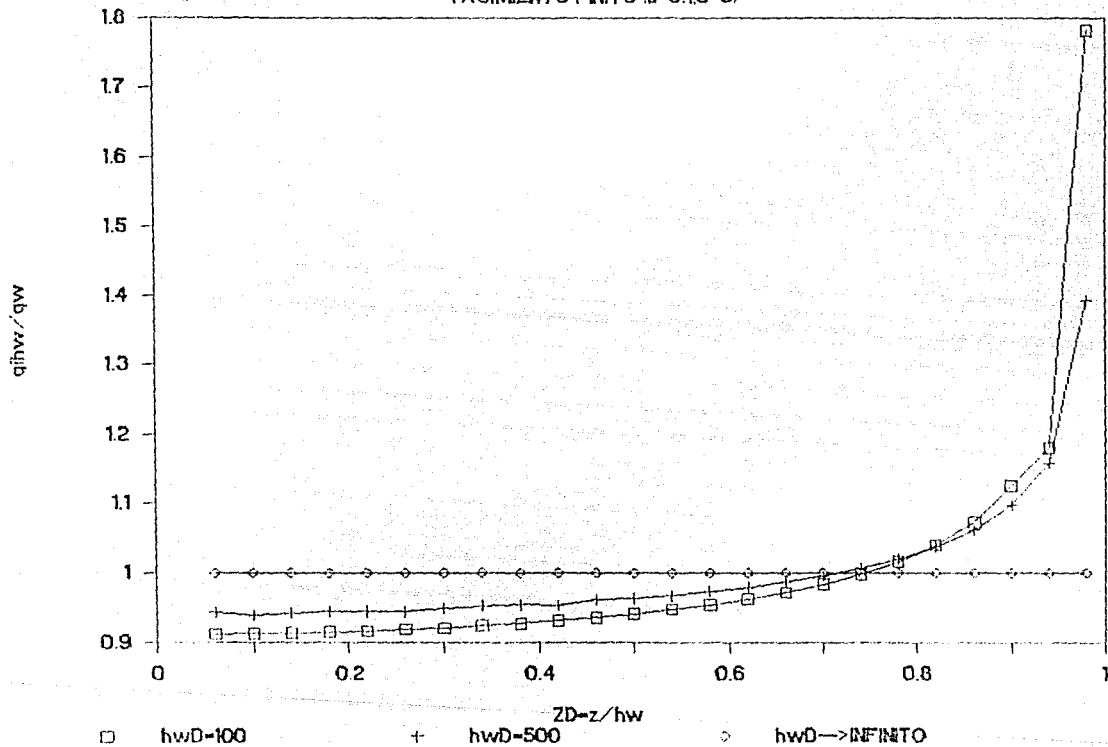
El efecto del daño del pozo adimensional  $S$  representa una resistencia al flujo en la pared del pozo. la definición de la caída de presión adimensional debida al daño  $S$  fue dada por la ecuación (32).

$$f_{Ds} = \frac{h_D}{h_{wD}} S \frac{q(z_D)}{q} \quad (32)$$

Es lógico esperar encontrar una reducción a la capacidad de flujo

# FIG. 33.- $q_{ihw}/q_w$ VS $ZD$

YACIMIENTO FINITO ( $b=0.1S=0$ )





debido al daño a la formación de los procesos de perforación y terminación del pozo.

Esta reducción a la permeabilidad es comunmente causada por la invasión de fluidos de perforación y terminación. Matemáticamente, este daño de la formación puede ser representado por una resistencia de una película de espesor infinitesimal alrededor del pozo. La caída de presión a través de esta película está dada por la ecuación (17).

$$\Delta P_S(z) = S \frac{q_w(z)\mu}{2\pi kh_w(z)} \quad (17)$$

Hurst<sup>33</sup> y Van Everdingen<sup>34</sup> introducen el efecto del daño a la formación dentro de la teoría de pruebas de pozos. Ellos supusieron un pozo totalmente penetrante. La caída de presión debida al daño S es uniforme para todo el pozo porque la distribución de flujo es uniforme. Por otro lado, la distribución de flujo no uniforme en el pozo influencia grandemente la caída de presión debida al daño S para pozos parcialmente penetrantes. La ecuación (17) define que la caída de presión debida al daño S es directamente proporcional al gasto de fluido  $q_w(z)$  que pasa por el segmento  $h_w(z)$ . En el fondo del intervalo abierto se tienen valores mayores de flujo y por lo tanto tiene que corresponder a mayores caídas de presión.

Como es de esperarse, la distribución de flujo relativo estabilizado es afectada por el daño del pozo adimensional S. Las figuras 13 a la 23 ilustran este punto. Cuando el daño del pozo adimensional S incrementa, la distribución de flujo relativo estabilizado tiende a ser más uniforme.

El incremento del daño del pozo adimensional S tiene un

efecto similar sobre la distribución de flujo como el incremento de  $h_{wD}$ . De hecho, ambos parámetros adimensionales producen la misma distribución de flujo cuando  $h_{wD}$  o  $S$  tienden a infinito.

Las figuras 13 a la 23 y la tabla 16 ilustran el efecto de la relación de penetración  $b$  sobre la distribución de flujo para diferentes  $h_{wD}$  y  $S$ . Una conclusión de este estudio es que la distribución de flujo relativo estabilizado es completamente determinada por  $h_{wD}$  y  $S$ , pero es independiente de  $b$ . También, para todos los valores de  $h_{wD}$  y  $S$  el valor del flujo relativo igual a la unidad está localizado aproximadamente 75% de la longitud del pozo cuando el intervalo productor está en la cima o en el fondo de la formación. Por lo tanto, el daño del pozo adimensional  $S$  no cambia significativamente esta localización.

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados de este estudio, se pueden considerar como aditivos el daño por penetración parcial  $S_p$  y el daño por reducción de la permeabilidad alrededor del pozo  $S$  con un error menor al 1%.

$$S_T = S_p + \frac{S}{b}$$

Con respecto al análisis de datos de pruebas de presión, es necesario tomar en cuenta la penetración parcial en el análisis del período de flujo esférico transitorio ya que, como se demostró, la distribución de flujo en el intervalo productor no es constante.

## VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Fue desarrollado un modelo analítico en dos dimensiones y una sola fase en este estudio para un yacimiento circular, homogéneo y anisotrópico. La condición de frontera interna consiste de un pozo parcialmente penetrante de conductividad infinita considerando el efecto de la reducción de permeabilidad alrededor del pozo debida al filtrado de los fluidos de perforación. Los resultados de este estudio sugieren las siguientes conclusiones útiles para aplicaciones de campo:

- 1.- La distribución de flujo para un pozo parcialmente penetrante no depende de la relación espesor de la formación entre el intervalo abierto.
- 2.- A medida que  $S$  aumenta, la distribución de flujo tiende a uniformizarse porque la formación dañada no altera la distribución de flujo para un pozo totalmente penetrante. El efecto  $S$  para un pozo totalmente penetrante y uno parcialmente penetrante no son enteramente análogos.
- 3.- El daño por penetración parcial y el daño por la reducción de permeabilidad alrededor del pozo se pueden considerar como aditivos.
- 4.- La permeabilidad vertical puede ser obtenida del análisis de pruebas de presión en pozos parcialmente penetrantes.
- 5.- Se recomienda realizar el cierre en el fondo durante pruebas de incremento de presión para que se

realice un análisis adecuado de los datos obtenidos ya que el periodo del flujo radial y esférico es muy corto y en la mayoría de los casos no son detectados por los efectos de almacenamiento.

## NOMENCLATURA

C	compresibilidad
h	espesor de la formación
$h_w$	longitud del intervalo abierto a producción
k	permeabilidad de la formación
P	presión
q	gasto por unidad de longitud
$q_w$	gasto del pozo
r	distancia radial
$r_w$	radio del pozo
S	factor de daño por invasión de fluidos
$S_{P+FP}$	factor de daño por invasión de fluidos y penetración parcial
$S_P$	factor de pseudodaño por penetración parcial
$S_{\theta+P}$	factor de pseudodaño por inclinación y penetración parcial
$S_T$	factor de daño por inclinación, penetración parcial e invasión de fluidos
t	tiempo produciendo
z	distancia vertical
$\mu$	viscosidad
$\phi$	porosidad
$\theta_w$	inclinación del pozo

## subíndices

D	adimensional
i	segmento i
r	radial
w	intervalo abierto, radio del pozo
w <sub>f</sub>	fluyente
z	vertical

## unidades

Sistema de unidades c-g-s

Sistema de unidades en inglés

## REFERENCIAS

1. Kozeny, J.: "Theorie und Berechnung der Brunnen", Wasserkraft u. Wasserwirtschaft (1933) Vol. 26, 101 (in German).
2. Muskat, M.: The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, J.W. Edwards, Inc., Ann Arbor, Mich. (1946) 263.
3. Polubarinova-Kochina, P. Ya.: Theory of Filtration of Liquids in Porous Media, Advances of Applied Mechanics (1951) Vol. 2, 207.
4. Hantush, M. S.: "Non-Steady Flow to a Well Partially Penetrating in an Infinite Leaky Aquifer", Proc., Iraqi Scientific Societies (1957).
5. Hantush, M. S.: "Drawdown Around a Partially Penetrating Well", Proc., ASCE, HY4 (1961) Vol. 87, 83.
6. Hantush, M. S.: "Hydraulic of Wells", Advances in Hydrosciences, Academic Press, Inc., New York (1964) Vol. 1, 307.
7. Cdeh, A. S.: "Steady-State Flow Capacity of Wells With Limited Entry to Flow", Soc. Pet. Eng. J. (March 1963) 43-51.
8. Minskii, E. M. and Markov, P. P.: "Experimental Investigation of the Flow Resistance in Imperfect Wells", Problems in the Hydrodynamics and Thermodynamics of Reservoirs, Gosloptekhnizdat, Leningrad (1956) (in Russian) Trudy VNII, No. 3, 35-65.
9. Nisle, R. G.: "The Effect of Partial Penetration on Pressure Buildup in Oil Wells", Trans. AIME (1958) Vol. 213, 85.
10. Brons, F., and Marting, V. E.: "The Effect of Restricted Fluid Entry on Well Productivity", Paper SPE 1322-G presented at the SPE-AIME 34th Annual Fall Meeting, Dallas, Oct. 4-7, 1959.
11. Brons, F., and Marting, V. E.: "The Effect of Restricted Fluid Entry on Well Productivity", J. Pet. Tech. (Feb. 1961) 172-174.
12. Dupuy, M.: "Modeles Mathematiques a Penetration Partielle et a Permeabilites Variees Realisees pour le Bureau Reservoir de la CFFA", Revue de l'Institut Francais du Pétrole (Oct. 1961) Vol. XVI, No. 13, 1071 (in French).
13. Dzaililov, K. N., and Gulamov, K. A.: "On the Non-Stationary Filtration of Liquids and Gases to Imperfect Well in Non-Homogeneous Porous Media", Dok. Akad. Nauk Azerb. USSR (1961) Vol. 16, 5 (in Russian).
14. Fizzi, G., Giucci, G. M., and Chierici, G. L.: "Quelques Cas de Remontees de Pression dans des Couches Heterogenes a Penetration Partielle. Etude par Analyseur Electrique", Revue de l'Institut Francais du Pétrole (dec. 1955) Vol. XX, No. 12, 1911 (in French).

15. Javandel, I. and Witherspoon, P. A.: "Use of Thermal Model to Investigate the Theory of Transient Flow to a Partially-Penetrating Well", J. Water Resource Research (1967) Vol. 3, 591.
16. Javandel, I. and Witherspoon, P. A.: "Analysis of Transient Fluid Flow in Multilayered Systems", Water Resources Center Contribution No. 124, U. of California, Berkeley (1968).
17. Seth, M. S.: "Unsteady-State Pressure Distribution in a Finite Reservoir With a Partial Wellbore Opening", J. Cdn. Pet. Tech. (Oct.-Dec. 1968) Vol 7, 153.
18. Kazemi, H. and Seth, M. S.: "Effect of Anisotropy and Stratification on Pressure Transient Analysis of Wells with Restricted Flow Entry", J. Pet. Tech. (May 1969) 639-646.
19. Eurns, W. A., Jr.: Discussion on "Effect of Anisotropy and Stratification on Pressure Transient Analysis of Wells with Restricted Flow Entry", J. Pet. Tech. (May 1969) 646-647.
20. Clegg, M. W. and Mills, M.: "A Study of the Behavior of Partially Penetrating Wells", Soc. Pet. Eng. J. (June 1969) 189-203.
21. Burns, W. A., Jr.: "New Single Well Test for Determining Vertical Permeability", J. Pet. Tech. (June 1969) 743-752.
22. Frate, M.: "A Method for Determining the Net Vertical Permeability Near a Well From In-situ Measurements", J. Pet. Tech. (May 1970) 637-643.
23. Gringarten, A. C.: "Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Well With a Single Horizontal Fracture, Partial Penetration or Restricted Entry", PhD Dissertation, Stanford U. (1971).
24. Weeks, J. .: "Effects of Well Loss, Development and Partial Penetration on Drawdown on Discharge Wells", Engineer Thesis, Stanford U. (1972).
25. Gringarten, A. C., and Ramey, H. J., Jr.: "Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Well With a Single Horizontal Fracture, Partial Penetration or Restricted Entry", Soc. Pet. Eng. J. (Aug. 1974) 413-426.
26. Bilhartz, H. L., Jr.: "Effects of Wellbore Damage and Storage on Behavior of Partially Penetrating Wells", PhD Dissertation, Stanford U. (June 1973).
27. Gringarten, A. C., and Ramey, H. J., Jr.: "An Approximate Infinite Conductivity Solution for a Partially Penetrating Line-Source Well", Soc. Pet. Eng. J. (April 1975) 140-146.
28. Cinco, H., Miller, F. G. and Ramey, H. J., Jr.: "Well Test Analysis for Slanted Wells", Paper SPE 5131 presented at the SPE AIME 49th Annual Fall Meeting, Houston, Tex., Oct. 6-9, 1974.



