

Universidad Nacional Agraria La Molina

Programa Académico de Ingeniería Agrícola

Programa Académico de Graduados

Especialidad de Ingeniería de Recursos de Agua y Tierra



**« Estudio del Comportamiento Hidrodinámico
del Filtro Protector Laminar L M en el
Flujo Radial hacia Pozos de Agua »**

Tesis presentada por:

Toribio Sebastián Santayana Vela

Para optar el Título de

INGENIERO AGRICOLA

GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERIA

DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA

LIMA - PERU

1981

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
TITULO	i
COMITE CONSEJERO Y JURADO EXAMINADOR	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
RESUMEN	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE CUADROS	xvii
SIMBOLOS USADOS	xx
I. INTRODUCCION	
1.1 Generalidades	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Objetivos	3
II. REVISION DE BIBLIOGRAFIA	
2.1 El Medio Poroso	4
2.1.1 Generalidades	4
2.1.2 Análisis Granulométrico	5
2.1.2.1 Curva Granulométrica	6
2.1.2.2 Análisis de la Curva Granulométrica	8
2.2 El Fluído	11
2.3 Flujo a través de Medios Porosos	12
2.3.1 Principios de Hidrodinámica en Medios Porosos	12

	Pág.
2.3.2 Ecuaciones Fundamentales de la Hidrodinámica	13
2.3.2.1 Ecuaciones de Euler	13
2.3.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes	14
2.3.2.3 Ecuación de Hagen-Poiseville	15
2.3.2.4 Ecuación de Laplace	17
2.3.3 Regímenes de Flujo en Medios Porosos	19
2.3.4 Flujo Radial en un Acuífero Confinado	22
2.4 Los Filtroprotectores	26
2.4.1 Consideraciones Generales	26
2.4.2 Clases de materiales filtroprotectores	29
2.4.3 Determinación de la Necesidad de Filtroprot.	30
2.4.4 Criterios de diseño	31
2.4.4.1 Bertram-Terzaghi	31
2.4.4.2 U.S. Army Corps of Engineers	33
2.4.4.3 Karpoff (USBR, 1955)	35
2.4.4.4 Johnson (1966)	36
2.4.4.5 G. Orozco (1971)	38
2.4.4.6 Walton	38
2.4.5 Espesor del Filtroprotector	38
2.4.6 Consideraciones sobre el arrastre de finos	39
2.5 Comportamiento Hidrodinámico del Medio Poroso	40
2.6 Estudios Similares	41
III. MATERIALES Y EQUIPOS	
3.1 Materiales Filtroprotectores	61
3.2 Suelo Base	61
3.3 Fluido	61
3.4 Otros Materiales	62
3.5 Equipos	62
3.5.1 Caracterización del Medio Poroso	62
3.5.2 Comportamiento Hidrodinámico	62

	Pág.
3.5.2.1 Descripción del Permeámetro Converg.	62
a) Tanque de Prueba	63
b) Tablero Manométrico	72
c) Tanque de Regulación de Carga Entr.	75
d) Tanque de Regulación de Carga Salid.	78
e) Torre de Elevación	80
f) Mangueras de Circulación	80
3.5.2.2 Otros Equipos	82
IV. METODOS Y PROCEDIMIENTOS	
4.1 Selección de los Materiales Filtroprotectores	84
4.2 Caracterización de los Materiales Filtroprotectores	84
4.3 Comportamiento Hidrodinámico	85
a) Armado e instalación del Tanque de Prueba	85
b) Cargado del Tanque de Prueba	85
c) Puesta en funcionamiento del Sistema	86
d) Realización de las pruebas y toma de datos	87
e) Cambio de materiales	89
f) Cambio de rejilla	89
g) Evaluación de los datos experimentales	89
V. RESULTADOS Y ANALISIS	
5.1 Caracterización de los materiales empleados	91
5.1.1 Material F-P Laminar Natural	93
5.1.2 Filtroprotector Laminar LM-4, LM-8 y LM-16	95
5.1.3 Suelo Base	95
5.2 Comportamiento Hidrodinámico de los F-P Laminares	98
5.2.1 Relación Carga Hidráulica (h) - distancia al centro del pozo (r)	100

	Pág.
5.2.1.1 Sistema Suelo Base - Sin Filtroprotec.	100
5.2.1.2 Sistema Suelo Base - Filtroprotec. LM4	102
5.2.1.3 Sistema Suelo Base - Filtroprotec. LM8	105
5.2.1.4 Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM8-16	105
5.2.1.5 Sistema Suelo Base - Filtroprotec. LM16	108
5.2.1.6 Comparativo de los análisis de los re- sultados en los Sistemas Suelo Base - Filtroprotector Laminar LM	108
5.2.2 Redes de Flujo	110
5.2.3 Relación Caudal Total (Q) - Rebatiimiento Total (S)	112
5.2.4 Relación Caudal Total (Q) - Rebatiimiento entre los piezómetros 2 y 8 (S_{2-8}) - (Suelo Base)	119
5.2.5 Relación Descarga Específica (q_{40}) - Gradiente entre los piezómetros 2 y 8 (J_{2-8}) - (Suelo Base)	121
5.2.6 Relación entre la Descarga Específica, q_{15} - Gradiente formado entre los piezómetros 9 y 17, J_{9-17}	123
5.2.7 Resistencia de Entrada	125
5.2.8 Número de Reynolds	128
5.2.9 Relación Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia	130
 VI. CONCLUSIONES	 133
 VII. RECOMENDACIONES	 136
 VIII. BIBLIOGRAFIA	 137
 IX. ANEXO	 142

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en el estudio del flujo del agua en estado permanente en la inmediata vecindad de un pozo.

El estudio incide en la modificación del flujo de entrada al pozo por efecto de la introducción del material filtroprotector Laminar L.M. alrededor del filtro entubado o rejilla.

Se utilizó el método del Permeámetro Convergente, para lo cual fue necesario construir un modelo especial en el Laboratorio que simula el flujo radial del agua hacia un pozo de captación, ubicado en un acuífero confinado.

Los materiales Filtroprotectores Laminares L.M. en estudio fueron: F-P LM 4, F-P LM 8 y F-P LM 16, los cuales fueron colocados alrededor de la rejilla con 2" y 4" de espesor.

Se describe el diseño y construcción del modelo, luego las pruebas efectuadas en el modelo y se presentan las mediciones y los resultados de las pruebas realizadas.

Se establecen los materiales F-P Laminares y el espesor más eficiente desde el punto de vista del comportamiento hidrodinámico en la inmediata vecindad del pozo.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Explicación	Pág.
1	Representación gráfica de curvas granulométricas típicas.	7
2	Red de flujo mostrando la ortogonalidad entre las líneas equipotenciales (ϕ) y las líneas de corriente (ψ).	21
3	Relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds para el flujo en medios porosos (según Rose).	21
4	Pozo en una isla circular	23
5	Pozo con filtroprotector en una isla circular.	23
6	Variaciones del descenso total en función del caudal de extracción (según Rorabaugh).	27
7	Franja granulométrica del Filtroprotector adecuado para un determinado suelo. Según Bertram-Terzaghi.	32
8	Franja granulométrica del Filtroprotector adecuado para un grupo de suelos según Bertram-Terzaghi.	34
9	Franja granulométrica del Filtroprotector adecuado para un determinado suelo, según Karpoff (USBR).	37
10	Curvas de caída de potencial a lo largo del nivel de referencia horizontal para diferentes niveles de agua en el tanque de arena para tubos de arcilla. a) Sin filtroprotector. b) Con F-P granular Camaná de 1/2" de espesor, geometría A. c) Con F-P Laminar 8 de 1/2" de espesor, geometría A. De La Colina.	44

Figura	Explicación	Pág.
11	Curvas de caída de potencial a lo largo del nivel de referencia horizontal para diferentes niveles de agua en el tanque de arena, para tubos de plástico. a) Sin Filtroprotector. b) Con F-P granular Camaná de 1" de espesor, geometría A. c) Con F-P Laminar de 1" de espesor, geometría A. De La Colina.	45
12	Curvas de caída de potencial a lo largo del nivel de referencia, para diferentes niveles de agua. Tubo plástico, F-P Laminar 16 de 3" de espesor, geometría A. De La Colina.	46
13	Relaciones de descarga unitaria y carga hidráulica obtenidas en el tanque de arena para varios tipos de F-P. De La Colina.	48
14	Curvas granulométricas de los materiales F-P experimentados.	49
15	Relación entre la descarga específica y el gradiente que se forma entre el Piezómetro 1 y 4 (Material Filtroprotector) del Hidroconductivímetro.	52
16	Relación de pérdidas de carga sobre la curva de descenso para un pozo que penetra parcialmente en un acuífero confinado.	55
17	Pérdidas de carga hidráulica por efecto del ranurado del pozo. Diámetro del entubado 18 ^o . Vallejos (35).	57
18	Diagrama Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia para flujo paralelo y flujo convergente. Wright (38).	60

Figura	Explicación	Pág.
19	Diagrama del tanque de prueba (permeámetro convergente).	64
20	Tanque de Prueba, mostrando sus partes esenciales.	65
21	Pared del tanque que contiene los piezómetros, mostrando la disposición de éstos.	67
22	Detalle de instalación de los piezómetros.	67
23	Rejilla cribada utilizada en el tanque de prueba (proyección).	70
24	Rejilla ranurada (8rpv) utilizada en el tanque de prueba (proyección).	70
25	Perspectiva del tanque de prueba con su armadura de soporte.	71
26	Perspectiva del tablero manométrico.	73
27	Elevación principal del tablero manométrico.	74
28	Detalle de interconexión de los tubos de vidrio en el tablero manométrico.	76
29	Tanque de Regulación de Carga de Entrada.	77
30	Tanque de Regulación de Carga de Salida.	79
31	Torre de elevación para el control de la carga hidráulica de entrada al Tanque de Prueba.	81
32	Diagrama del Sistema de Circulación de agua.	83
33	Representación esquemática del funcionamiento del Permeámetro convergente con respecto al flujo de agua a través de sus partes esenciales.	87

Figura	Explicación	Pág.
34	Tablero manométrico mostrando las lecturas de potencial (en cm. de mercurio) de una de las pruebas efectuadas.	88
35	Curva granulométrica del F-P Laminar LM en condiciones naturales.	94
36	Curvas granulométricas de los tres tipos de F-P Laminar LM.	96
37	Curva granulométrica del Suelo Base empleado en el Tanque de Prueba.	97
38	Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. Sin Filtroprotector.	101
39	Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. Con F-P Laminar LM-4. a) Espesor 5 cm (2"). b) Espesor 10 cm (4"). Rejilla cribada.	103
40	Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico, con F-P Laminar LM-8. a) Espesor 5 cm (2"). b) Espesor 10 cm (4"). Rejilla cribada.	106
41	Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. a) Con F-P Laminar LM-8; espesor 10 cm (4"). b) Con F-P Laminar LM-8 y LM-16, espesor 10 cm (4"). Rejilla ranurada.	107

Figura	Explicación	Pág.
42	Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico, con F-P Laminar LM-16. a) Espesor 5 cm (2"). b) Espesor 10 cm (4"). Rejilla cribada.	109
43	Red de flujo para una de las pruebas del sistema Suelo Base sin Filtroprotector.	111
44	Redes de flujo para una de las pruebas del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM-4. a) Espesor F-P=2". b) Espesor F-P=4". Rejilla cribada.	113
45	Redes de flujo para una de las pruebas del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM-8. a) Espesor de F-P=2". b) Espesor de F-P=4". Rejilla cribada.	114
46	Redes de flujo para una de las pruebas de a) Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM-8-4"; b) Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM-8-16-4". Rejilla ranurada.	115
47	Redes de flujo para una de las pruebas del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM-16. a) Espesor F-P=2". b) Espesor F-P=4". Rejilla cribada.	116
48	Relación entre el caudal total y el rebatimiento total.	117
49	Relación entre el caudal total, Q, y el rebatimiento producido entre los piezómetros 2 y 8, S_{2-8} (Suelo Base).	120

Figura	Explicación	Pág.
50	Relación entre la Descarga Específica a 40 cm del eje del pozo, q_{40} y el gradiente hidráulico entre los piezómetros 2 y 8, J_{2-8} (Suelo Base).	122
51	Relación entre la Descarga Específica, q_{15} y el Gradiente entre los piezómetros 9 y 17, J_{9-17} .	124
52	Relaciones de Descarga Unitaria, q_u y Pérdidas de carga producidas entre los piezómetros 9 y T_s .	127
53	Diagrama Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia, para los sistemas con F-P Laminares.	132

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Explicación	Pág.
1	Diametro Medio (Dm) y Coeficiente de Uniformidad (Cu) de los materiales filtroprotectores.	51
2	Porosidad total, Retentividad Específica y Porosidad Drenable de los materiales filtroprotectores.	51
3	Valores de conductividad hidráulica de los F-P.	51
4	Diámetro Medio (Dm) de los materiales empleados en la presente investigación (mm).	92
5	Coeficiente de Uniformidad, Cu.	93
6	Factor de corrección R_p para la viscosidad del agua a varias temperaturas.	143
7	Formato de tabulación de datos para las pruebas experimentales realizadas en el Permeámetro Convergente.	144
8	Análisis granulométrico del Filtroprotector Laminar LM en condiciones naturales.	145
9	Análisis granulométrico del Filtroprotector Laminar LM-4.	146
10	Análisis granulométrico del Filtroprotector Laminar LM-8.	147
11	Análisis granulométrico del Filtroprotector Laminar LM-16.	148

Cuadro	Explicación	Pág.
12	Análisis granulométrico del Suelo Base.	149
13	Resultados de las pruebas efectuadas sin Filtro-protector.	150
14	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector Laminar LM-4; espesor de 5 cm (2"). Rejilla cribada.	151
15	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector Laminar LM-4; espesor de 10 cm (4"). Rejilla cribada.	152
16	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector LM-8; espesor de 5 cm (2"). Rejilla cribada.	153
17	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector LM-8; espesor de 10 cm (4"). Rejilla cribada.	154
18	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector Laminar LM-8; espesor 10 cm (4"). Rejilla ranurada.	155
19	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector LM 8-16; espesor 10 cm (4"). Rejilla ranurada.	156
20	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector Laminar LM-16; espesor de 5 cm (2"). Rejilla cribada.	157
21	Resultados de las pruebas efectuadas con Filtro-protector LM-16; espesor 10 cm (4") con rejilla cribada.	158

Cuadro	Explicación	Pág.
22	Valores de Caudal Total, Descarga Específica a 40 cm del centro del pozo y Gradiente Hidráulico entre los piezómetros 2 y 8.	159
23	Valores de Caudal Total, Descarga Específica a 15 cm del centro del pozo y Gradiente Hidráulico entre los piezómetros 9 y 17.	160
24	Valores de Caudal Total, Caudal Unitario y Pérdidas de Carga entre los piezómetros 9 y T _S , para cada secuencia experimental.	161
25	Valores de Número de Reynolds, calculados en base a los resultados experimentales para cada uno de los sistemas estudiados, a diferentes distancias del centro del pozo.	162
26	Valores de Coeficiente de Resistencia (λ) y Número de Reynolds (Re) calculados para cada uno de los sistemas con material F-P Laminar.	167

SIMBOLOS USADOS

A	Area transversal al flujo.
B	Fuerza volumétrica.
C	Tubo manométrico de control.
CE	Conductividad Eléctrica.
Cu	Coefficiente de Uniformidad.
Cu _f	Coefficiente de Uniformidad del filtroprotector.
Cu _s	Coefficiente de Uniformidad del Suelo Base.
DCR	Departamento de Construcciones Rurales.
Dm	Diámetro Medio.
DRAT	Departamento de Recursos de Agua y Tierra.
Dx	Diámetro tal que, en la curva acumulativa exista x% en peso de granos cuyos diámetros son menores o iguales que Dx.
D ₁₀	Diámetro eficaz.
D _{15f}	Diámetro relativo al porcentaje que pasa, igual al 15% del material filtroprotector.
D _{85s}	Diámetro relativo al porcentaje que pasa, igual al 85% del Suelo Base.
F	Fuerza volumétrica por unidad de masa.
F-P	Filtroprotector.
F-P L.M.	Filtroprotector Laminar "La Molina".
F-P LM 4-2"	Filtroprotector Laminar 4 con 2" de espesor y con rejilla cribada.
F-P LM 8-4"(*)	Filtroprotector Laminar 8 con 4" de espesor y con rejilla ranurada.
F-P LM 16-4"	Filtroprotector Laminar 16 con 4" de espesor y con rejilla cribada.

g	Aceleración de la gravedad.
H	Espesor del acuífero confinado.
h	Carga hidráulica, carga piezométrica.
h_i	Pérdidas de carga hidráulica debido a la resistencia de entrada.
h_f	Pérdidas de carga a través del filtro protector.
h_s	Pérdidas de carga a través del Suelo Base.
h_{g-s}	Pérdidas de carga entre los piezómetros 9 y Ts.
J	Gradiente hidráulico.
J_{1-4}	Gradiente hidráulico entre los piezómetros 1 y 4.
J_{2-8}	Gradiente hidráulico entre los piezómetros 2 y 8.
J_{9-17}	Gradiente hidráulico entre los piezómetros 9 y 17.
K	Conductividad hidráulica
K_1	Conductividad hidráulica del material filtro protector.
K_2	Conductividad hidráulica del Suelo Base.
L	Espaciamiento entre drenes.
L	Longitud.
MC	Mangueras de circulación.
n	Porosidad total.
p	Presión.
$P/\rho g$	Carga de presión.
Q	Descarga total.
q	Descarga específica.
q_m	Velocidad aparente de flujo a través del medio poroso.
q_r	Descarga específica a una distancia r del centro del pozo.
q_u	Descarga unitaria.
R	Radio

R	Descarga normativa.
Re	Número de Reynolds.
Re	Número de Reynolds en los poros.
rpv	Ranuras por vuelta.
Re	Factor de corrección por temperatura.
r_w	Radio del pozo.
S	Rebatimiento
S ₂₋₈	Rebatimiento entre los piezómetros 2 y 8.
t	Tiempo
Te	Piezómetro del tanque de regulación de entrada.
TE	Torre de elevación.
TM	Tablero manométrico.
TP	Tanque de Prueba.
TRE	Tanque de regulación de entrada.
TRS	Tanque de regulación de salida.
Ts	Piezómetro del tanque de regulación de salida.
u	Velocidad de flujo en el eje X.
v	Velocidad de flujo en el eje Y.
\vec{V}	Vector de velocidad.
w	Velocidad de flujo en el eje Z.
Wi	Resistencia de entrada.
Z	Carga de posición.
ρ	Densidad del fluido.
μ	Viscosidad dinámica.
ν	Viscosidad cinemática.
Δ	Incremento.

∇	Operador Nabla.
∇^2	Operador Laplaciano.
Σ	Sumatoria.
ϕ	Diámetro
ϕ	Carga hidráulica o carga piezométrica.
ϕ	Potencial de velocidad o Función de Potencial.
ψ	Función de corriente.
Π	Pi = 3.1416
δg	Longitud característica (diámetro) de los granos del medio poroso.
λ	Coefficiente de resistencia.

I. INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

Uno de los factores limitantes del desarrollo de las zonas áridas del mundo, lo constituye el recurso hídrico. La Costa Peruana, debido a sus condiciones climáticas e hidrológicas (precipitaciones anuales menores de 25 mm.), es eminentemente una zona árida. En esta región existe déficit de agua, tanto para uso agrícola, industrial, como doméstico, durante la mayor parte del año.

Un elemento importante para tratar de minimizar la limitación y el déficit de agua mencionado lo constituye el uso de las aguas subterráneas. Así tenemos que la agricultura de la costa se sostiene por lo menos 7 meses al año a base de agua subterránea; en cuanto a la industria, casi la totalidad de su funcionamiento depende del agua subterránea; y, en cuanto al uso doméstico, la mayoría de ciudades y pueblos del Perú utilizan para el consumo humano el agua subterránea mediante el uso de pozos. En los períodos de sequía, como el recientemente pasado, el uso del agua subterránea adquiere mucha mayor importancia.

Por otro lado, el Perú es un país cuya producción de alimentos es deficitaria. Para encarar este problema es necesario realizar tres acciones fundamentales en el campo agrícola: ampliación de la frontera agrícola, mejoramiento del riego de miles de hectáreas, y; recuperación de tierras afectadas con problemas de salinidad y/o drenaje.

Considerando solamente los valles de la costa con mayor área de tierras cultivables, Chancay, Piura, Chicama y Jequetepeque; todos ellos presentan un fuerte déficit del recursos agua, requiriendo en forma prioritaria el mejoramiento del riego de la totalidad de las tierras actualmente cultivadas.

La solución para mejorar estas tierras, aparte de los grandes proyectos hidráulicos que se efectúan a largo plazo, es la explotación de las aguas subterráneas, que son obras ejecutables a corto plazo.

Los caudales de explotación promedio de los pozos de la Costa Peruana varían entre 30 y 40 lt/s., los cuales pueden ser superados considerablemente si se mejoran las técnicas de captación de las aguas subterráneas, ya que en la mayoría de los casos las obras son efectuadas al azar y en forma por demás empírica.

El factor que más influye en la Eficiencia o Capacidad Específica de los pozos (rendimiento por unidad de descenso de nivel) es el diseño y la construcción de la rejilla así como el paquete de material filtrante a emplearse. Gibson-Singer (8).

Al respecto, Maraví (20), dice que "es necesario mantener una Capacidad Específica tan grande como sea posible, sin bombear arena con el agua. Con esto se consigue una reducción de los gastos de instalación, del costo de mantenimiento y operación y se prolonga el período de vida útil del pozo". De La Cruz (6), menciona que "de la carencia de un paquete de grava filtrante alrededor del pozo, se desprende la conclusión de la presencia en el futuro de graves problemas de arenamiento, desgaste de equipos, obturación de ranuras y ventanas y lógicamente, una disminución considerable en la producción de los pozos".

Por todo lo mencionado anteriormente se tiene que un importante campo de investigación de recursos de agua, es el estudio del agua subterránea, en lo que respecta a su dinámica, especialmente en el flujo hacia los pozos de captación. Y, dentro de este contexto, el estudio de las modificaciones producidas en las condiciones del flujo de entrada de agua a los pozos como consecuencia de la introducción del filtro protector Laminar L.M. alrededor de la rejilla o filtro entubado del pozo.

1.2 ANTECEDENTES

En el año 1968 se inició en el Departamento de Recursos de Agua y Tierra, una línea de investigación sobre materiales filtroprotectores, la cual desembocó en la obtención del Filtroprotector Laminar L.M. (La Molina), el cual ha sido sometido a una serie de experiencias orientadas fundamentalmente a su empleo en sistemas de Drenaje Subterráneo.

Su empleo en pozos de captación de agua subterránea no ha sido estudiado hasta la actualidad, lo cual sitúa al presente trabajo como uno de los primeros que se realizan al respecto.

1.3 OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación son:

1. Analizar el flujo radial del agua bajo la acción de diferentes cargas hidráulicas de funcionamiento que se produce en un modelo construido en el Laboratorio de Drenaje y Aguas Subterráneas de la UNA.
2. Estudiar la modificación de las condiciones de flujo en la inmediata vecindad del pozo por efecto de la introducción del material Filtroprotector Laminar L.M.
3. Establecer comparativamente el comportamiento hidrodinámico de los diferentes tipos de Filtroprotector Laminar L.M.
4. Determinar los sistemas con material F-P Laminar L.M. de mayor eficiencia de funcionamiento en el flujo de agua hacia los pozos de captación de aguas subterráneas.

II. REVISION DE BIBLIOGRAFIA

2.1 EL MEDIO POROSO

2.1.1 Generalidades

Para estudiar el flujo de fluídos a través de medios porosos es necesario, primeramente definir que se entiende por "medios porosos" y por "fluído".

Según Scheidegger (25) los "medios porosos" son definidos como cuerpos sólidos que contienen "poros". Entendiéndose como "poros" a los espacios vacíos, los cuales están distribuidos a través del material.

Existen espacios vacíos extremadamente pequeños que son denominados "intersticios moleculares", otros muy grandes que se denominan "cavernas". Los "poros" son espacios vacíos intermedios entre los intersticios moleculares y las cavernas.

Los fenómenos hidrodinámicos tienen lugar en el interior de los "poros", por esto es importante un mayor conocimiento de éstos.

Los "poros" en un sistema poroso pueden estar interconectados o no. El flujo intersticial es posible sólo si los poros están interconectados. La parte interconectada de un sistema poroso se denomina el espacio poroso efectivo.

En problemas de movimiento de agua subterránea, la formación (acuífero) es considerado como medio continuo que contiene muchas aberturas interconectadas las que sirven como trayectoria del fluído. Esta formación como un medio continuo de muchas aberturas interconectadas, es un "medio poroso", Scheidegger-Liao (26).

Los "medios porosos" están caracterizados por una serie de propiedades geométricas. Estas son muy importantes para de-

finir el comportamiento de un "medio poroso", frente a un estímulo cualquiera.

La forma y dimensión de la partícula determina la forma y dimensión de los espacios, de donde se deduce que la forma de la partícula tiene un carácter decisivo en el comportamiento del medio poroso. Los granos tienen formas irregulares, por lo cual su tamaño no es fácil de definir. El tamaño o distribución del tamaño de los granos, es determinado mediante el análisis mecánico. Pero aún cuando el tamaño de grano (v.g. diámetro más grande), es conocido, la forma es desconocida. Los granos que pasan a través de un tamiz y no pasan a través de otro más pequeño, no son necesariamente todos iguales.

Una de las principales propiedades geométricas que caracterizan un medio poroso es la relación de vacíos al volumen total. Esta relación se denomina Porosidad.

Otras propiedades geométricas son la superficie específica y la tortuosidad. La primera se define como la superficie de poros por unidad de volumen, y la segunda como la relación entre la longitud real del trayecto del flujo a la longitud del medio poroso. Scheidegger-Liao (26).

2.1.2 Análisis Granulométrico

Considerando el medio poroso como un conductor de fluidos, una de las características importantes es la granulometría, definida como "el tamaño de las partículas que lo constituyen en una distribución porcentual dada". RHODIA (24). El objetivo es la separación de las partículas del material poroso, en fracciones que las contengan de un mismo tamaño aproximado, fijando en porcentaje el peso total de la cantidad contenida. Krynine-Judd (17).

Los métodos más usados en el análisis granulométrico son: el análisis con tamiz, para partículas grandes y el análisis

hidrométrico, para partículas pequeñas.

En el análisis con tamiz o mallas, el material pasa a través de tamices cuyas aberturas son cuadradas y de una dimensión específica, luego, el tamaño de las partículas así definidas, está basado en la abertura del tamiz, Lambe-Whitman (19).

El análisis hidrométrico se basa en la "Ley de Stokes, que fija la velocidad de caída -dependiente del tamaño, densidad y forma- de una partícula esférica de diámetro determinado que sedimenta en un líquido en reposo". Baver-Gardner (1).

Según Bear, J. (2) "el método más directo para separar las partículas de distinto tamaño, consiste en el uso de tamices. El número del tamiz expresa el número de mallas por pulgada de tejido".

2.1.2.1 Curva Granulométrica

En el análisis granulométrico, la muestra tomada, es previamente pesada, pasándose por tamices de mallas cada vez más pequeñas; luego se pesan las fracciones que han quedado en cada tamiz. Los resultados de las mediciones son ploteadas en un diagrama semilogarítmico, dando como resultado la curva granulométrica acumulada.

"Los diámetros de las partículas, que corresponden a las dimensiones interiores de las mallas de los tamices, expresados en milímetros, se colocan en las abscisas logarítmicas en un valor creciente a partir del origen".

Los pesos acumulados de las fracciones que han pasado a través de los tamices expresados en porcentaje del total de la muestra, se colocan en las ordenadas aritméticas". Castany (3). Lo dicho es ilustrado en la Fig. 1, donde se representa tres curvas granulométricas típicas.

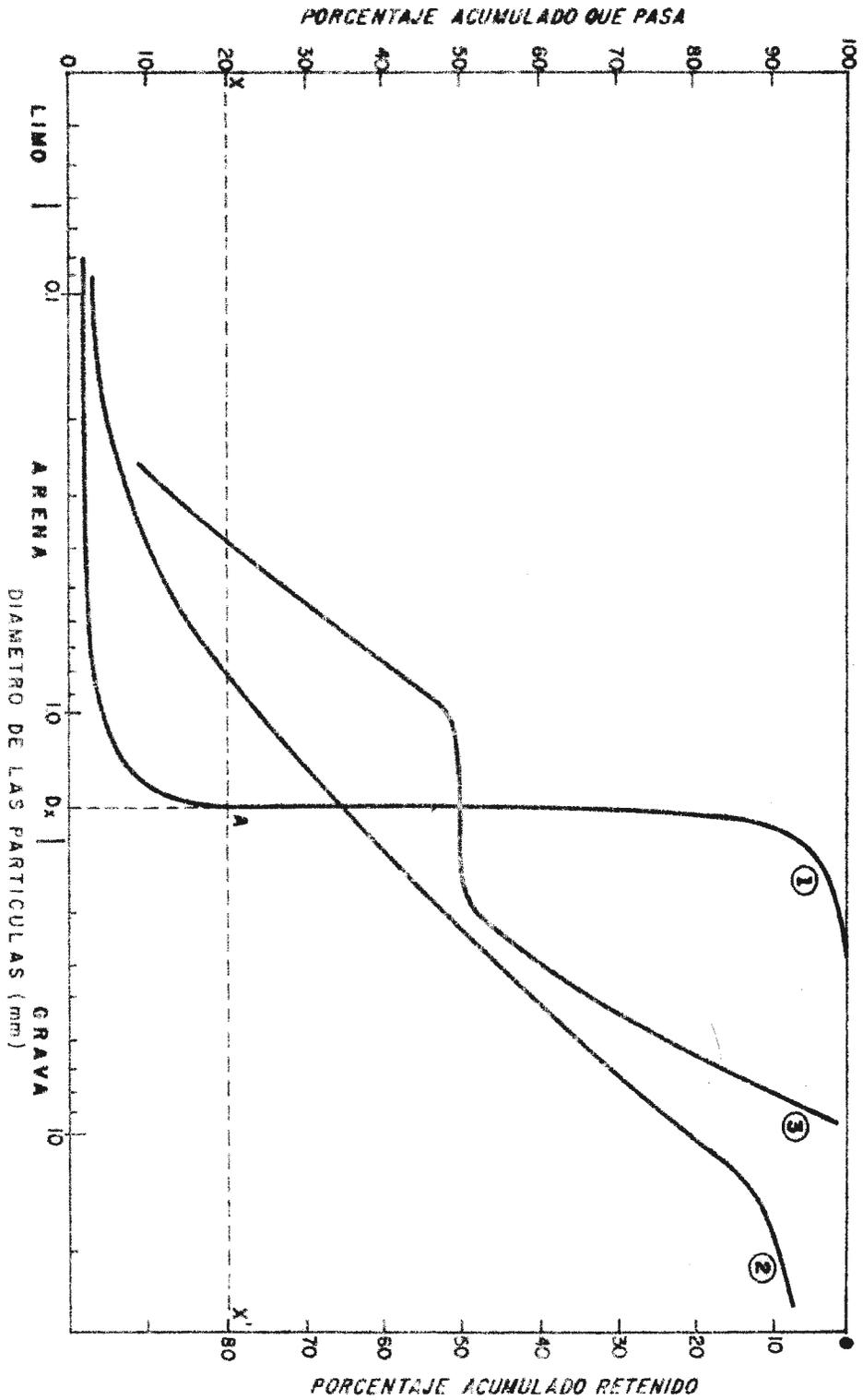


FIGURA 1. REPRESENTACION GRAFICA DE CURVAS GRANULOMETRICAS TYPICAS.

2.1.2.2 Análisis de la Curva Granulométrica

La curva granulométrica acumulativa puede y es utilizada como elemento de juicio para apreciar las propiedades significativas del material (filtro-protector) en estudio. Terzaghi-Peck (32).

Para entender mejor el significado de la curva, fijamos el punto A sobre la curva 1 de la Fig. 1, entonces haremos las siguientes lecturas e interpretaciones:

D_x : diámetro del grano

X : porcentaje (en peso) de granos cuyos diámetros son menores o iguales que D_x .

X' : porcentaje (en peso) de granos cuyos diámetros son mayores que D_x .

En la práctica, para definir las características granulométricas de los medios porosos (filtroprotectores), se fijan algunos puntos sobre la curva y se dan como índices o parámetros indicativos de algún tamaño de partículas características. Estos índices son:

- Diámetro Eficaz (D_{10}).-

Que es el diámetro correspondiente al 10% de los granos que pasan, o sea el 10% de los granos en peso, cuyo tamaño es menor o igual a D_{10} .

- Coefficiente de Uniformidad (C_u).-

O Coeficiente de Hazen, que es el cociente de los diámetros D_{60} y D_{10} .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

(D_{60} , es el diámetro relativo al porcentaje que pasa, igual al 60%).

"Este índice mide la uniformidad de los medios porosos, o sea, el abatimiento de la curva granulométrica" RHOZIA (24).

"Cuanto más uniforme es el tamaño de las partículas, es más pronunciada la pendiente de la curva. En un caso límite la uniformidad total corresponde a una recta vertical" Castany, G. (3).

Con respecto a la Fig. 1, la curva 1, es llamada "uniforme" o "mal graduada", pues los granos de esos suelos poseen un mismo tamaño, en su mayor parte. Un suelo uniforme, por lo tanto, es interesante, en lo que se refiere a la permeabilidad pues su tamaño constante de granos propicia también vacíos con tamaños regulares y menos oposición al movimiento de los fluidos.

La curva 2, es llamada "desuniforme" o "bien graduada", pues los granos de este suelo poseen una graduación continua de tamaños. Un suelo no uniforme por lo tanto, tiene menor permeabilidad pues el movimiento de los fluidos por su interior es más dificultoso (vacíos menores). Por otro lado, esa graduación granulométrica permite que el material sea autofiltrante, con los granos mayores reteniendo los menores, condición favorable y necesaria en lo que se refiere al arrastre de finos.

Definido el coeficiente de uniformidad de un material como la relación del D_{60} al D_{10} , entonces, de dos materiales, el que tenga mayor variación de tamaño de grano tendrá un mayor coeficiente C_u . También, un material con gran variación de tamaños de grano tendrá intersticios más pequeños que un material con una menor variación. La razón de esto es que las partículas pequeñas ocupan los espacios entre las grandes; aún las más pequeñas ocupan los es

pacios entre las partículas pequeñas; y así sucesivamente, con el resultado que los tamaños de las aberturas o intersticios son grandemente reducidos. Así, un material con un Cu alto tiene intersticios más pequeños que uno con un Cu bajo, y desde que el tamaño de los intersticios controlan el movimiento de los finos, un material graduado, podría ser esperado sea un filtro más efectivo que un material uniforme.

Según Castany, G. (3), "cuanto más cercano a la unidad el valor del coeficiente de uniformidad, mayor porosidad".

$C_u < 2$ uniforme

$C_u > 2$ variable

Otros puntos de la curva.-

Más adelante veremos que para el diseño y dimensionamiento de los filtroprotectores, ya sea en sistemas de drenaje o en pozos tubulares, nos será necesario conocer los siguientes puntos de la curva granulométrica:

D_{15} : 15% de los granos tienen diámetros menores que D_{15} .

D_{50} : 50% de los granos tienen diámetros menores que D_{50} .

D_{85} : 85% de los granos tienen diámetros menores que D_{85} .

Los diámetros arriba mencionados se refieren tanto al suelo (material base) como al material filtro protector. Para distinguirlos usaremos los sub-índices s y f, respectivamente. Otro de los aspectos que pueden analizarse en base a la curva granulométrica es la continuidad de los materiales (medios porosos). Son llamados continuos aquellos cuyas curvas granulométricas permiten que para cualquier incremento de

diámetro (Δd) de la curva, exista un correspondiente incremento de porcentaje ($\Delta\%$) que no sea nulo. En caso contrario el medio será discontinuo. En la Fig. 1 las curvas 1 y 2 corresponden a medios continuos, mientras que la 3 corresponde a uno discontinuo.

2.2 EL FLUIDO

Los fluidos son sustancias capaces de "fluir" y que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen.

Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes, sin desplazarse o deformarse.

Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases. Un líquido está sometido a fuerzas intermoleculares que lo mantiene unido de tal manera que su volumen es definido pero su forma no.

Los líquidos son ligeramente compresibles y su densidad varía poco con la presión y temperatura. Un gas, por otra parte, consta de partículas en movimiento que chocan unas con otras y tratan de dispersarse de tal forma que un gas no tiene forma ni volumen definidos y llenará completamente cualquier recipiente, en el cual se coloque.

En el estudio que nos ocupa, tratamos con el líquido agua el que posee propiedades físicas (y químicas) singularmente excepcionales.

Las propiedades físicas del fluido (agua) más importantes vinculadas al aspecto hidrodinámico son: la densidad, peso específico, viscosidad, tensión superficial, compresibilidad y módulo de elasticidad. Estas son ampliamente tratadas en los textos básicos de Mecánica de Fluidos.

2.3 FLUJO DE FLUIDOS A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS

2.3.1 Principios de Hidrodinámica en Medios Porosos

El estudio del flujo de fluidos a través de medios porosos presenta muchos problemas complejos. Como resultado de esta complejidad, el conocimiento actual del comportamiento del flujo a través de tales medios se basa casi completamente en aproximaciones empíricas. Literalmente, miles de experimentos se han llevado a cabo desde el histórico experimento de Darcy ejecutado en 1856. Scheidegger (25), en 1960 señaló que una relación general para el flujo en materiales porosos puede ser desarrollada sólo si "uno es capaz de entender exactamente cómo todas las propiedades (del medio poroso) son condicionadas por las propiedades geométricas del sistema de poros". Tal entendimiento será posible cuando se obtenga la solución de las ecuaciones fundamentales de flujo en materiales porosos. Stark, K. (29) propuso una técnica para la obtención de tales soluciones mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo laminar a través de materiales porosos simplificados e idealizados. También extendió las soluciones al rango de flujo no-lineal, manteniendo los términos de inercia en las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para desarrollar una representación cuantitativa del comportamiento de fluidos que discurren a través de medios porosos es necesario, primero, establecer los principios físicos que determinan dicho comportamiento. Estos principios deben ser fundamentalmente los mismos que gobiernan el movimiento de fluidos viscosos en conductos libres comunes y expresados en las ecuaciones de Navier-Stokes de la hidrodinámica clásica, que imponen sobre la distribución de velocidades en cada uno de los sistemas de flujo el requerimiento del equilibrio dinámico entre las fuerzas de inercia, las viscosas y aquellas

debidas a la acción de cuerpos externos y a la distribución interna de presiones del fluido. Muskat (21).

2.3.2 Ecuaciones Fundamentales de la Hidrodinámica

El movimiento de un fluido, si éste es continuo, está descrito geométricamente si la posición de cada partícula del fluido es conocida en cualquier tiempo. Existen tres condiciones físicas que determinan tal movimiento: la primera es la condición de continuidad; la segunda, la ecuación reológica del estado, y; la tercera, la ecuación de movimiento de Newton.

Estas condiciones físicas son expresadas matemáticamente como un sistema de ecuaciones diferenciales, cuya resolución requiere del conocimiento de las condiciones iniciales y de frontera.

La ecuación de continuidad y la ley de movimiento de Newton son bastante conocidas. La condición reológica es la relación entre las fuerzas y los esfuerzos en el fluido (y sus derivadas). En el caso de un fluido ideal se asume que no hay esfuerzos de corte y que éste es incompresible. Sin embargo, se tiene que los fluidos son viscosos y compresibles.

2.3.2.1 Ecuaciones de Euler

En forma vectorial general las ecuaciones de Euler son:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{v^2}{2} \right) - (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \vec{B} \quad (2)$$

a partir de las cuales se deduce la ecuación generalizada de Bernoulli o ecuación de Euler; para flujo incompresible:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) = 0 \quad (3)$$

Esta ecuación se basa en que el flujo es permanente, sin rozamiento, incompresible, con la gravedad como única fuerza interna que se cumple a lo largo de una línea de corriente.

2.3.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes

Son las ecuaciones completas de movimiento aplicables a fluidos viscosos newtonianos e incompresibles.

En forma vectorial, se escriben:

$$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = F - \frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} \quad (4)$$

donde:

\vec{v} : es el vector de velocidad local en un punto del fluido

t : es el tiempo

F : es la fuerza volumétrica por unidad de masa

p : es la presión

μ : la viscosidad dinámica del fluido

ρ : la densidad del fluido

La estructura de las ecuaciones de Navier-Stokes y las condiciones de frontera hacen que la solución analítica sea muy difícil. Sin embargo, es posible encontrar algunas aproximaciones que nos permitan una definición analítica más fácil. Así, la ecuación de Navier-Stokes

se simplifica considerablemente si hacemos $\mu=0$. En efecto, se obtiene la ecuación de Euler para flujo no viscoso, donde las soluciones pueden ser obtenidas de un flujo potencial. Muskat (21).

El problema del flujo de fluidos a través de un medio poroso es difícil de ser tratado por la Ecuación Fundamental de Navier-Stokes debido al hecho de que la forma geométrica interna de los poros y, por lo tanto, a que las condiciones límites no son conocidas. Igualmente, si fueran conocidas su complejidad haría difícil resolver directamente la Ecuación de Navier-Stokes. Puesto que un medio poroso es tan desordenado e irregular puede ser estudiado mejor por métodos estadísticos. Scheidegger-Liao (26).

Resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes cuando las velocidades son muy pequeñas, el término de la aceleración no lineal puede ser despreciado por ser de segundo grado, entonces el gradiente de presión es linealmente proporcional a la velocidad. Esto es cierto para tuberías y esferas como también para medios porosos. Cuando las velocidades son más grandes, los términos no lineales ya no pueden despreciarse en base a la asunción de que son pequeños. Sin embargo en el caso de flujo uniforme en tuberías son iguales a cero y el gradiente de presión es linealmente proporcional a la velocidad. Silberman (28).

2.3.2.3 Ecuación de Hagen-Poiseuille

La ecuación de Navier-Stokes puede ser resuelta exactamente para un tubo circular recto. En este caso al término $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$ es igual a cero debido a que \vec{V} y el gradiente de \vec{V} ($\nabla \cdot \vec{V}$) son perpendiculares. El resto

de la ecuación puede ser integrada fácilmente por las condiciones límites predominantes.

En 1840, Poisseuille y Hagen desarrollaron esta solución y la demostraron experimentalmente, en forma independiente. Obtuvieron que la descarga de un fluido viscoso a través de un tubo circular de radio R y longitud L , cuando el flujo es laminar, esta dada por:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (5)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del fluido, Δp es la diferencia de presión entre los dos extremos del tubo.

Dado que el área de un tubo es πR^2 y la viscosidad dinámica está relacionada con la viscosidad cinemática por $\mu = \nu \rho$, se puede escribir en este caso:

$$v = \frac{Q}{\pi R^2} = - \frac{R^2 g}{8\nu} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (6)$$

donde $h = Z + \frac{P}{\rho g}$

Como el fenómeno físico del flujo de agua subterránea es tal que un fluido se mueve a través de poros pequeños entre los granos sólidos del suelo, esto sugiere una comparación con el flujo de un fluido viscoso a través de un tubo. Sin embargo, la naturaleza de flujo en un suelo (medio poroso) es mucho más compleja, debido a que el espacio poroso es de una forma geométrica muy complicada.

2.3.2.4 Ecuación de Laplace

La Ecuación de Laplace o Ecuación General de Flujo en Medios Porosos resulta de la combinación de la Ley de Darcy y la Ecuación de Continuidad.

Para flujo en régimen permanente, la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Substituyendo u, v y w por sus valores (Ley de Darcy):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

considerando el fluido incompresible ($\rho = \text{constante}$) y el medio homogéneo e isotrópico ($K_x = K_y = K_z = K$) se obtiene la Ecuación de Laplace.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (8a)$$

considerando el potencial de velocidad ($\phi = -Kh$), definida por Harr (11) como una función escalar del espacio, cuya derivada con respecto a una dirección es la velocidad del fluido en esa dirección. La Ecuación de Laplace, es:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8b)$$

en forma vectorial:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\phi) = \nabla \cdot (\nabla \phi) = \nabla^2 \phi = 0 \quad (8a)$$

La ecuación de Laplace es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, tipo elíptica, homogénea y lineal en ϕ .

En un flujo irrotacional ($\nabla \times \vec{V} = 0$) bidimensional de un fluido incompresible la función potencial de velocidad ϕ está relacionado con la función de corriente ψ mediante:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = - \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (9)$$

que son conocidas como las ecuaciones de Cauchy-Riemann.

Para flujo irrotacional bidimensional, la función de corriente ψ también satisface la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (10)$$

También, para un flujo bidimensional la ecuación (8b) se transforma en:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (11)$$

ya que tanto ϕ como ψ satisfacen la ecuación de Laplace, de la integración de ésta para flujo bidimensional y para condiciones límites ideales, se obtienen dos raíces cada una de las cuales se representa por una fa

milia de curvas, que se interceptan ortogonalmente, formando lo que se llama la "red de flujo". Tamez, G. (30), Figura 2.

2.3.3 Regímenes de flujo a través de medios porosos

Los regímenes de flujo fueron estudiados por Reynolds en 1888, a través de un experimento simple en el cual se visualizan los hilos líquidos para diferentes velocidades de flujo.

Para velocidades de flujo bajas, los hilos líquidos se observan en forma continua, rectos y paralelos (flujo laminar). Para velocidades altas los hilos se retuercen y se dispersan apareciendo torbellinos (flujo turbulento).

El parámetro utilizado para la discriminación de los tipos de regímenes de flujo es el Número de Reynolds, definido como $Re = vd/\nu$, el cual expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas (v , es la velocidad de flujo; d , el diámetro medio de los granos del medio poroso; y ν , la viscosidad cinemática del fluido).

En base a una serie de experimentos Wright (38) distingue cuatro regímenes de flujo a través de medios porosos:

1. Un "régimen laminar", en el cual en cada punto la microvelocidad es estacionaria y las pérdidas de carga son directamente proporcionales a la velocidad. Las fuerzas de viscosidad son predominantes y la velocidad máxima ocurre muy cerca del centro de cada pasaje de flujo.
2. Un "régimen de estado inercial" en el cual en cada punto la microvelocidad es aún estacionaria, pero la pérdida de carga deja de variar linealmente con la velocidad. Las fuerzas de viscosidad y de inercia influyen el movimiento.

3. Un "régimen de transición turbulenta", en el cual la micro-velocidad fluctúa en cualquier punto con una frecuencia regular y la pérdida de carga varía aproximadamente con el cuadrado de la velocidad. Las fuerzas de inercia son predominantes.
4. Un "régimen completamente turbulento", en el cual todo el flujo es turbulento, la microvelocidad fluctúa fortuitamente alrededor de un término medio. La pérdida de carga depende aproximadamente del cuadrado de la velocidad.

En vista de la naturaleza estocástica del flujo a través de medios porosos, se tendrá que los regímenes de flujo mencionados no pueden ser definidos en forma precisa. Sin embargo, en base a los experimentos realizados, puede definirse los valores de Número de Reynolds entre 1 y 5 para los límites superior e inferior de los regímenes laminar y de estado inercial, respectivamente; entre 90 y 120 para los límites entre los regímenes de estado inercial y de transición turbulenta y por lo menos 800 para el límite entre los regímenes de transición turbulenta y completamente turbulenta.

Según Daily-Harleman (4), el flujo darciniano, en lechos arenosos, no se cumple más allá de $Re = 10$ aunque el flujo permanezca laminar. La condición de transición de flujo laminar a flujo turbulento es gradual y ocurre en alguna parte entre $Re = 60$ y $Re = 600$. Para $Re = 1000$, parece ser que la resistencia al flujo se hace independiente del Número de Reynolds.

Numerosas investigaciones experimentales y teóricas sobre el flujo de fluidos a través de medios granulares han demostrado que el esfuerzo cortante medio en la superficie de los granos,

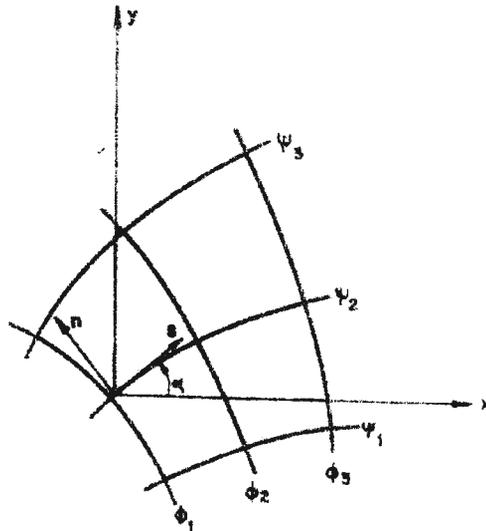


Figura 2 . - Red de flujo mostrando la ortogonalidad entre las líneas equipotenciales (ϕ) y líneas de corriente (ψ).

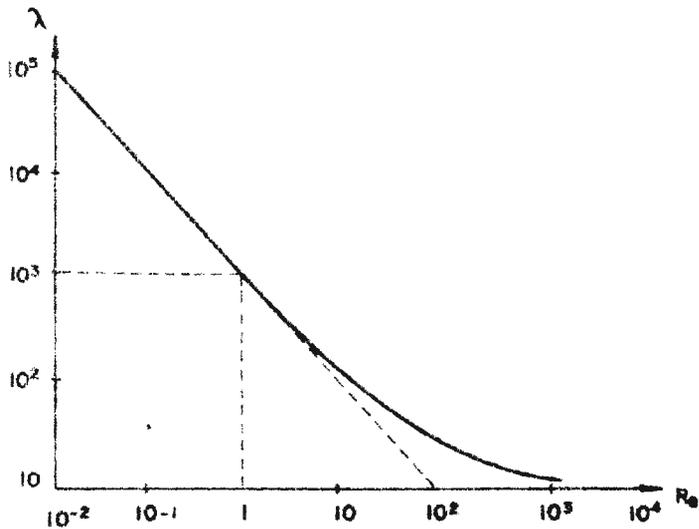


Figura 3 . - Relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds para el flujo en medios porosos (según Rose).

expresado en términos de un coeficiente de resistencia, (λ) es función del Número de Reynolds. Wright, D.E. (38).

Rose, citado por Castany (3), con los resultados de diferentes estudios confeccionó el diagrama Número de Reynolds-Coeficiente de Resistencia para el flujo en un medio poroso, el cual consiste de una línea recta para valores pequeños de Re. Esta indica la condición de flujo laminar. Luego se tiene una curva a partir de valores de Re entre 1 y 10. Para valores superiores de Re = 10-100, la curva indica el pase progresivo del régimen laminar al turbulento (Figura 3).

2.3.4 Flujo radial en un acuífero confinado

Para el caso de acuíferos confinados, la ecuación diferencial de flujo radial, en términos de coordenadas polares, es:

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} = 0 \quad (12)$$

Por integración se obtiene la solución general:

$$\phi = C_1 \ln r + C_2 \quad (13)$$

donde C_1 y C_2 son constantes que se determinan de acuerdo a las condiciones límite.

Considerando el flujo hacia un pozo en una isla circular (figura 4), cuando la producción del pozo es Q_0 y el potencial en la circunferencia externa de la isla es fijado, las condiciones límites son:

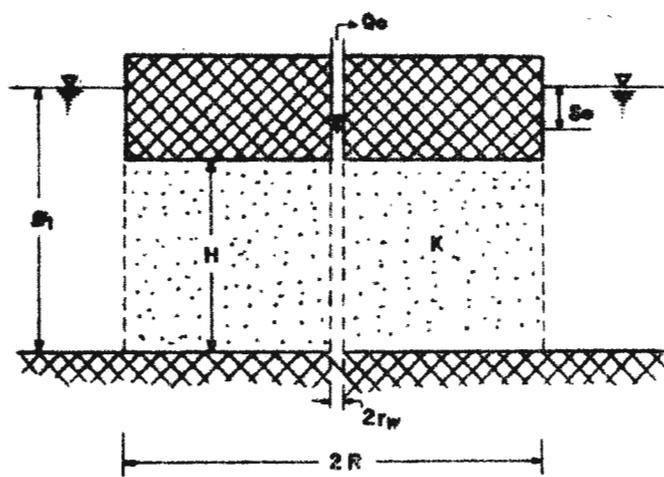


Figura 4. - Pozo en una isla circular

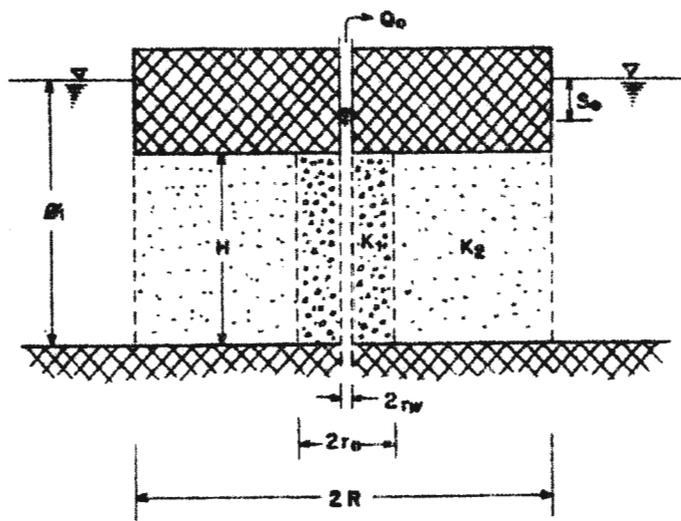


Figura 5. - Pozo con filtro protector en una isla circular.

$$(1) \quad r = R \quad \phi = \phi_1$$

$$(2) \quad r = r_w \quad 2\pi r H V_r = -Q_0$$

Con estas condiciones límites y teniendo en cuenta la Ley de Darcy, la solución general es:

$$\phi = \phi_1 + \frac{Q_0}{2\pi KH} \ln \left(\frac{r}{R} \right) \quad (14)$$

El nivel del agua en el pozo se obtiene reemplazando $r = r_w$ en la ecuación (14):

$$\phi_w = \phi_1 + \frac{Q_0}{2\pi KH} \ln \left(\frac{r_w}{R} \right) \quad (15)$$

Si consideramos el abatimiento $S = \phi_1 - \phi$, la ecuación (14) se transforma en:

$$S = - \frac{Q_0}{2\pi KH} \ln \left(\frac{r}{R} \right) \quad (16)$$

Cuando el pozo se encuentra rodeado por material filtro protector, (Figura 5), la ecuación general es aplicable, pero las constantes difieren para cada una de las regiones. Por continuidad, la descarga total a $r = r_0$ deberá ser la misma que a $r = r_w$. La ecuación (14) puede ser usada en ambas regiones:

$$r_w < r < r_0 : \phi = \phi_0 + \frac{Q_0}{2\pi K_1 H} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (17)$$

$$r_0 < r < R : \phi = \phi_1 + \frac{Q_0}{2\pi K_2 H} \ln \left(\frac{r}{R} \right) \quad (18)$$

donde el valor de la carga ϕ_0 a $r = r_0$ no es conocido. Pero puede determinarse de la última ecuación (18), reemplazando el valor de $r = r_0$:

$$\phi_0 = \phi_1 + \frac{Q_0}{2\pi K_2 H} \ln \left(\frac{r_0}{R} \right) \quad (19)$$

El nivel del agua en el pozo se obtiene reemplazando $r = r_w$ en la ecuación (17) con la ecuación (19) nos da:

$$\phi_w = \phi_1 + \frac{Q_0}{2\pi K_1 H} \ln \left(\frac{r_w}{r_0} \right) + \frac{Q_0}{2\pi K_2 H} \ln \left(\frac{r_0}{R} \right) \quad (20)$$

Fórmula de Dupuit-Thiem

La ecuación (16) deducida para el caso de un pozo en el centro de una isla circular, puede ser igualmente aplicada para acuíferos confinados que se extienden indefinidamente en la horizontal. Para este caso:

$$S = \frac{Q}{2\pi KH} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad r_2 > r_1 \quad (21)$$

La fórmula (21) es empleada, principalmente, en la determinación de la conductividad hidráulica del acuífero. Su empleo fue iniciado por Thiem en 1906 y fue obtenida teniendo en cuenta las asunciones de Dupuit:

- El acuífero es homogéneo, isotrópico y está limitado por dos planos horizontales de extensión infinita.
- El pozo es de penetración total.
- El flujo está gobernado por la componente radial de la velocidad.
- El flujo es laminar, y por lo tanto es aplicable la Ley de Darcy.
- El flujo es permanente.

La ecuación (21) es válida solo para ciertas secciones de la zona de depresión, para puntos alejados del pozo y para descensos poco importantes, donde los caudales de bombeo y los rebatimientos siguen una relación lineal.

Fórmula de Jacob

Para cuando los descensos son importantes se emplea la Fórmula de Jacob:

$$S = CQ + B Q^2 \quad (22)$$

La cual se denomina "Ecuación General del descenso en un acuífero confinado" (el rebatimiento y el caudal siguen una relación parabólica de 2º orden).

El coeficiente C depende de la resistencia al flujo de agua en el acuífero, o sea que está en función de la conductividad hidráulica horizontal.

El coeficiente B está en función del cambio de conductividad hidráulica en las cercanías del pozo, del diseño de los filtros y del cambio de régimen de flujo laminar a turbulento. Ver Figura 6.

2.4 LOS FILTROPROTECTORES

2.4.1 Consideraciones Generales

La instalación de un sistema de drenaje subterráneo o la construcción de un pozo tubular implican condiciones de flujo de agua en un medio poroso (acuífero). Este flujo de agua hacia los tubos, conlleva la aplicación de un "material" alrededor de los mismos, sobre todo en condiciones de formaciones inestables. Este "material" debe satisfacer, simultáneamente, dos requisitos básicos y contradictorios:

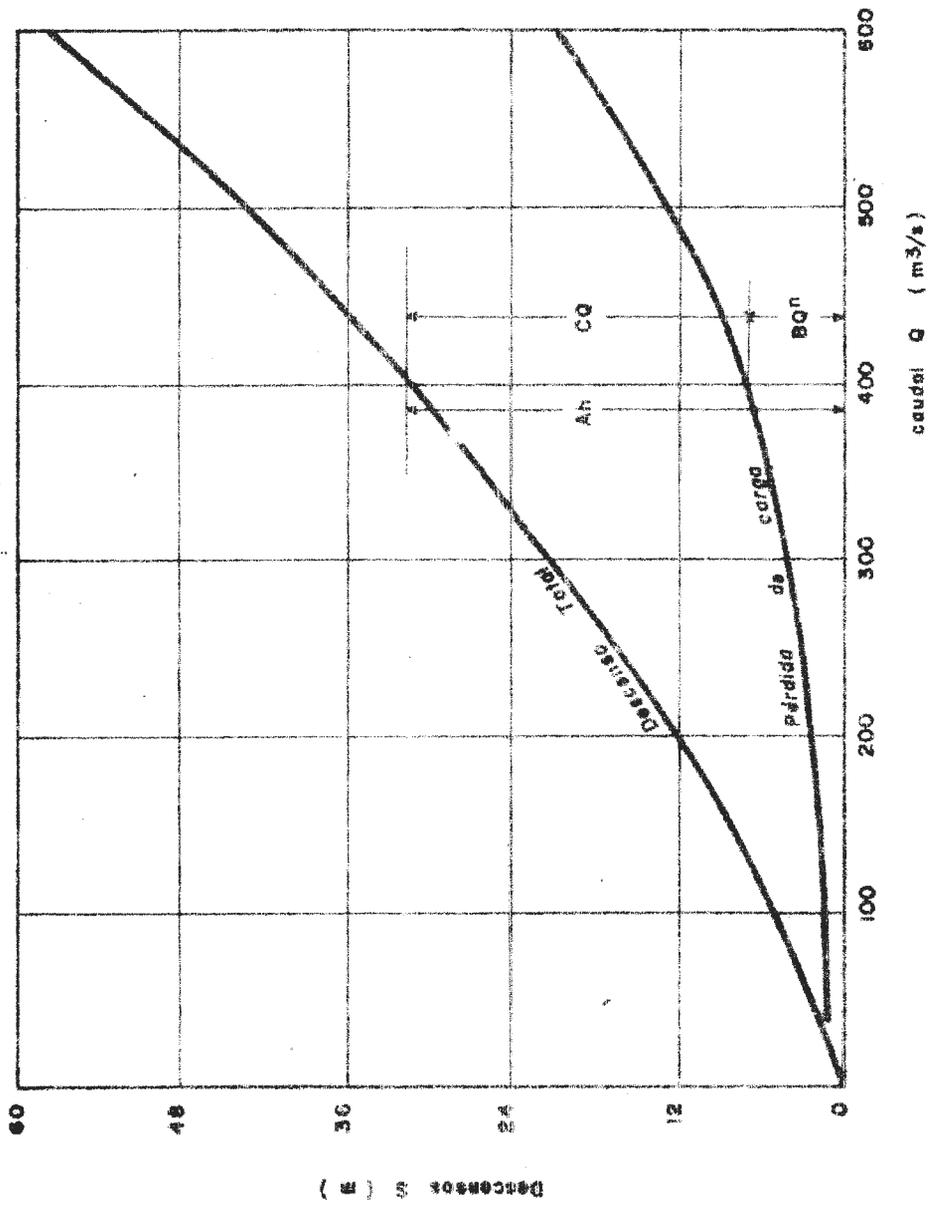


Figura 6. - Variaciones del descenso total en función del caudal de extracción (Según Norabauhin)

- 1) Que sus espacios vacíos (poros) sean tan pequeños como para impedir el arrastre de partículas finas del suelo a través del mismo.
- 2) Que los espacios vacíos sean lo suficientemente grandes como para permitir el libre flujo de agua a través de él, y posibilitar, así, un alivio de las fuerzas de percolación y de presión hidrostática.

El primero de éstos requisitos es llamado "condición anti-piping" y el segundo, "condición de permeabilidad". El "piping" es el acarreamiento de partículas del suelo por las fuerzas de percolación causando un vacío de forma tubular, donde las partículas que se van desprendiendo dejan un espacio que favorece la convergencia del flujo de agua hacia dicho espacio, acelerando el proceso. RHODIA (24).

Así, este "material" tiene que ser un elemento catalizador, que "facilite" el flujo de agua y que "evite" el pase de finos. Específicamente, en Ingeniería de Drenaje del país, ha sido denominado como FILTROPROTECTOR. De La Colina (5).

En Ingeniería de Drenaje, el Filtroprotector es definido como "un material altamente permeable que se coloca alrededor de los drenes, para evitar el acarreo de finos hacia el tubo como a través de sí mismo, y para mejorar las condiciones de flujo en el área inmediata que rodea el dren. Toledo (33).

En Hidrogeología (pozos), se habla de paquetes de grava filtrantes, definidos, según De La Cruz (6), como "cubiertas del tubo técnico constituídas por gravas silíceas redondeadas de aproximadamente 10 a 25 cms. de espesor". También refiere que estos paquetes filtrantes juegan dos papeles básicos importantes:

- 1) Permiten contar con ranuras más grandes de la rejilla, disminuyendo notablemente las pérdidas de carga y el rebatimiento del pozo, al incrementarse el porcentaje de área abierta.

- 2) Sostienen las formaciones arenosas del acuífero, una vez efectuado el desarrollo del pozo.

Gibson Singer (8), agregan que el empaque con grava permite un mejor desarrollo del pozo, incrementando su eficiencia. El "desarrollo del pozo" consiste en eliminar el material fino de las cercanías del mismo, dejando una zona de material más grueso. Esto no puede lograrse en una formación de arena fina uniforme debido a la ausencia de material grueso. El objeto de "empacar" un pozo con grava es proporcionar artificialmente este material grueso que está faltando en la formación natural.

En el presente trabajo, los "paquetes de grava" utilizados en los pozos, serán denominados, al igual que en Drenaje, **FILTROPROTECTORES**.

2.4.2 Clases de Materiales Filtroprotectores

En Drenaje se han ensayados con diversos materiales, de acuerdo a la disponibilidad de recursos y a la solución propuesta para determinados problemas en cada país.

La serie de materiales F-P que se han experimentado pueden clasificarse de la siguiente manera:

- a) Minerales : Arena-Grava (Granulares y Laminares); suelo superficial (Topsoil).
- b) Orgánicos : Fibra de turba tamizada, heno, paja de arroz, paja de lino, broza, cártamo; viruta de aserrín de madera.
- c) Sintéticos : Fibra de vidrio, lana de vidrio, espuma granulada, fibra poliéster (Bidim).

Pomareda (23), da una descripción detallada, en su trabajo, de la mayoría de ellos.

Los materiales F-P más usados en pozos son los minerales clasificados como arena-grava, pudiéndose usar también los materiales sintéticos (como el Bidim), solos o conjuntamente con los minerales.

Nuestro estudio abarca los materiales minerales clasificados como gravas laminares, denominados FILTROPROTECTORES LAMINARES L.M. (La Molina).

El F-P Laminar se caracteriza por ser un material no consolidado de partículas de forma de escama o huso. Esto significa que su dimensión planar, largo y ancho, predomina sobre su espesor o altura.

El F-P Laminar no posee elementos finos, por lo que es poco probable la migración de éstos, por parte de él y a través de él al fluir el agua. Presentan, además, menores pérdidas de carga que los F-P granulares debido a su mejor tortuosidad.

El F-P Laminar como recurso, se lo encuentra a lo largo de toda la costa peruana, cerca de las áreas donde se requiere de uso de materiales filtroprotectores, ya sea para tubos de drenaje o para pozos.

2.4.3 Determinación de la necesidad de Filtroprotectores

En la construcción de pozos tubulares se requiere del uso de materiales F-P si se cumplen las siguientes condiciones:

a) La granulometría del acuífero es uniforme, esto es:

$$Cu \quad 1 \text{ a } 2.5$$

b) La curva granulométrica del acuífero cumple con:

$$- D_{60S} < 0.5 \text{ mm.}$$

$$D_{10S} > 0.03 \text{ mm} \quad (\text{Johnson})$$

$$- D_{10S} < 0.025 \text{ mm.}$$

$$1.0 < Cu_s < 5 \quad (\text{Bremond})$$

$$- D_{10S} \leq 0.25 \text{ mm.}$$

$$Cu_s < 3 \quad (\text{Walton})$$

2.4.4 Criterios de Diseño

Los criterios de diseño de los filtroprotectores más importantes son los siguientes:

2.4.4.1 Bertram-Terzaghi

El criterio desarrollado por Terzaghi para filtros de protección, posteriormente constatado por Bertram (1940) establece las siguientes relaciones:

$$\frac{D_{15f}}{D_{85s}} \leq 4 \text{ a } 5 \quad \text{y} \quad \frac{D_{15f}}{D_{15s}} \geq 4 \text{ a } 4$$

$$\text{para } 2.5 \leq Cu_s \leq 5 \quad \text{y} \quad Cu_f = 1$$

La primera de estas relaciones asegura que los vacíos del material F-P no sean mucho mayores que las partículas del suelo adyacente (condición antipiping). La segunda, asegura que estos mismos vacíos sean suficientes para que el flujo de agua a través de ellos se dé en forma libre (condición de permeabilidad).

Conocida la curva granulométrica del suelo en contacto con el material F-P, y, aplicándose el criterio de diseño citado, se puede determinar una franja granulométrica dentro de la cual deberá situarse el material F-P. Para ello, se obtiene el $D_{15f\text{máx.}}$ y el $D_{15f\text{mín.}}$ que corresponde a las curvas límites de la franja granulométrica, como se muestra en la Figura 7. Por estos dos puntos se trazan las curvas equidistantes a la curva del suelo, obteniéndose así la franja granulométrica,

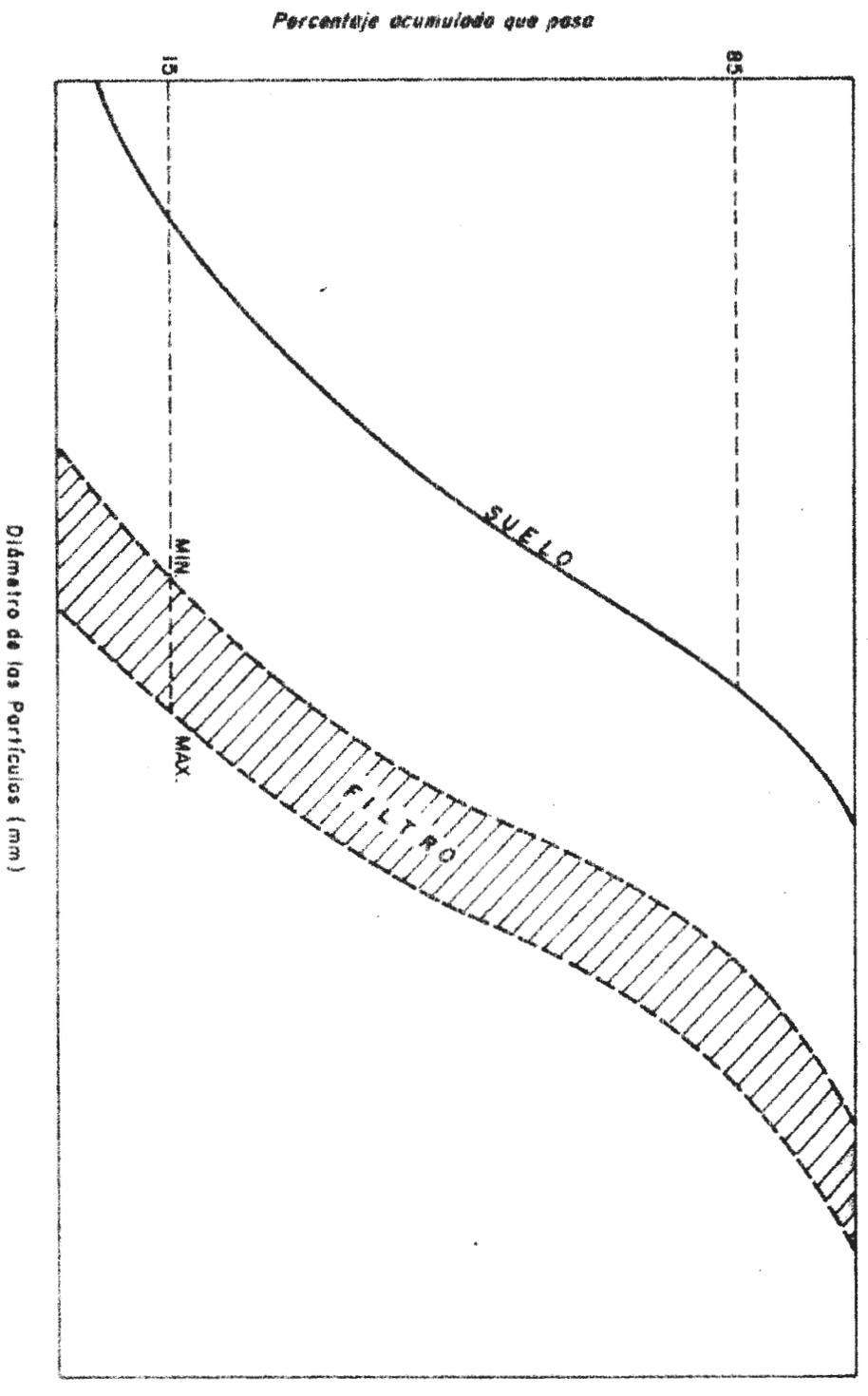


Figura 7 ... Fronja Granulométrica de Filtroprotector adecuado para un determinado Suelo
 3000 Partim - Terzaghi

dentro de la cual deberá situarse el material F-P a ser adoptado.

Cuando se tienen las curvas granulométricas de todos los suelos en contacto con el material F-P, se procede análogamente. En la Figura 8 se muestra una franja granulométrica formada por las curvas granulométricas del grupo de suelos, siendo la curva A la del suelo más fino y la curva B del suelo más grueso. De las curvas A y B, se obtienen los puntos D_{15s} y D_{85s} respectivos. Con los dos puntos obtenidos a partir de la curva A se calculan los $D_{15f\text{mín.}}$ y $D_{15f\text{máx.}}$. Por estos puntos se trazan las curvas equidistantes a la curva A, obteniéndose las curvas C y D, respectivas. Con los puntos de la curva B se obtienen las curvas E (originada por $D_{15f\text{mín.}}$) y F (originada por $D_{15f\text{máx.}}$), ambas equidistantes a la curva B.

La intersección de la franja formada por las curvas C y D y de la franja formada por las curvas E y F es la franja granulométrica del material F-P (formada por las curvas D y E).

2.4.4.2 U.S. Army Corps of Engineers

En 1941, la U.S. Army Corps of Engineers (34) programó una serie de ensayos, con la finalidad de determinar el diámetro límite del material F-P que estabiliza el suelo de la fundación y el diámetro límite a partir del cual éste no penetra por las aberturas de un tubo perforado.

Las conclusiones a que se llegaron son:

- a) El material fino no atravesará el Filtroprotector si:

$$\frac{D_{15f}}{D_{85s}} < 5$$

Porcentaje acumulado que pasa

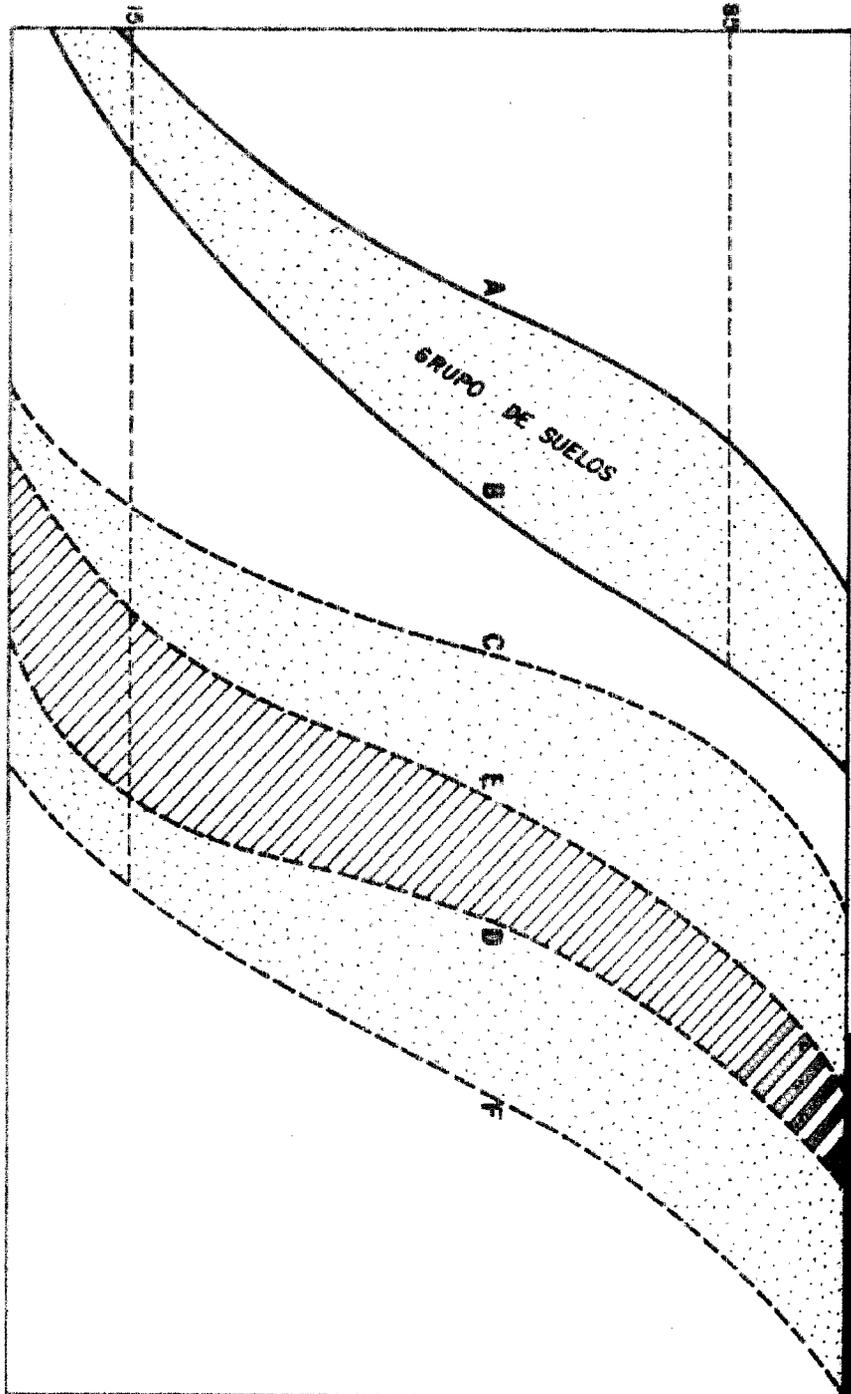


Figura 6 - Límite Superior Inferior de Clasificación adecuada para un grupo de Suelos

Dimetro de las Partículas (mm)

b) La curva granulométrica del material F-P debe ser equidistante a la del suelo de la fundación a fin de minimizar el acarreo de material fino hacia dentro del material F-P.

Posteriormente, en 1955, recomendaba la siguiente relación para evitar el movimiento de finos hacia dentro y a través del material F-P:

$$\frac{D_{50f}}{D_{50s}} \leq 25 \quad \text{y} \quad 4 \leq \frac{D_{15f}}{D_{15s}} \leq 20$$

Cuando se tiene un tubo, el material F-P en contacto con éste debe cumplir con las siguientes condiciones:

Para ranuras:

$$\frac{D_{85f}}{\text{Abertura de ranura}} > 1.2$$

Para agujeros circulares:

$$\frac{D_{85f}}{\phi \text{ agujero}} > 1.0$$

En general las aberturas de la rejilla serán menores que D_{85s} y D_{10f} .

2.4.4.3 Karpoff (USBR, 1955)

De los ensayos de laboratorio realizados Karpoff (16), establece las siguientes reglas para el diseño de materiales F-P:

a) Para material F-P de granulometría uniforme:

$$5 < \frac{D_{50f}}{D_{50s}} < 10$$

b) Para material F-P graduado:

$$12 < \frac{D_{50f}}{D_{50s}} < 58 \quad \text{y} \quad 12 < \frac{D_{15f}}{D_{15s}} < 40$$

Con estas dos condiciones se obtiene la granja granulo
métrica del Filtroprotector adecuado para un determinado
suelo (Ver Figura 9).

2.4.4.4 Johnson (1966)

Es considerado el criterio más apropiado cuando
se utiliza rejilla o filtro de ranuras continuas.

Establece las siguientes relaciones:

$$\frac{D_{30f}}{D_{30s}} = 4 \text{ a } 6$$

$$\frac{D_{30f}}{D_{30s}} = 6 \text{ a } 9$$

Para: $Cu_f \leq 2.5$ y $Cu_s < 2.5$

Se usa 4 cuando el material es fino y uniforme; 6 cuando
el material es más grueso y no uniforme y entre 6 y
9 cuando la formación acuífero contiene limo y la granulo
métrica es poco uniforme.

El tamaño de la abertura del filtro o rejilla será la
que retenga el 90% o más del material de "prefiltro"
(filtroprotector).