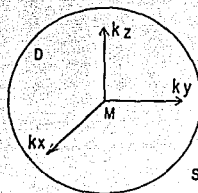
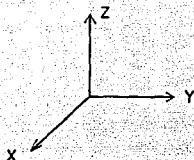
29. Matthews, C. S. and Russell, D. G.: Pressure Build-up and Flow Tests in Wells, Soc. Pet. Eng. Monograph Series, Vol. 1, SPE, Dallas (1967) 4.
30. Gringarten, A. C., and Ramey, H. J., Jr.: "The Use of Source and Green's Functions in the Solution of Unsteady Flow Problems in Reservoirs", Soc. Pet. Eng. J. (Oct. 1973) 285-296.
31. Gringarten, A. C., and Ramey, H. J., Jr., and Raghavan, R.: "Unsteady-state Pressure Distributions Created by a Well With a Single Infinite Conductivity Vertical Fracture", Soc. Pet. Eng. J. (Aug. 1974) 347-360.
32. Cinco, H.: Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Slanted Well, or a Well With an Inclined Fracture". PhD Dissertation, Stanford U. (April 1974).
33. Van Everdingen, A. F.: "The Skin Effect and its Influence on the Productive Capacity of a Well", Trans., AIME (1952) 198, 171-176.
34. Hurst, W.: "Establishment on the Skin Effect and its Impediment to Fluid Flow into a Wellbore", Pet. Eng. (Oct. 1953) 25, 8-6.
35. Cinco Ley, H., Ramey, H. J., Jr., and Miller, F. G.: "Pseudoskin Factor for Partially Penetrating Directionally Drilled Wells", Paper SPE 5589, AIME (1975).
36. Raghavan, R. and Clark, . K.: "Vertical Permeability from Limited Entry Flow Test in Thick Formations", Trans, AIME (1975) 6573, 65-73.
37. Papatzacos, P.: "Approximate Partial Penetration Pseudoskin for Infinite-Conductivity Wells, SPE Reservoir Eng. (May 1987) 227-234.
38. Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C.: Conduction of Heat in Solids, 2nd. ed., Oxford U. Press, Oxford, England (1959) 257.
39. Moran, J. H., and Flinkea, E. E.: "Theoretical Analysis of Pressure Phenomena Associated with the Wireline Formation Tester", J. Pet. Tech. (Aug. 1962) 899-908; Trans. AIME, Vol. 225.
40. Culham, W. E.: "Pressure Buildup Equations for Spherical Flow Regime Problems", paper presented at 47th Annual Fall Meeting, San Antonio, Tex., Oct. 3-7, 1972.
41. Rodriguez-Nieto, R., and Carter, R. D.: "Unsteady Three-Dimensional Gas Flow in Thick Reservoirs", paper SPE 4255 was submitted for publication consideration but not preprinted. Copies of original manuscript available from SPE-AIME office.
42. Cinco Ley, H.: "Apuntes de Análisis Moderno de Pruebas de Presión y Datos de Producción", U.N.A.M., D.E.P.F.I., 1989/I.

43. Gringarter, A. C.: "The Use of Source and Green's Function in the Solution of Unsteady Flow Problem in Reservoirs", F.W.B. ITTE 71-9, Dept. of Civil Engineering, U. of California at Berkeley (Dec. 1971).

## APENDICE A

### METODO DE LAS FUNCIONES DE GREEN <sup>42</sup>

Se considera un medio poroso D homogéneo y anisotrópico limitado por una superficie S y un punto M dentro del dominio D.



El flujo transitorio de un fluido ligeramente compresible es descrito por la ecuación de difusión derivada de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy. Suponiendo permeabilidades, porosidad y viscosidad del fluido constantes y efectos gravitacionales despreciables, la ecuación de difusividad puede ser descrita como:

$$\eta_x \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial x^2} + \eta_y \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial y^2} + \eta_z \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial z^2} = \frac{\partial P(M,t)}{\partial t} \quad (A-1)$$

donde x, y y z son los ejes principales de permeabilidad y los coeficientes  $\eta_x$ ,  $\eta_y$  y  $\eta_z$  son las difusividades hidráulicas principales. Cuando  $\eta_x = \eta_y = \eta_r$  (sistema cilíndrico), la ecuación de difusividad puede escribirse como:

$$\eta_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P(M,t)}{\partial r} \right) + \eta_z \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial z^2} = \frac{\partial P(M,t)}{\partial t} \quad (A-2)$$

Las constantes de difusividad están dadas por:

$$\eta_j = \frac{k_j}{\phi \mu C}, \quad j = x, y, z \text{ o } r \quad (\text{A-2})$$

Si nosotros multiplicamos cada coordenada  $j$  por  $\left(\frac{k}{k_j}\right)^{1/2}$ , donde  $k$  puede ser elegida arbitrariamente, la ecuación (A-1) o ecuación (A-2) quedan así:

$$\eta \nabla^2 P(M, t) = \frac{\delta P(M, t)}{\delta t} \quad (\text{A-4})$$

la cual es una ecuación para un dominio isotrópico; por consiguiente, el problema en el dominio anisotrópico puede ser reducido a el correspondiente problema en el dominio isotrópico cuando el dominio es infinito o cuando es limitado por planos perpendiculares al eje principal de permeabilidad o, en el caso del sistema cilíndrico, por planos perpendiculares al eje  $z$  y por cilindros circulares con sus ejes  $z$ . En la mayoría de los casos la superficie de la frontera es irregular.

La solución  $P(M, t)$  de la ecuación de difusión es únicamente determinada predeterminando (1) la distribución de la presión inicial en  $D$ , y (2) el valor de la presión en la frontera  $S$  (problema Dirichlet) o el valor del flujo a través de la frontera  $S$  (problema Neumann) para todo tiempo. Como en el caso de estado estacionario la solución de la ecuación de difusión puede ser obtenida por medio de funciones de Green, las cuales son definidas como sigue:

Las funciones instantáneas de Green para el dominio  $D$  con respecto a la ecuación de difusión (ecuación A-4) es la presión para el punto  $M'(x', y', z')$  para el tiempo  $t$  debido a una fuente instantánea de fuerza

unitaria generada en el punto  $M(x, y, z)$  para el tiempo  $\tau$ , con  $\tau < t$ , el dominio  $D$  inicia para una presión cero y la superficie  $S$  inicia para otra presión cero, o flujo impermeable.

Las funciones instantáneas de Green, representadas por  $u = G(M, M', t - \tau)$  tiene las siguientes propiedades:

(1) es una solución de la ecuación de difusión adjunta si  $L[V]$  representa la forma de difusión diferencial. La forma diferencial adjunta  $M[u]$  es definida por el requerimiento de esta expresión:

$$u L[V] - V M[u]$$

será integrable. En nuestro problema,  $L = (\eta \nabla^2 - \frac{\delta}{\delta t})$ ,  $t > \tau$ , y la forma adjunta es  $M = (\eta \nabla^2 + \frac{\delta}{\delta t})$ ,  $\tau < t$ .

(2) es simétrica en los puntos  $M$  y  $M'$

(3) es una función delta. Desaparece para todos los puntos dentro de los límites  $S$  cuando  $t \rightarrow \tau$  excepto para el punto  $M$  donde tiende a infinito.

Para cualquier función continua  $f(M)$ :

$$\lim_{t \rightarrow \tau} \int_D f(M') G(M, M', t - \tau) dM' = f(M) \quad (A-5)$$

Además, de la definición de fuente instantánea unitaria, la función instantánea de Green también satisface:

$$\int_D G(M, M', t) dM' = 1 \quad \forall t \geq 0 \quad (A-6)$$

(4) La función instantánea de Green\*, o su derivada normal\*\*, desaparece cuando  $M$  está sobre el límite  $S$ .

\* funciones de Green de primera clase

\*\* funciones de Green de segunda clase, o funciones Neumann

Si tal función puede ser encontrada, entonces la presión para M para el tiempo t, P(M,t), debida a la distribución de presión inicial P<sub>i</sub>(M), y una presión dada o flujo para la frontera, es dada por:

$$P(M,t) = \int_D P_i(M') G(M,M',t) dM' \quad (A-7)$$

$$\eta \int_0^t \int_S \left[ G(M,M',t-\tau) \frac{\delta P(M',\tau)}{\delta n} - P(M',\tau) \frac{\delta G(M,M',t-\tau)}{\delta n} \right] dS_{M'} d\tau$$

$M' \in S$

donde  $\frac{\delta}{\delta n}$  denota la diferenciación a lo largo de la normal exterior el elemento  $dS_{M'}$ , del límite S.

Una comprobación de este teorema está dada en el Carslaw and Jaeger, pag. 354. P(M',t) y G(M,M',t-τ) satisfacen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\left( \eta \nabla^2 - \frac{\delta}{\delta \tau} \right) P(M',\tau) = 0, \quad \forall M' \in D \quad (A-8)$$

$$\left( \eta \nabla^2 + \frac{\delta}{\delta \tau} \right) G(M,M',t-\tau) = 0 \quad \forall M \in D \quad (A-9)$$

respectivamente. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta \tau} P(M',\tau) G(M,M',t-\tau) &= P(M',\tau) \frac{\delta}{\delta \tau} G(M,M',t-\tau) + G(M,M',t-\tau) \frac{\delta}{\delta \tau} P(M',\tau) \\ &= \eta [G(M,M',t-\tau) \nabla^2 P(M',\tau) - P(M',\tau) \nabla^2 G(M,M',t-\tau)] \end{aligned}$$

γ

$$\int_0^{t-\epsilon} \left[ \int_D \frac{\delta}{\delta \tau} P(M', \tau) G(M, M', t-\tau) dM' \right] d\tau =$$

$$\eta \int_0^{t-\epsilon} \left\{ \int_D \left[ G(M, M', t-\tau) \nabla^2 P(M', \tau) - P(M', \tau) \nabla^2 G(M, M', t-\tau) \right] dM' \right\} d\tau \quad (A-10)$$

El espacio integral empieza tomando el dominio  $D$ , y  $\epsilon$  empieza con cualquier número positivo menor que  $t$ , tan pequeño como nosotros queramos.

Intercambiando el orden de integración en el lado izquierdo de la ecuación (A-10).

$$\int_D \left[ P(M', \tau) G(M, M', t-\tau) \right]_{\tau=t-\epsilon} dM' - \int_D \left[ P(M', \tau) G(M, M', t-\tau) \right]_{\tau=0} dM' =$$

$$\int_D P(M', t-\epsilon) G(M, M', \epsilon) dM' - \int_D P_i(M') G(M, M', t) dM'$$

Ahora, tomando el límite del primer término cuando  $\epsilon$  tiende a cero, uno obtiene de la definición de función delta:

$$P(M', t) = \int_D P_i(M') G(M, M', t) dM'$$

Aplicando el Teorema de Green para el lado derecho de la ecuación (A-10) y tomando el límite cuando  $\epsilon$  tiende a cero:

$$\eta \int_0^t \left\{ \int_S \left[ G(M, M', t-\tau) \frac{\delta P(M', \tau)}{\delta n} - P(M', \tau) \frac{\delta G(M, M', t-\tau)}{\delta n} \right]_{M' \in S} dS_{M'} \right\} d\tau$$

donde  $\frac{\delta}{\delta n}$  denota diferenciación a lo largo de la normal exterior para el elemento  $dS_{M'}$  del límite  $S$ .

Substituyendo estos últimos dos resultados dentro de la ecuación (A-10) da el resultado de la ecuación (A-7).

Ahora, si el dominio  $D$  es limitado por un límite interior  $S_w$  y un límite exterior  $S_e$ , la distribución de presión  $P(M, t)$  está dada por:

$$\begin{aligned}
 P(M, t) = & \int_D P_1(M') G(M, M', t) dM' + \\
 & \eta \left\{ \int_0^t \int_{S_w} \left[ G(M, M_w, t-\tau) \frac{\delta P(M_w, \tau)}{\delta n(M_w)} - P(M_w, \tau) \frac{\delta G(M, M_w, t-\tau)}{\delta n(M_w)} \right] dS_{(M_w)} \right\} d\tau \\
 & + \eta \left\{ \int_0^t \int_{S_e} \left[ G(M, M_e, t-\tau) \frac{\delta P(M_e, \tau)}{\delta n(M_e)} - P(M_e, \tau) \frac{\delta G(M, M_e, t-\tau)}{\delta n(M_e)} \right] \right. \\
 & \left. dS_{(M_e)} \right\} d\tau \quad (A-11)
 \end{aligned}$$

donde  $M_w$  y  $M_e$  representan las variables de integración de  $S_w$  y  $S_e$ , respectivamente.