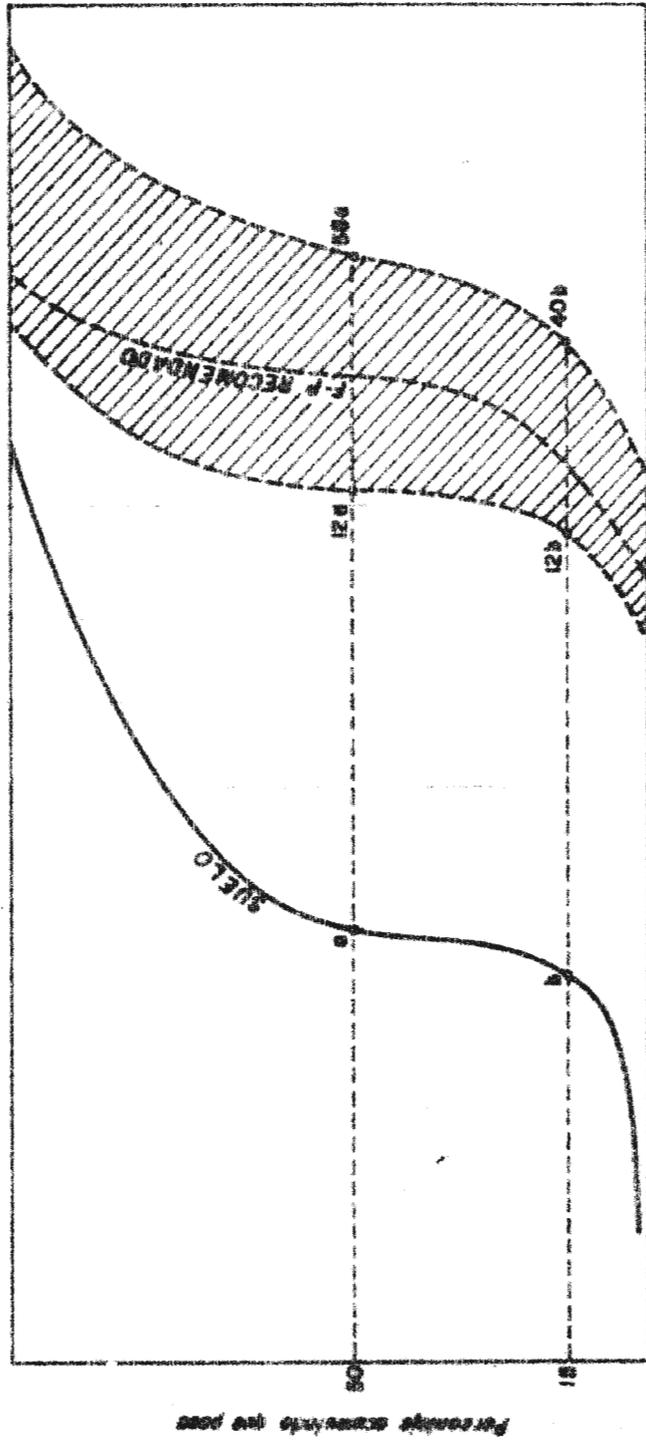


Figure 9 -- Profile Granulométrico de Filtrador recomendado para un determinado Suelo según Corps (USBR).

2.4.4.5 G. Orozco (1971)

Utiliza la siguiente combinación de criterios:

$$4 < \frac{D_{30f}}{D_{30s}} < 6$$

$$4 < \frac{D_{50f}}{D_{50s}} < 5$$

para: $Cu_f < 2.5$

La abertura de ranuras de la rejilla será $\leq D_{10f}$.

2.4.4.6 Walton

Considera que el tamaño del "prefiltro" debe ser 5 veces mayor al del material acuífero, es decir:

$$\frac{D_{10f}}{D_{10s}} = \frac{D_{50f}}{D_{50s}} = \frac{D_{85f}}{D_{85s}} = 5$$

El tamaño de las aberturas del filtro deben ser iguales al D_{10f} , o sea, al 90% retenido. Este criterio puede ser modificado y utilizar como tamaño de aberturas del filtro correspondiente al 100% retenido del prefiltro ya que no se justifica colocar cierto volumen de grava como "prefiltro" para luego sacar, durante el desarrollo del pozo, una parte del mismo.

2.4.5 Espesor del Filtroprotector

En el diseño y construcción de pozos tubulares, una vez determinada la necesidad de material F-P de acuerdo a la granulometría del material base, y diseñado éste, debe di

mensionarse, también, el espesor del material F-P.

Los espesores recomendados por la literatura consultada son los siguientes:

De La Cruz (6), reporta "el uso de gravas silicias, redondeadas, de aproximadamente 10 a 25 cm. de espesor alrededor del filtro-tamiz".

Grassi (8), menciona "la instalación de una empaquetadura de grava, que consiste en colocar un espesor de 5 a 10 cms. de grava, en una corona circular alrededor del filtro (entubado)".

Gibson-Singer (10), dicen que "usualmente las envolturas para empaque son de 3" a 8", lo cual no es absolutamente necesario, ya que las pruebas han demostrado que 1" ó 2" detendrían y controlarían la arena de la formación".

Johnson E. (13) considera que más de 20 cms. de "prefiltro" es inconveniente y contraproducente para el desarrollo del pozo .

En la práctica se considera que un mínimo de 7.5 cms. de espesor es necesario para asegurar que todo el filtro (rejilla) ha sido rodeado por la empaquetadura de grava.

2.4.6 Consideraciones sobre el arrastre de finos

Uno de los grandes problemas en el uso de los filtro-protectores, es el arrastre de finos.

Las condiciones de flujo en las cercanías de los tubos (convergencia) produce una serie de fenómenos ligados a la migración de partículas, sedimentación, colmatación, obstrucción, que bajan la eficiencia de funcionamiento de los sistemas de drenaje o de los pozos.

El fenómeno de arrastre de partículas finas está directamente relacionado con la granulometría y tamaño de vacíos del Filtroprotector y el tamaño de las partículas del material

base. Al respecto, Terzaghi-Peck (32), mencionan: "El material F-P debe satisfacer ciertas condiciones, si los vacíos del mismo son mayores que las partículas más finas del suelo base, éstas son poco a poco arrastradas a los intersticios del F-P, terminando por obstruir el flujo de agua".

El uso o no de materiales F-P alrededor de los pozos es determinante de que éstos funcionen inadecuadamente o lleguen a obstruirse totalmente por efecto del arrastre de finos hacia su interior.

2.5 COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DEL MEDIO POROSO

Los fenómenos que se produzcan en un determinado proceso, en el que intervenga el medio poroso están en función de las características del mismo. Así el estudio de los medios porosos, por los cuales discurre un determinado flujo de agua, permite precisar las características acuíferas o comportamiento hidrodinámico de éstos.

El medio poroso está interconectado por vacíos, poros, por donde puede fluir libremente un determinado fluido (agua) a través de él. Este "fluir libremente", está sujeto a leyes físicas, que son función de ciertas características que da el medio poroso al flujo de agua.

La caracterización del medio poroso al flujo de agua, plantea dos aspectos: por un lado la discriminación y cuantificación de las propiedades hidráulicas de los materiales que lo constituyen y por otra, la delimitación de sus dominios, vale decir, las condiciones límite o de frontera del sistema de flujo. Yap S. (39).

La característica o parámetro que define el comportamiento de un medio poroso al flujo del agua, es la conductividad hidráulica (K).

La conductividad hidráulica depende tanto de las características del medio poroso como del fluido. Así, depende de la forma, tamaño y distribución de tamaños de las partículas y de la porosidad, como también de la densidad y viscosidad del fluido.

Así mismo, la homogeneidad y el contenido de aire del sistema, el contenido y distribución de partículas de arcilla, la presencia de microorganismos, el contenido de sales del agua, etc., influyen en la variación de la conductividad hidráulica.

2.6 ESTUDIOS SIMILARES

En el país la investigación sobre materiales filtroprotectores fue iniciada en 1968, en el Laboratorio de Drenaje y Aguas Subterráneas de la Universidad Nacional Agraria "La Molina" y también en las Areas Pilotos instaladas en la costa peruana con la finalidad de estudiar la factibilidad de recuperación de tierras afectadas con problemas de drenaje y salinidad.

Como resultado de los ensayos de laboratorio se ha obtenido el Filtroprotector Laminar L.M. (La Molina) cuyas características hidráulicas han sido exitosas en la fase experimental a la que ha sido sometido.

Entre las principales investigaciones realizadas sobre Filtroprotectores tenemos las siguientes:

- Pomareda B. (23), estudió las pérdidas de carga hidráulica a través del perfil del suelo y la originada por la resistencia de entrada del agua a la zona inmediata al tubo de drenaje y al tubo mismo.

La resistencia de entrada es definida como la oposición al flujo del agua por efecto de una confluencia de las líneas de corriente; es función de la conductividad hidráulica alrededor del tubo de drenaje y de las características hidrodinámicas de éste. Esta dada por la relación:

$$w_i = \frac{h_i}{R.L} = \frac{h_i}{q_u K_i} = \frac{a}{K_i} \quad (23)$$

donde:

w_i = Resistencia de entrada (días/m)

R = Recarga normativa (m/día)

L = Espaciamiento entre drenes (m)

h_i = Pérdida de carga hidráulica debido a la resistencia de entrada (m)

q_u = Descarga unitaria de los drenes (m³/día/m)

a = Coeficiente de entrada

K_i = Conductividad hidráulica del medio alrededor del tubo de drenaje (m/día).

Propone un método de evaluación de la resistencia de entrada, en un modelo que consta básicamente de un tanque horizontal que contiene el suelo y el tubo de drenaje en posición horizontal.

El método propuesto para dicha evaluación consiste en medir la pérdida de carga hidráulica entre un piezómetro colocado a 10 cm del eje del tubo y el nivel de agua en éste, considerando que la resistencia de entrada es función de las características del tubo como del medio que lo rodea. Esta pérdida de carga hidráulica se plotea versus la descarga unitaria, q_u , obteniéndose una recta y la resistencia de entrada está dada por la tangente del ángulo que forma ésta con la horizontal.

$$(w_i = \text{tg } \alpha).$$

- Echevarría M. N., (7), estudió el efecto de la forma y disposición del material filtro protector alrededor del tubo de drenaje, utilizando una Analogía Eléctrica Bidimensional, concluyendo que la geometría del filtro tiene un efecto en la configuración de las líneas de flujo.

De La Colina (5), utilizando materiales F-P Laminar y Granular, estudió el efecto de la geometría de la partícula en el comportamiento del flujo del agua hacia el tubo de drenaje, a partir del concepto de resistencia de entrada. Así mismo, experimentó el efecto de la forma y disposición del material F-P alrededor del tubo de drenaje, a fin de verificar los resultados obtenidos en la investigación hecha por Echevarría.

El experimento fue realizado en un tanque de arena del Laboratorio de Drenaje y Aguas Subterráneas de la Universidad Nacional Agraria - La Molina.

Al respecto, las Figuras 10 y 11, muestran los resultados obtenidos para drenes sin material F-P; con material F-P (geometría A) Laminar y Granular, para tubos de arcilla y plástico, llegándose a las siguientes conclusiones:

- a) Existe una diferencia en la configuración del Gradiente Hidráulico en la zona del material base a nivel de la línea de control horizontal, siendo mínima, cuando se presenta el tubo sin F-P, para incrementarse, debido a la presencia de dicho material en la inmediata vecindad del dren, como consecuencia de la cercanía al mismo; la línea de gradiente tiende a horizontalizarse, debido al cambio de conductividad hidráulica del material.
- b) La geometría de las partículas que componen un elemento F-P, constituye un factor muy importante en la facilidad del flujo del agua a través del mismo.
- c) Experimentalmente a través de un comparativo entre Filtroprotectores Laminares y Granulares, se concluye, que la performance del F-P Laminar es superior en su comportamiento al flujo del agua que el F-P Granular.
- d) La variación de los niveles energéticos a lo largo de la línea de control horizontal, muestra una interesante con

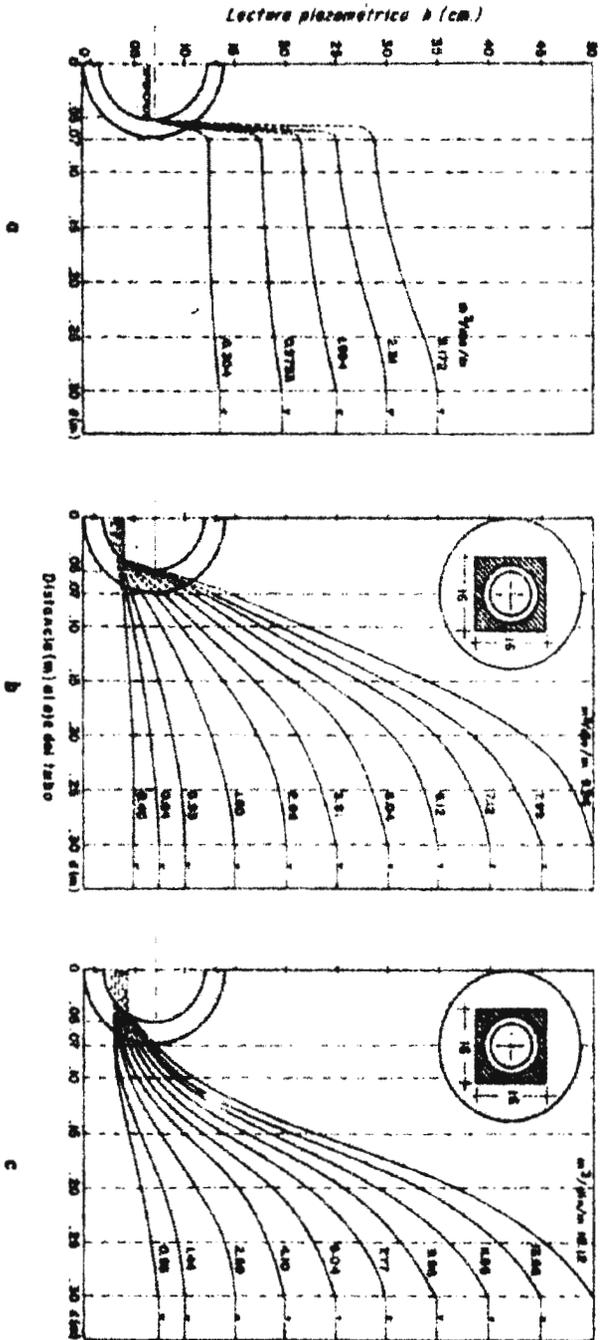


FIGURA 10.- Curvas de caída de potencial a lo largo del nivel de referencia horizontal para diferentes niveles de agua en el tanque de arena para tubos de arcilla. a) sin filtro protector. b) con F-P granular Co mono de 1/2" de espesor, geometría A. c) con F-P Laminar B de 1/2" de espesor, geometría A. De la Colina

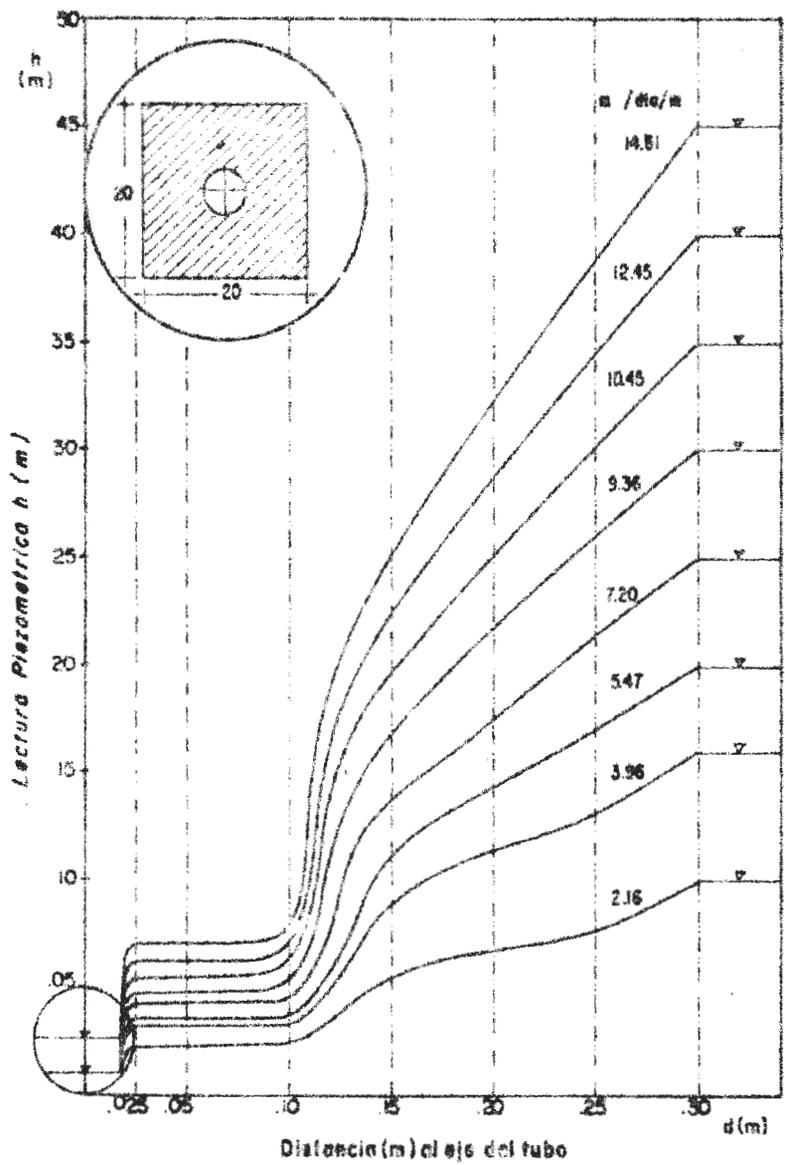


FIGURA 12.- *Curvas de caída de potencial a lo largo del nivel de referencia, para diferentes niveles de agua. tubo plástico, F-P Laminar 16 de 3" de espesor, geometría A. De la Colina*

figuración en las cercanías al dren, cuando se utiliza el F-P laminar, Figura 12; esta configuración se puede explicar como un efecto de linearización de los niveles energéticos en las cercanías al dren, que se traduce en una equilibrada distribución de equipotenciales. Este fenómeno puede explicar en cierta extensión el mayor gasto para una misma carga en las diferentes pruebas efectuadas.

- e) En las relaciones Descarga Unitaria y Carga Hidráulica, Figura 13, los mayores valores $q/m/día$, con un claro margen diferencial, son obtenidos en las diferentes performances, para los materiales laminares que para los granulares. La relación modular $m/día$, significa, mayor descarga para una misma carga.
- f) El F-P Laminar del tipo LM-8 con un espesor de 2" y una geometría B, podría ser el resultado del esquema de optimización.

- Toledo (33), en 1975, realizó un estudio comparativo de los materiales F-P Granulares utilizados en algunas Areas Piloto de Drenaje de la costa peruana y los nuevos F-P Laminares en experimentación en los Laboratorios de Drenaje y Aguas Subterráneas de la Universidad Nacional Agraria - La Molina. Para ello determinó en forma cualitativa y cuantitativa los siguientes factores de los materiales F-P: Caracterización física y estadística; comportamiento al flujo y almacenamiento de agua; y efectos anómalos en la interfase Filtroprotector - Suelo Base.

Los materiales filtroprotectores estudiados fueron: Laminares L.M.4, L.M.8, L.M.16 y San Lorenzo; Granulares Yapato, Chacupe, Cartavio y Camaná.

Como resultado de la caracterización estadística obtuvo las curvas granulométricas para cada uno de los Filtroprotectores mencionados. Ver Figura 14. A partir de las curvas granulométricas se obtienen los diámetros medios (D_m) y el Coeficiente de Uniformidad de los materiales Filtroprotectores. Ver Cuadro 1.

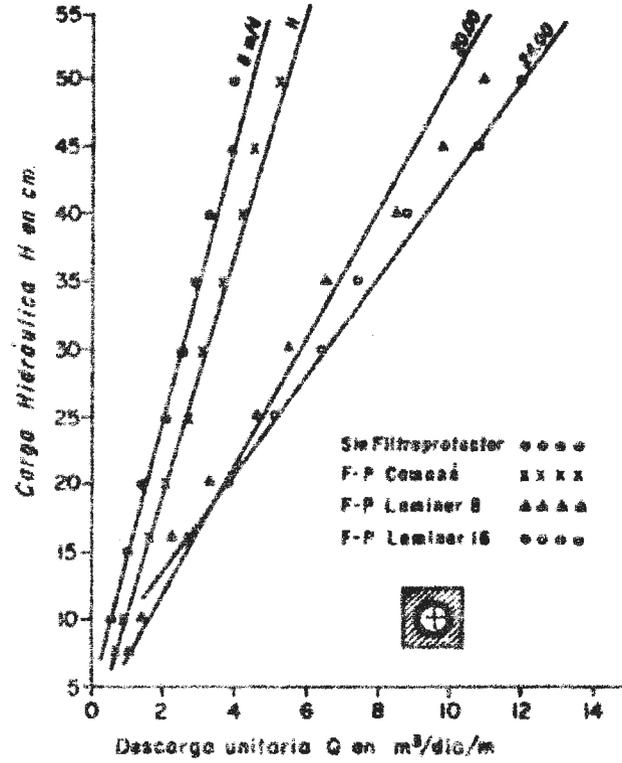
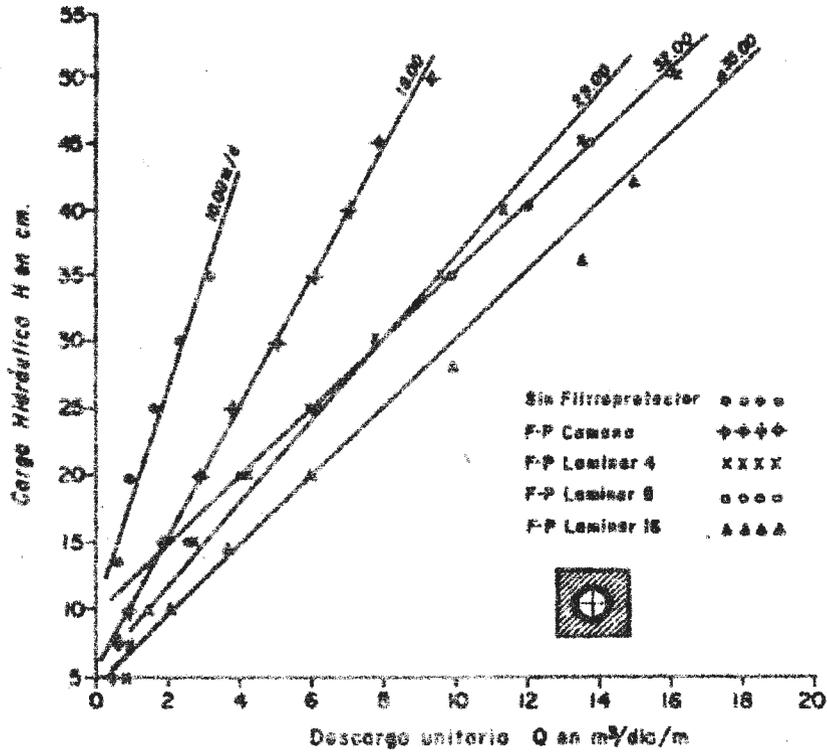


FIGURA 13.- Relaciones de descarga unitaria y carga Hidráulica obtenido en el tanque de arena para varios tipos de F-P de la Celina

CURVA GRANULOMETRICA

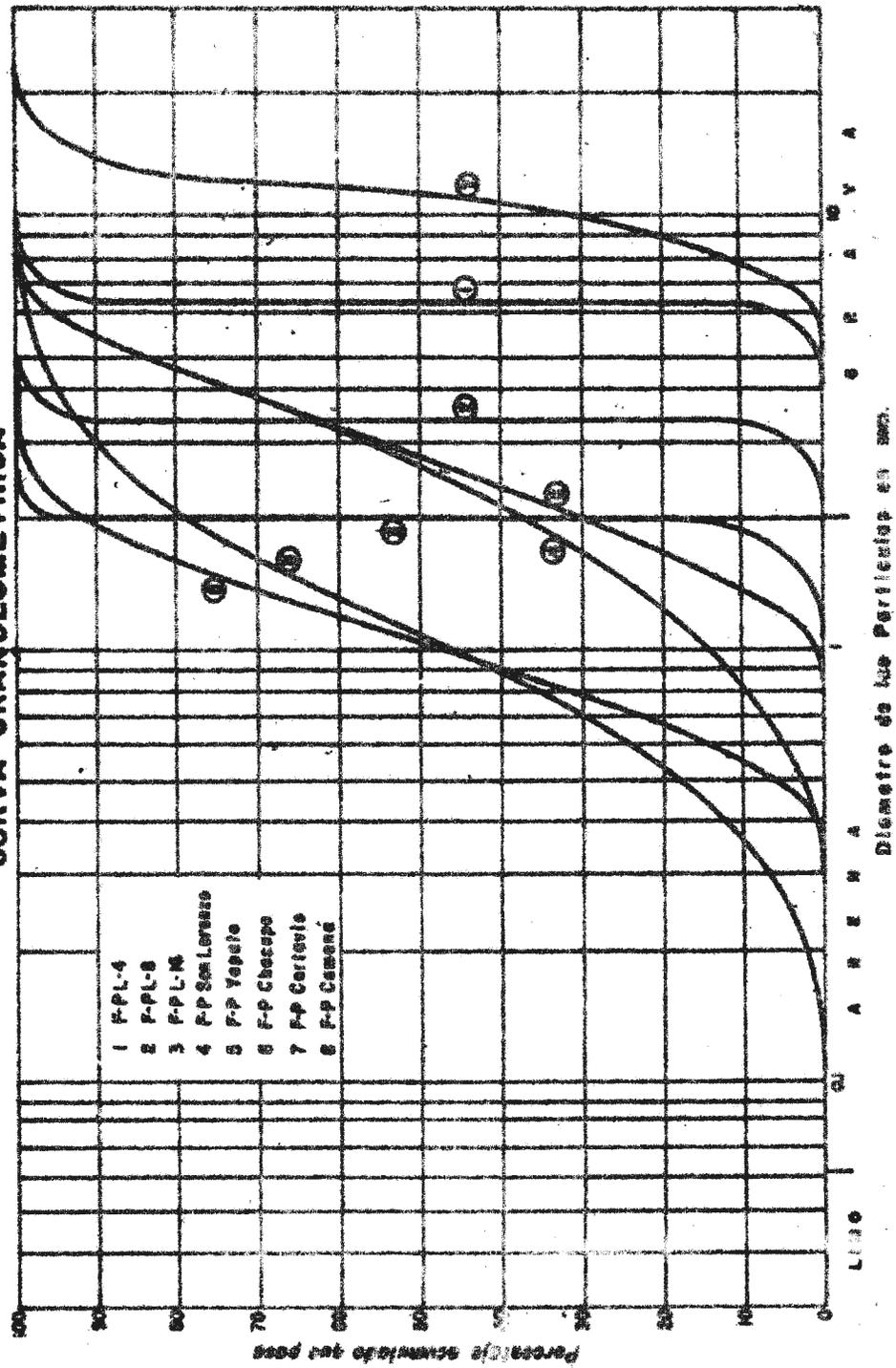


FIGURA 14.- Curvas granulométricas de los aceites F-P de diferentes aceites.

En el Cuadro 2, se tienen los valores obtenidos de Porosidad Total, Retentividad Específica y Porosidad Drenable.

En el Cuadro 3, se tienen los resultados de la determinación de la conductividad hidráulica (k) por el método del permeámetro de carga constante y del hidroconductivímetro.

Los valores de K obtenidos en el Hidroconductivímetro, son resultado de la relación Descarga Específica q y el gradiente que se forma en los piezómetros 1 y 4, J_{1-4} (material filtroprotector). En la Figura 15 puede observarse la relación mencionada. Como se puede ver, existe una clara diferenciación entre los materiales F-P granulares y laminares.

Las conclusiones principales obtenidas en esta investigación podemos resumirlas en las siguientes:

- a) Se comprueba experimentalmente la existencia de dos tipos de materiales F-P, los cuales son definidos por la forma de sus partículas: Laminar y Granular; mostrando cada uno de ellos rasgos y comportamientos perfectamente diferenciados.
- b) Los F-P Laminares poseen una alta Porosidad Total y baja Retentividad Específica en comparación con los F-P Granulares.
- c) La conductividad hidráulica de los materiales F-P Laminares es superior a la de los F-P Granulares. Los valores determinados en el Hidroconductivímetro son más acordes que los calculados por el método del Permeámetro de carga constante.
- d) Las pérdidas de carga en la interfase Filtroprotector Laminar-Suelo Base, son mayores que en la interfase Filtroprotector Granular - Suelo Base.
- e) En la interfase Suelo Base - Filtroprotector se presenta un "Resalto Energético" que aumenta a medida que se incrementa el gradiente, y es mayor a medida que disminuye el tamaño de la partícula del F-P Laminar.

Cuadro 1. Diámetro medio (Dm) y Coeficiente de Uniformidad (Cu) de los materiales Filtroprotectores.

Filtroprotector	Dm (mm.)	D ₆₀ (mm.)	D ₁₀ (mm.)	Cu
Laminar 4	6.315	6.35	6.33	1.01
Laminar 8	3.358	3.36	3.10	1.08
Laminar 16	1.961	2.00	1.89	1.06
San Lorenzo	2.905	3.21	0.83	3.87
Yapato	1.14	1.19	0.55	2.16
Chacupe	3.058	3.36	1.25	2.69
Cartavio	11.00	11.90	7.79	1.54
Camaná	1.41	1.29	0.35	3.68

Cuadro 2. Porosidad Total, Retentividad Específica y Porosidad Drenable de los Materiales Filtroprotectores.

Filtroprotector	Porosidad Total (%)	Retentividad Específica (%)	Porosidad Drenable (%)
Laminar 4	54	4	50
Laminar 8	51	6	45
Laminar 16	52	15	37
San Lorenzo	49	15	34
Yapato	38	23	15
Chacupe	42	10	32
Cartavio	42	1	41
Camaná	40	23	17

Cuadro 3. Valores de Conductividad Hidráulica de los F-P.

Filtroprotectores	Permeámetro (m/día)	Hidroconductímetro (m/día)
Laminar 4	172	7,783
Laminar 8	71	-
Laminar 16	183	2,160
San Lorenzo	159	1,440
Chacupe	148	1,080
Camaná	28	77
Yapato	75	40

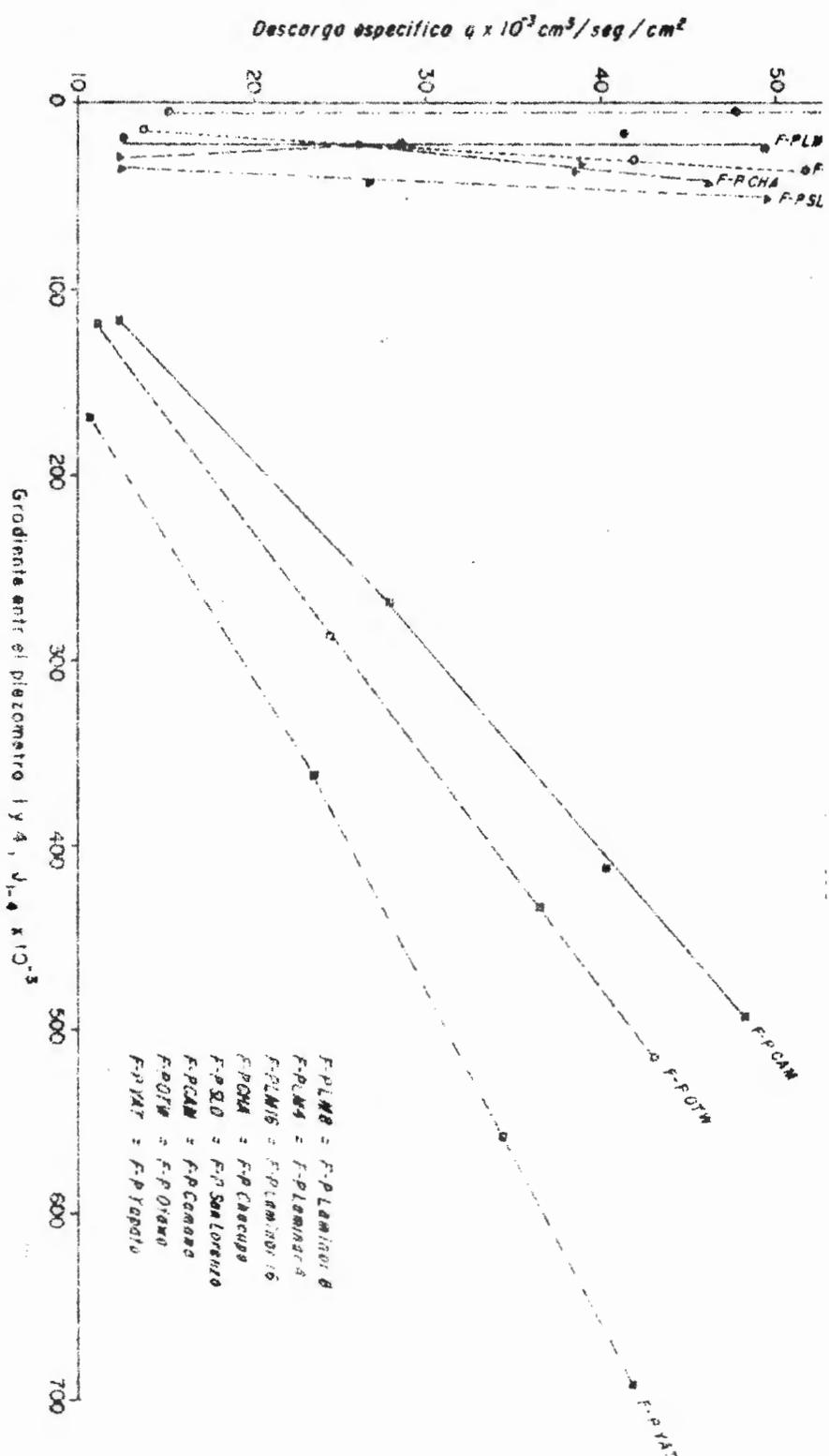


Figura 15. Relación entre la descarga específica y el gradiente que se forma entre el piezometro $i y 4$.

- f) Tanto en el arreglo Filtroprotector - Suelo Base como en el arreglo Suelo Base - Filtroprotector, el gasto guarda una relación lineal con el gradiente, y que son mayores para los F-P Laminares, siendo el F-P Laminar el óptimo.
- g) Se comprueba experimentalmente que el F-P Laminar tiene un comportamiento muy superior al de los F-P Granulares.

En cuanto a las investigaciones orientadas a estudiar las pérdidas de carga hidráulica en pozos, la mayoría de éstas se han dedicado a determinar el efecto total de este problema de flujo de agua, bajo la concepción de hacer una comparación entre la situación real y la teórica.

- Youssef (1971), citado por Vallejos (35), considera que los componentes de las pérdidas de carga en un pozo de bombeo son debidas a la resistencia del flujo de agua a través del acuífero, cambio de permeabilidad en las cercanías del pozo, penetración parcial u obstrucción de los filtros, y el efecto del pasaje del agua del material acuífero al pozo (Régimen turbulento). Concluye diciendo:

1. Que la reducción del valor del coeficiente de permeabilidad en las cercanías del pozo, constituye un incremento en la resistencia total al movimiento del flujo del agua que llega al pozo de bombeo.
2. Cuando el pozo penetra parcialmente en el acuífero o parte de los filtros se obstruyen, algunas de las líneas de flujo son más curvadas que el flujo radial durante el bombeo. Como resultado de este fenómeno, la resistencia total del flujo se incrementa.
3. Se produce una pérdida de carga debido al cambio de régimen de flujo laminar a turbulento, como consecuencia del pasaje del agua, a través del filtro, del material base al pozo.

Propone la siguiente ecuación para cuantificar el descenso total en un pozo de bombeo:

$$D_w = (B_1 + B_2 + B_3) Q + CQ^2 \quad (24)$$

donde:

D_w = Descenso total en el pozo de bombeo

B_1 = Factor de resistencia al flujo de agua, a través del acuífero

B_2 = Factor de cambio de permeabilidad

B_3 = Factor de penetración parcial u obstrucción de filtros.

C = Constante del flujo turbulento

Q = Caudal de bombeo.

- Yap (39) realizó una investigación sobre el efecto de las aberturas de los drenes en las pérdidas de carga hidráulica. Estudió y comparó aberturas circunferenciales, circulares y ranuras. Desde un punto de vista experimental establece que las pérdidas de carga en un sistema de flujo radial, como el que ocurriría en un pozo, puede discretizarse en dos partes. La primera parte la denomina componente debido a la macroconvergencia de las líneas de corriente, desde el infinito hacia el punto de extracción (pozo) y la otra componente debido a la microconvergencia de líneas de corriente, desde el acuífero en las cercanías del pozo, hacia el interior del pozo mismo, pasando por la interfase engarzado-crepina y crepina propiamente dicha o filtro del pozo.

La componente debida a la macroconvergencia queda establecida, por la pérdida de energía debido al flujo radial ideal hacia el pozo y que se cuantifica perfectamente mediante las conocidas fórmulas de abatimiento en pozos.

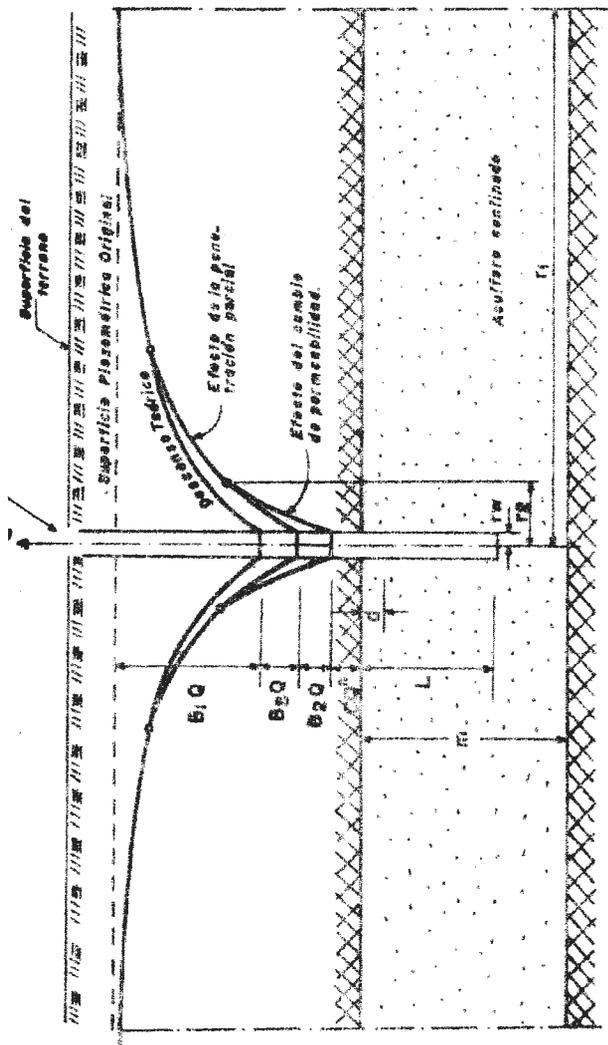


Figura 16. - Retención de las pérdidas de carga sobre la curva de descenso para un pozo que penetra parcialmente en un acuífero confinado.

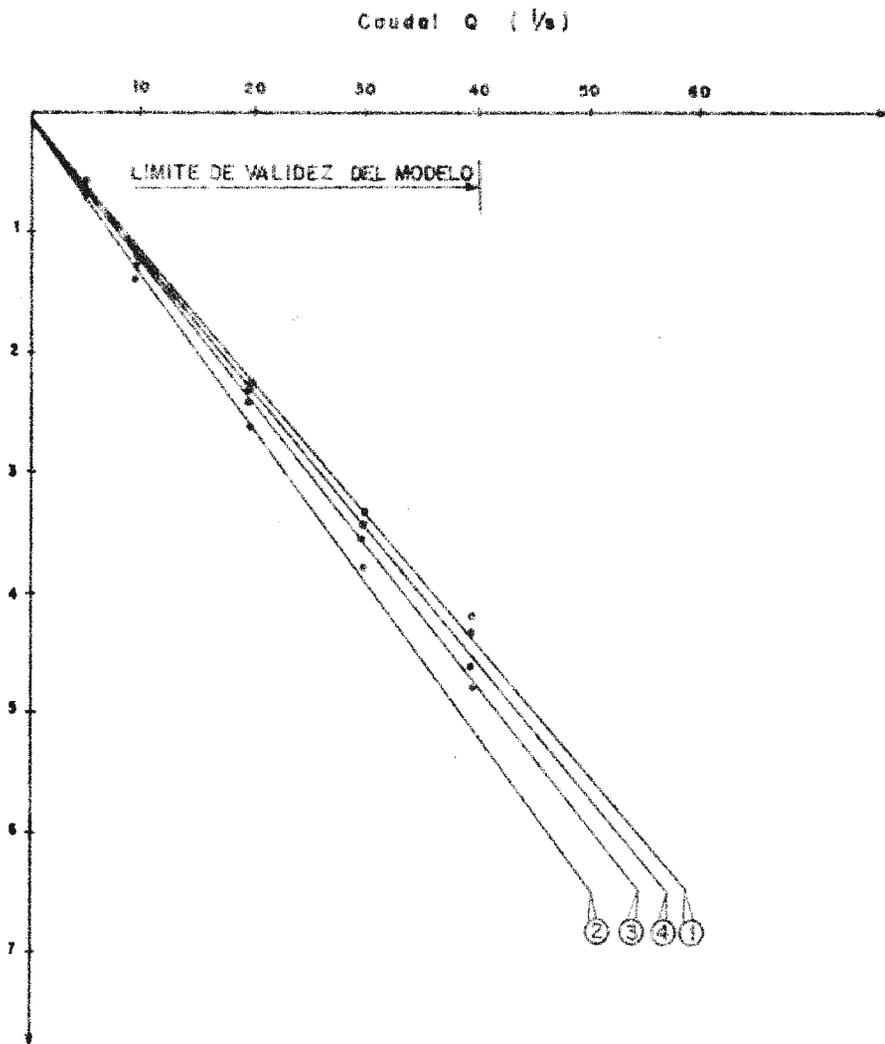
La componente debida a la microconvergencia se debe al cambio de modificación de la trayectoria idealmente radial que sufren las líneas de corriente en la inmediata vecindad del pozo al atravesar interfases y materiales de diferentes granulometrías y las aberturas que se diseñan en los pozos.