$P(M, t)$  es, por lo tanto, obtenida como la suma de tres términos de diferente naturaleza:

El primer término en la ecuación (A-11) considera la distribución inicial; el segundo y tercer término consideran las condiciones de frontera interna y externa, respectivamente. En particular, si  $D$  es un dominio infinito, el tercer término en la ecuación (A-11) desaparece y



únicamente los dos primeros términos se consideran, con la condición que la función Green's es cero cuando  $M$  o  $M'$  es infinita. El tercer término también desaparece cuando  $D$  es finito si la condición de frontera externa es presión cero o cero flujo:

$$P(M_e, t) = 0, \quad \frac{\delta}{\delta n} P(M_e, t) = 0, \quad \forall t \text{ y } \forall M_e \in S_e$$

APENDICE B  
PROGRAMAS DE COMPUTO

- 1.- Programa de cómputo para calcular el perfil de flujo estabilizado y la caída de presión adimensional total para un pozo parcialmente penetrante de conductividad infinita en un yacimiento semi-infinito.
- 2.- Programa de cómputo para calcular la caída de presión adimensional total para un pozo parcialmente penetrante. Solución de gasto constante en un yacimiento semi-infinito.
- 3.- Programa de cómputo para calcular el perfil de flujo estabilizado y los factores de daño para un pozo parcialmente penetrante de conductividad infinita en un yacimiento semi-infinito.
- 4.- Programa de cómputo para calcular el perfil de flujo estabilizado y los factores de daño para un pozo parcialmente penetrante de conductividad infinita en un yacimiento finito.

```

10 OPEN "A:SALIDA.DAT" FOR OUTPUT AS #1
20 DEFINT J-N
30 DEFBL A-H,O-Z
40 DIM G(50,50),H(50),O(50)
50 REM PAUL BARRON TORRES                                U.N.A.M.                                F.S.E.F.I
60 REM PROGRAMA DE COMPUTO PARA CALCULAR EL PERFIL DE FLUJO ESTADIONADO
70 REM Y LA CAIDA DE PRESION ADIMENSIONAL TOTAL PARA UN PISO PARALELO DE
80 REM PENETRANTE DE CONDUCTIVIDAD INFINITA EN UN YACIMIENTO SEMI-DEUTERIO
90 REM DATOS
100 N=50:HWD=100:S=0
110 REM SECUENCIA DE CALCULO
120 FOR J=1 TO N
130 FOR I=1 TO N
140 A1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-.5)^2))+1))+1)
150 A2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+.5)^2))+1))-1)
160 IF (J+I-.5)>0 THEN A=2*LOG(A1/A2) ELSE A=2*LOG(A2/A1)
170 B1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+.5)^2))+1))+1)
180 B2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+.5)^2))+1))-1)
190 IF (J+I+.5)>0 THEN B=2*LOG(B1/B2) ELSE B=2*LOG(B2/B1)
200 C1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-1.5)^2))+1))+1)
210 C2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-1.5)^2))+1))-1)
220 IF (J+I-1.5)>0 THEN C=LOG(C1/C2) ELSE C=LOG(C2/C1)
230 D1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+1.5)^2))+1))+1)
240 D2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+1.5)^2))+1))-1)
250 IF (J+I+1.5)>0 THEN D=LOG(D1/D2) ELSE D=LOG(D2/D1)
260 E1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+.5)^2))+1))+1)
270 E2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I+.5)^2))+1))-1)
280 IF (J+I+.5)>0 THEN E=LOG(E1/E2) ELSE E=LOG(E2/E1)
290 F1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-.5)^2))+1))+1)
300 F2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-.5)^2))+1))-1)
310 IF (J+I-.5)>0 THEN F=LOG(F1/F2) ELSE F=LOG(F2/F1)
320 G(J,I)=A+B-C-D-E-F
330 IF J=1 THEN G(J,I)=G(J,I)+4*S
340 IF J=N THEN G(J,I)=G(J,I)-4*S
350 IF I=N THEN G(J,I)=1
360 NEXT I
370 NEXT J
380 FOR J=1 TO N
390 H(J)=0
400 IF J=N THEN H(J)=N
410 NEXT J
420 FOR I=1 TO N
430 PIV=G(1,I)
440 H(1)=H(1)/PIV
450 IF I=N GOTO 560
460 FOR J=1 TO N
470 S(J,J)=G(1,J)/PIV
480 NEXT J
490 FOR J=1 TO N
510 FOR I=1 TO N
520 S(J,I)=G(J,I)-G(1,I)*G(J,I)
530 NEXT I
540 H(J)=H(J)-H(1)*G(J,I)
550 NEXT J

```

```

550 NEXT I
570 FOR I=1 TO N
580 J=I+1
590 SUM=0
610 FOR K=J TO N
620 SUM=SUM+(J,K)*H(K)
630 NEXT K
640 H(I)=H(I)-SUM
650 NEXT I
660 FOR J=1 TO N
670 FOR I=1 TO N
680 A1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-.5)^2))+1))+1)
690 A2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-.5)^2))+1))-1)
700 IF (J+I-.5)>0 THEN A=LOG(A1/A2) ELSE A=LOG(A2/A1)
710 B1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J-I+.5)^2))+1))+1)
720 B2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J-I+.5)^2))+1))-1)
730 IF (J-I+.5)>0 THEN B=LOG(B1/B2) ELSE B=LOG(B2/B1)
740 C1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-1.5)^2))+1))+1)
750 C2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J+I-1.5)^2))+1))-1)
760 IF (J+I-1.5)>0 THEN C=LOG(C1/C2) ELSE C=LOG(C2/C1)
770 F1=((SQR((N^2/(HWD^2*(J-I-1.5)^2))+1))+1)
780 F2=((SQR((N^2/(HWD^2*(J-I-1.5)^2))+1))-1)
790 IF (J-I-1.5)>0 THEN F=LOG(F1/F2) ELSE F=LOG(F2/F1)
800 G(J,I)=A+B-C-F
810 NEXT I
820 NEXT J
830 FOR J=1 TO N
840 SUM=0
850 FOR I=1 TO N
860 SUM=SUM+(J,I)*H(I)
870 G(I)=.25*SUM+S*(J)
880 NEXT I
890 I1=" 0.00      ###.#####      ###.##### "
910 PRINT #1," PUNTO          GASTO          PRESTION          "
920 PRINT #1,"          qihw/qw          Pdhw/h          "
930 FOR I = 1 TO N :PRINT #1,
940 B=(2*I-1)/(2*N)
950 PRINT #1,USING K#;P.H(I),O(I);
960 NEXT I
970 CLOSE #1
980 END