- Vancon (36), en base a los cálculos de las pérdidas de carga en los pozos de algunos valles de la costa concluye diciendo que el mal diseño y el deficiente equipamiento de casi la totalidad de los pozos en el Perú, tiene por efecto producir pérdidas de carga muy importantes, las cuales tienen implicancia de carácter económico en la explotación de las aguas subterráneas.
- Vallejos (35), estudió el comportamiento del flujo del agua subterránea convergente al pozo, por efecto del número y distribución de ranuras alrededor del filtro-entubado de diámetro variable. Para ello utilizó el método de la analogía eléctrica R-C (Resistencias y capacitancias) v.g. simulando condiciones de flujo no permanente.

Encontró que de las 4 densidades de ranuras ensayadas (4, 8, 16 y 24 rpv) para los 3 diámetros de pozo (12", 15" y 18"), la densidad de 8 rpv., reduce en un 55% el rebatimiento máximo observado. Con 16 y 24 rpv. hay mayor aproximación al rebatimiento ideal, pero al pequeño porcentaje de disminución de rebatimiento adicional no justifica económicamente el incremento del número de ranuras. Ver Figura 17.

Concluye que el pozo con entubado de 18" de diámetro, amplitud de ranura de 11.5 mm. y densidad de ranura de 8 ranuras por vuelta es el más eficiente ya que se producen menores pérdidas de carga hidráulica.

Con respecto a los experimentos realizados con la finalidad de estudiar el flujo de agua en medios porosos:



LEYENDA

- ① Completamente abierto
- ② 4 Ranuras por vuelta
- ③ 8 Ranuras por vuelta
- ④ 16 Ranuras por vuelta

Figura 17 .- Pérdidas de carga hidráulica por efecto del ranurado del pozo. Diámetro del entubado 18". Vallejos (35)-

- Wright (38) en 1958, emprendió una serie de experimentos en el "Hawksley Hydraulics Laboratory of Imperial College" de Londres con el propósito de determinar las causas de la desviación de la Ley de Resistencia Lineal. Los objetivos de su trabajo fueron detectar y medir la turbulencia y observar el efecto de la convergencia de las macrolíneas de flujo en la conducta de la relación Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia. Para la medida de la turbulencia usó el método del "anemómetro de resistencia" (hot-wire anemometer).

Encontró que la turbulencia no se presentó hasta valores de Número de Reynolds superiores a 90 (hasta 120), sin embargo, de acuerdo al diagrama Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia encontrado se observa que la Ley Lineal de Darcy empieza a desviarse cuando $R = 2$. Lo cual confirma la conclusión de Schneebeli (27) de que la Ley de Darcy deja de ser válida antes del comienzo de la turbulencia.

En el flujo de tuberías el movimiento es a lo largo de líneas rectas y a velocidad constante, mientras que el flujo a través de medios granulares, el fluido pasa por ciclos continuos de aceleración y desaceleración y sigue caminos curvilíneos. Por esto es improbable que la falla de la Ley Lineal de Darcy signifique el comienzo de turbulencia en el flujo a través de medios granulares, al igual que la falta de la Ley de Hagen-Poiseuille en el flujo en tuberías, significa el comienzo de la turbulencia.

Hubbert, citado por Wright (38), dice que a un valor del Número de Reynolds, cercano a la unidad, las fuerzas inerciales llegan a ser perceptibles en un empaque granular, y que ellas pueden, entonces, ser suficientes para causar no linealidad en la relación de flujo, pero insuficientes para causar turbulencia. Es, pues, improbable que la turbulencia pueda empezar a un Número de Reynolds bajo.

En base a estos experimentos llevados a cabo, Wright (38), concluye diciendo que existen cuatro regímenes de flujo en medios

porosos: laminar, de estado inercial, de transición turbulenta y completamente turbulenta, los cuales ya fueron mencionados anteriormente.

También realizó experimentos en relación a la pérdida de carga usando un permeámetro cilíndrico donde el flujo es esencialmente paralelo, y un permeámetro convergente, donde el campo de flujo es convergente y en el cual la macroaceleración del fluido podría tener el efecto de impedir la turbulencia y afectar la resistencia al flujo.

Comparando las curvas Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia de los experimentos realizados en los permeámetros cilíndricos y convergente (Fig. 18), encontró que la convergencia causa que el Coeficiente de Resistencia se desvíe por debajo del valor del flujo paralelo por una cantidad que gradualmente se incrementa para valores de Reynolds por encima de 10. Debajo de éste las curvas son virtualmente idénticas, mientras que a $R = 100$ el coeficiente de Resistencia convergente es sólo alrededor de 73% del valor del flujo paralelo.

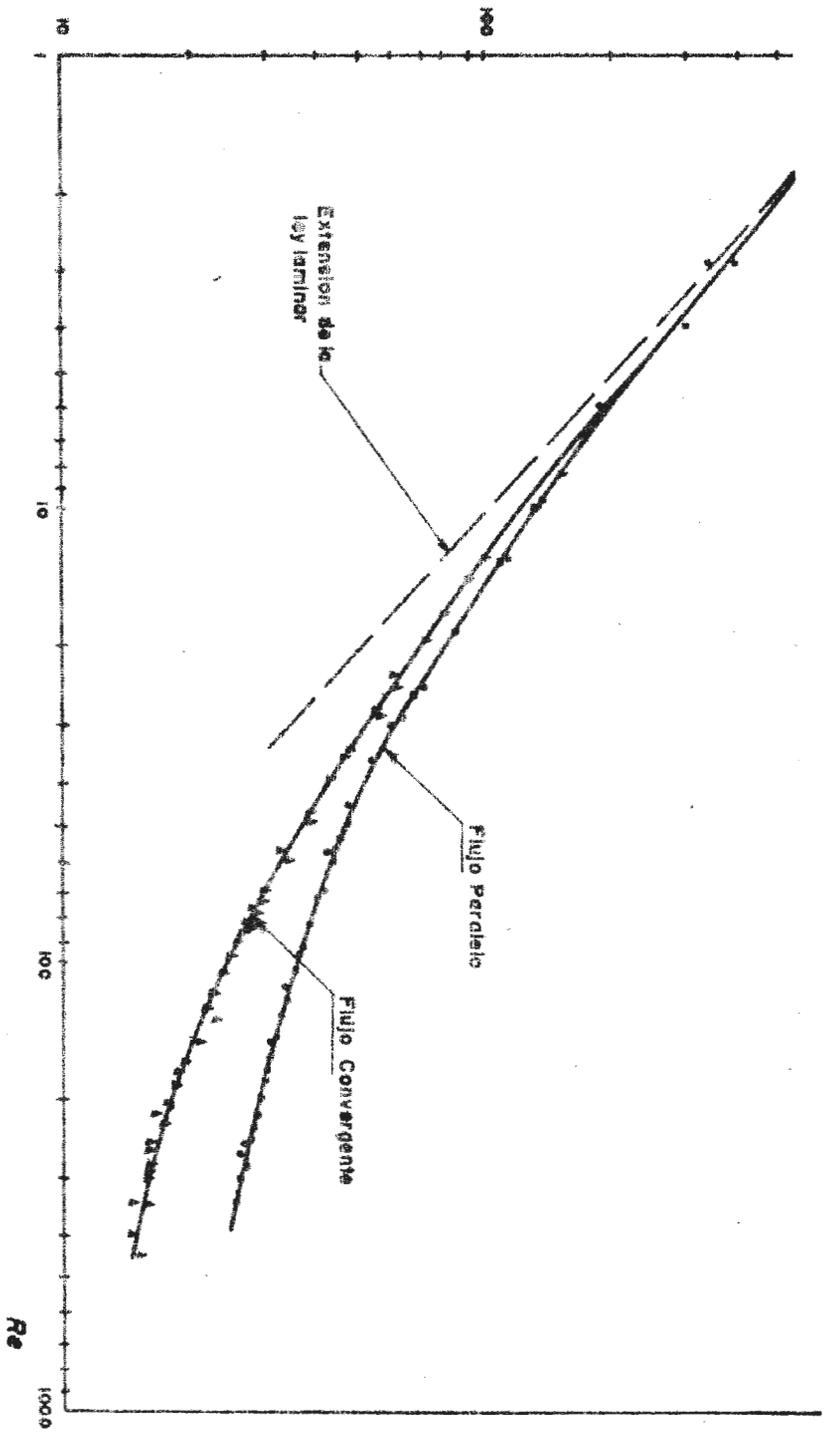


Figura 18. - Diagrama número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia para flujo paralelo y flujo convergente. Wright (38).

III. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1 MATERIALES FILTROPROTECTORES

Los materiales filtroprotectores empleados en la presente investigación son los denominados Filtroprotectores Laminares L.M. (La Molina). Su denominación se debe a que fueron caracterizados y experimentados en los Laboratorios de Drenaje y Aguas Subterráneas de la Universidad Nacional Agraria "La Molina".

Los materiales F-P Laminares utilizados en las pruebas experimentales fueron:

- F-P Laminar LM-4
- F-P Laminar LM-8
- F-P Laminar LM-16

Estos diferentes tipos de material filtroprotector fueron obtenidos por tamizado a partir del Filtroprotector Laminar Natural.

El material F-P Laminar Natural es proveniente de una roca muy común en las formaciones cretáceo (Neocomiano) de los alrededores de Lima (Formación Pamplona). Este tipo de material se obtuvo de una cantera ubicada en Pachacamac (30 Km. al sur de Lima).

3.2 SUELO BASE

Como suelo base se empleó arena eólica obtenida del Cerro "El Centinela" - La Molina.

3.3 FLUIDO

El agua utilizada en las pruebas corresponde al agua de pozo de la Universidad Nacional Agraria "La Molina", cuya conductividad eléctrica (CE) promedio es de 0.9 milimhos/cm. a 25°C, con una temperatura media de 20°C.

3.4 OTROS MATERIALES

- Mercurio metálico
- Pintura
- Pegamento "Soldimix"

3.5 EQUIPOS

3.5.1 Caracterización del Medio Poroso

Se usó el equipo de Análisis Granulométrico del Laboratorio del DCR de la Universidad Nacional Agraria - La Molina; el cual consta de:

- Vibrador automático
- Juego de mallas
- Reloj cronómetro
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Lápiz
- Formato de la Prueba (Cuadro 8) Anexo.
- Papel Semilog Especial

3.5.2 Comportamiento Hidrodinámico

3.5.2.1 Permeámetro Convergente

El permeámetro convergente es un equipo especial construido en el Laboratorio de Drenaje y Aguas Subterráneas del DRAT, específicamente para la evaluación del comportamiento hidrodinámico de los materiales F-P Laminares L.M. en el flujo radial hacia pozos de captación de agua subterránea.

Este equipo consta de los siguientes elementos claramente definidos, los cuales serán descritos en forma detallada por ser de gran importancia en el desarrollo de la presente investigación:

- Tanque de Prueba (TP)
- Tablero Manométrico (TM)
- Tanque de Regulación de carga de entrada (TRE)

- Tanque de Regulación de carga de salida (TRS)
- Torre de elevación (TE)
- Mangueras de circulación de agua (MC)

a) Tanque de Prueba

El tanque de prueba (TP), está constituido por un modelo radial (permeámetro convergente) el cual ha sido construido de plexiglass de 3/8" de espesor cuyo diagrama y dimensiones principales se muestran en la Figura 19.

Este modelo radial fue construido con el objeto de poder estudiar el efecto del aumento de velocidad del agua hacia el centro imaginario del pozo. Debido a la transparencia del material, éste permite observar los fenómenos ocurridos durante las pruebas.

En la Figura 20 se muestra el tanque de prueba (TP) con sus partes esenciales. Básicamente está constituido por:

- Dos paredes frontales de forma especial, cuyas dimensiones se muestran en la Figura 19.
- Dos paredes laterales, una recta de 12 x 106 cm. y una quebrada constituida por 3 planchas unidas de las siguientes dimensiones: 12 x 50 cm., 12 x 76 cm. y 12 x 10 cm.
- Dos tapas de cierre, una superior de 18 x 71 cm. y una inferior de 10 x 18 cm.

Las paredes laterales se encuentran unidas fijamente a una de las paredes frontales, quedando libre la otra pared frontal. Esta última es unida al resto del conjunto mediante una armadura de soporte.

En la parte superior de la pared lateral quebrada se encuentra una perforación que tiene un diámetro

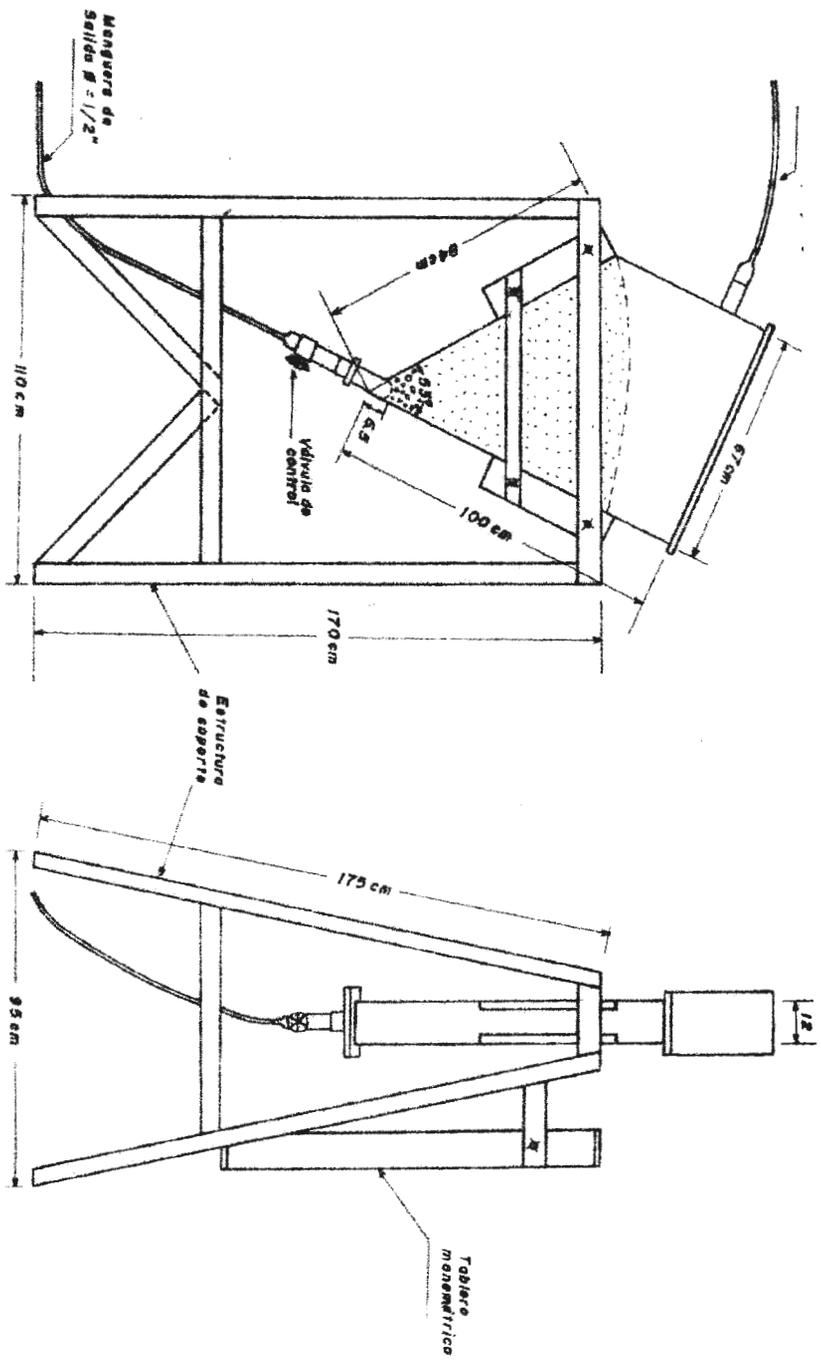


Figura 19. - Diagrama del tanque de prueba (permedmetro convergente)

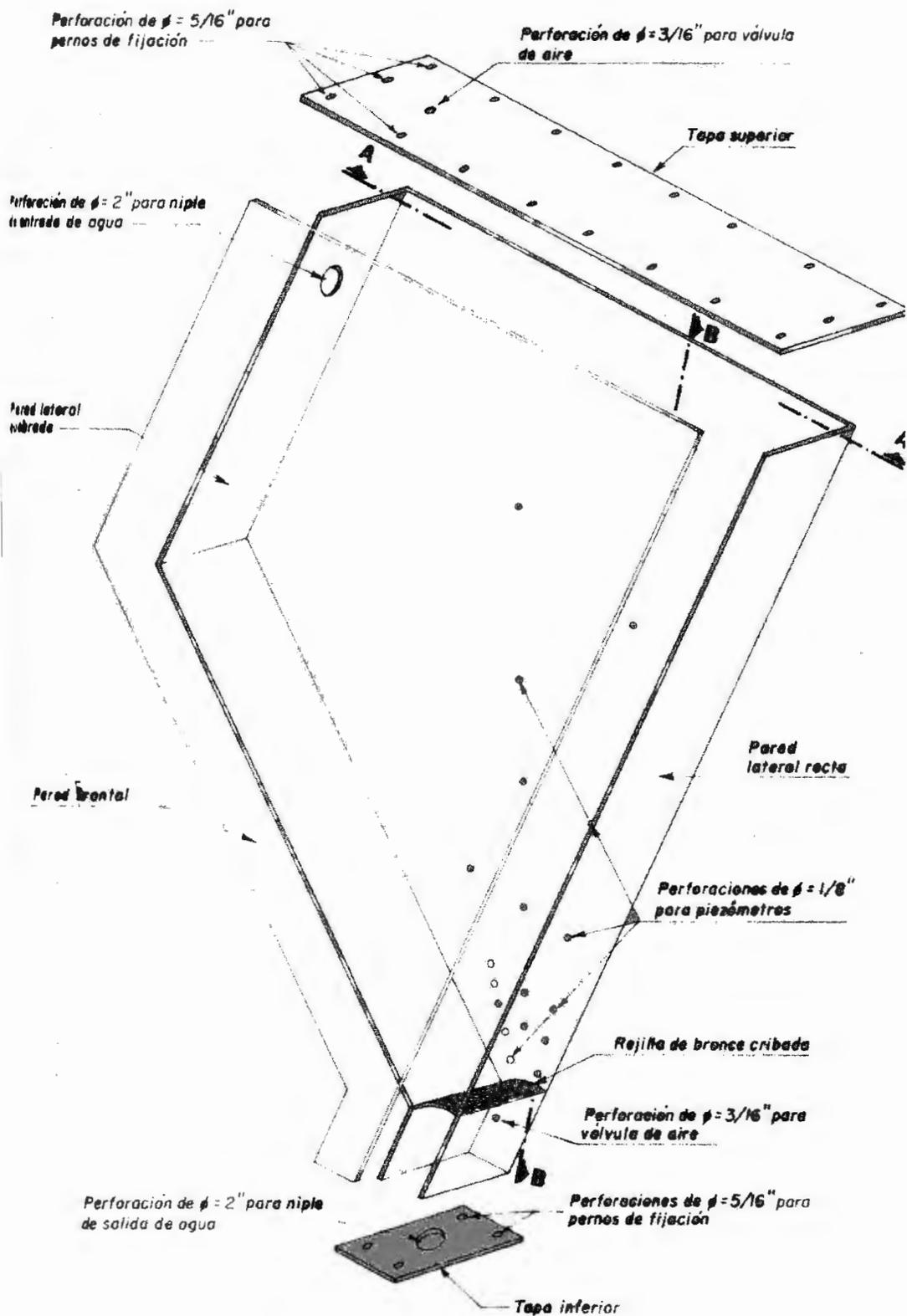


Figura 20.- Tanque de prueba, mostrando sus partes esenciales

efectivo de 2", donde va colocado el niple de entrada de agua al tanque.

En la parte inferior de la pared lateral recta se halla una perforación de 3/16" de diámetro donde va colocada una válvula de aire.

De acuerdo al corte AA', Figura 21, se muestra la pared que contiene los piezómetros y la disposición de éstos.

El tanque de prueba, en su conjunto, está montado sobre una estructura de soporte de perfiles ranurados de 1 1/2" (Figura 19).

Aditamentos Especiales

Los aditamentos especiales son aquellos elementos conexos al tanque de prueba, pero que en su conjunto forman parte del mismo.

- Tapas de Cierre, tienen la finalidad de dar el hermetismo deseado para sellar el sistema, y de esta manera, el flujo se realice a una determinada presión.

La tapa superior posee en su periferie 14 perforaciones de 5/16" de diámetro que alojan a los pernos de fijación. Además posee una perforación de 3/16" de diámetro para la válvula de aire.

La tapa inferior posee 4 perforaciones de 5/16" de diámetro para los pernos de fijación. En su parte central posee otra perforación de 2" de diámetro, la cual aloja al niple de salida de agua.

- Piezómetros, instalados en el Tanque de Prueba, son en número de diecinueve (19). Están contruídos en base a pequeños tubos de bronce cuyo diámetro es de 3 mm. Estos son introducidos herméticamente en los orificios perforados en una de las pa

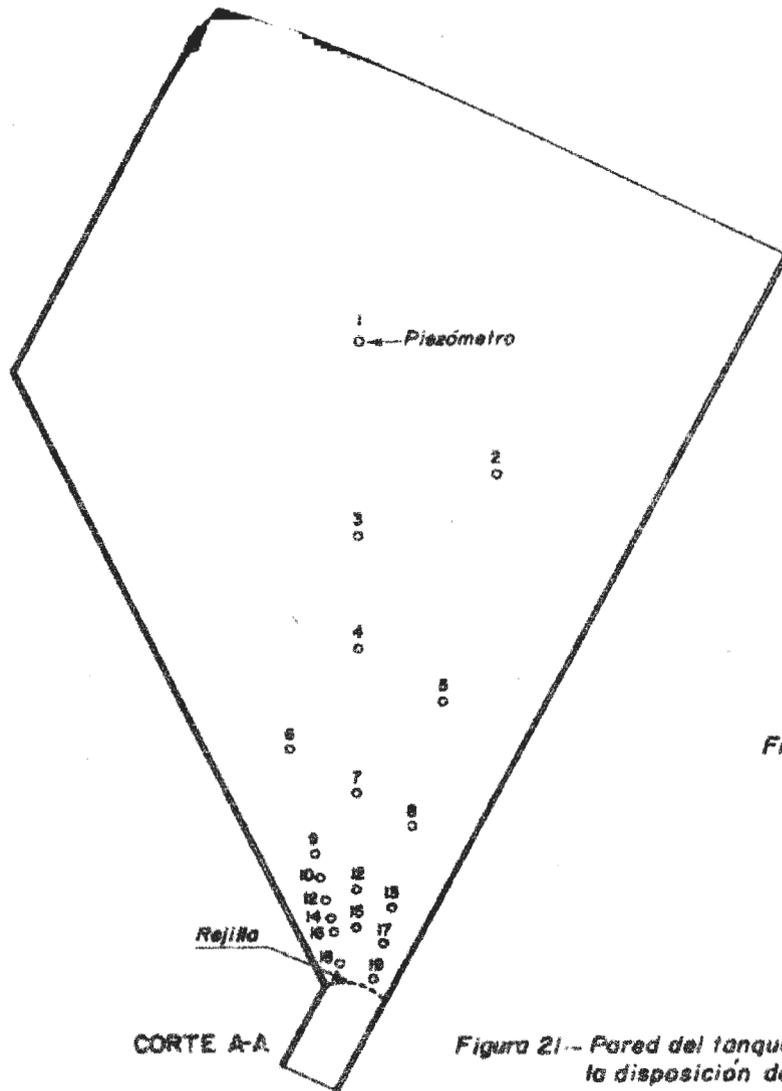


Figura 21.- Pared del tanque que contiene los piezómetros mostrando la disposición de éstos.

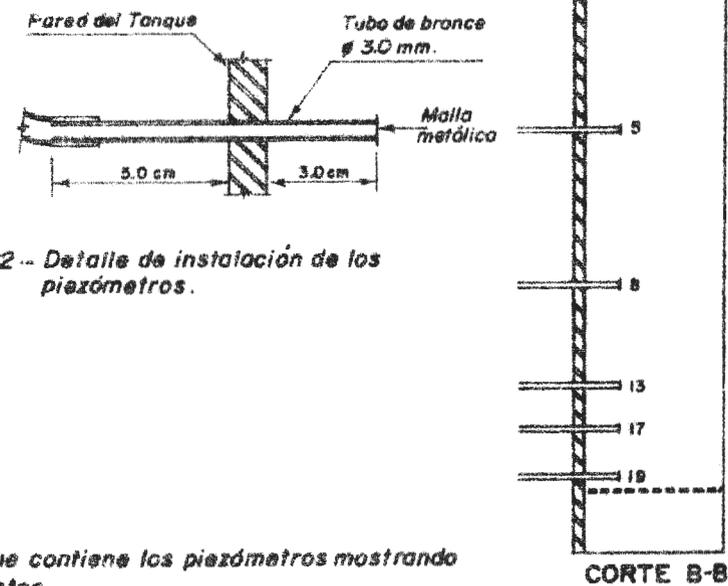


Fig. 22.- Detalle de instalación de los piezómetros.

redes frontales, sobresaliendo 3 cm hacia adentro del tanque y 5 cm hacia afuera. Para asegurar la hermeticidad del tanque se aplicó pegamento "Soldimix" alrededor del tubo por ambos lados de la pared.

En el extremo saliente del tubo, que da hacia el interior del tanque, va pegada adecuadamente una malla metálica muy permeable, aún cuando sus orificios tienen pocos micrones de diámetro. La finalidad de esta malla metálica es la de evitar el paso de finos a través de los tubos piezométricos.

En el extremo saliente del tubo que da hacia el exterior van colocadas las mangueras de plástico flexibles que los conectan con los tubos manométricos. Todos estos detalles se muestran en la Figura 22.;

Los piezómetros están numerados del uno al diecinueve en forma ascendente comenzando por la parte superior. Ver Figura 21.

- Mangueras plásticas, van colocadas en los tubos piezométricos y su función es unir a éstos con los tubos de vidrio del Tablero Manométrico. Son transparentes y flexibles, su transparencia sirve para observar la presencia de burbujas de aire atrapado. Estas mangueras tienen un diámetro interno de 3 mm y un diámetro externo de 6 mm.
- Válvulas de aire, tienen por misión eliminar las burbujas de aire atrapado del tanque de prueba. Una se encuentra en la parte más alta de la tapa de cierre superior. La otra se encuentra ubicada en la parte inferior de la pared lateral recta,

justo por debajo de la ubicación de la rejilla.

- Rejilla, es una pequeña plancha de bronce curvada, colocada por dentro del tanque de prueba, en la parte inferior, a 6.5 cm del eje imaginario del pozo. Tiene por misión contener el material de prueba (Filtroprotector y suelo base), evitando su pase al "pozo" y permitiendo el flujo del agua hacia el mismo.

Se emplearon dos tipos de rejillas en los ensayos, una de ellas cribada con perforaciones de 1.5 mm de diámetro, como se muestra en la Figura 23; y otra renurada (8 ranuras por vuelta), como se muestra en la Figura 24.

- Empaquetaduras, de jebe de 5 mm de espesor, fueron utilizadas para dar el cierre hermético al Tanque de Prueba. Se emplearon tanto para unir la pared frontal libre del TP con las paredes laterales como para la unión de las tapas de cierre al TP. También fueron usadas en los niples de entrada y salida del agua.
- Armadura de soporte, que une y sujeta las paredes del tanque de prueba y las tapas de cierre. Fue construída de perfiles de fierro de 1". Figura 25.
- Pernos de fijación, la armadura de soporte está unida mediante 15 pernos de 5" de longitud y 3/8" de diámetro. La tapa de cierre superior está unida por 14 pernos de 1 1/2" de longitud y 1/4" de diámetro y la tapa de cierre inferior está unida por 4 de éstos últimos.

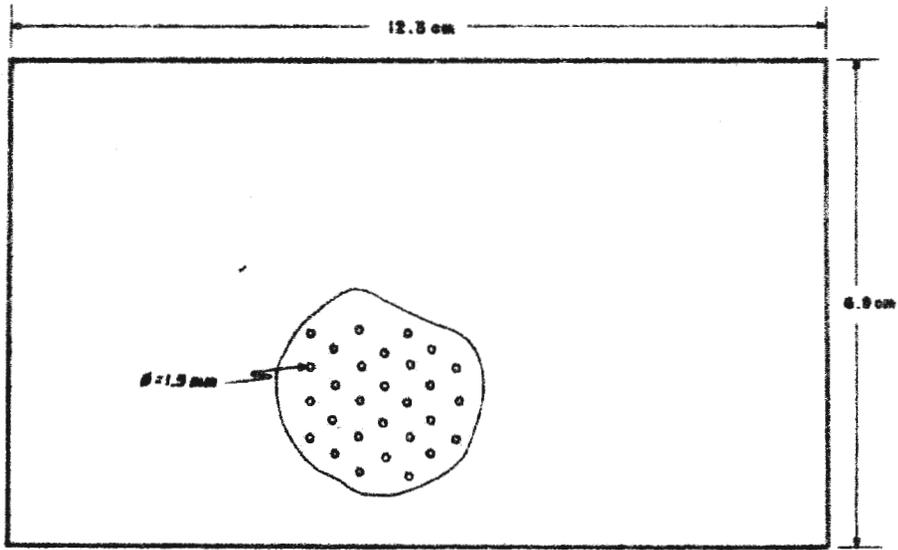


Figura 23 . - Rejilla cribada utilizada en el tanque de prueba (Proyección)

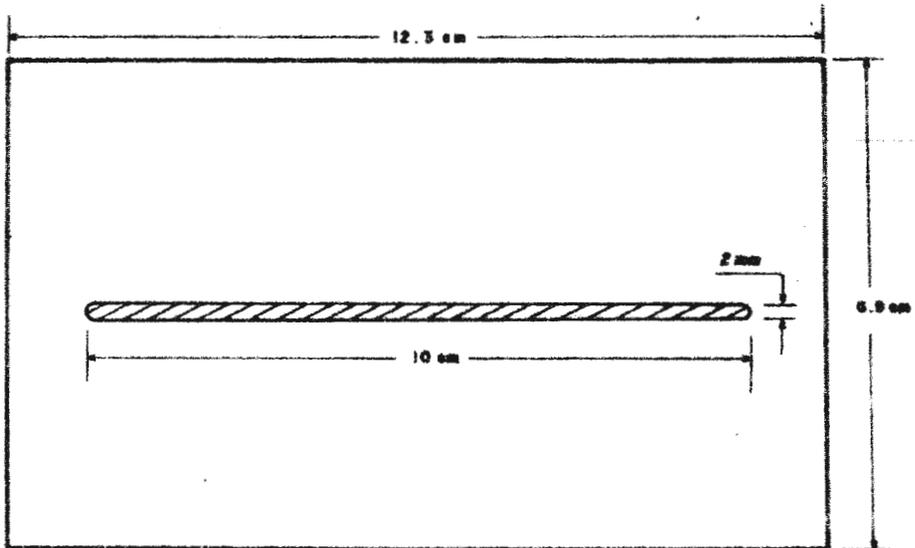


Figura 24 . - Rejilla ranurada (8rpv) utilizada en el tanque de prueba (proyección).

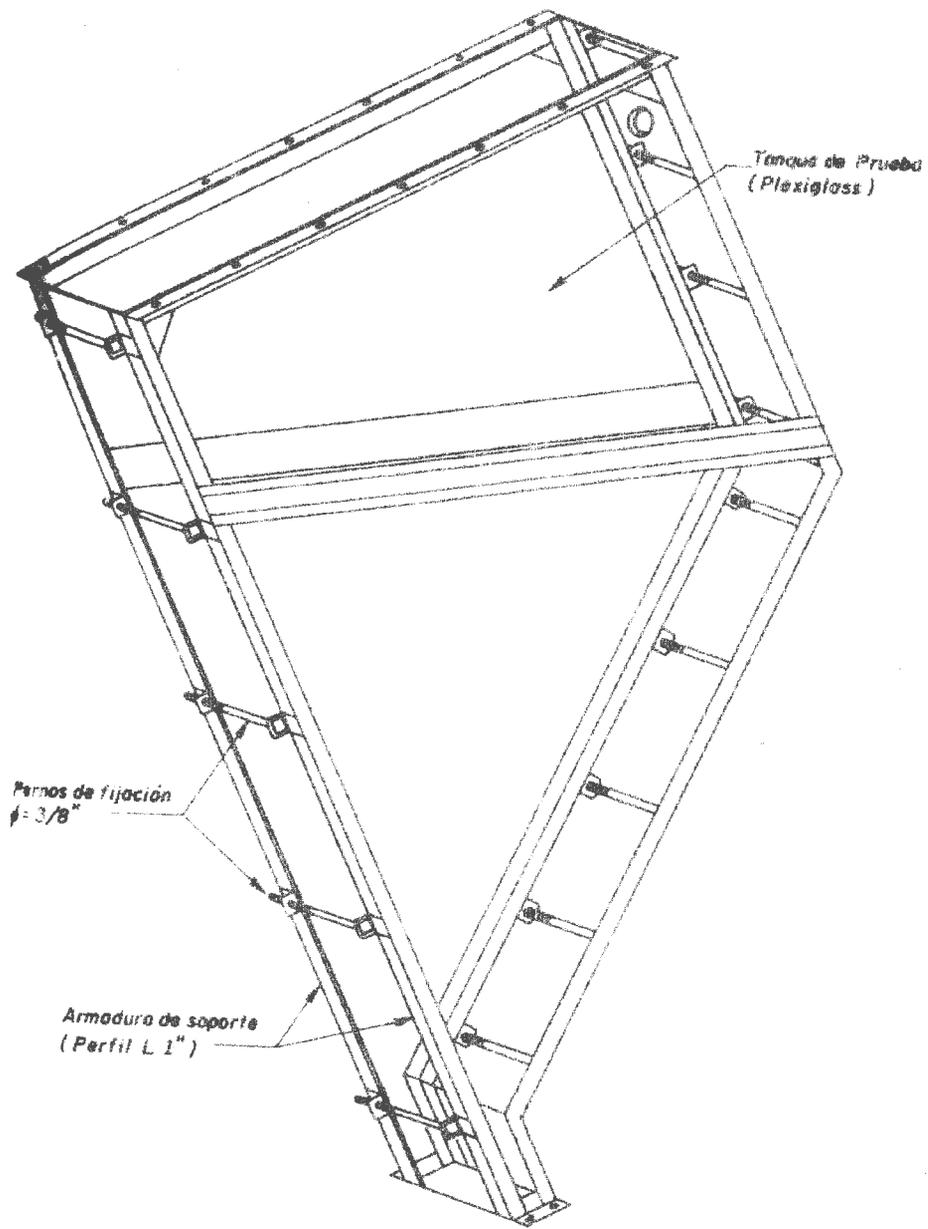


Figura 25-- Perspectiva del tanque de Prueba con su armadura de soporte

- Niples de entrada y salida, el niple de entrada de agua de 2" de diámetro va alojado en la perforación hecha en la parte superior de la pared lateral quebrada y el de salida (del mismo diámetro), en la perforación hecha en la tapa de cierre inferior. Ambos son de fierro galvanizado.

El niple de entrada está conectado a una manguera de jebe resistente de 1/2" de diámetro mediante una reducción de 2" a 1/2". El niple de salida está conectado a la válvula de control de salida.

- Válvula de control de salida, es del tipo compuerta de 2". Va unida al niple de salida y a otro niple con reducción de 2" a 1/2".

Tiene como función controlar el sistema de circulación de agua en todo el sistema; se abre y se cierra al iniciar y terminar cada ensayo.

b) Tablero Manométrico

El tablero manométrico consta básicamente de una estructura de madera de forma rectangular cuyas dimensiones se muestran en las Figuras 26 y 27.

En su interior contiene los tubos de vidrio manométricos de 115 cm. de longitud, 3 mm. de diámetro interno y 5 mm. de diámetro externo. La separación de los tubos en el tablero es de 3 cm. y están numerados de izquierda a derecha del 1 al 19, que corresponden a los 19 piezómetros instalados en el Tanque de Prueba. Además se tienen dos tubos nominados como T_e y T_s que corresponden a los tanques de entrada y salida y dos tubos de control (C).

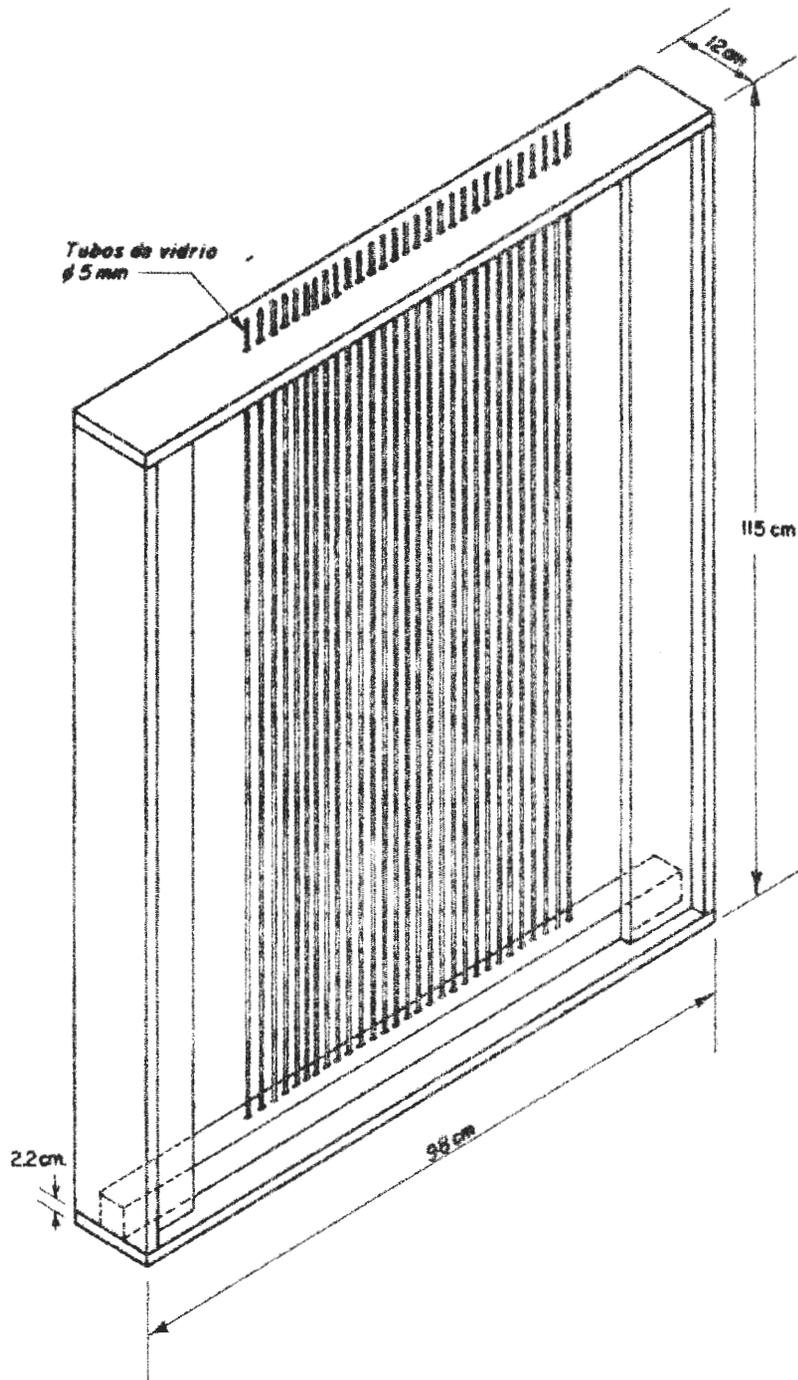


Figura 26-- Perspectiva del Tablero Manométrico

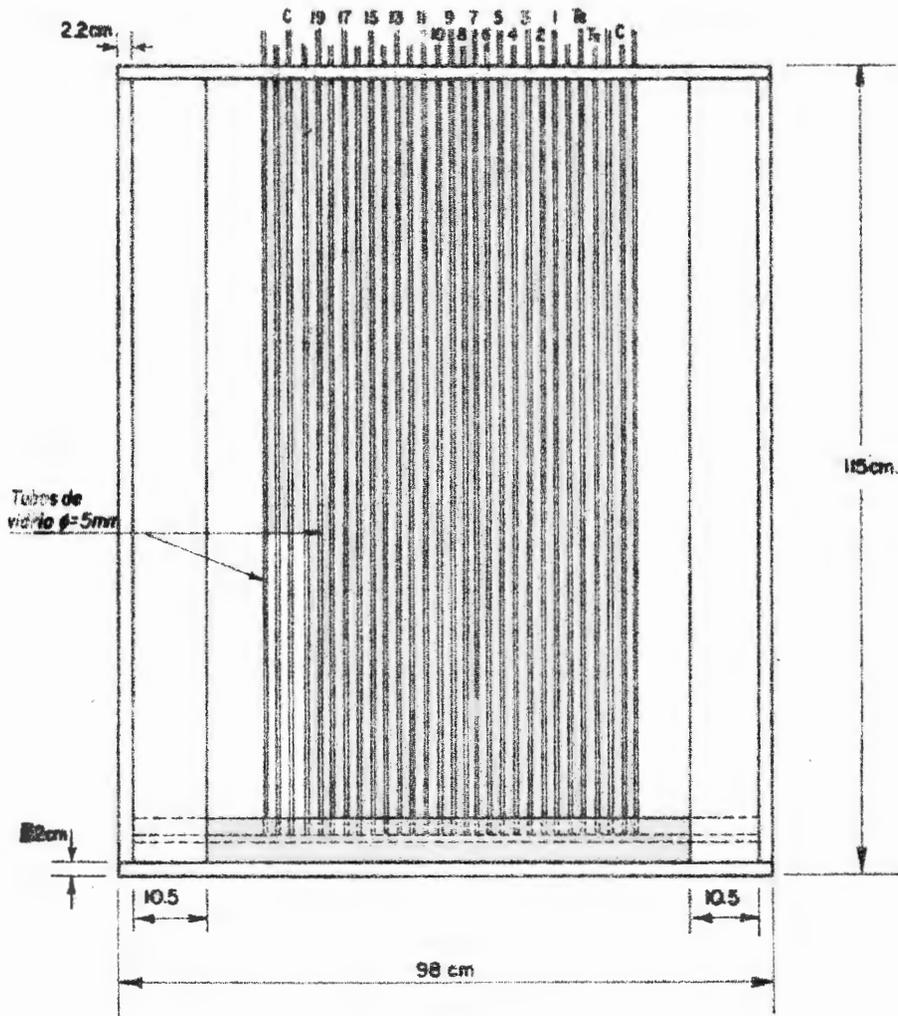


Figura 27-- Elevación Principal del Tablero Manométrico

Los tubos están unidos e interconectados, en su parte inferior, a un aditamento especial, construido de dos placas de plexiglass de 3/8" unidas fijamente. Estas placas dejan en su interior un conducto, que interconecta los tubos y que contiene el mercurio. Ver Figura 28. En su parte superior los tubos están colocados dentro de perforaciones hechas en la madera del tablero, y se encuentran conectados por mangueras plásticas flexibles y transparentes a los tubos piezométricos. Los tubos de control (C) se encuentran abiertos y sirven para medir la presión atmosférica.

Debido a las altas presiones a las que trabaja el sistema, se emplea mercurio para medir las presiones relativas, con respecto a la presión atmosférica, tomada como cero.

c) Tanque de Regulación de Carga de Entrada

El tanque de regulación de carga de entrada, tiene la función de regular la carga de entrada de agua, manteniéndola constante durante cada prueba.

Este tanque es cilíndrico, de 25 cm. de diámetro y 75 cm. de altura; está construido de fierro dulce de 2 mm de espesor. Ver Figura 29.

Posee un sistema de entrada y salida de agua. El primer sistema consta de un orificio de entrada de 1/2" de diámetro, por donde ingresa al flujo de agua proveniente de la fuente de alimentación. El segundo sistema consta de un rebose, que consiste en un tubo de 2" de diámetro y 65 cms de longitud, que tiene la función de mantener un tirante constante, eliminando el agua en exceso; y de un orificio de salida de 1/2" de diámetro, que alimenta

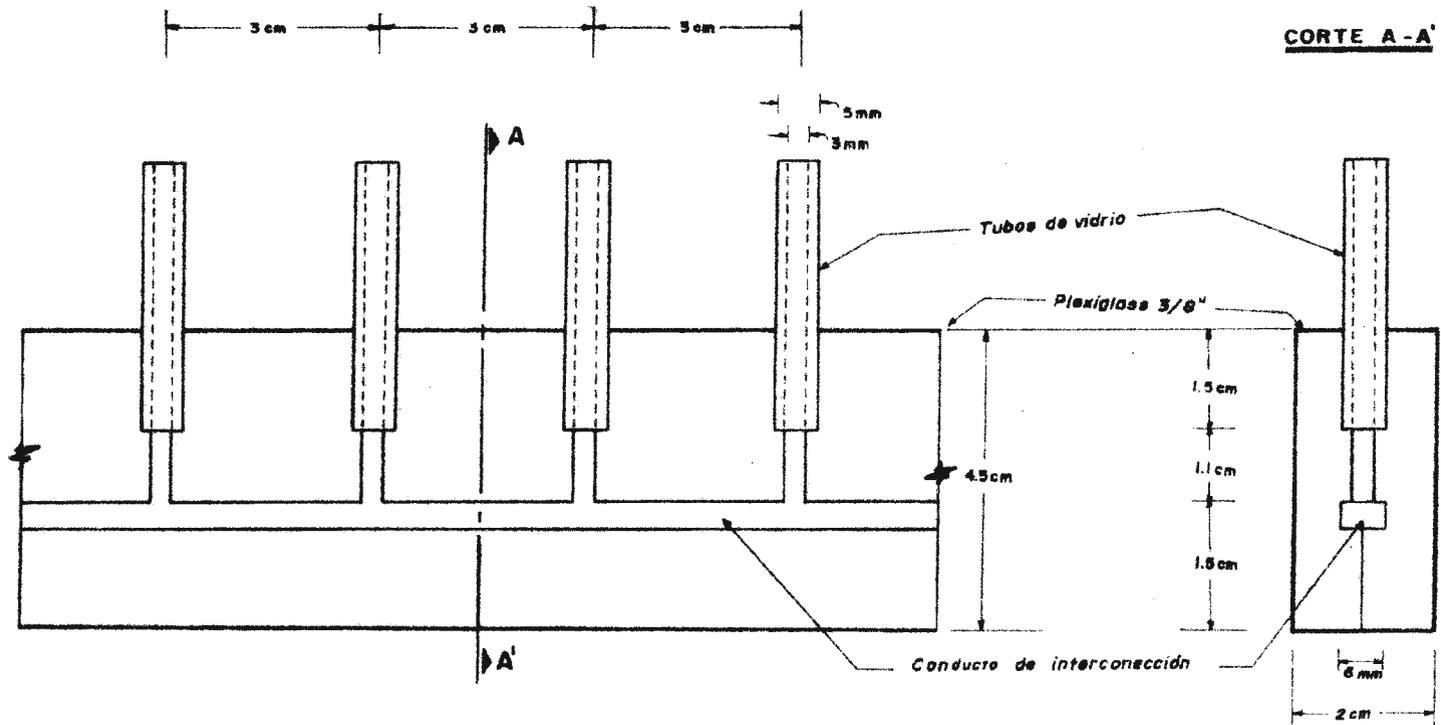


Figura 2B .- Detalle de interconexión de los tubos de vidrio en el tablero manométrico.

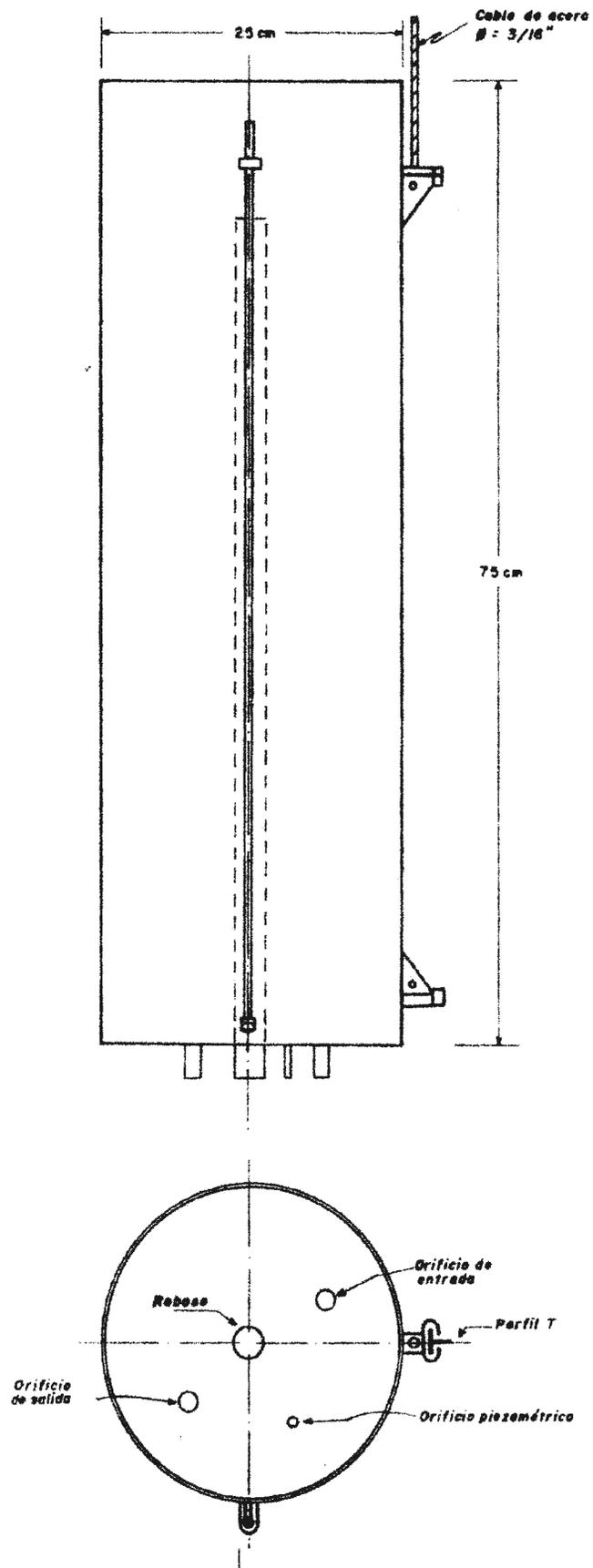


Figura 29.- Tanque de Regulación de carga de Entrada.

con el flujo respectivo, el Tanque de Prueba. Además se tiene un orificio piezométrico de 3/8" de diámetro, el cual está conectado al Tablero Manométrico con la finalidad de medir la carga de entrada.

Conectado al Tanque lateralmente se tiene un tubo de vidrio de 6 mm de diámetro externo que tiene la función de indicar el nivel del agua dentro del tanque.

El TRE está montado sobre la torre de elevación, a través de la cual puede desplazarse a voluntad, mediante un cable de acero de 3/16", al cual se encuentra unido.

d) Tanque de Regulación de Carga de Salida

Este tanque tiene la función de regular la carga de salida de agua, manteniéndola constante durante la realización de cada prueba.

Está construido de planchas de plexiglass de 1/8" de espesor; sus dimensiones son 16 x 20 x 46 cm. Ver Figura 30. Su sistema de entrada de agua consta de un orificio de entrada de 1/2" de diámetro, que capta el flujo de agua proveniente del Tanque de Prueba. Su sistema de salida consiste de un rebalse, cuya función es la misma que el del Tanque de Regulación de Carga de Entrada, y por donde discurre el flujo que se va a medir. Este es el punto de salida de agua del sistema y está conectado al desagüe. También tiene un orificio piezométrico de 3/8" de diámetro, conectado al tablero manométrico para medir la carga de salida.

El TRS está montado sobre dos perfiles de ángulo ranurado de 1" colocados en la pared sobre los cuales puede ser colocado a diferentes alturas.

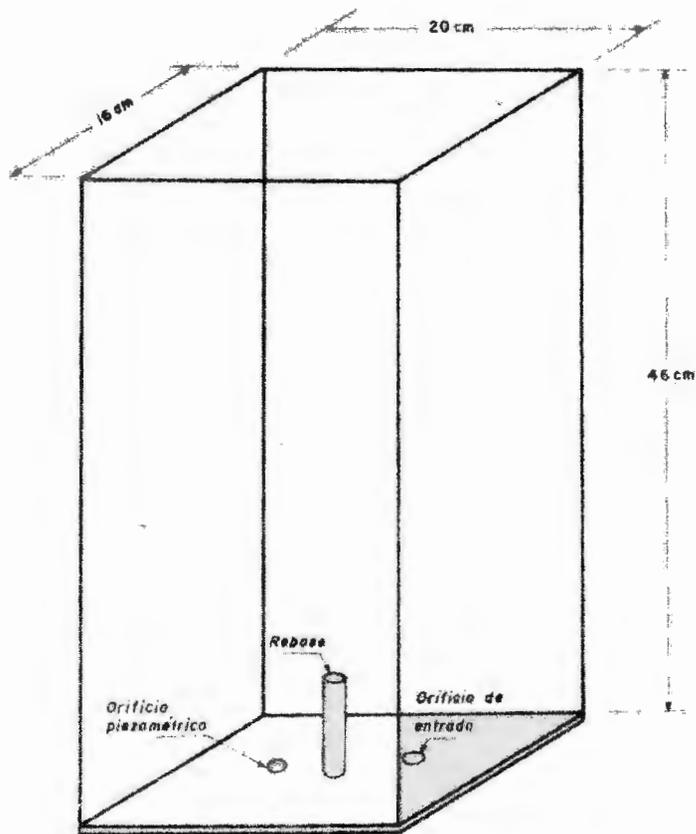


Figura 30 . - Perspectiva del Tanque de Regulación de Carga de Salida.

e) Torre de Elevación

La Torre de Elevación (TR) es una estructura de 5 m de altura, construída a base de varillas de fierro de construcción de 1/2" de diámetro. Consta de 4 varillas longitudinales de 5 m unidas cada 0.5 m con varillas transversales de 0.42 m, formando un elemento prismático de 0.42 x 0.42 x 5.0 m. Las caras laterales de este prisma están asegurados con varillas diagonales para darle mayor rigidez a la estructura.

La base de la Torre es de 0.6 x 0.9 x 0.5 m y tiene la finalidad de darle estabilidad a la misma. Un tirante de 3 m de longitud une la torre con la base. Ver Figura 31.

Para el deslizamiento del tanque de regulación de carga de entrada, la torre tiene instalado en la parte central delantera un perfil T de 1" de 5 m de longitud.

El sistema de deslizamiento, está constituido además, por una polea de 15 cm de diámetro instalado en la parte superior de la torre, y por un sistema de engranajes, colocado en la base de la misma. Este sistema de engranajes está constituido por un engranaje de 3 cm de diámetro, el cual está conectado a una manivela y un engranaje de 15 cm de diámetro, conectado a un carrete sobre el cual se enrolla el cable de acero.

f) Mangueras de Circulación

Las mangueras de circulación (MC) son aquellas que conectan los Tanques de Regulación de Carga con el Tanque de Prueba y los puntos de toma y evacuación de agua.

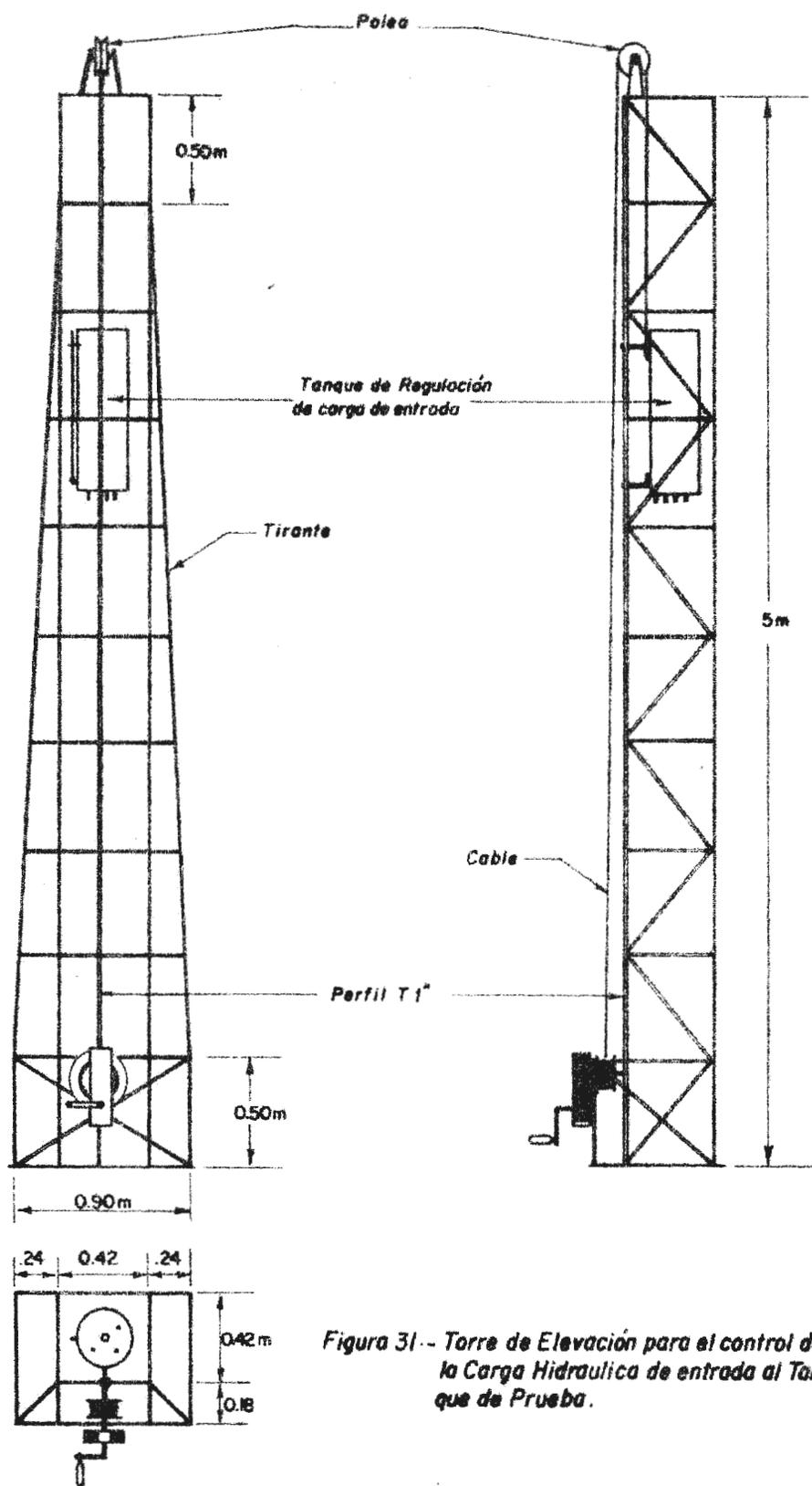


Figura 31.- Torre de Elevación para el control de la Carga Hidraulica de entrada al Tan. que de Prueba.

Las mangueras mencionadas son de jebe flexible y resistente de 1/2" de diámetro interno. Las longitudes de las diferentes mangueras son: la que une el punto de toma de agua con el TRE, 4.5 m; la que une el TRE con el TP, 5 m; la que une el TP con el TRS, 4 m; la que va del TRS al punto de evacuación, 2.5 m, y la que va del TRE al punto de evacuación, 4.5 m.

El diagrama del sistema de circulación de agua puede verse en la Figura 32.

3.5.2.2 Otros Equipos

Para la realización de las pruebas experimentales se empleó además los siguientes implementos:

- Probetas graduadas de 250 y 500 ml.
- Termómetro con aproximación de 0.1°C.
- Cronómetro
- Regla Graduada
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Baldes de diferentes capacidad.
- Llaves de Boca.
- Llaves de Cabeza
- Llaves Stillson
- Desarmador Plano
- Wincha metálica de 3 m
- Sifón de plástico de 2" de diámetro
- Lápiz y borrador
- Hoja de tabulación de datos (Ver Cuadro 7)

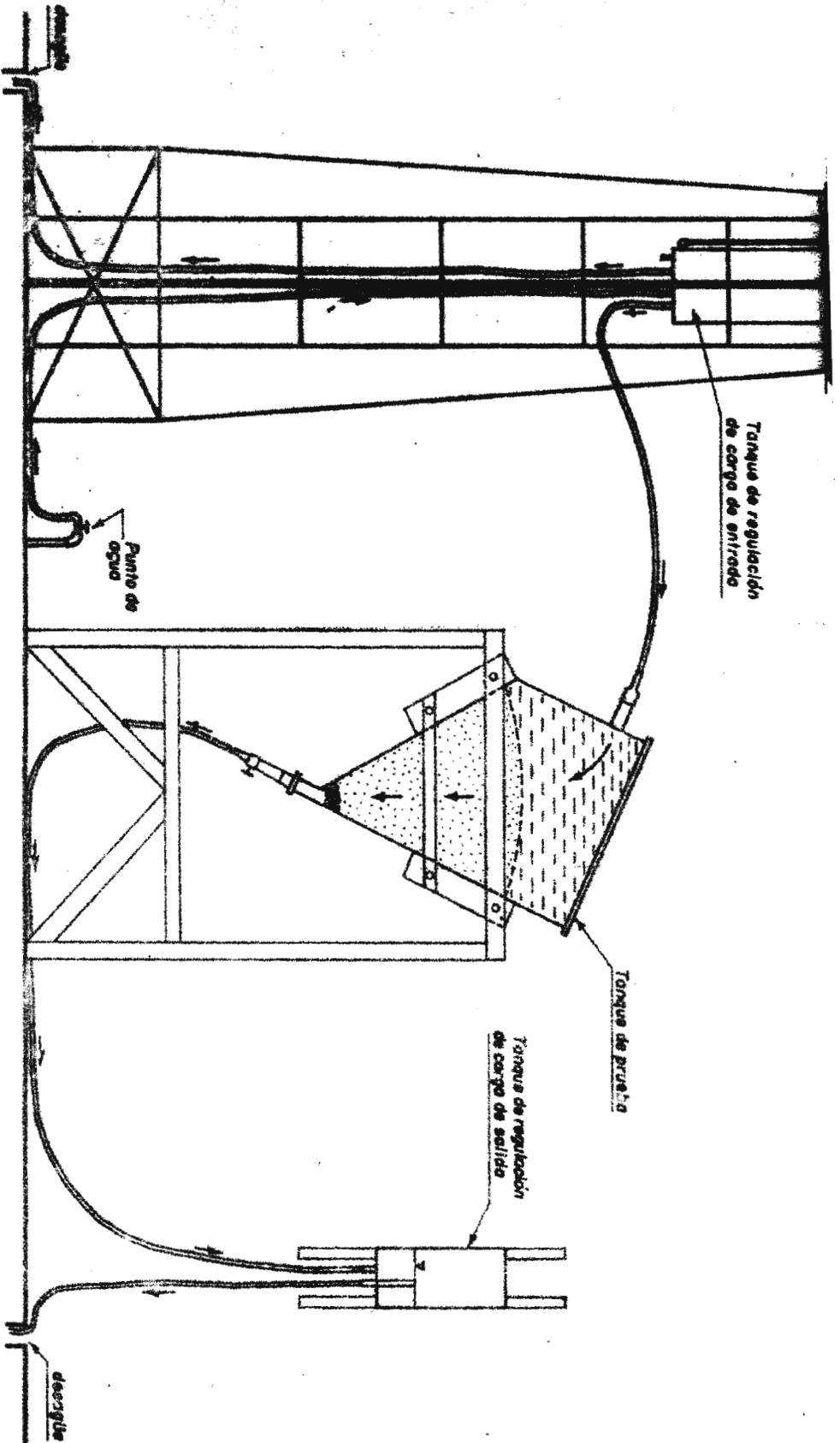


Figura 32.- Diagrama del Sistema de Circulaci3n de Agua

IV. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La evaluación del comportamiento hidrodinámico de los materiales filtroprotectores en estudio ha requerido de la construcción de un equipo especial para la realización de las pruebas experimentales. En el capítulo anterior se describe el equipo mencionado. En el presente capítulo se describe la metodología y procedimientos empleados, los cuales son propios de la presente investigación. Además se describe los métodos y procedimientos de las pruebas complementarias realizadas con el fin de seleccionar y caracterizar los materiales F-P Laminares.

4.1 SELECCION DE LOS MATERIALES FILTROPROTECTORES

Los materiales filtroprotectores empleados fueron obtenidos a partir del material filtroprotector laminar natural; éste se encuentra formando montículos en la fuente de aprovechamiento (cantera), de donde fue extraído y trasladado al laboratorio.

En el laboratorio el material F-P Laminar Natural (material madre) fue sometido al procedimiento mecánico de tamizado, utilizando el equipo de Análisis Mecánico. Para ello se colocó en el vibrador automático en forma sucesiva y decreciente las mallas 3/8", N°4, N°8 y N°16 y una base o plato de fondo.

El material que queda retenido en el tamiz N°4, constituye el F-P LM-4; el retenido por el tamiz N°8, constituye el F-P LM-8; y el retenido por el tamiz N°16, da origen al F-P LM-16.

4.2 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES FILTROPROTECTORES

El método general empleado es el análisis mecánico por tamizado, siguiendo las especificaciones standard del ASTM.

A partir del análisis mecánico se obtiene la curva granulométrica en la cual se determina el tamaño y distribución del tamaño de las partículas.

Los diámetros notables, tales como el D_{10} y D_{60} , fueron determinados de las respectivas curvas granulométricas.

Para la determinación del coeficiente de uniformidad (C_u), para los diferentes materiales F-P se empleó la relación D_{60} y D_{10} , como se menciona en la Revisión Bibliográfica. También se realizó la caracterización del suelo base empleado en las pruebas, de acuerdo a los métodos y procedimientos mencionados.

4.3 COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO

Para la evaluación del comportamiento de los materiales en estudio al flujo radial de agua hacia pozos, se ha empleado el método del Permeámetro Convergente.

Dicho método consiste en analizar el flujo del agua a través del suelo base y del material F-P Laminar, bajo la acción de gradientes hidráulicos diferentes.

El procedimiento seguido consta de las siguientes etapas:

a) Armado e instalación del Tanque de Prueba

Consiste en unir la pared frontal libre del TP al resto del conjunto haciendo uso de la armadura de soporte y de los pernos de fijación. Previamente, es colocada la rejilla, en el interior del TP (Ver Figura 25). Luego se coloca la tapa de cierre inferior con todos sus aditamentos conexos.

Una vez armado el TP es colocado sobre la estructura de soporte y conectado, mediante las mangueras de circulación, al TRE y TRS (Ver Figura 19).

b) Cargado del Tanque de Prueba

Consiste en colocar el material F-P Laminar y el suelo base dentro del tanque de prueba. Esta operación se realiza en condiciones de saturación para evitar la formación de burbujas de aire. Para ello se mantiene un tirante de agua de 2 a 5 cm por encima del material que se va colocando.

El material F-P laminar se coloca sobre la rejilla con un espesor determinado (2" ó 4" según el caso). El suelo se coloca a continuación hasta cubrir un radio aproximado de 70 cm.

Una vez colocados los materiales, se cierra herméticamente el TP, colocando la tapa de cierre superior.

c) Puesta en funcionamiento del sistema

Consiste en hacer circular el agua a través de todo el sistema como se muestra en la Figura 33. Previamente, se conectan los piezómetros con los tubos de vidrio del tablero manométrico y se coloca el mercurio metálico por la parte inferior de los tubos, a través del dispositivo especial de interconexión (Ver Figura 28 y 34).

d) Realización de las pruebas y toma de datos

La realización de las pruebas consiste en hacer funcionar el sistema bajo la acción de diferentes gradientes hidráulicos. Para cada secuencia experimental (combinación suelo base - material F-P Laminar determinado) se han realizado siete pruebas.

La toma de datos consiste en obtener las lecturas manométricas, en cms de mercurio, en el Tablero, (Ver Figura 34). Las lecturas son anotadas en el formato respectivo (Cuadro 7). También, se mide y anota en el mismo formato, el volumen de agua descargado en un intervalo de tiempo dado. Así mismo, se toma la temperatura del agua al efectuar dicha medición.

Las lecturas deben hacerse después de una hora de funcionamiento del sistema o cuando las condiciones de equilibrio de flujo (flujo permanente) estén aseguradas, esto es, cuando las lecturas de carga piezométrica no varíen.

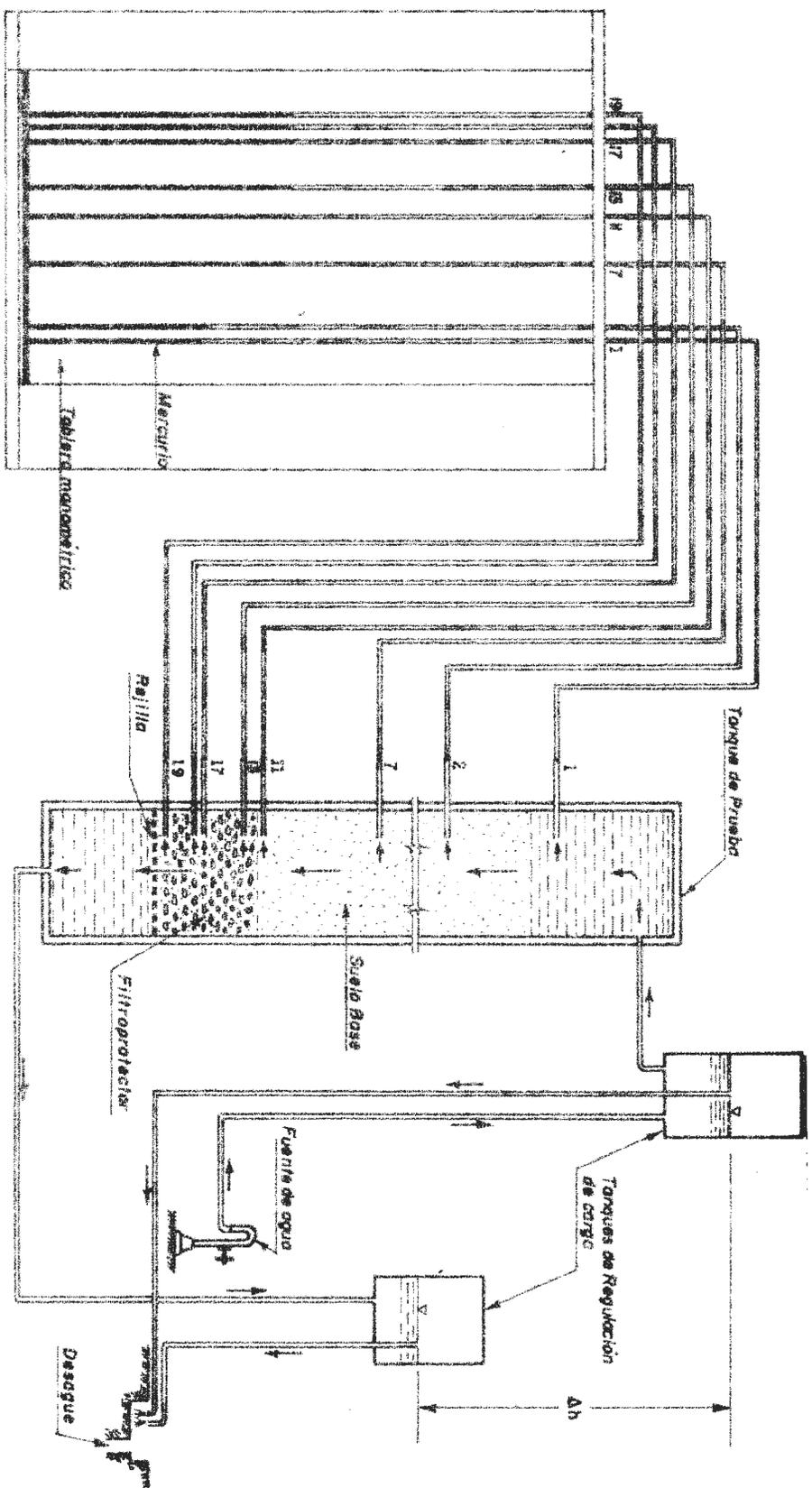


Figura 23. Representación esquemática del funcionamiento del permeámetro convergente con respecto al flujo de agua a través de los ductos por las placas.

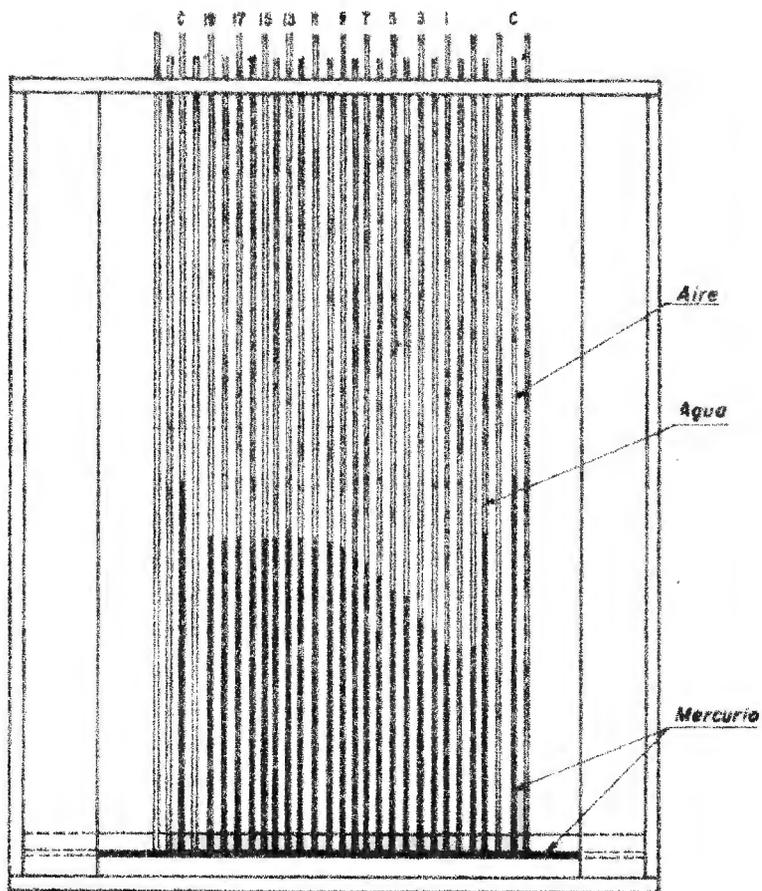


Fig. 34.- Tablero manométrico mostrando las lecturas de potencial (en cm. de mercurio) en una de las pruebas efectuadas.

e) Cambio de materiales

Realizadas todas las pruebas para una combinación dada de suelo base - filtroprotector, los materiales ensayados son evacuados del TP mediante sifonamiento. Como sifón, se usa una manguera de plástico flexible de 2" de diámetro y 5 m de longitud.

Luego, se vuelve a cargar el tanque de prueba, para una nueva combinación de suelo base - material filtroprotector, y se realizan las pruebas respectivas, de acuerdo a los procedimientos ya descritos.

f) Cambio de rejilla

Una vez realizadas las pruebas para todas las combinaciones de suelo base - material filtroprotector laminar, se efectúa el cambio de rejilla. Para ello es necesario bajar el tanque de prueba y desarmarlo.

En esta operación se aprovecha para revisar los piezómetros y reemplazar aquellos que se hubieran obstruido o malogrado al realizar las diferentes acciones de carga y descarga de materiales.

Colocada la nueva rejilla se vuelve a armar el TP y a colocarlo sobre la estructura de soporte.

Luego se continúa con el proceso de cargado de materiales y realización de las pruebas respectivas de acuerdo a los procedimientos indicados anteriormente.

g) Evaluación de los datos experimentales

Las lecturas piezométricas tomadas en cm de mercurio son convertidas a carga hidráulica (potencial) en cm de mercurio.

Para ello se resta cada una de éstas a la lectura de referencia (manómetro C), la cual representa la presión atmosférica, considerada como cero (presión relativa).

La carga hidráulica en cms de mercurio, es convertida luego, en cm de agua considerando el peso específico del mercurio

Este fue tomado como 13.57 gr/cm^3 en promedio, de acuerdo al rango de temperaturas a las que se realizaron las pruebas experimentales.

El gradiente hidráulico promedio al que está sometido el sistema en cada prueba se calculado dividiendo la pérdida de carga producida entre los tanques de regulación de carga de entrada y salida entre la longitud total de muestra (70 cm).

La descarga Q , en cm^3/seg , es calculada dividiendo el volumen de agua medida entre el tiempo considerado.

La descarga específica, q , en cm/seg , es calculada para un radio (r) determinado debido a que la sección transversal al flujo varía con la distancia al centro del pozo por tratarse de un modelo radial. Teniendo en cuenta que el Tanque de Prueba es un sector circular de 53° con un espesor de 12 cms. La sección transversal al flujo, A en cm^2 , para un radio r dado es $A = 11.1 r$. Luego, la descarga específica, q , en cm/seg es $q_r = 0.09 Q/r$.

También es posible determinar las pérdidas de carga entre dos piezómetros cualesquiera y su correspondiente gradiente hidráulico.

V. RESULTADOS Y ANALISIS

Los resultados son obtenidos de los datos experimentales, presentados en forma de cuadros y gráficos, a partir de los cuales se realizan los análisis respectivos, tanto en forma cualitativa como cuantitativa.

Los resultados son presentados y analizados mediante la caracterización de los materiales en estudio y el comportamiento hidrodinámico de los mismos.

5.1 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales F-P Laminares y el suelo base empleados fueron caracterizados en base al análisis de la curva granulométrica acumulativa.

El análisis efectuado fue hecho considerando a los materiales estudiados como medios porosos a través de los cuales ocurre el flujo de agua, es decir, teniendo en cuenta su comportamiento hidrodinámico.

Es importante señalar, con respecto al método utilizado para definir la caracterización de los materiales F-P Laminares, que éstos debido a la forma de sus partículas no presentan una relación diametral esférica. Por lo tanto este método aplicado para medios granulares es utilizado en forma aproximativa y referencial para los medios laminares.

El tamaño y la distribución de tamaños de las partículas de los materiales son determinados mediante el análisis granulométrico. Aunque los granos que pasan a través de un tamiz y no pasan a través de otro más pequeño no son necesariamente iguales, se asume que a través de un tamiz pasan partículas de igual tamaño, considerándose un diámetro determinado.

La caracterización de los materiales, en cuanto al tamaño de sus partículas, es hecha mediante el Diámetro Medio (D_m), obtenido de las curvas granulométricas, empleando la relación $D_m = \Sigma d \cdot \Delta p / \Sigma \Delta p$,

CUADRO 4. Diámetro Medio (D_m) de los materiales empleados en la presente investigación. (mm)

Material	d_{100-90}	d_{90-80}	d_{80-70}	d_{70-60}	d_{60-50}	d_{50-40}	d_{40-30}	d_{30-20}	d_{20-10}	d_{10-0}	D_m
Laminar Natural	16.00	13.20	10.90	8.50	6.20	4.40	2.65	1.10	0.74	0.01	6.31
Laminar 16	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.60	1.961
Laminar 8	3.60	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.10	3.358
Laminar 4	6.65	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	5.70	6.315
Suelo Base	0.29	0.21	0.19	0.175	0.17	0.165	0.155	0.145	0.125	0.09	0.172

donde d es el diámetro medio para un intervalo de porcentaje, Δp , considerado.

En el Cuadro 4 se presentan los diámetros medios (D_m) de los materiales en estudio, cuyos datos son obtenidos de las curvas granulométricas respectivas.

Los valores del coeficiente de uniformidad, C_u , mostrados en el Cuadro 5, son obtenidos también de las curvas granulométricas acumulativas de los respectivos materiales.

El C_u ha sido obtenido tomando el criterio matemático empleado para los medios granulares.