```

```

10 OPEN "A:SALIDA.DAT" FOR OUTPUT AS #1
20 DEFINT I-N
30 DEFBL A-H,D-Z
40 DIM G(50),O(50)
50 REM PAUL BARRON TORRES                U.N.A.H.                D.E.P.F.01
60 REM PROGRAMA DE COMPUTO PARA CALCULAR LA CAIDA DE PRESION
70 REM ADIMENSIONAL TOTAL PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE
80 REM SOLUCION DE GASTO CONSTANTE EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO
90 REM DATOS
100 N=50:HWD=100:S=0
110 REM SECUENCIA DE CALCULO
120 FOR J=1 TO N
130 A1=((SQRT(N^2/(HWD^2*(J-.5+N)^2))+1))+1
140 A2=((SQRT(N^2/(HWD^2*(J-.5+N)^2))+1))-1
150 IF (J-.5+N)>0 THEN A=LOG(A1/A2) ELSE A=LOG(A2/A1)
160 F1=((SQRT(N^2/(HWD^2*(J-.5-N)^2))+1))+1
170 F2=((SQRT(N^2/(HWD^2*(J-.5-N)^2))+1))-1
180 IF (J-.5-N)>0 THEN F=LOG(F1/F2) ELSE F=LOG(F2/F1)
190 G(J)=A-F
200 O(J)=.25*G(J)+S
210 NEXT J
220 F1=" 0.00      ###.##### "
230 PRINT #1," PUNTO          PRESION          "
240 PRINT #1,"          Pdhw/h          "
250 FOR I = 1 TO N :PRINT #1,
260 F=(2*I-1)/(2*N)
270 PRINT #1,USING #4;P,O(I):
280 NEXT I
290 CLOSE #1
300 END

```

```

10 OPEN "A:SALIDA.DAT" FOR OUTPUT AS #1
20 DEFINE I=H
30 DEFBEL A=H,0-Z
40 DIM B(50,50),H(50),D(50),P(50)
50 REM PAUL BARRON TORRES                U.N.A.M.                D.E.P.F.I
60 REM PROGRAMA DE COMPUTO PARA UN CALCULAR EL PERFIL DE FLUJO ESTABILIZAD
70 REM Y LOS FACTORES DE DADO PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE DE
80 REM CONDUCTIVIDAD INFINITA EN UN YACIMIENTO SEMI-INFINITO
90 REM DATOS
100 N=25:HWD=100:S=0:R=10
110 REM SECUENCIA DE CALCULO
120 FOR J=1 TO N
130 FOR I=1 TO N
140 A=(HWD/I)*(J-.5+1)
150 AA=(HWD/N)*(J+.5+1)
160 B=(HWD/N)*(J-.5-1)
170 BB=(HWD/N)*(J+.5-1)
180 C=(HWD/N)*(J-.5-1+1)
190 CC=(HWD/N)*(J+.5-1+1)
200 D=(HWD/N)*(J-.5+1-1)
210 DD=(HWD/N)*(J+.5+1-1)
220 A1=(A+SQR(A^2+1))/(B+SQR(B^2+1))
230 AC=(AA+SQR(AA^2+1))/(BB+SQR(BB^2+1))
240 AD=LOG(A1/AC)
250 B1=(C+SQR(C^2+1))/(D+SQR(D^2+1))
260 BC=(CC+SQR(CC^2+1))/(DD+SQR(DD^2+1))
270 B3=LOG(B1/BC)
280 G(I,I)=AD+B3
290 IF J=I THEN G(J,I)=G(J,I)+2*S
300 IF J+1=I THEN G(J,I)=G(J,I)-2*S
310 IF J=N THEN G(J,I)=1
320 NEXT I
330 NEXT J
340 FOR I=1 TO N
350 E=(HWD/N)*(J-.5+R*N)
360 EE=(HWD/N)*(J+.5+R*N)
370 F=(HWD/N)*(J-.5-R*N)
380 FF=(HWD/N)*(J+.5-R*N)
390 C1=(E+SQR(E^2+1))/(F+SQR(F^2+1))
400 C2=(EE+SQR(EE^2+1))/(FF+SQR(FF^2+1))
410 C3=LOG(C1/C2)
420 H(J)=C3*(1/R)
430 IF J=N THEN H(J)=N
440 NEXT J
450 FOR I=1 TO N
460 PIV=G(I,I)
470 II=I+1
480 H(I)=H(I)/PIV
490 IF I=N GOTO 590
500 FOR J=II TO N
510 G(I,J)=G(I,J)/PIV
520 NEXT J
530 FOR J=II TO N
540 FOR K=II TO N
550 G(J,K)=G(J,K)-G(I,K)*G(J,I)

```



```

10 OPEN 'A:EXCJIA.DAT' FOR OUTPUT RE W
20 DEFINT J,K
30 DEFVAL A=H,0=2
40 DIM G(50,50),H(50),O(50),P(50)
50 REM RAUL BARRON TORRES                               D.I.A.M.          D.S.P.F.I
60 REM PROGRAMA DE COMPUTO PARA CALCULAR EL PERFIL DE FLUJO ESTABILIZADO
70 REM Y LOS FACTORES DE DAÑO PARA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE DE
80 REM CONDUCTIVIDAD INFINITA EN UN YACIMIENTO FINITO
90 REM DATOS
100 N=50:HWD=100:R=20:G=0
110 REM SECUENCIA DE CALCULO
120 FOR J=1 TO N
130 FOR I=1 TO N
140 SUM=0
150 FOR K=-5 TO 5
160 A=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N+1)
170 AA=(HWD/N)+(J+.5+2*K*R*N+1)
180 B=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N-1)
190 BB=(HWD/N)+(J+.5+2*K*R*N-1)
200 C=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N-1+1)
210 CC=(HWD/N)+(J+.5+2*K*R*N-1-1)
220 D=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N+1-1)
230 DD=(HWD/N)+(J+.5+2*K*R*N+1-1)
240 A1=(A+SOR(A^2+1))/(B+SOR(B^2+1))
250 A2=(AA+SOR(AA^2+1))/(BB+SOR(BB^2+1))
260 IF (A1/A2)>1E+12 THEN GOTO 280
270 A3=LOG(A1/A2)
280 B1=(C+SOR(C^2+1))/(D+SOR(D^2+1))
290 B2=(CC+SOR(CC^2+1))/(DD+SOR(DD^2+1))
300 IF (B1/B2)>1E+12 THEN GOTO 330
310 B3=LOG(B1/B2)
320 SUM=SUM+A3+B3
330 NEXT K
340 G(J,I)=SUM
350 IF J=I THEN G(J,I)=G(J,I)+2*S
360 IF J=1 THEN G(J,I)=G(J,I)-2*S
370 IF J=N THEN G(J,I)=1
380 NEXT I
390 NEXT J
400 FOR J=1 TO N
410 SUM=0
420 FOR K=-5 TO 5
430 E=(HWD/N)*(J-.5+2*K*R*N+R*N)
440 EE=(HWD/N)*(J+.5+2*K*R*N+R*N)
450 F=(HWD/N)*(J-.5+2*K*R*N-R*N)
460 FF=(HWD/N)*(J+.5+2*K*R*N-R*N)
470 C1=(E+SOR(E^2+1))/(F+SOR(F^2+1))
480 C2=(EE+SOR(EE^2+1))/(FF+SOR(FF^2+1))
490 IF (C1/C2)>1E+12 THEN GOTO 1110
500 C3=LOG(C1/C2)
510 SUM=SUM+C3
520 NEXT K
530 H(J)=SUM*(1/R)
540 IF J=N THEN H(J)=N
550 NEXT J