CUADRO 5. Coeficiente de Uniformidad, C_u .

Material	d_{60} (mm)	d_{10} (mm)	C_u
Laminar Natural	7.50	0.15	50.00
Laminar 4	6.35	6.33	1.01
Laminar 8	3.36	3.19	1.05
Laminar 16	2.00	1.89	1.06
Suelo Base	0.175	0.11	1.59

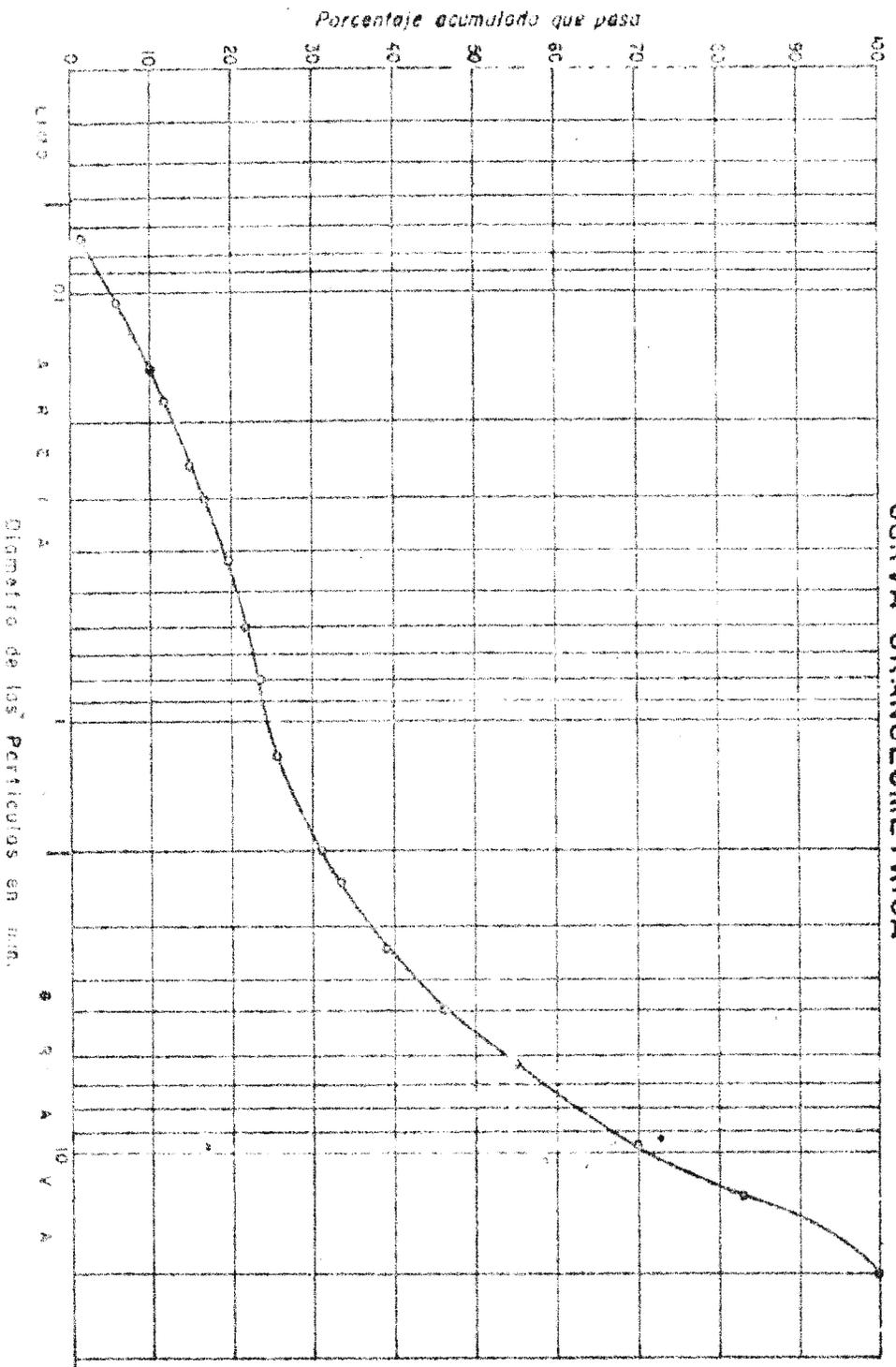
5.1.1 Material F-P Laminar Natural

En la Figura 36 se muestra la curva granulométrica acumulativa del F-P Laminar en condiciones naturales. Los datos que dan origen a dicha curva constan en el Cuadro 8 (Anexo).

El análisis granulométrico del F-P Laminar en condiciones naturales es presentado con la finalidad de establecer el origen de los F-P Laminares en estudio.

Las partículas que componen este material son planas o laminares debido a que provienen de la intemperización de una roca sedimentaria de estructuración Laminar ya que no ha sufrido ningún tipo de rodamiento.

CURVA GRANULOMETRICA



Presenta una gran variedad de tamaños de partículas, ya que su curva granulométrica se desplaza ampliamente sobre diferentes campos texturales, correspondiendo un 78% a las gravas y un 30% a las arenas.

Se trata de un material de granulometría variada, ya que su coeficiente de uniformidad es bastante alto ($C_u = 50.0$).

5.1.2 Filtroprotector Laminar LM4, LM8 y LM16

En la Figura 36 se muestra las curvas granulométricas acumulativas de los tres tipos de material F-P obtenidos por tamizado a partir del material FP Natural. Los datos que dan origen a dichas curvas se presentan en los Cuadros 9, 10 y 11 del Anexo.

Las tres curvas presentan las mismas características en cuanto a su forma, variando únicamente en su posición con respecto al rango textural. Son curvas en forma de S muy parada (granulometría cerrada).

De acuerdo a la posición de cada una de las curvas, el F-P LM4 corresponde a grava media; el F-P LM8, a grava muy fina; y, el F-P LM16, a arena muy gruesa.

El coeficiente de uniformidad para los tres tipos de material tiene un valor cercano a la unidad, lo cual los tipifica como materiales completamente uniformes.

Por su uniformidad y la forma específica de sus partículas, estos materiales presentan mayor facilidad al flujo del agua a través de sí mismos. Su tamaño uniforme de partículas da lugar a vacíos de tamaños regulares y por lo tanto menor oposición al movimiento de los fluidos.

5.1.3 Suelo Base

En la Figura 37 se muestra la curva granulométrica acumulativa del Suelo Base. Los datos que dan origen a dicha curva se presentan en el Cuadro 12 (Anexo).

CURVA GRANULOMETRICA

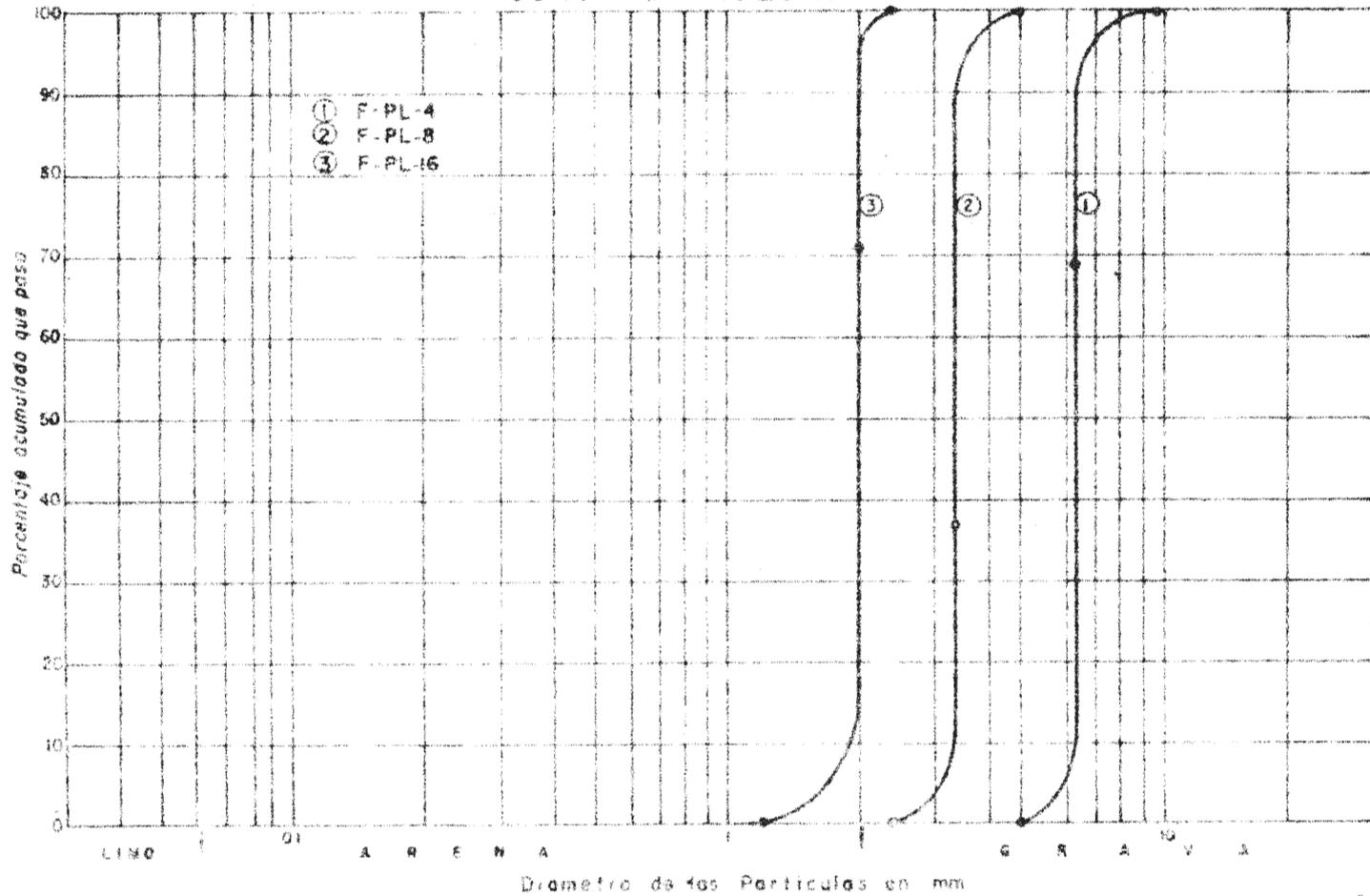


FIGURA 26.- Curvas granulométricas de los tres tipos de F-F Lumbar LM

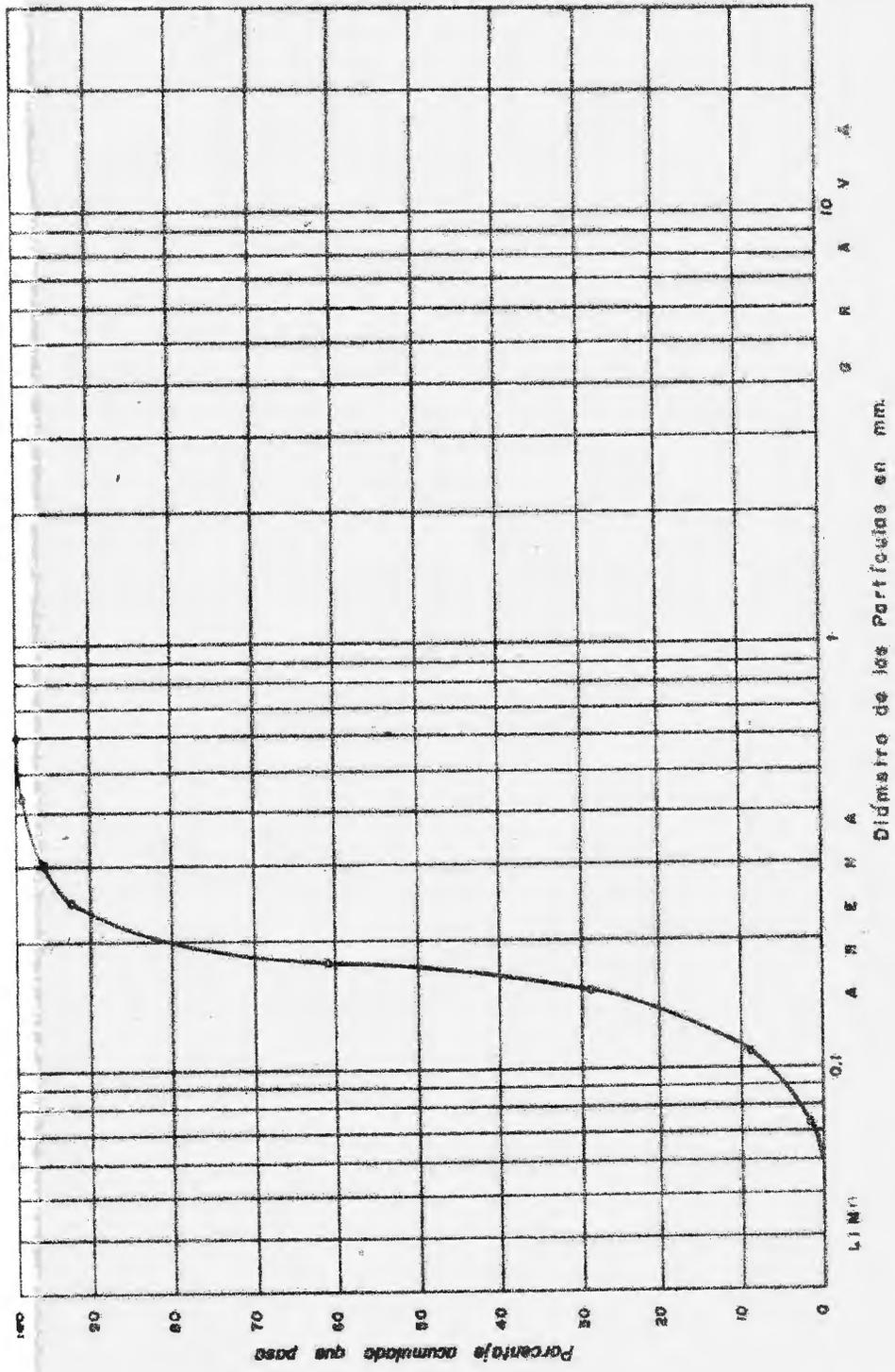


Figura 37 .- Curva granulométrica del Suelo Base usado en el Tanque de Prueba.

De acuerdo al tamaño de las partículas que lo componen y de la posición de la curva se trata de arena fina.

A diferencia de los materiales filtroprotectores en estudio, la forma de las partículas del suelo base es granular.

Su Coeficiente de Uniformidad es de 1.59, tratándose por lo tanto, de un medio uniforme ($C_u < 2$).

5.2 COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DE LOS MATERIALES F-P LAMINARES

Por intermedio de las pruebas experimentales realizadas en el Permeámetro Convergente, se han medido las Cargas o Potencial en cada uno de los piezómetros instalados en el modelo, para diferentes gradientes y para cada uno de los sistemas estudiados (combinación Suelo Base - Material Filtroprotector).

La evaluación del comportamiento al flujo del agua de los diferentes sistemas empleados se realiza mediante el estudio de la modificación de las condiciones de flujo en las cercanías del pozo por efecto de la introducción de un determinado tipo de material filtroprotector. Para ello se analizan los siguientes puntos:

- Relación carga hidráulica (h) - distancia al centro del pozo (r).
- Redes de flujo.
- Relación Caudal Total (Q) - Rebatiendo Total (S).
- Relación Caudal Total (Q) - Rebatiendo entre los piezómetros 2 y 8, (S_{2-8}). (Suelo Base).
- Relación Descarga Específica (q_{40}) - Gradiente entre los piezómetros 2 y 8, (J_{2-8}). (Suelo Base).
- Relación Descarga Específica, q_{15} - Gradiente J_{9-17} - (Suelo Base - Material F-P).
- Resistencia de Entrada.

- Número de Reynolds.
- Relación Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia.

Cabe recordar, antes de realizar los análisis respectivos, que las condiciones en que se realizaron las pruebas experimentales fueron las siguientes:

1. Para cada sistema, una secuencia experimental, (presencia de un determinado material filtroprotector) se han realizado una serie de siete pruebas; cada una de las cuales está definida por un determinado gradiente.
2. Para cada material filtroprotector se realizaron dos secuencias experimentales; una con 2" de material F-P y otra con 4".
3. Como referencia se realizó una secuencia experimental sin emplear material filtroprotector.
4. En las secuencias experimentales mencionadas se empleó una rejilla cribada.
5. También se realizaron dos secuencias experimentales auxiliares empleando una rejilla ranurada (8 ranuras por vuelta).
6. En todas las secuencias experimentales el material filtroprotector es colocado entre la rejilla y el Suelo Base.
7. Para todas las secuencias experimentales se empleó el mismo tipo de Suelo Base.
8. La dirección del flujo de agua, fue la misma en todas las pruebas.
9. El modelo empleado para la realización de las pruebas experimentales simula el flujo radial a través de un acuífero confinado, hacia un pozo instalado en el centro de una isla circular, cuyo rendimiento es Q y cuyo potencial o carga total en la circunferencia externa (TRE) y en el interior del pozo (TRS) son previamente fijados (Ver Figura 4 y 5).

10. El diámetro del pozo, en el modelo, es de 15 cm (6") y el estudio abarca la zona inmediata a éste hasta un radio aproximado de 5 veces el diámetro del pozo.
11. De acuerdo a la forma y dimensiones del modelo, la sección transversal al flujo, A (cm^2) está dada por la relación $A = 11.1 r$.

Los valores obtenidos en cada secuencia experimental se encuentran registrados en los Cuadros 13 al 21 del Anexo.

5.2.3 Relación Carga Hidráulica (h) - distancia al centro del pozo (r)

Los valores de Carga Hidráulica (h), reportados en los Cuadros 13 al 21, son ploteados con respecto a la distancia al centro del pozo (r) para cada una de las secuencias experimentales realizadas, obteniéndose las Figuras 38 a la 42.

El análisis de la relación h vs. r se efectúa fundamentalmente, en base a la variación de las cargas o potencial, la cual nos indica el consumo energético o pérdidas de carga, a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector Laminar.

5.2.1.1 Sistema Suelo Base - Sin Filtroprotector

De acuerdo a la Figura 38, que representa los resultados de la secuencia experimental realizada en el sistema arriba mencionado, podemos efectuar el siguiente análisis:

- a) La variación de los niveles piezométricos o de carga hidráulica a lo largo del Suelo Base, indican un fuerte consumo energético, traducido en grandes pérdidas de carga, h_s .
- b) Las pérdidas de carga aumentan conforme disminuye la distancia al centro del pozo, lo cual se explica debido a la confluencia de las líneas de flujo.

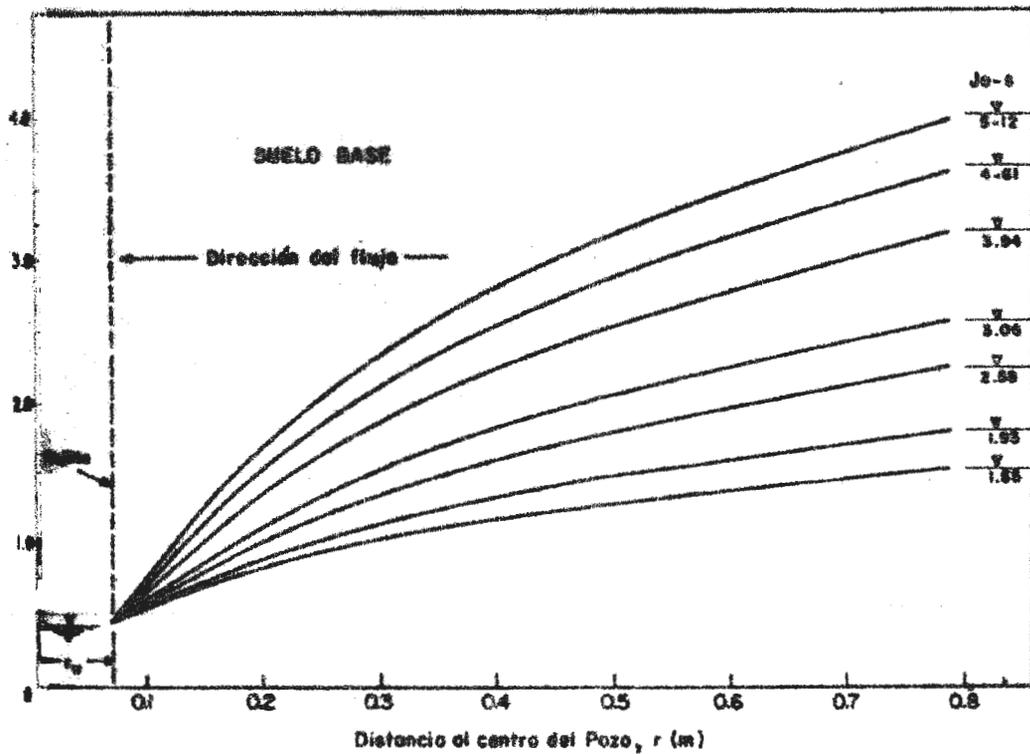


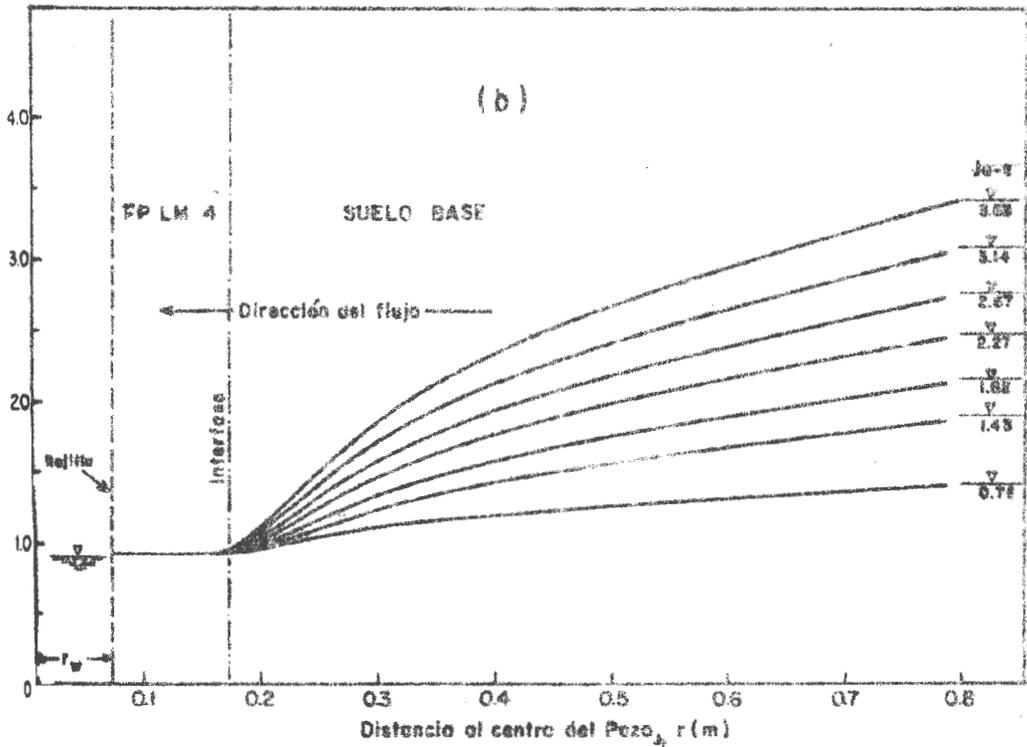
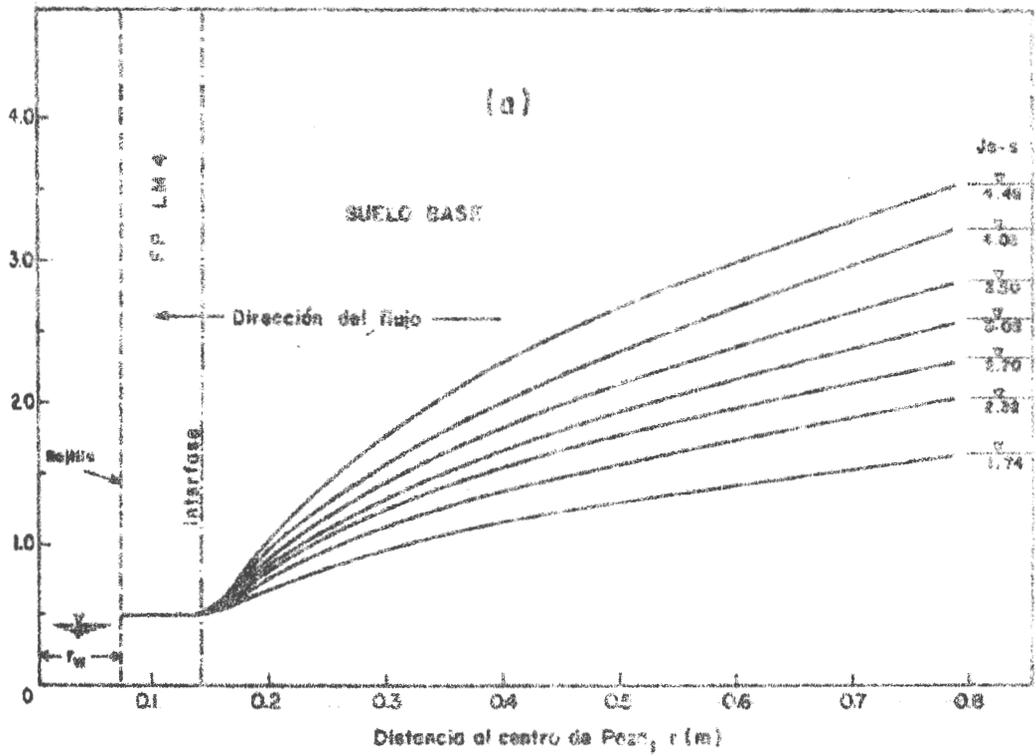
Fig. 38 -- Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico, sin filtro protector.

- c) La carga hidráulica (h) y la distancia al centro del pozo (r) están relacionados en forma logarítmica. Dicha relación se comprueba mediante al análisis de regresión. Ver Anexo.
- d) De acuerdo al análisis de regresión aplicado a la relación de tipo logarítmica planteada se comprueba que existe una alta correlación entre ambas variables.
- e) Las pendientes de las líneas logarítmicas que representan la variación de las cargas a lo largo del Suelo Base, se incrementan con el Gradiente Total del Sistema. Esto indica que a mayor Gradiente, las Pérdidas de Carga en el Suelo Base son mayores.

5.2.1.2 Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM4

Las Figuras 39(a) y 39(b), nos muestran la variación de la carga hidráulica a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM4, para 2" y 4" de material F-P, (con rejilla cribada) respectivamente. El análisis correspondiente presenta los siguientes resultados:

- a) Los niveles piezométricos a lo largo del Suelo Base, para ambos sistemas (2" y 4") indican un fuerte consumo energético, traducido en grandes pérdidas de carga, h_s .
- b) Las pérdidas de carga a través del Suelo Base, aumentan conforme disminuye la distancia a la interfase Suelo Base - Filtroprotector.
- c) La variación de las cargas totales a través del Suelo Base siguen una relación de tipo logarítmico con respecto a la distancia al centro del pozo. El análisis de regresión de dicha relación se muestra en el Anexo.



39.- Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. Con F.P. Laminar LM-4 a) Espesor 5cm (2"). b) Espesor 10cm (4"). Rejilla cribada.

- d) El incremento de las pendientes de las líneas logarítmicas que representan la variación de las cargas a lo largo del Suelo Base, indican que éstas obedecen a la variación del Gradiente Total del Sistema.
- e) No existe diferencia en cuanto a la conformación de las curvas que relacionan la variación de carga o caída de potencial a lo largo del Suelo Base con respecto a la distancia al centro del pozo para ambos sistemas ensayados (2" y 4").
- f) A nivel de la zona de cambio de granulometría (Suelo Base - Filtroprotector) se presenta un cambio brusco en cuanto a las Pérdidas de Carga.
- g) Los niveles piezométricos a lo largo del material Filtroprotector, en ambos sistemas, indican un consumo energético mínimo y casi no perceptible, para todos los gradientes a los que se sometió el sistema lo cual se traduce en Pérdidas de Carga, h_f , dentro de este medio poroso, no significativas.
- h) La variación de las cargas a través del material F-P Laminar 4 es lineal con respecto a la distancia al centro del pozo y no varía con respecto al Gradiente Hidráulico, siendo la misma para todas las pruebas realizadas.
- i) De acuerdo a lo mencionado anteriormente, podemos inferir que la introducción del material F-P Laminar es linearizar la relación entre la carga hidráulica y la distancia al centro del pozo. También puede afirmarse que al producirse pérdidas de carga no significativas a través del material F-P, éste

produce el efecto hidráulico de ampliar el diámetro efectivo del pozo, aumentando, de esta manera, el área de captación de agua del pozo.

5.2.1.3 Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM8

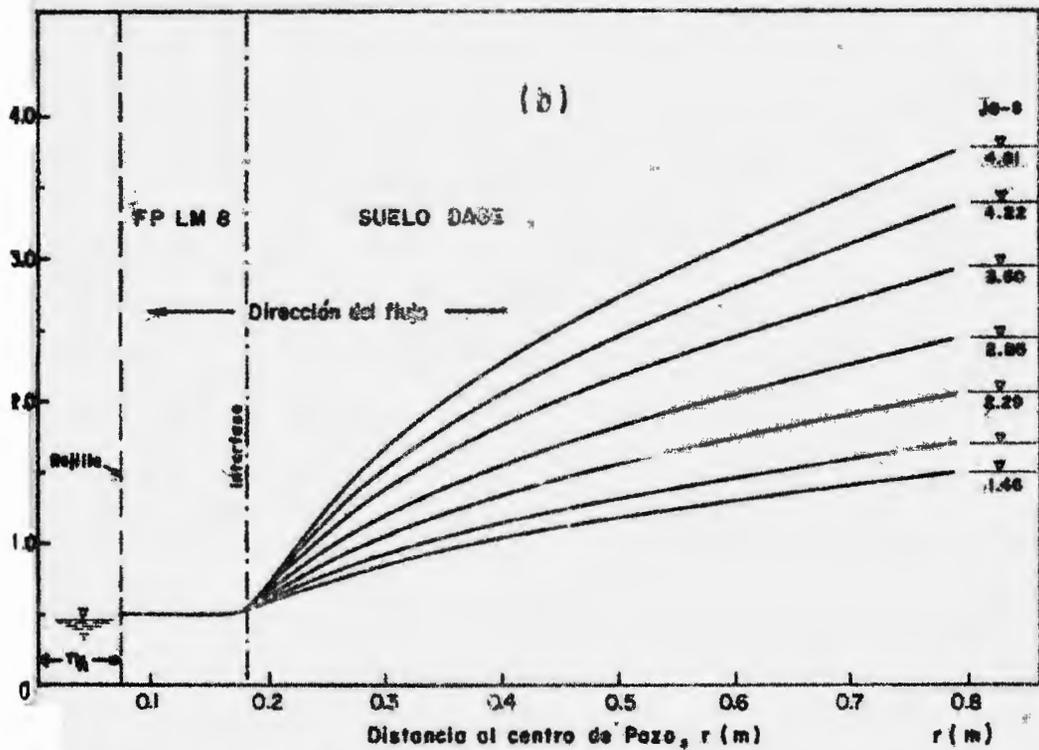
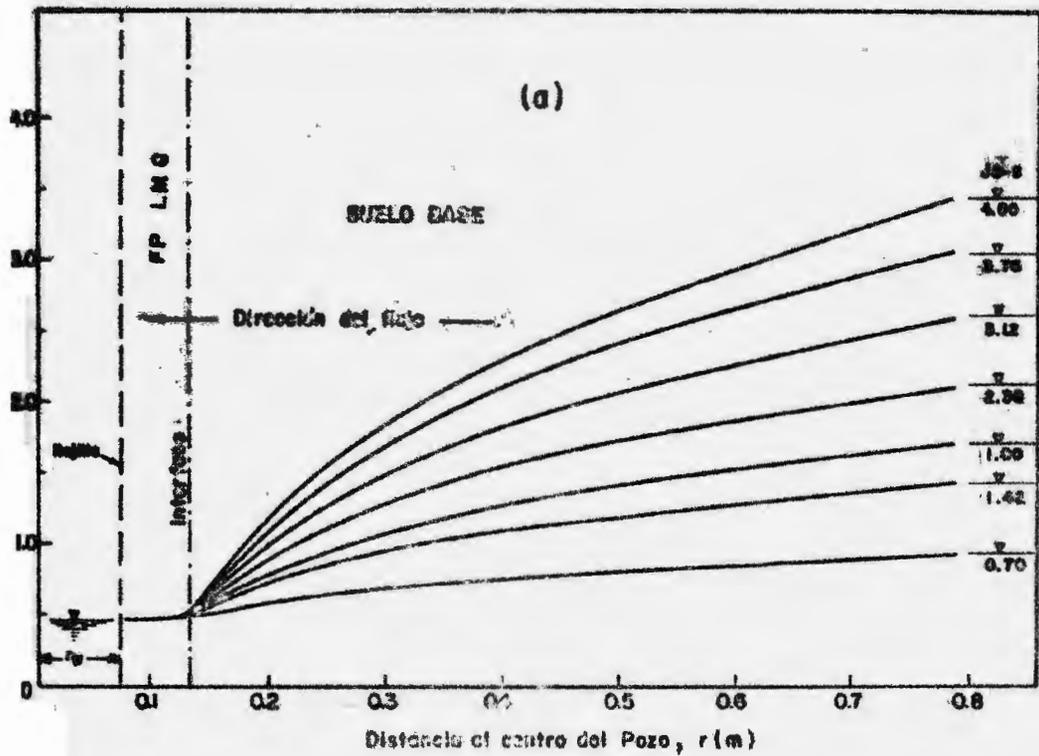
En las Figuras 40(a) y 40(b), se presenta gráficamente la variación de la carga hidráulica a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM8, para 2" y 4" de material F-P, respectivamente, ambos con rejilla cribada. En la Figura 41(a), se muestra la relación entre la carga hidráulica y la distancia al centro del pozo para el mismo sistema, empleando 4" de material F-P y la rejilla ranurada.

El análisis correspondiente a estos tres sistemas presenta idénticos resultados a los sistemas mencionados en el acápite anterior. Sin embargo, existe diferencia en cuanto a la conformación de las curvas de caída de potencial para estos tres sistemas, siendo las curvas correspondientes al sistema que usa rejilla ranurada menos pronunciadas y por lo tanto las pérdidas de carga a través del Suelo Base son menores. Las curvas más pronunciadas corresponden al sistema Suelo Base - Material F-P 3-2", siendo las pérdidas de carga a través del suelo base, mayores.

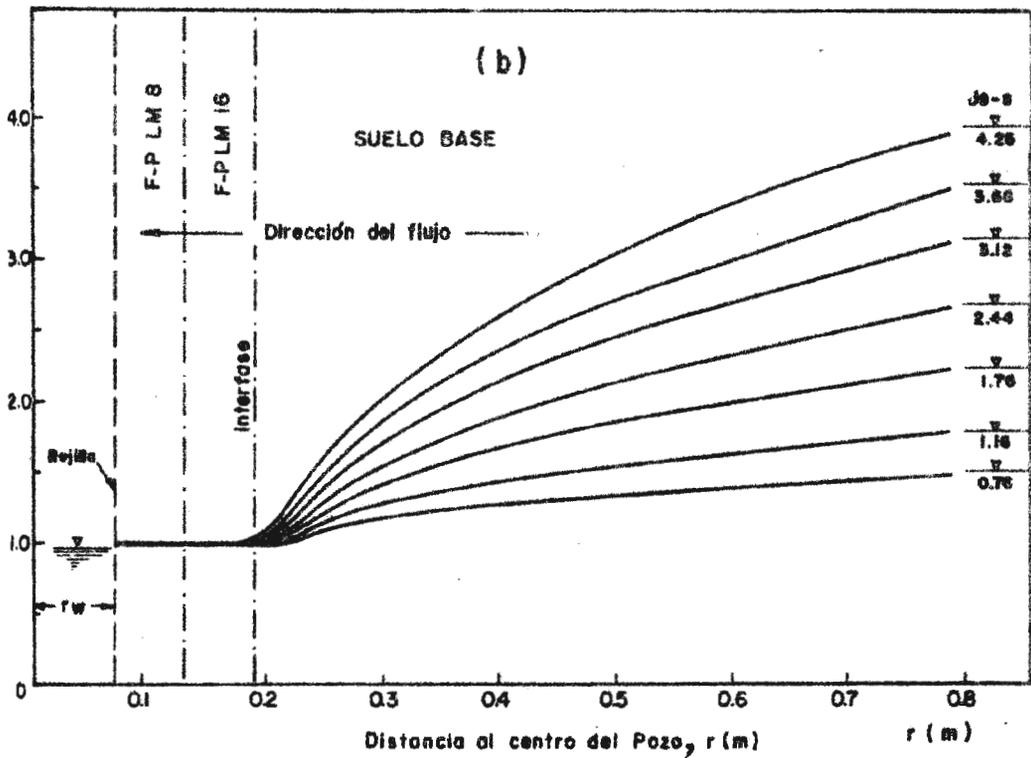
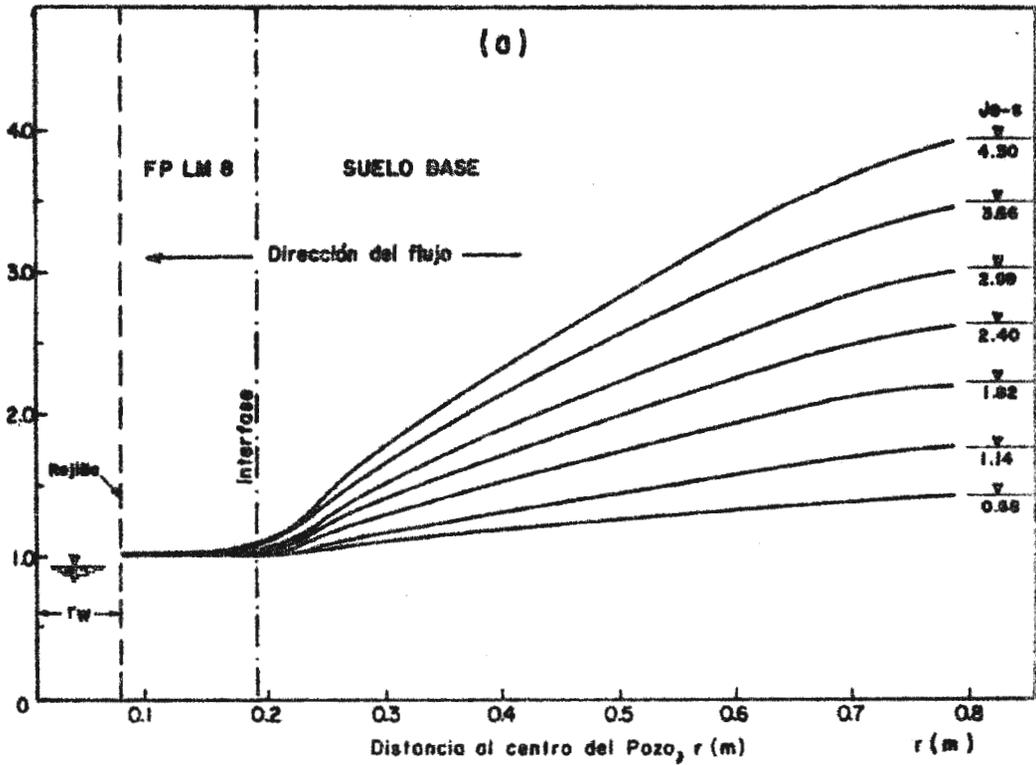
5.2.1.4 Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM8-16

La Figura 41(b) nos muestra la variación de la carga hidráulica a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM8-16 con 4" de F-P (2" de F-P LM8 y 2" de F-P LM16), con rejilla ranurada.

El comportamiento de este sistema es análogo a los sistemas anteriormente analizados.



40 - Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. Con F.P. Laminar LM-8 a) Espesor 5 cm (2"). b) Espesor 10 cm (4"). Rajilla cribada.



4) -- Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del Pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. a) Con FP Laminar LM-8; espesor 10 cm (4"). b) Con FP Laminar LM-8 y LM-16; espesor 10 cm (4"). Rejilla ranurada.

5.2.1.5 Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM16

Las Figuras 42(a) y 42(b), muestran la variación de la carga hidráulica a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector LM16, con 2" y 4" de material F-P, respectivamente, con rejilla cribada, para los diferentes valores de gradiente hidráulico a que fue sometido el sistema.

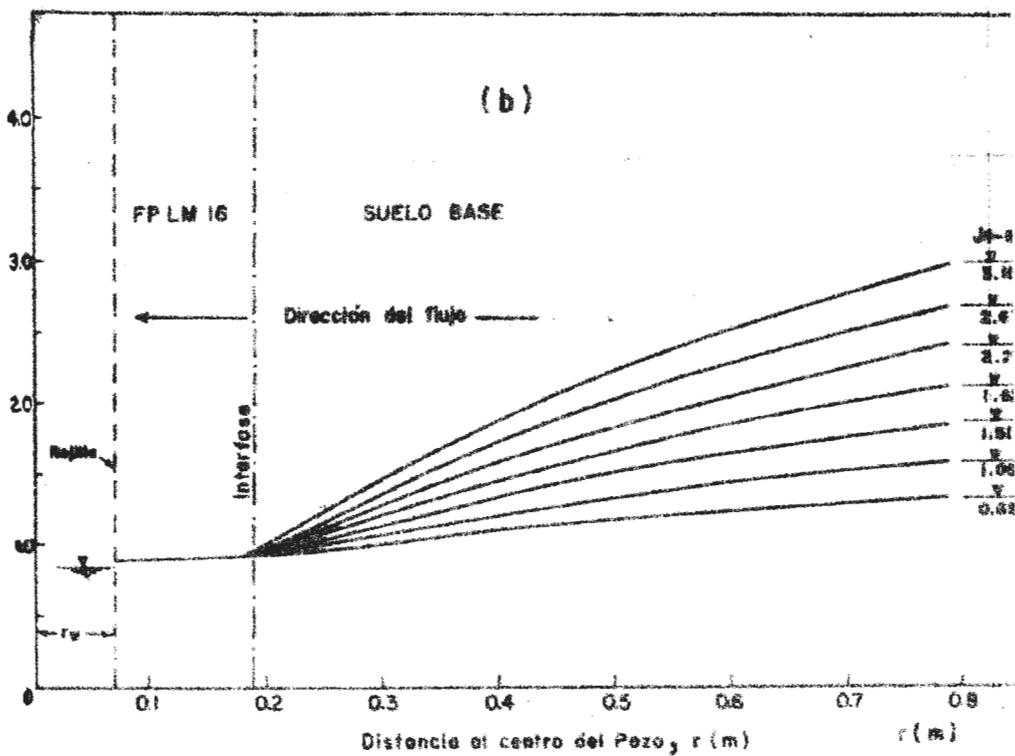
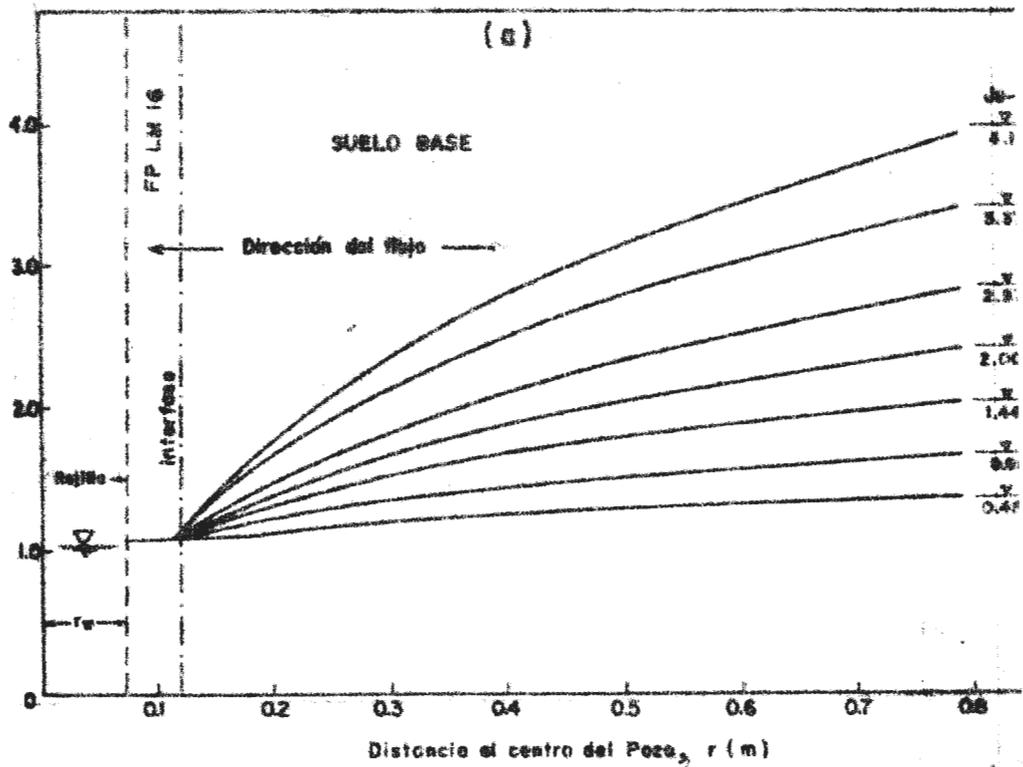
El análisis correspondiente a estos dos sistemas es idéntico a los mencionados para el sistema Suelo Base - Filtroprotector LM4.

Cabe mencionar solamente que comparando la conformación de las curvas de variación de la carga o caída de potencial, éstas son diferentes. Las curvas correspondientes al sistema que emplea 2" de material F-P son más pronunciadas que las del sistema con 4" de material F-P, al aproximarse a la zona de cambio de granulometría, siendo, por lo tanto, mayores las pérdidas de carga en el sistema con F-P LM16-2".

5.2.1.6 Comparativo del análisis de los resultados en los sistemas Suelo Base - Filtroprotector Laminar LM

Comparando los análisis efectuados para los sistemas mencionados, obtenemos los siguientes resultados:

- a) Existe una notable diferencia en cuanto a la forma de las curvas de variación de potencial entre el sistema Suelo Base - Sin filtroprotector y los sistemas Suelo Base - Con filtroprotector.
- b) En el sistema Suelo Base - Sin filtroprotector las pérdidas de carga a través del Suelo Base son mucho más grandes que en los sistemas con Filtroprotector, incrementándose conforme disminuye la distancia al centro del pozo.



42.-- Curvas de caída de potencial con respecto a la distancia al centro del pozo para diferentes valores de gradiente hidráulico. Con F.P Laminar LM-16 a) Espesor 5 cm (2"); b) Espesor 10 cm (4").

- c) La variación de la carga hidráulica a través del Suelo Base sigue una relación logarítmica con respecto a la distancia al centro del pozo.
- d) La diferencia entre la variación de la carga a través del Suelo Base para los diferentes sistemas con Filtroprotector es pequeña. De acuerdo a los resultados del análisis de regresión logarítmica simple, se tiene que las menores variaciones (menores pendientes de las líneas logarítmicas) se dan para el sistema con Filtroprotector LM8-4", con rejilla ranurada. Las mayores variaciones de carga se dan para el sistema con Filtroprotector LM4-4" con rejilla cribada.
- e) La introducción del material F-P Laminar modifica la conformación de las curvas de caída de potencial a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector. Las pérdidas de carga a través del material F-P son mínimas y no varían con respecto al gradiente.
- f) La variación de la carga hidráulica a través de los materiales F-P Laminares sigue una relación lineal (casi horizontal) con respecto a la distancia al centro del pozo y el consumo energético es menor para el F-P Laminar 8, siendo mayor para el F-P LM16.

5.2.2 Redes de Flujo

Las Figuras 43 a la 47, nos muestran las Redes de Flujo de una de las pruebas efectuada para cada sistema Suelo Base - Filtroprotector en estudio.

Las Redes de Flujo construídas nos muestran en forma gráfica que el flujo del agua, en todos los sistemas, es radial. También nos muestran la forma cómo se distribuyen las pérdidas

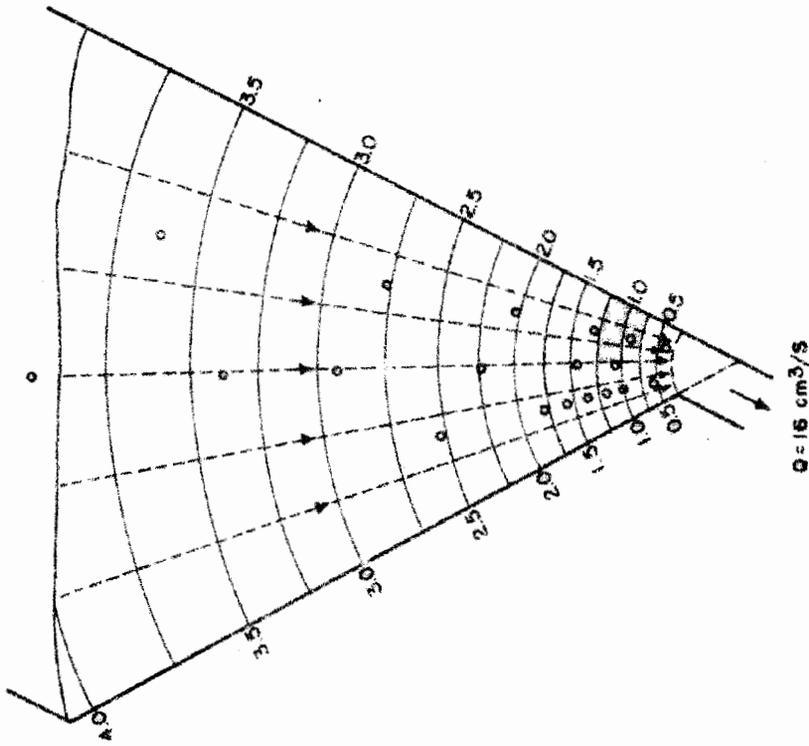


Figura 43 -- Red de Flujo para una de las pruebas del Sistema Suela Base sin Filtrorprotector.

de carga a través de todo el sistema Suelo Base - Filtropro tector. Se observa claramente que las pérdidas de carga aumentan (las líneas equipotenciales se comprimen) conforme disminuye la distancia al centro del pozo. Este fenómeno se explica debido a que la sección transversal al flujo disminuye con la distancia (r), lo cual hace que la velocidad aumente y por lo tanto aumenten las pérdidas de carga.

En cuanto a las líneas de corriente, puede observarse perfectamente la confluencia de éstas hacia el eje imaginario del pozo. A mayor confluencia, las pérdidas de carga son mayores. Ver Figura 43.

En las Figuras 44 a la 47, se observa claramente que con la introducción del material F-P Laminar, en el cual las pérdidas de carga son insignificantes, el diámetro efectivo del pozo se incrementa, en el espesor del F-P considerado en cada caso, ampliándose el área de captación. Al incrementarse el diámetro efectivo del pozo, la confluencia de las líneas de flujo es menor y, por lo tanto, las pérdidas de carga a través del Suelo Base disminuyen.

De lo dicho anteriormente se deduce, y se comprueba experimentalmente, que las pérdidas de carga a través del Suelo Base son mejores para los sistemas que emplean 4" de espesor de material F-P Laminar.

5.2.3 Relación Caudal Total (Q) - Rebatimiento Total (S)

La Figura 48, nos muestra la relación entre el caudal total y el rebatimiento total para cada uno de los sistemas estudiados. Los valores de caudal y Rebatimiento que dan lugar a la presente figura se encuentran registrados en los Cuadros 13 al 21 del Anexo.

Como resultado de la simple observación de la Figura 48 y del análisis de regresión realizado, el cual se presenta en el

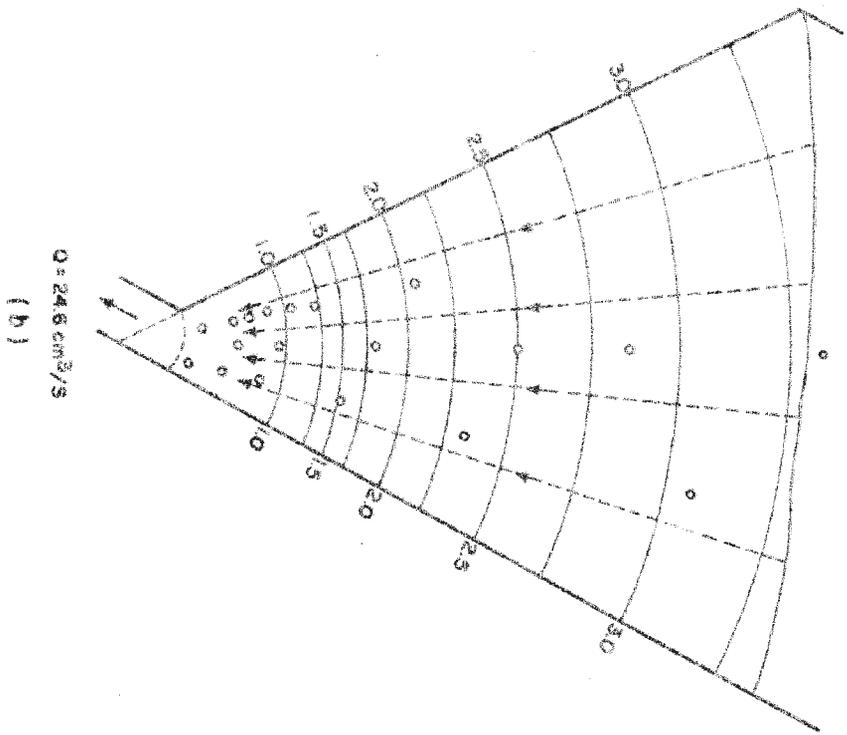
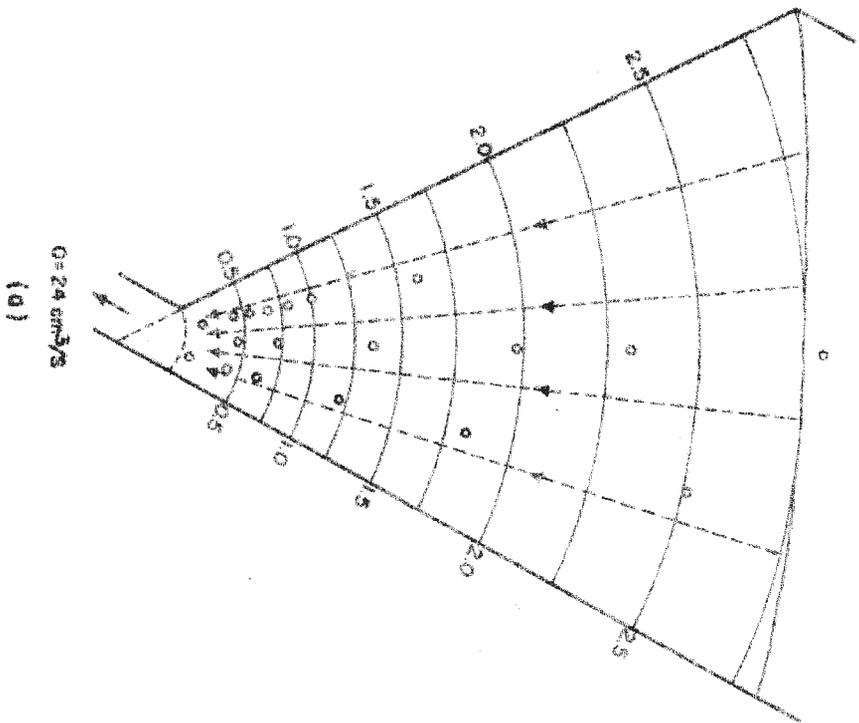


Figura 44. Redes de flujo para una de las pruebas del Sistema Suelo Base-Filtroprotector LM 4
 a) Espesor $FP = 2''$; b) Espesor $FP = 4''$. Rejillo cribada.

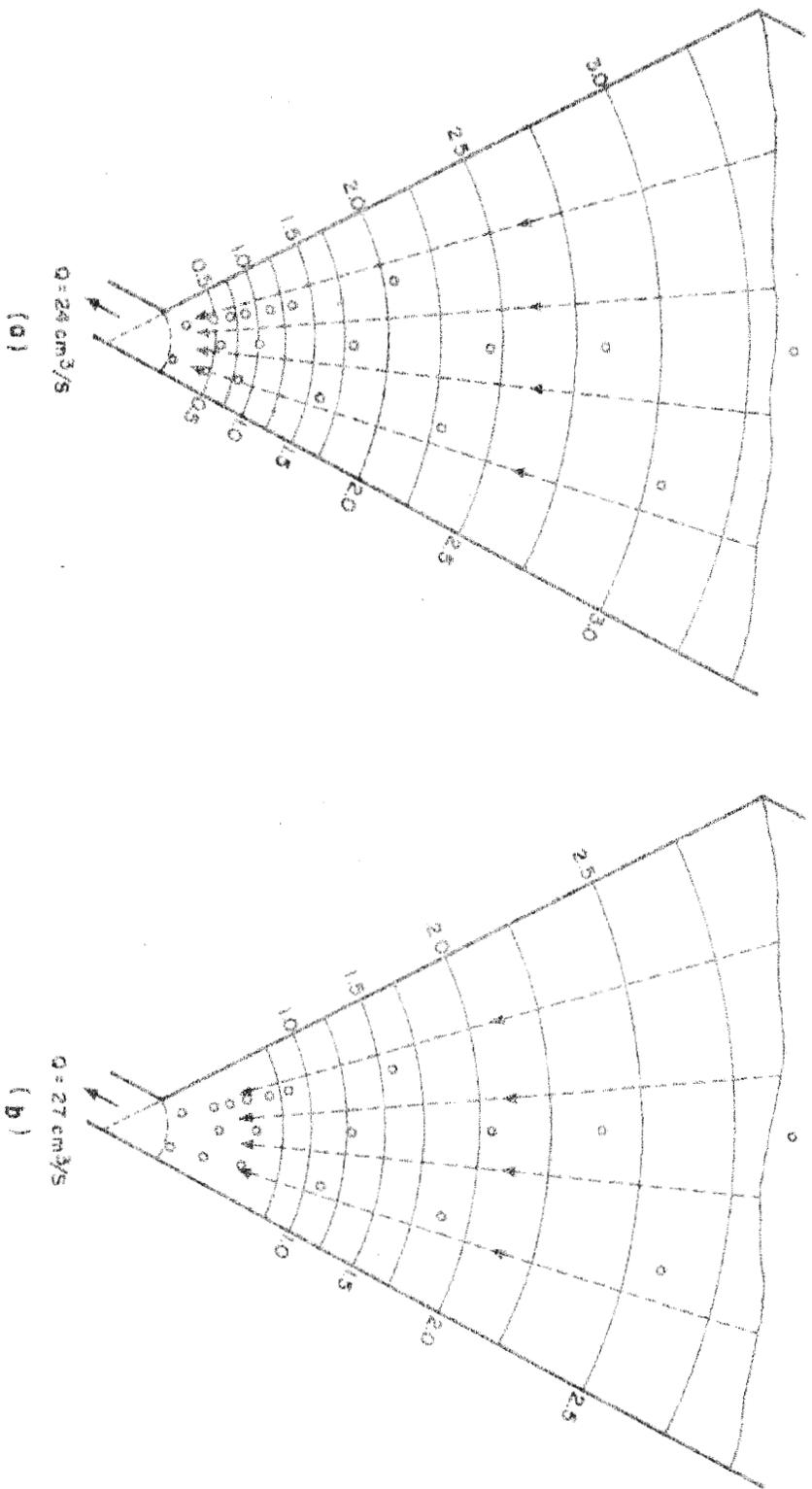


Figura 45 ... Redes de flujo para una de las pruebas del Sistema Suelo Base - Filtroprotector LM-6
 a) Espesor de F.P. = 2" ; b) Espesor de F.P. = 4" . Rejilla cribada.

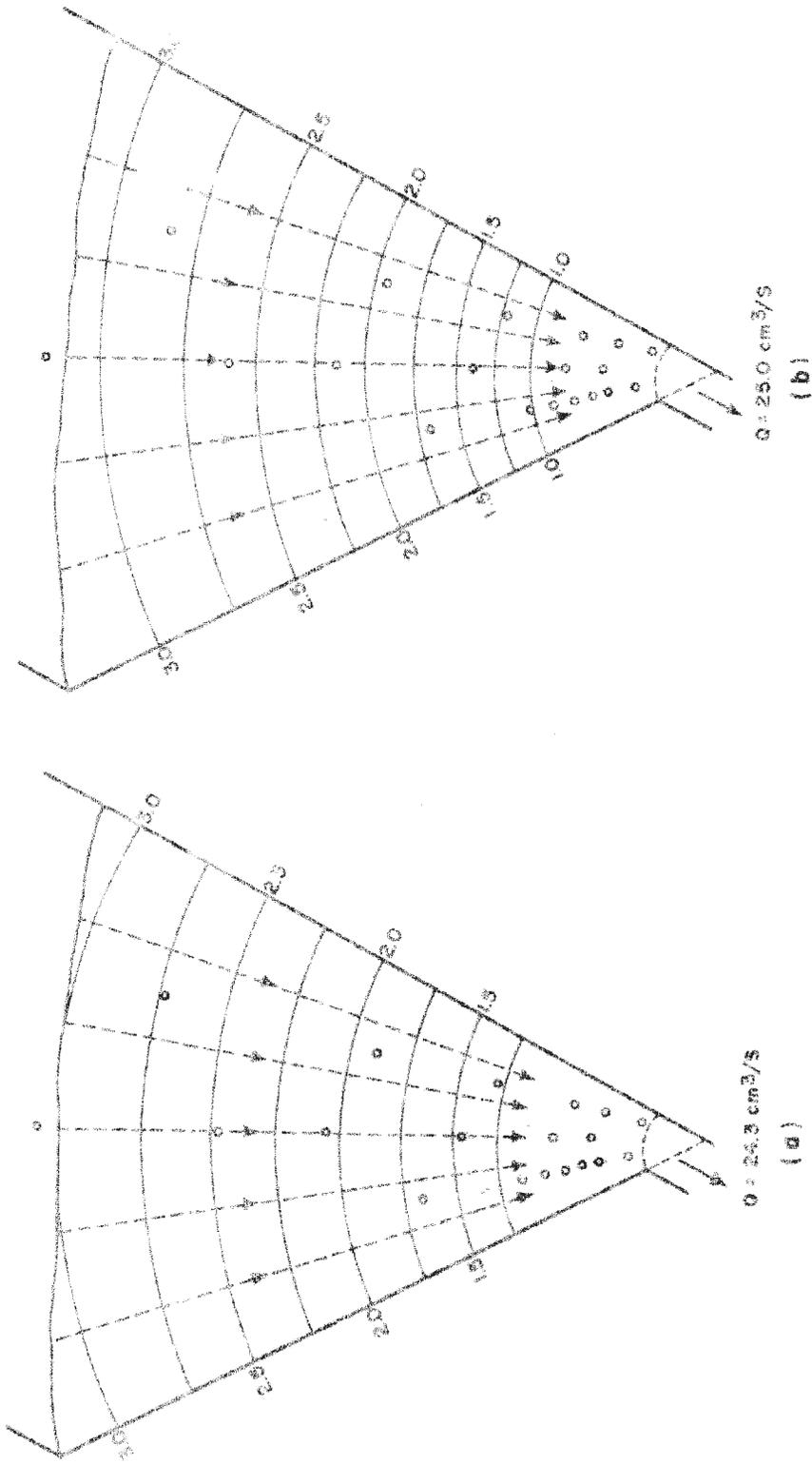
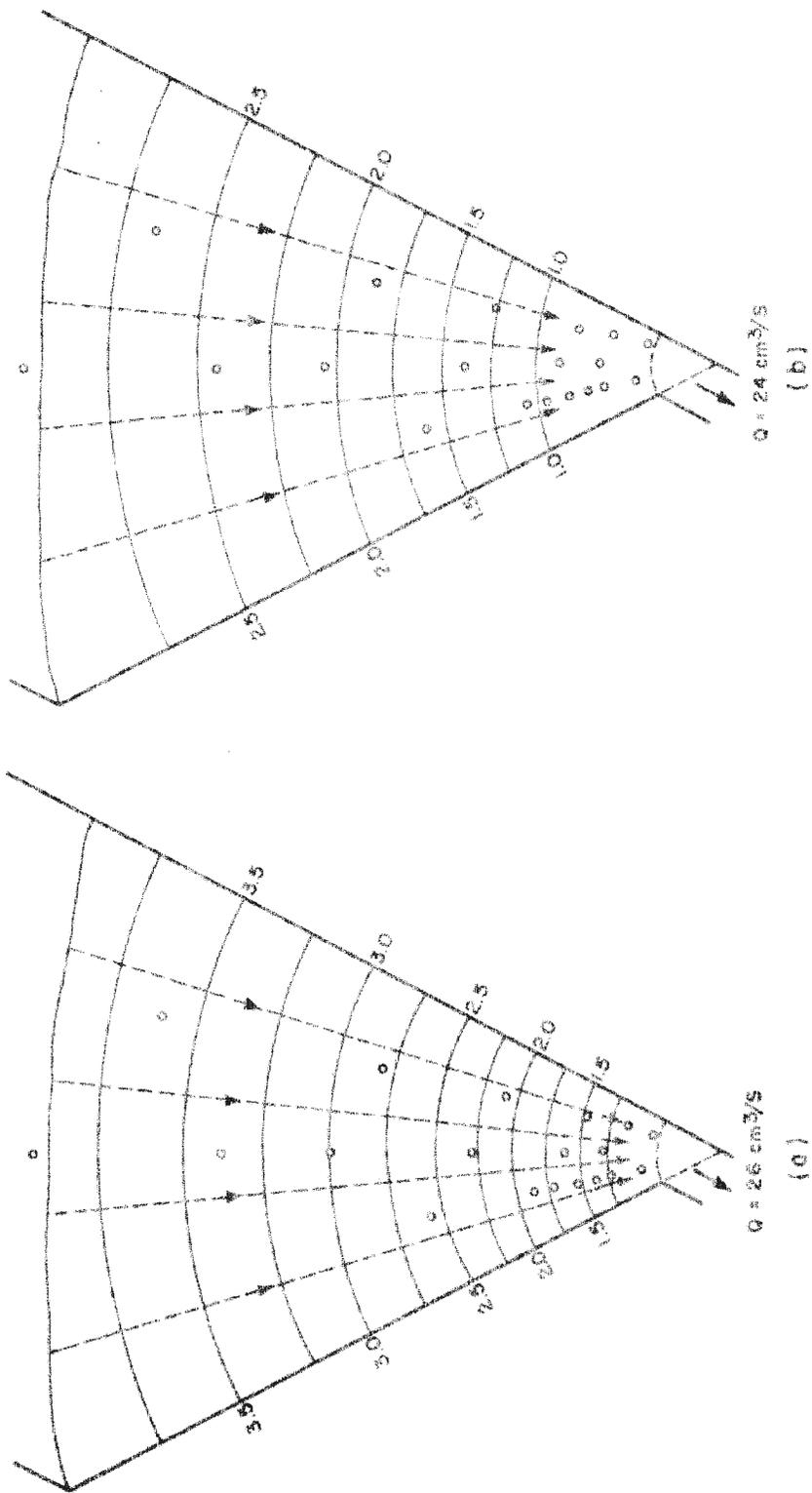


Figura 46... Redes de Flujo para uno de los pruebos de : a) Sistema Suelo Base - Filtrador LM-6-4" ;
 b) Sistema Suelo Base - Filtrador LM 6-15-4" , Rejilla Removida.



Figuro 47.-Redes de Flujo para una de las pruebas del sistema Suelo Base - Filtroprotector L.M.16.
 a) Espesor F.P. = 2" ; b) Espesor F.P. = 4". Rejilla cribada.

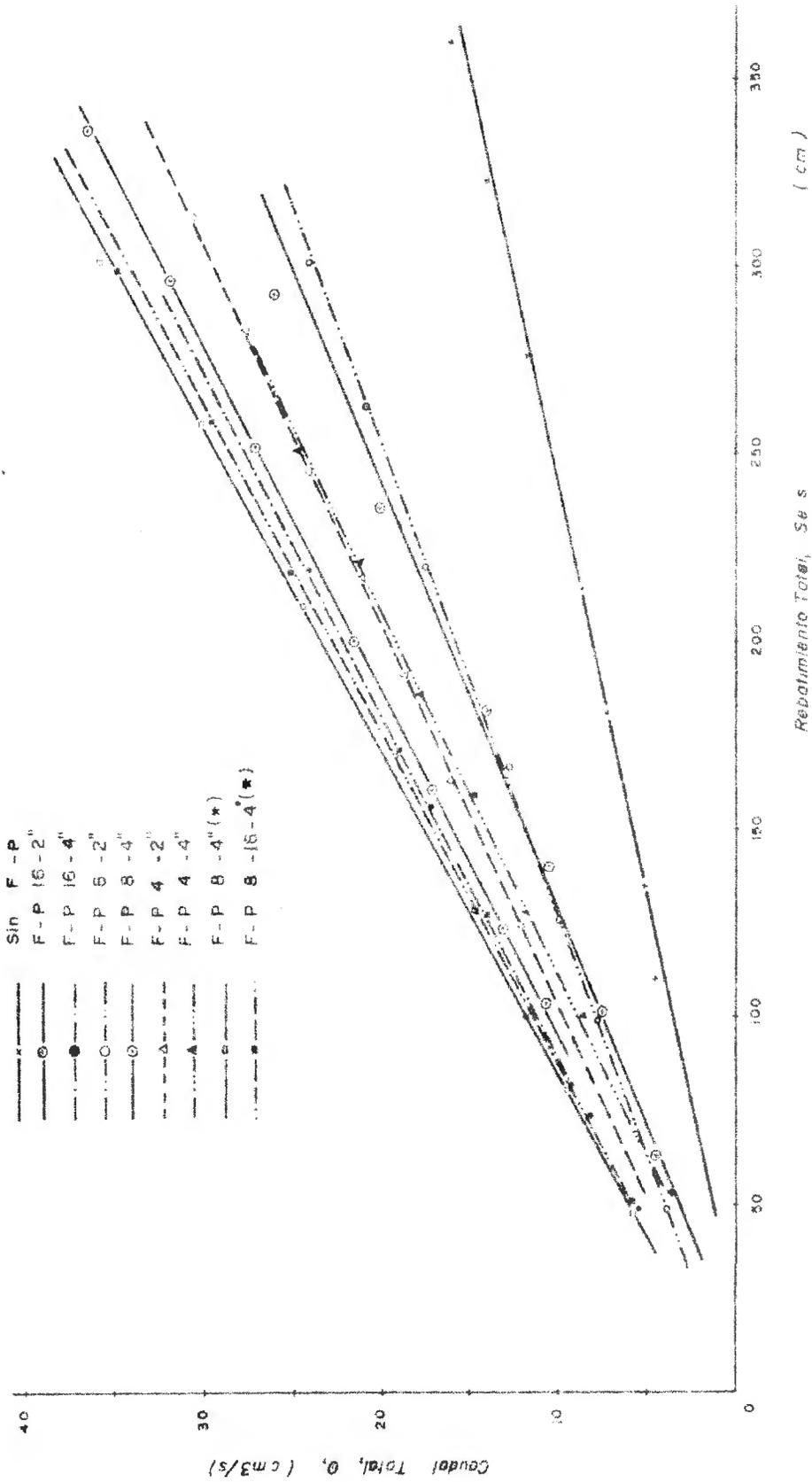


Figura 48 . - Relación entre el Caudal Total y el Rebatimiento Total.

Anexo, se obtiene que el Caudal Total, Q, y el Rebatimiento Total, S, se encuentran relacionados en forma lineal. Por lo tanto, los resultados experimentales obtenidos se adaptan a la relación lineal de DUPUIT-THIEM, para el flujo permanente hacia pozos en acuíferos confinados (Ec.21).

A partir de la Figura 48, podemos analizar, también, la eficiencia de los sistemas estudiados. La eficiencia o capacidad específica, es definida por Maraví (20), como el "rendimiento por unidad de descenso del nivel". Un pozo o un sistema será más eficiente que otro sí para un mismo descenso de nivel o rebatimiento su rendimiento (caudal) es mayor.

Observando la Figura 48 y de acuerdo al análisis de Regresión Simple efectuado tenemos que existe una gran diferencia entre la eficiencia del sistema sin Filtroprotector con los sistemas con filtroprotector. La diferencia entre los sistemas mencionados, en promedio, es mayor del 100% (aproximadamente igual a 116%).

Comparando los sistemas con el mismo tipo de material F-P Laminar, los sistemas que usan 4" de F-P presentan mayor eficiencia que los que usan 2".

Haciendo una comparación entre los sistemas con diferente tipo de material F-P Laminar, los de mayor "eficiencia" resultan ser los sistemas con F-P LM8-4"(*), con F-P LM8-16-4"(*), con F-P LM8-4" y con F-P LM16-4". El incremento de eficiencia de estos sistemas con respecto al sistema sin F-P es de 146%, 145%, 129%, 126% respectivamente. Los de menor incremento son los sistemas con F-P LM8-2" y F-P LM16-2" (68% y 92%, respectivamente).

Cabe mencionar, que la cuantificación de los porcentajes de incremento de la eficiencia de los diferentes sistemas F-P con respecto al sistema sin F-P se ha realizado en base a las pendientes de las rectas, obtenidas en el análisis de regresión lineal simple.

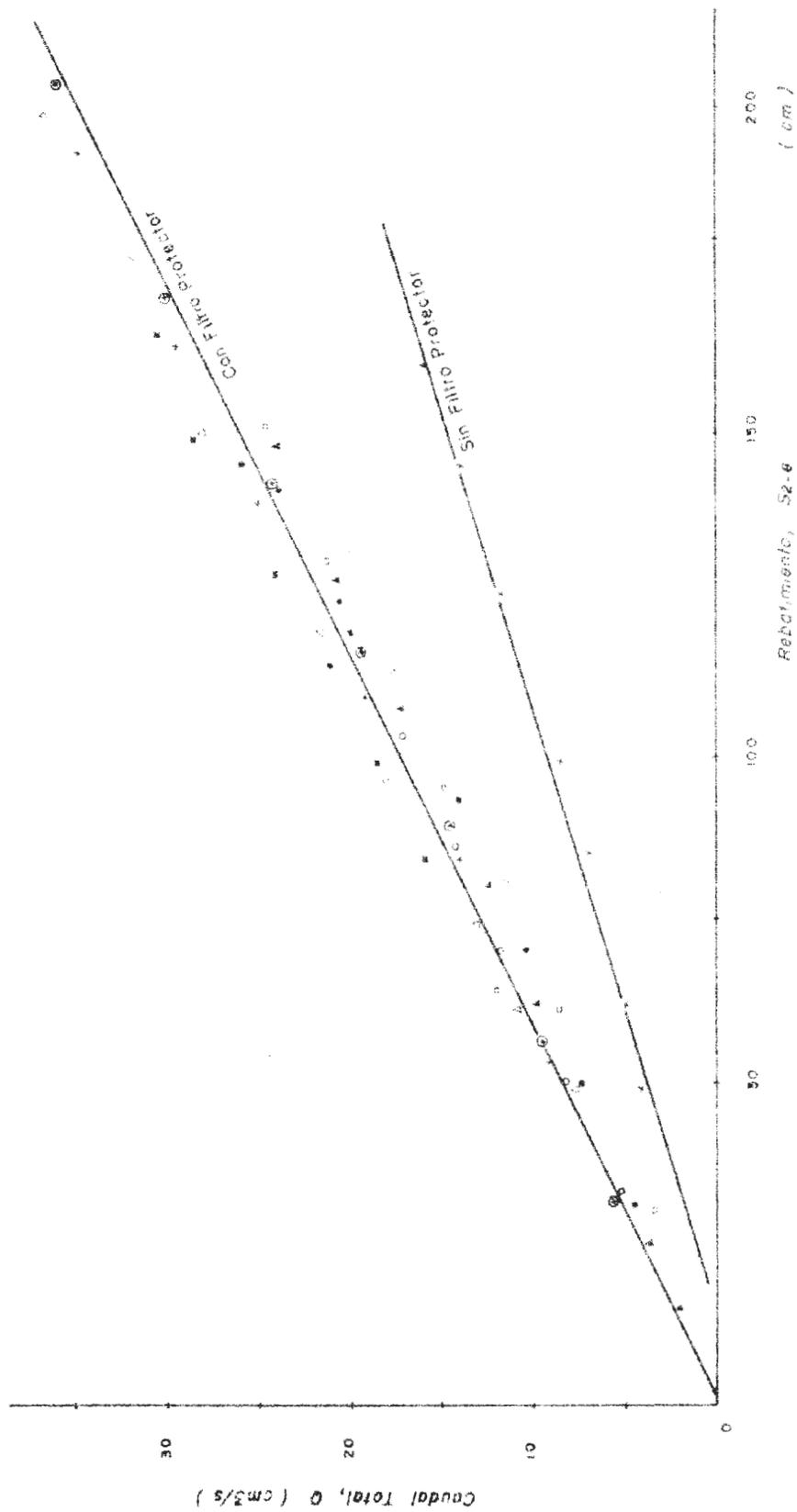


Figura 49. - Relación entre el Caudal Total, Q , y el Rebatimiento producido entre los piezómetros 2 y 8, S_{2-e} (Suelo Base).

recta, independientemente de la introducción de los materiales F-P Laminares.

Las ecuaciones lineales determinadas para ambas rectas, mediante el análisis de regresión se dan en el Anexo.

La Conductividad Hidráulica del Suelo Base, entre los piezómetros 2 y 8, puede ser determinada empleando la relación de Dupuit-Thiem, deducida en el Anexo, para el caso del modelo empleado en la presente investigación.

Como resultado se obtiene que la Conductividad Hidráulica para el sistema sin filtroprotector toma el valor de 8.02 m/día, y para los sistemas con F-P, 12.91 m/día.

Así, puede verse que la introducción de los materiales filtro protectores laminares influye sobre la facilidad del flujo del agua a través del Suelo Base (Conductividad Hidráulica), en la inmediata vecindad del pozo.

5.2.5 Relación Descarga Específica (q_{40}) - Gradiente entre los piezómetros 2 y 8 (J_{2-8}) - (Suelo Base)

La Figura 50 muestra la relación entre la Descarga Específica a 40 cms del eje imaginario del pozo, q_{40} y el gradiente que se forma entre los piezómetros 2 y 8, J_{2-8} (correspondiente al Suelo Base). Los valores que dan origen a dicha figura se dan en el Cuadro 22.

De la observación directa de la Figura 50, se desprende que la relación existente entre las variables mencionadas es lineal. Esta afirmación es comprobada haciendo uso del Análisis de Regresión.

Al ser lineal la relación entre q_{40} y J_{2-8} , al flujo de agua a través del Suelo Base, entre los piezómetros 2 y 8, es laminar y, por lo tanto, la pendiente de cada una de las rectas, representa el valor de la Conductividad Hidráulica (k) del Suelo Base.