```



```

600 FOR I=1 TO N
610 PIV=B(I,1)
620 I1=I+1
630 H(I)=H(I)/PIV
640 IF I=N GOTO 700
650 FOR J=I+1 TO N
660 G(I,J)=B(I,J)/PIV
670 NEXT J
680 FOR K=I+1 TO N
690 FOR J=I+1 TO N
700 B(J,K)=B(J,K)-B(I,K)*B(J,I)
710 NEXT J
720 H(I)=H(I)-H(I)*B(I,I)
730 NEXT J
740 NEXT I
750 FOR I=2 TO N
760 J=N-I+1
770 J1=J+1
780 SUM=0
790 FOR K=J1 TO N
800 SUM=SUM+B(J,K)+H(K)
810 NEXT K
820 H(J)=H(J)-SUM
830 NEXT J
840 FOR J=1 TO N
850 FOR I=1 TO N
860 SUM=0
870 FOR K=-5 TO 5
880 A=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N-I)
890 B=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N-I)
900 C=(HWD/N)*(J-.5+2*K*R*N-I+1)
910 D=(HWD/N)*(J-.5+2*K*R*N-I-1)
920 A1=A+SQR(A^2+1)
930 A2=B+SQR(B^2+1)
940 IF (A1/A2)>1E+12 THEN GOTO 970
950 A3=LOG(A1/A2)
960 B1=C+SQR(C^2+1)
970 B2=D+SQR(D^2+1)
980 IF (B1/B2)>1E+12 THEN GOTO 970
990 B3=LOG(B1/B2)
1000 SUM=SUM+A3+B3
1010 NEXT K
1020 G(J,I)=SUM
1030 NEXT I
1040 NEXT J
1050 FOR J=1 TO N
1060 SUM=0
1070 FOR K=-5 TO 5
1080 E=(HWD/N)+(J-.5+2*K*R*N+R*N)
1090 F=(HWD/N)*(J-.5+2*K*R*N-R*N)
1100 C1=E+SQR(E^2+1)
1110 C2=F+SQR(F^2+1)
1120 C3=LOG(C1/C2)
1130 IF (C1/C2)>1E+12 THEN GOTO 1110
1140 SUM=SUM+C3

```

```

1110 PRINT I
1120 PUNTOS=SUM
1130 NEXT J
1140 FOR I=1 TO N
1150 PUNTOS=0
1160 FOR J=1 TO N
1170 SUM=SUM+(N-I)*H(I)
1180 NEXT J
1190 D(I)=.5*SUM+.5*(I)-.5*(I)*I/N
1200 NEXT J
1210 LOC=" " W.L.#0      #00.000000      #00.000000 "
1220 PRINT #1," PUNTO..      GASTO      Sp-torno/h
1230 PRINT #1,"              g/h#z/qw
1240 FOR I = 1 TO N :PRINT #1,
1250 P=(I*I-1)/(I*N)
1260 PRINT #1,USING #0:P,H(I),D(I);
1270 NEXT I
1280 CLOSE #1
1290 END

```

## APENDICE C

DISCUSION SOBRE LA APLICACION DE LOS TIEMPOS DE TERMINACION DEL PERIODO DE FLUJO RADIAL, INICIO DEL FLUJO PSEUDO-RADIAL Y EL TIEMPO DE INTERSECCION DE AMBOS PERIODOS PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD VERTICAL  $k_z$ .

Tiempo de terminación del período de flujo radial ( $t_{D1}$ )

Haciendo  $N=1$  y  $h \rightarrow \omega$  podemos escribir la ecuación (32) de la siguiente forma:

$$b^P_D = \frac{1}{4} \int_0^{t_D} \frac{e^{-r_D^2/4t_D}}{t_D} \left[ -\operatorname{erf} \frac{(z_D - h_{wD})}{\sqrt{4t_D}} + \operatorname{erf} \frac{(z_D + h_{wD})}{\sqrt{4t_D}} \right] dt_D$$

+ 5 (C-1)

Por lo tanto, para:

$$\frac{(z_D - h_{wD})}{\sqrt{4t_{D1}}} \approx -5 \quad (C-2)$$

$$\frac{(h_{wD} - z_D)}{\sqrt{4t_{D1}}} \approx -5 \quad (C-3)$$

La ecuación (C-1) toma la forma de la solución de línea fuente.

Para el caso de pozos parcialmente penetrantes terminados en la cima o en la base de la formación:

$$t_{D_0} \leq 0.00135 h_{wD}^2 \quad (C-4)$$

Para pozos terminados en el centro de la formación:

$$t_{D_1} \leq 0.00078125 h_{wD}^2 \quad (C-5)$$

El pozo se comportará como un pozo totalmente penetrante cuyo espesor de la formación será  $h_w$ . Estos tiempos adimensionales fueron calculados con un error de 0%. Si nosotros consideramos un error del 1%:

$$t_{D_1} \leq 0.0078125 h_{wD}^2 \quad (C-6)$$

$$\text{y } t_{D_1} \leq 0.001953125 h_{wD}^2 \quad (C-7)$$

respectivamente, por lo que se demuestra que no es confiable la determinación de la permeabilidad vertical del tiempo final del periodo de flujo radial.

Tiempo de inicio del flujo pseudoradial ( $t_{D_2}$ )

Como se demostró anteriormente, la solución de flujo uniforme y conductividad infinita concuerdan si la presión es evaluada en el 75% de la cima o en el fondo del intervalo abierto. Nosotros podemos usar la expresión presentada por Gringarten<sup>33</sup> para desarrollar una expresión

para el inicio del flujo pseudoradial.

La solución de flujo uniforme para pozos parcialmente penetrantes terminados en la cima o en la base de la formación es:

$$\Delta P(r, z, t) = \frac{q_w \mu}{4\pi k_r h} \int_0^l e^{-r^2/4\eta_r \tau} \left[ 1 + \frac{4}{\pi b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{(-n^2 \pi^2 \eta_z t/h^2)} \operatorname{sen} \frac{n\pi b}{2} \cos \frac{n\pi b}{2} \cos \frac{3}{4} n\pi b \right] \frac{\delta \tau}{\tau} \quad (C-8)$$

Derivando (C-8) con respecto al logaritmo natural del tiempo:

$$\frac{\delta \Delta P(r, z, t)}{\delta \ln(t)} = \frac{q_w \mu}{4\pi k_r h} e^{-r^2/4\eta_r t} \left[ 1 + \frac{2}{\pi b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{(-n^2 \pi^2 \eta_z t/h^2)} \operatorname{sen} n\pi b \cos \frac{3}{4} n\pi b \right] \quad (C-9)$$

Por lo tanto, el inicio del periodo de flujo pseudoradial es cuando el lado derecho de la ecuación (C-9) permanece constante; esto es, cuando:

$$\frac{k_r t_2}{\phi \mu C r^2} \geq 25 \quad (C-10)$$

$$\frac{k_z t_D}{\phi \mu C h^2} \geq \frac{1}{2} \quad (C-11)$$

En variables adimensionales:

$$\frac{t_{Dz}}{r_D^2} \geq 25 \quad (C-12)$$

$$\frac{t_{Dz}}{h_D^2} \geq \frac{1}{2} \quad (C-13)$$

Ahora, si consideramos un error de 1%

$$0.01 = e^{(-\pi^2 k_z t / \phi \mu C h^2)} \frac{2}{\pi b} \operatorname{sen} \pi b \cos \frac{3}{4} \pi b \quad (C-14)$$

$$\frac{t_{Dz}}{h_D^2} \geq 0.1267 \quad (C-15)$$

Por lo cual concluimos que no es apropiado determinar la permeabilidad vertical con el tiempo final del periodo de flujo radial o el de inicio de flujo pseudoradial del análisis de datos de pruebas de presión.

Tiempo de intersección de los periodos de flujo radial y pseudoradial ( $t_D^*$ )

Para este tiempo, las soluciones para el periodo de flujo radial y

pseudoradial son iguales, por lo tanto:

periodo de flujo radial

$$F_D = \frac{1}{2b} (\ln t_D + 0.80907) + \frac{S}{b} \quad (C-16)$$

periodo de flujo pseudoradial

$$F_D = \frac{1}{2} (\ln t_D + 0.80907) + \frac{S}{b} + S_P \quad (C-17)$$

Igualando las ecuaciones (C-16) y (C-17):

$$\frac{1}{2b} (\ln t_D^* + 0.80907) + \frac{S}{b} = \frac{1}{2} (\ln t_D^* + 0.80907) + \frac{S}{b} + S_P \quad (C-18)$$

de donde:

$$t_D^* = e^{(2S_P / (1/b - 1) - 0.80907)} \quad (C-19)$$

$$y \quad S_P = \frac{1}{2} \left[ (\ln t_D^* + 0.80907) \left( \frac{1}{b} - 1 \right) \right] \quad (C-20)$$

Con la ecuación (C-20) podemos construir una gráfica de  $S_P$  contra  $\log t_D^*$  (figura C-1).

Ahora, conociendo  $S_P$  y  $b$  estamos en posibilidades de determinar la permeabilidad vertical como se muestra en el ejemplo de aplicación. Utilizando las pendientes de los periodos de flujo radial y pseudoradial

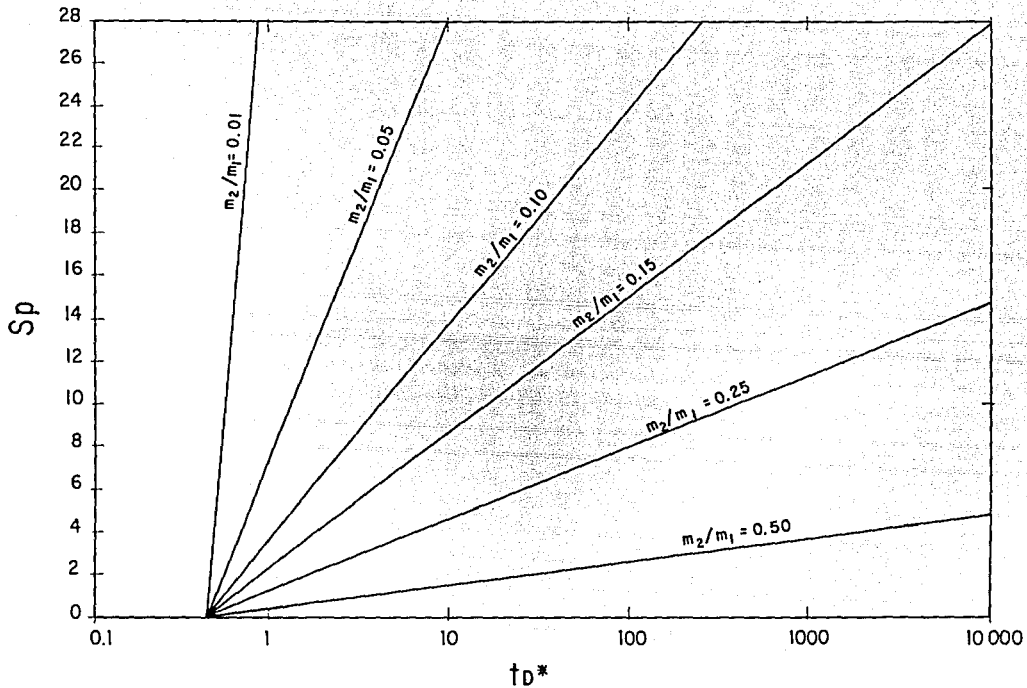


FIGURA C-1 FACTOR DE PSEUDODAÑO  $Sp$  Vs. TIEMPO ADIMENSIONAL  $t_D^*$

$$t_D^* = \frac{0.042926 t^* q B}{\phi c r w^2 h w m_1}$$



podemos escribir la ecuación (C-20) de la siguiente forma:

$$S_p = \frac{1}{2} \left[ \left( \ln \frac{0.042926 t^* q_B}{\phi C_v \frac{2}{h_w} m_1} + 0.80907 \right) \left( \frac{m_1}{m_2} - 1 \right) \right] \quad (C-21)$$

Para el ejemplo de aplicación,  $t^* = 1.5$  horas (figura 29).

$$S_p = \frac{1}{2} \left[ \left( \ln \frac{(0.042926)(1.5)(4441)(1.73)}{(0.03)(2.096 \times 10^{-06})(0.27)^2(131.2)(266.4)} + 0.80907 \right) \left( \frac{266.4}{122.6} - 1 \right) \right]$$

$$S_p = 7.89$$