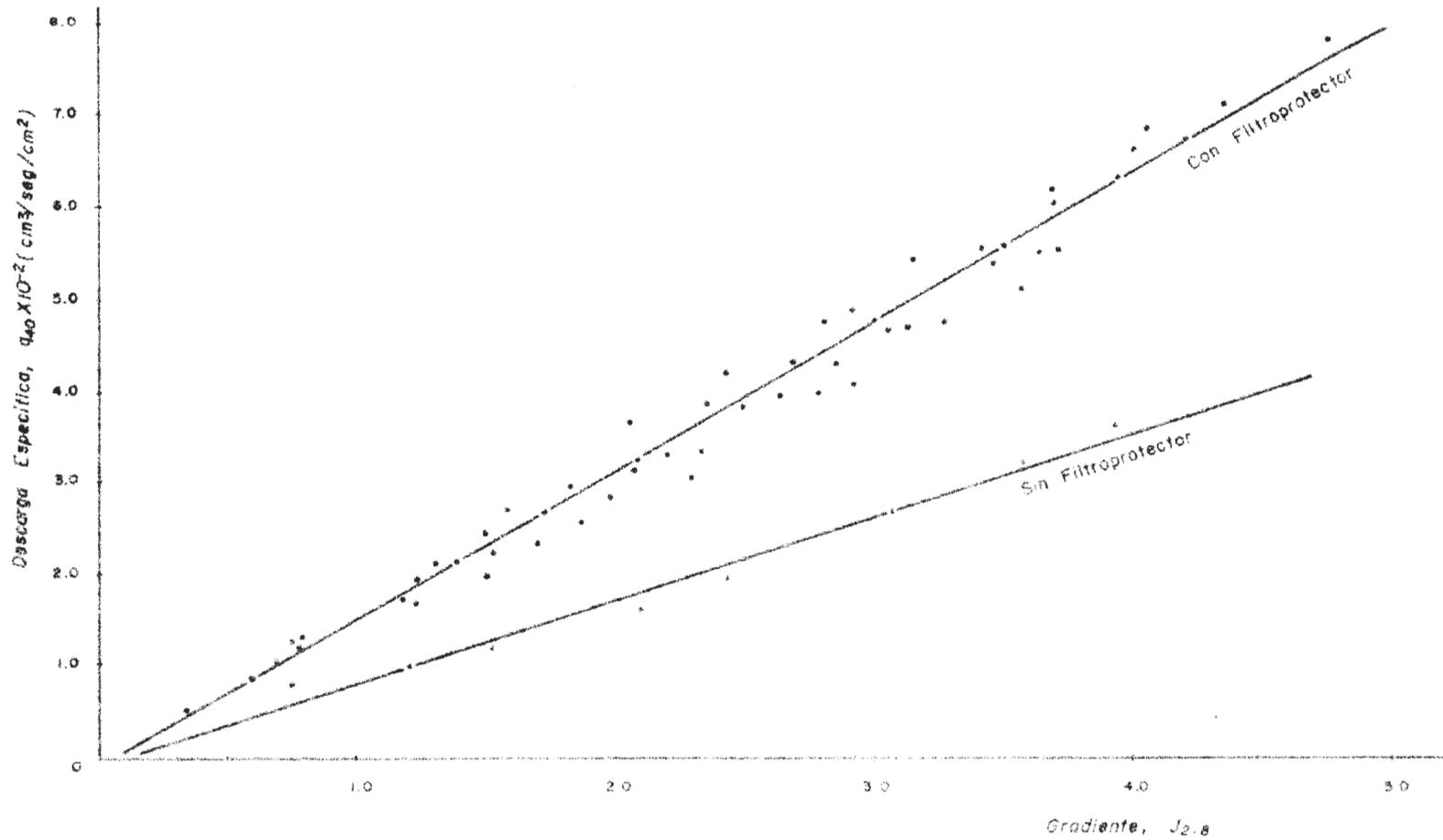


Figura 50 . - Relación entre la descarga Especifica a 40 cm del eje del pozo, q_{40} y el Gradiente Hidráulico entre los piezómetros 2 y 8, $J_{2.8}$ (Suelo Base).

Como el Suelo Base empleado en cada secuencia experimental fue el mismo, el valor esperado de K, tendría que ser igual, y la relación q_{40} vs. J_{2-8} debería estar representada por una sola recta, indiferente a la introducción de los diferentes tipos de material F-P Laminar. De acuerdo con la evidencia experimental graficada se ve que dicha asunción teórica no se cumple y existe diferencia entre la pendiente del sistema sin filtroprotector con respecto a la de los sistemas con material F-P Laminar. La discusión de este fenómeno es idéntica a la efectuada en el acápite anterior, para la relación Q vs. S_{2-8} .

Las ecuaciones para cada recta, resultantes del análisis de regresión, se dan en el Anexo.

Con las pendientes de dichas rectas se han determinado los valores de K del Suelo Base para los sistemas con filtroprotector y el sistema sin filtroprotector. Los valores obtenidos son 14.01 m/día y 8.54 m/día, respectivamente.

5.2.6 Relación entre la Descarga Específica, q_{15} - Gradiente formado entre los piezómetros 9 y 17, J_{9-17}

La Figura 51 muestra la relación entre la Descarga Específica a 15 cms del eje imaginario del pozo, q_{15} y el Gradiente que se forma entre los piezómetros 9 y 17, J_{9-17} (correspondientes al Suelo Base y material F-P respectivamente). En el Cuadro 23 se presentan los valores que dan origen a la Figura mencionada.

En la Figura 51 podemos observar que los valores de Descarga Específica (q_{15}) y Gradiente (J_{9-17}), para cada una de las secuencias experimentales, se ajustan a una relación lineal. Mediante el Análisis de Regresión, se comprueba dicha relación.

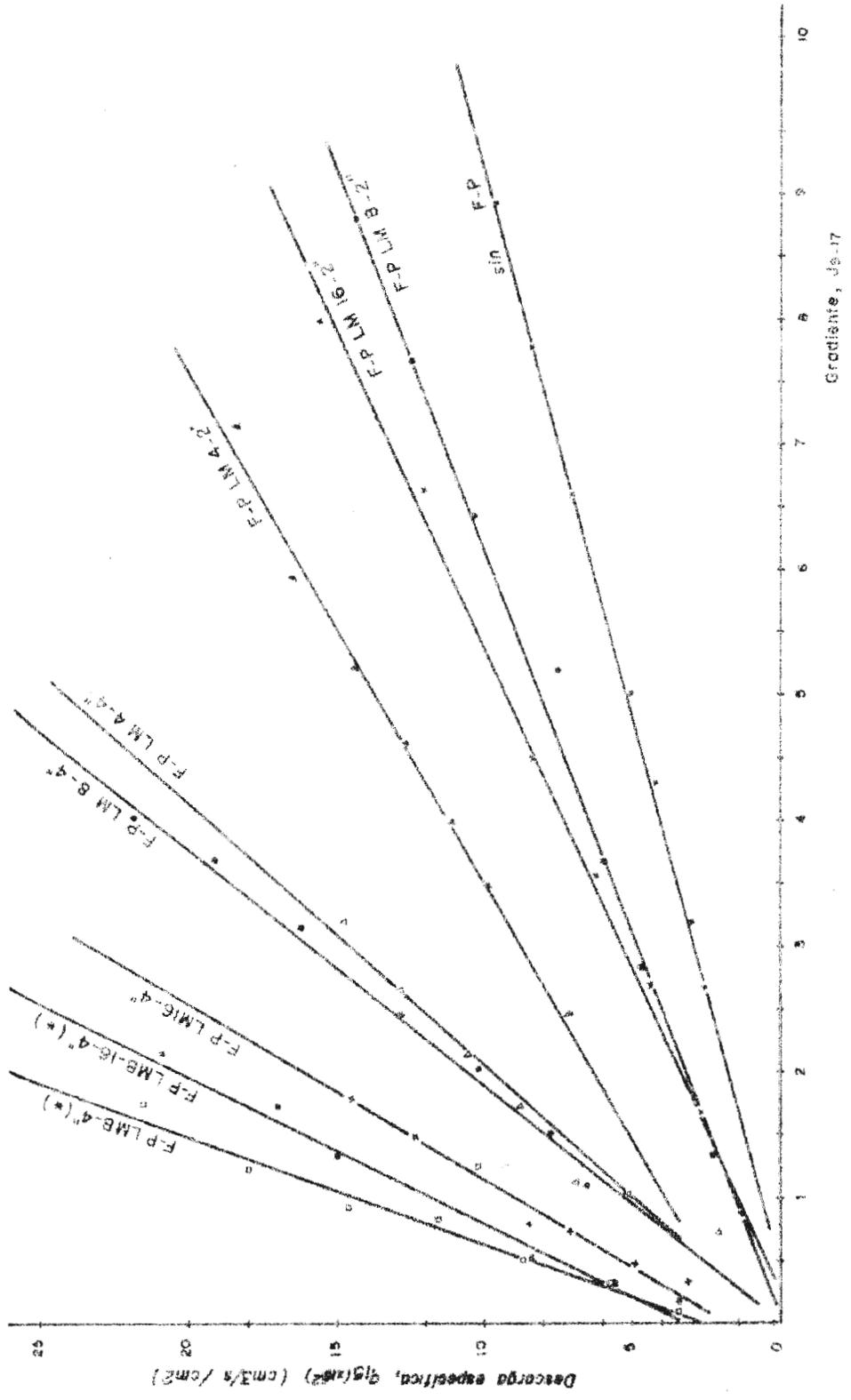


Figura 51. - Relación entre la descarga Específica, q , y el Gradiente entre los piezómetros 9 y 17, Js-17

La linealidad entre la Descarga Específica y el Gradiente nos indica que el flujo a través del sistema Suelo Base - Filtro protector, entre los piezómetros 9 y 17, es laminar y obedece a la Ley de Darcy.

Puede observarse, también, la gran diferencia existente entre los sistemas con F-P con respecto al sistema sin F-P, la cual se debe a que la introducción de los respectivos materiales F-P mejora las condiciones de flujo en la vecindad del pozo al reducir considerablemente las pérdidas de carga y la confluencia de las líneas de corriente.

También existen diferencias entre los sistemas con materiales F-P. Puede verse claramente, que los sistemas con 4" de material F-P Laminar tienen una mejor "performance" (mayor descarga específica para un mismo gradiente) que los sistemas con 2" de material F-P. Entre los sistemas con 4" de F-P, los que presentan mejores resultados son aquellos que emplean el F-P LM 8 y F-P LM 16.

Con respecto al uso de rejillas diferentes, se observa que con la rejilla ranurada se obtienen mejores resultados que con la rejilla cribada. Esto se debe fundamentalmente a las mayores pérdidas de carga producidas en la rejilla cribada, al ser más propensa a la obstrucción por partículas de arena, cosa que no sucede con la rejilla ranurada.

Las ecuaciones para cada una de las rectas que relacionan q_{15} vs. J_{9-17} , resultantes del Análisis de Regresión, se presentan en el Anexo.

5.2.7 Resistencia de Entrada

La modificación de las condiciones de flujo en un sistema radial debido a la introducción de los materiales filtro protectores alrededor del filtro entubado o rejilla puede ser evaluada, también, cuantificando la Resistencia de Entrada en cada uno de los sistemas en experimentación.

Para la cuantificación de la Resistencia de Entrada se ha utilizado el Método Gráfico, tal como se menciona en la Revisión de Bibliografía. Para ello se relaciona la Descarga Unitaria (q_u) con la Pérdida de Carga entre un piezómetro ubicado a 20 cms del eje imaginario del pozo, aproximadamente, (piezómetro 9) y el piezómetro del TRS (T_s).

La Descarga Unitaria, q_u , en $m^3/día/m$. se determina multiplicando el valor de la Descarga Total (Q) en cm^3/seg . por la constante 0.72, determinada de acuerdo a las dimensiones del modelo y a la transformación de unidades.

Las Pérdidas de Carga consideradas (Δh_{g-s}) incluyen tanto las Pérdidas a través del Sistema Suelo Base - Filtroprotector como las Pérdidas producidas en la rejilla y a través de la manguera de salida. Las Pérdidas de Carga a lo largo de la manguera de salida son insignificantes, por lo cual se desprecian. Las Pérdidas de Carga a través de la rejilla, se esperan, sean diferentes y se muestran en los resultados.

La Figura 52, muestra las relaciones entre la Descarga Unitaria (q_u) y las Pérdidas de Carga (Δh_{g-s}). Los valores que dan origen a la Figura mencionada, se muestran en el Cuadro 24 y han sido determinados a partir de los resultados experimentales, reportados en los Cuadros 13 al 21 del Anexo.

De acuerdo al Método Gráfico, los valores de la Resistencia de Entrada están dados por las pendientes de las rectas que relacionan q_u vs. Δh_{g-s} . Estas han sido determinadas mediante el análisis de Regresión Lineal Simple, cuyos resultados se presentan en el Anexo.

A partir de la Figura 52, podemos realizar el siguiente análisis:

- a) En cuanto a la Resistencia de Entrada, existe gran diferencia entre los sistemas con filtroprotector con respecto al sistema sin F-P.

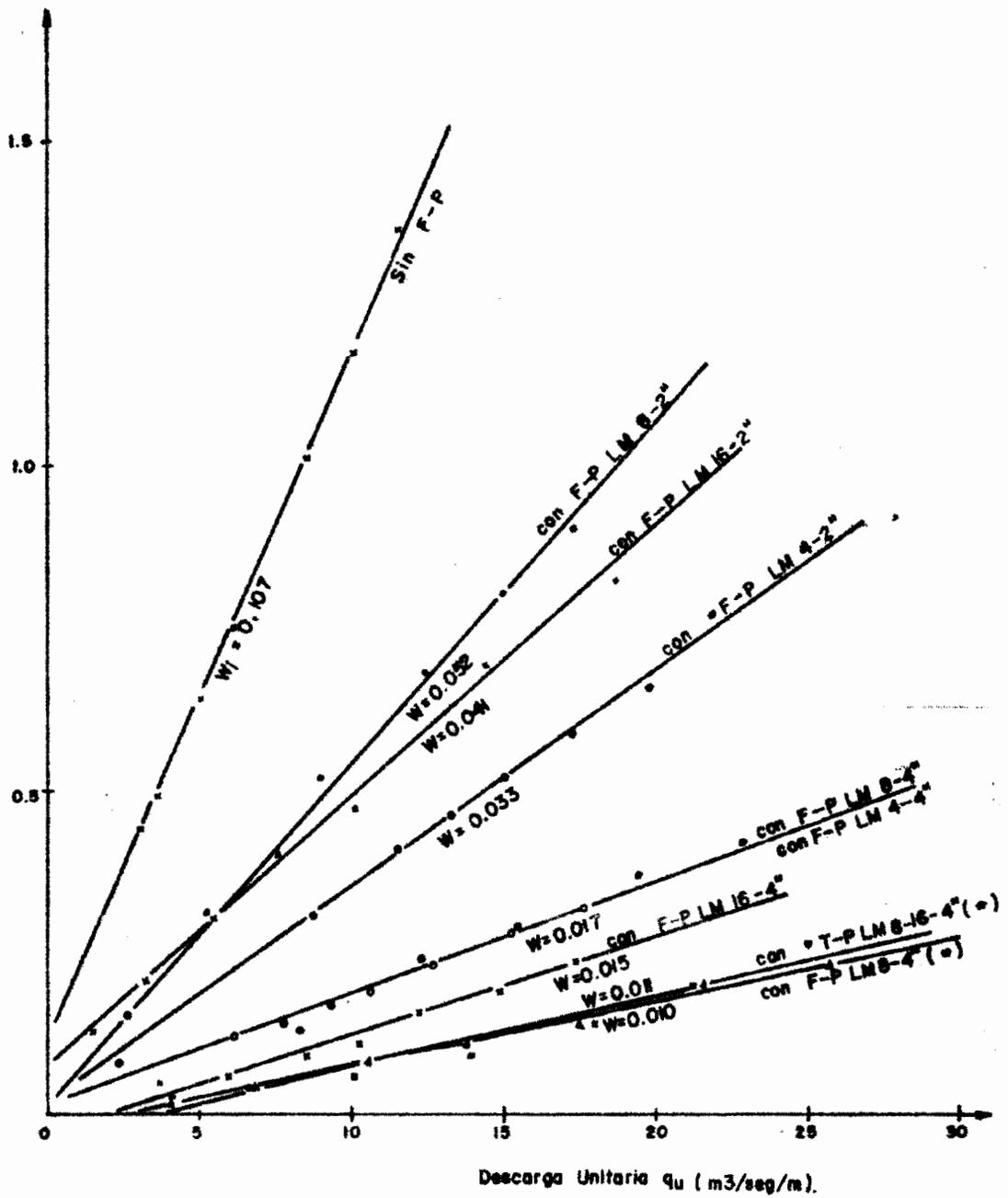


Figura 52 .- Relaciones de Descarga Unitaria, q_u y Pérdidas de Carga producidas entre los piezómetros 9 y T_5 , Δh_{g-s} .

- b) El sistema con más alto valor de W es el sistema sin filtro protector, siendo los de menor valor el sistema con F-P LM8-4''(*) y el sistema con F-P LM8-16-4''(*) (ambos con rejilla ranurada).
- c) La Resistencia de Entrada en los sistemas con F-P LM8-4''(*) y F-P LM8-16-4''(*), es aproximadamente, diez veces menor que la del sistema sin F-P.
- d) Los sistemas con 2'' de F-P tienen mayor Resistencia de Entrada que los sistemas con 4'' de material F-P. La diferencia entre ambos es de 69%, aproximadamente.
- e) Comparando los sistemas con 2'' de material F-P, el de menor Resistencia de Entrada es el correspondiente al sistema con F-P LM4 y el de mayor valor al sistema con F-P LM8.
- f) Haciendo la comparación entre los sistemas con 4'' de material F-P, se tiene que no existe diferencia entre los sistemas con F-P LM8 y con F-P LM4. También se observa una clara diferenciación entre los sistemas que utilizan rejilla cribada con los que utilizan rejilla ranurada, siendo menor, la Resistencia de Entrada, para éstos últimos. La diferencia se debe a que a través de la rejilla cribada, se producen mayores Pérdidas de Carga, debidas a la obstrucción con partículas de arena.

5.2.8 Número de Reynolds

Con el fin de poder tipificar el flujo ocurrido en el Modelo para cada una de las secuencias experimentales, se han calculado los valores del Número de Reynolds a diferente distancia del centro del pozo (r).

Los valores del Número de Reynolds han sido calculados a partir de la ecuación, dada por Wright (38):

$$R_p = \frac{q_m \delta g}{v(1-n)} \quad (25)$$

donde:

R_p = Número de Reynolds en los poros (adimensional)

q_m = Velocidad aparente del fluido a través del medio poroso (cm/seg).

δ_g = Longitud característica (diámetro) de los granos del medio poroso (cm).

ν = Viscosidad cinemática del fluido (cm²/seg).

n = Porosidad del medio.

En el Cuadro 25, se presentan los valores del Número de Reynolds, calculados en base a los resultados para cada secuencia experimental, a diferentes distancias del centro del pozo ($r_1 = 7.5$ cm ; $r_2 = 15$ cm , y $r_3 = 60$ cm).

Cabe mencionar, con respecto al Cuadro 25, que los valores de viscosidad cinemática han sido determinados teniendo en cuenta la temperatura del agua, mediante la relación:

$$\nu = 1.007 \times 10^{-2} \times R_r \quad (26)$$

donde R_r es el factor de corrección de la viscosidad cinemática del agua, de acuerdo a la temperatura de la misma. En el Cuadro 6 (Ver Anexo) se presentan los valores de R_r .

Como longitud característica del medio poroso se ha considerado el Diámetro Medio (D_m) de las partículas. Ver Cuadro 4.

La velocidad aparente (q_m) es igual a la Descarga Específica (q) y es determinada mediante la relación $q = 0.09 Q/r$.

Del Cuadro 25 se desprende el siguiente análisis:

- a) Para todos los sistemas estudiados, los valores de R_p obtenidos disminuyen con la distancia al centro del pozo (r) y aumentan con el gradiente al cual se somete cada sistema.
- b) La variación de los valores de R_p con respecto a la distancia al centro del pozo (r) es mucho mayor en los sistemas con F-P Laminar, debido al cambio de granulometría.

- c) Los valores de R_p obtenidos para el sistema sin F-P Laminar, para las tres distancias consideradas, son menores que la unidad ($R_p < 1$).
- d) En los sistemas con 2" de material F-P, los valores de R_p obtenidos para $r_2 = 15$ cm y $r_3 = 60$ cm (Suelo Base) son menores que la unidad, siendo mayores para $r_1 = 7.5$ cms (material F-P).
- e) En los sistemas con 4" de material F-P, los valores de R_p calculados para $r_1 = 7.5$ cms y $r_2 = 15$ cms (material F-P) son mayores que la unidad, siendo menores para $r_3 = 60$ cm (Suelo Base).
- f) Considerando el Número de Reynolds (R_p) como parámetro para la discriminación de los tipos de regímenes de flujo ocurridos en los sistemas estudiados, se tiene que en todos ellos el flujo a través del Suelo Base es Laminar ($R_p < 1$) y obedece a la Ley de Darcy. A través de los materiales F-P el flujo, es también laminar, de acuerdo a Daily-Harleman (4); y, es de Estado Inercial, de acuerdo a Wright (38).

5.2.9 Relación Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia

La discriminación de los diferentes regímenes de flujo a través de medios porosos, puede realizarse también mediante la relación del Número de Reynolds (Re) y el Coeficiente de Resistencia (λ).

Con tal objeto se han calculado los valores de Re y λ para cada uno de los sistemas con material F-P Laminar, a 30 cm y 60 cm del eje imaginario del pozo (correspondiente al Suelo Base). Los resultados se presentan en el Cuadro 26.

Los valores de Re se han obtenido empleando la ecuación (25).

Los valores de λ se han determinado empleando la ecuación, dada por Wright (38):

$$\lambda_p = \frac{g \delta^2 j n^3}{q_m^2 (1-n)} \quad (26)$$

donde:

λ_p = Coeficiente de Resistencia de poro.

g = Aceleración de la gravedad, en cm^2/seg .

δg = Longitud característica del grano (diámetro medio), en cm .

j = Gradiente hidráulico.

q_m = Velocidad aparente de flujo a través del medio poroso, en cm/seg .

n = Porosidad del medio.

La Figura 53, muestra el diagrama Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia, obtenido a partir del Cuadro 26.

En la Figura mencionada puede observarse que la relación entre el Número de Reynolds y el Coeficiente de Resistencia es lineal para valores de $Re < 1$. Dicha relación lineal demuestra que el flujo a través de los puntos del modelo considerados (Suelo Base) es Laminar.

Utilizando el Análisis de Regresión, se ha obtenido la ecuación:

$$\lambda = 460 Re^{-1.13}$$

para la recta bilogarítmica que relaciona los valores de Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia.

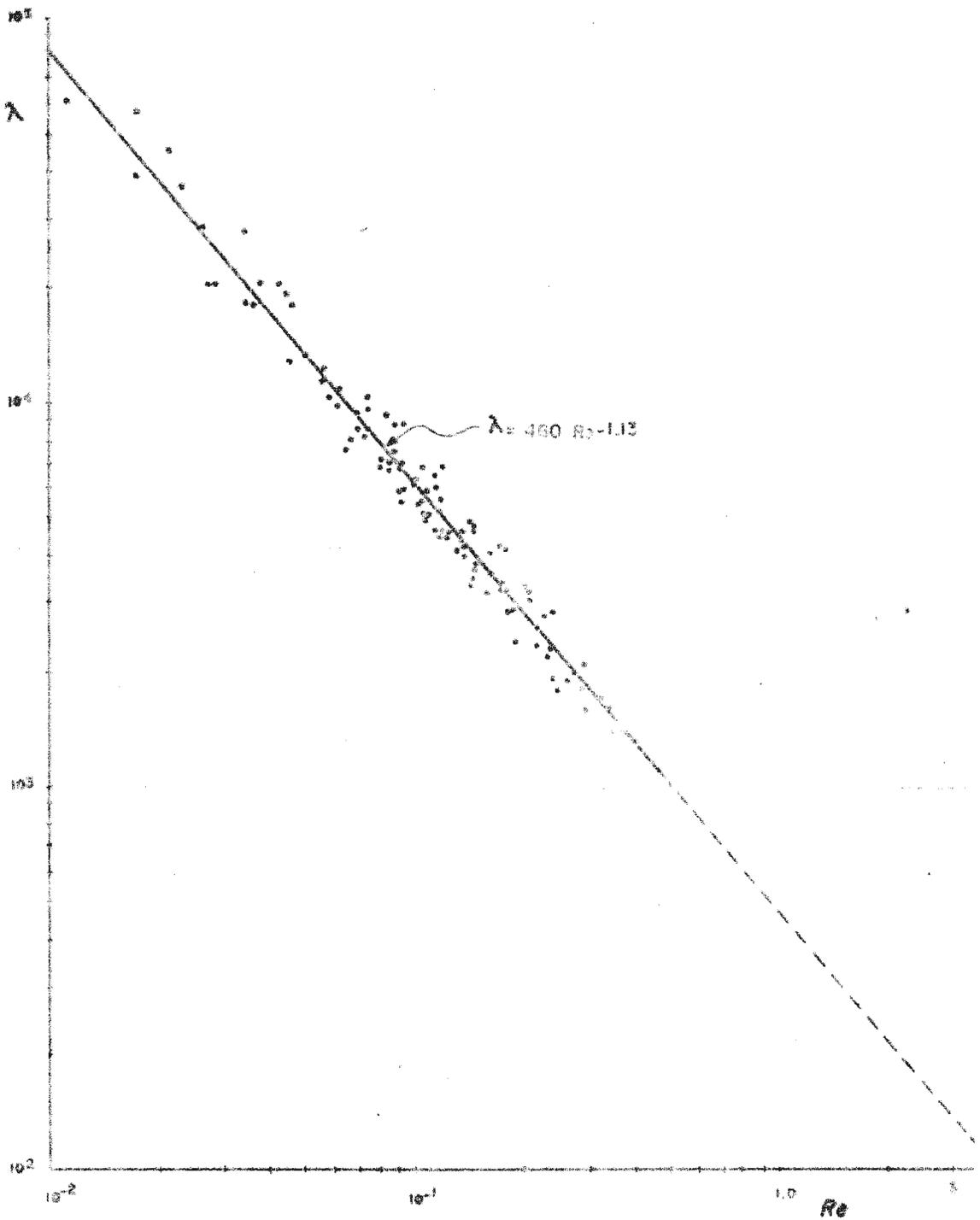


Figura 53 .- Diagrama Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia para los Sistemas con F-F Lineal.

VI. CONCLUSIONES

1. Se comprueba experimentalmente que la introducción del material Filtroprotector Laminar alrededor del filtro entubado o rejilla modifica significativamente las condiciones del flujo del agua en la inmediata vecindad del pozo.
2. Los materiales F-P Laminares modifican la conformación de las curvas de caída de potencial (pérdidas de carga) para el flujo de agua a través del sistema Suelo Base - Filtroprotector. Así, las Pérdidas de Carga a través de los materiales F-P Laminares son mínimos y no varían con respecto al gradiente; mientras que, a través del Suelo Base son considerables y varían con respecto al gradiente.
3. La variación de la carga hidráulica con respecto a la distancia al centro del pozo, muestra una configuración muy peculiar cuando se utiliza el material F-P Laminar. Para el flujo a través del Suelo Base, la Carga Hidráulica Total y la distancia al centro del pozo, se relacionan en forma logarítmica; mientras que para el flujo a través del material F-P Laminar, dicha relación es lineal.
4. Las Pérdidas de Carga a través del Suelo Base son mucho menores para los sistemas con material F-P Laminar con respecto al sistema sin filtroprotector, para una misma descarga específica. Entre los sistemas con material F-P Laminar no existe mayor diferencia en cuanto a las Pérdidas de Carga a través del Suelo Base, para la misma descarga.
5. Se comprueba experimentalmente que la introducción del material F-P Laminar entre la rejilla y el Suelo Base tiene como efecto hidráulico neto el incremento del diámetro efectivo del pozo, ampliándose el área de captación y disminuyendo, de esta forma, la confluencia de las líneas de corriente.

6. Las Pérdidas de carga a través del Suelo Base, son menores para los sistemas que emplean 4" de espesor de material F-P Laminar, con respecto a los que emplean 2". El sistema con menores Pérdidas de Carga, a través del Suelo Base, es el sistema con F-P LM 8-4(*).
7. En todos los sistemas estudiados el Gasto guarda una relación lineal con el Gradiente, lo mismo que con el Rebatimiento. Por lo tanto, los resultados experimentales obtenidos se adaptan a la relación lineal de DUPUIT-THIEM, para el flujo radial permanente hacia pozos en acuíferos confinados.
8. La Eficiencia o Rendimiento Específico de los sistemas que emplean material F-P Laminar, se incrementa, en promedio, en más del 100% con respecto al sistema sin filtroprotector.
9. Los sistemas de mayor eficiencia son los sistemas con F-P LM 8-4"(*), con F-P LM 8-16-4"(*), con F-P LM 8-4" y con F-P LM 16-4". El incremento, con respecto al sistema sin filtroprotector, es de 146%, 145%, 129% y 126%.
10. La relación entre la Descarga Específica y el Gradiente es lineal, tanto a través del Suelo Base, como a través de todo el sistema Suelo Base - Filtroprotector. En consecuencia, el flujo es laminar y obedece a la Ley de Darcy.
11. El incremento de la Conductividad Hidráulica en las cercanías del pozo (material filtroprotector) hace que las Pérdidas de Carga por efecto de la Resistencia de Entrada disminuyan considerablemente, obteniéndose mejores condiciones hidrodinámicas en la zona inmediata al pozo.

12. El sistema sin Filtroprotector posee un alto valor de Resistencia de Entrada, la cual es mejorada grandemente con la introducción del material F-P Laminar.
13. Los Sistemas con menor valor de Resistencia de Entrada son los Sistemas con F-P LM 8-4"(*) y con F-P LM 8-16-4"(*).
14. De acuerdo a los valores del Número de Reynolds obtenidos para los diferentes sistemas empleados, se deduce que el flujo del agua a través del Suelo Base es Laminar ($Re < 1$) y a través del material Filtroprotector es también Laminar (según Daily-Harleman) o de Estado Inercial (según Wright).
15. No existe cambio en el Régimen de Flujo por efecto de la introducción de los materiales F-P Laminares, para los gradientes a que fueron sometidos los sistemas estudiados.
16. La presencia del Flujo Laminar es demostrada gráficamente mediante el diagrama Número de Reynolds - Coeficiente de Resistencia.
17. Se deduce experimentalmente que los sistemas con F-P Laminar de mejor "Performance" son los que emplean F-P LM 8 y F-P LM 16 con 4" de espesor.
18. El modelo construido para efectuar la presente Tesis simula perfectamente el flujo radial hacia pozos en un acuífero confinado. Por lo tanto el Laboratorio de Drenaje y Aguas Subterráneas del DRAT, cuenta con un equipo con el cual se puede proseguir esta línea de investigación.

VII. RECOMENDACIONES

1. Continuar la presente línea de investigación iniciada, aprovechando el equipo construído.
2. Realizar estudios comparativos, en cuanto al Comportamiento Hidrodinámico, entre los materiales F-P Laminares y los materiales granulares empleados actualmente en los pozos que se instalan en el país.
3. Estudiar el comportamiento de los materiales F-P Laminares, referente al arrastre de finos.
4. Determinar el comportamiento químico del material F-P Laminar L.M., frente a la acción de las aguas agresivas.
5. Estudiar el comportamiento de los materiales F-P Laminares, para series que incluyan proporciones de los diferentes tamaños.
6. Continuar esta línea de investigación empleando otros tipos de Suelo Base menos uniformes.
7. Definir la factibilidad económica y uso del material F-P Laminar L.M.
8. Ante los positivos resultados experimentales de los materiales F-P LM 8 y F-P LM 16, se recomienda que los organismos estatales correspondientes ofrezcan la oportunidad para probar en el campo las bondades de dichos materiales.
9. De acuerdo a la información obtenida sobre la construcción y equipamiento de los pozos de agua, se recomienda dar mayor importancia al estudio y utilización de los materiales Filtroprotectores (paquetes filtrantes).

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. BAVER-GARDNER, 1973. Física de Suelos. UTEHA. 1ra. Edición en español, México - Buenos Aires.
2. BEAR, J., 1967. Dynamic of Fluid in Porous Media. American Elsevier Publishing, Inc. New York.
3. CASTANY, G. 1971. Tratado Práctico de Aguas Subterráneas. Editorial OMEGA S.A., Barcelona - España.
4. DAILY-HARLEMAN, 1975. Dinámica de los Fluidos con Aplicaciones en la Ingeniería. Editorial TRILLAS S.A. México D.F.
5. DE LA COLINA, J., 1975. Efecto de la Disposición y Geometría del Filtro en la Resistencia de Entrada. Tesis Universidad Nacional Agraria, La Molina, Lima - Perú.
6. DE LA CRUZ, E., 1975. Bases Hidrológicas y Operativas para definir la Infraestructura de Captación de las Aguas Subterráneas - La Yarada - Tacna. Tesis Universidad Nacional Agraria, La Molina, Lima - Perú.
7. ECHEVARRIA M. N., 1972. Analogía Eléctrica Bidimensional para el estudio del flujo de agua hacia Drenes con Filtroprotectores. Tesis Universidad Nacional Agraria - La Molina, Lima - Perú.
8. GIBSON-SINGER, 1974. Manual de los Pozos Pequeños, Ed. Limusa - Wiley S.A. México.

9. GRASSI, C., 1967. Manual de Drenaje Agrícola, CIDIAT, Mérida - Venezuela.
10. GREGORY-WALLING 1973. Drainage Basin Form and Process, a Geomorphological Approach. Edward Arnold Ltd.
11. HARR, M.E. Groundwater and Seepage. Mc Graw-Hill Book Company, New York.
12. INTERNATIONAL ASSOCIATION HIDRAULIC RESEARCH, 1972. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. Elsevier Publishing Co. Amsterdam.
13. JOHNSON, E., 1966. Groundwater and Wells. Primera edición. Edward E. Johnson, Inc. Minnesota, U.S.A.
14. JOHNSON DIVISION, 1958. Agua Sana y Abundante. Boletín N°234C. Minnesota - U.S.A.
15. JOHNSON DIVISION, 1968. Porqué bombear arena. Boletín N°853C. Minnesota - U.S.A.
16. KARPOFF, K.P., 1955. The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filters. 58°Annual Meeting of the USBR.
17. KRYNINE-JUDD, 1961. Principios de Geología y Geotecnica para Ingenieros. Segunda Edición. Ed. OMEGA S.A., Barcelona - España.
18. KUTILEK M., 1972. "Non-Darcian Flow of Water in Soils-Laminar Region. Elsevier Publishing Co. Amsterdam.

19. LAMBE, T. - WHITMAN, R., 1972. Mecánica de Suelos, Ed. Limusa - Wiley S.A. Mexico D.F.
20. MARAVI G.A., 1970. Explotación - Exploración - Perforación de Pozos en el Valle de Lurín. Tesis Universidad Nacional Agraria - La Molina, Lima-Perú.
21. MUSKAT, M. 1937. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. Ed. Mc Graw-Hill, New York.
22. POLUBARINOVA-KOTCHINA, P. 1962. Theory of Groundwater for Movement. Princeton Univ. Press. New Jersey.
23. POMAREDA BENEL, C., 1969. La Resistencia de Entrada en los Sistemas de Drenaje Subterráneo. Tesis Universidad Nacional Agraria - La Molina, Lima-Perú.
24. RHODIA, 1978. Drenos Principios Basicos e Sistemas Drenantes. Publicacao Tecnica Nº1, Sao Paulo - Brasil.
25. SCHEIDEGGER, A.E., 1960. The Physics of Flow through Porous Media.
26. SCHEIDEGGER, A. - LIAO, K., 1972. Thermodynamic Analogy of Mass Transport Processes in Porous Media. Elsevier Publishing Co., Amsterdam.
27. SCHNEEBELI, G., 1966. Hydraulique Souterraine - Eyrolles Editeur - Paris - Francia.
28. SILBERMAN, W., 1965. Discussion of Turbulent Flow in Porous Media by J.C. Ward, Journal of the Hydraulics Division ASCE Vol. 91, NºHY1.

29. STARK, K.P., 1972. A Numerical Study of the Non-Linear Laminar Regime of Flow in an Idealised Porous Medium. Elsevier Publishing Co. Amsterdam.
30. TAMEZ G.E., 1975. Principios Generales de Diseño y Construcción de Presas de Tierra. Rev. Ingeniería Hidráulica SRH, México.
31. TERZAGHI, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons, New-York.
32. TERZAGHI-PECK, 1955. Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Ed. ATENEO. Buenos Aires, Argentina.
33. TOLEDO, A., 1975. Comportamiento Comparativo del Filtroprotector Laminar L.M. como Medio Poroso. Tesis Universidad Nacional Agraria - La Molina, Lima-Perú.
34. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1941. Investigation of filter requirements for underdrains. Technical Memorandum N° 183-1.
35. VALLEJOS, C., 1973. Analogía Eléctrica Bidimensional Discretizada para el Estudio de las Pérdidas de Carga Hidráulica por Efecto del Ranurado del Filtro Entubado de los Pozos de Agua. Tesis U.N.A. La Molina, Lima - Perú.
36. VANCON, J.P., 1970. Les Pertes de Charge dans les Puits in Pérou. Lima.

37. VENTURA, M., 1976. Diagnóstico de la Explotación e Infraestructura de las Aguas Subterráneas en el Valle Chancay-Huaral. Tesis Universidad Nacional Agraria -- La Molina, Lima - Perú.
38. WRIGHT, D.E., 1968. Non Linear Flow through Granular Media. Journal of Hydraulics Division, ASCE Vol. N°HY4. July, 1968.
39. YAP SALINAS, H., 1971. Three Dimensional Electrolytic Model of Flow through Drain Opening. Thesis M.Sc. Purdue University.

IX. ANEXO

	Pág.
A. Resultados de las Pruebas Experimentales	143
B. Análisis de Regresión	168

CUADRO 6. FACTOR DE CORRECCION R_T PARA LA VISCOSIDAD DEL AGUA A VARIAS TEMPERATURAS

Temperatura °C	Decimos de grado									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.0	1.301	1.298	1.294	1.290	1.287	1.283	1.279	1.276	1.272	1.269
11.0	1.265	1.262	1.258	1.255	1.251	1.248	1.244	1.241	1.237	1.234
12.0	1.230	1.227	1.223	1.220	1.217	1.213	1.210	1.207	1.203	1.200
13.0	1.197	1.194	1.190	1.187	1.184	1.181	1.178	1.175	1.171	1.168
14.0	1.165	1.162	1.159	1.156	1.153	1.150	1.147	1.144	1.141	1.138
15.0	1.135	1.132	1.129	1.126	1.123	1.120	1.117	1.114	1.111	1.108
16.0	1.106	1.103	1.100	1.097	1.094	1.091	1.089	1.086	1.083	1.080
17.0	1.077	1.075	1.072	1.069	1.067	1.064	1.061	1.059	1.056	1.053
18.0	1.051	1.048	1.045	1.043	1.040	1.038	1.035	1.033	1.030	1.027
19.0	1.025	1.022	1.020	1.017	1.015	1.012	1.010	1.007	1.005	1.002
20.0	1.000	0.998	0.995	0.993	0.990	0.998	0.986	0.983	0.981	0.976
21.0	0.976	0.974	0.972	0.969	0.967	0.965	0.962	0.960	0.958	0.955
22.0	0.953	0.951	0.949	0.947	0.944	0.942	0.940	0.938	0.936	0.933
23.0	0.931	0.929	0.927	0.925	0.923	0.920	0.918	0.916	0.914	0.912
24.0	0.910	0.908	0.906	0.904	0.901	0.899	0.897	0.895	0.893	0.891
25.0	0.889	0.887	0.885	0.883	0.881	0.879	0.877	0.875	0.873	0.871
26.0	0.869	0.867	0.866	0.864	0.862	0.860	0.858	0.856	0.854	0.852
27.0	0.850	0.848	0.847	0.845	0.843	0.841	0.839	0.837	0.836	0.834
28.0	0.832	0.830	0.828	0.826	0.825	0.823	0.821	0.819	0.818	0.816
29.0	0.814	0.812	0.810	0.809	0.807	0.805	0.804	0.802	0.800	0.798

CUADRO 7.- FORMATO DE TABULACION DE DATOS PARA LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS EN EL PERMEAMETRO CONVERGENTE.

Filtro Protector Laminar L.M. _____ Espesor: _____

Rejilla: _____ Prueba: _____

Manóm. (N°)	Radio, R (cm.)	Lectura (cm.Hg.)	Carga (cm.Hg.)	Carga, H (cm,H ₂ O)	Δ H (cm.)	Δ R (cm.)	$J = \frac{\Delta H}{\Delta R}$
C							
Te							
Ts							
1	79.1						
2	66.2				12.9		
3	57.1				9.1		
4	44.6				12.5		
5	39.8				4.8		
6	33.9				5.9		
7	28.8				5.1		
8	25.5				3.3		
9	21.6				3.9		
10	19.1				2.5		
11	17.8				1.3		
12	16.8				1.0		
13	15.8				1.0		
14	14.7				1.1		
15	13.7				1.0		
16	12.8				0.9		
17	11.8				1.0		
18	9.3				2.5		
19	7.5				1.8		
Q =		cc/seg		J =	T° =	°C	

CUADRO 8

Universidad Nacional Agraria La Molina Programa Académico de Ingeniería Agrícola Laboratorio D.R.A.T.		MUESTRA: Material Filtro Protector Laminar en Con- diciones Naturales		
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO				
Mallas	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gramos)	Porcentaje Parcial Retenido	Porcentaje Acumu- lado que pasa
3/4 ⁱⁱ	19.10	-	-	100
1/2	12.70	172.22	17	83
3/8 ⁱⁱ	9.52	131.99	13	70
1/4 ⁱⁱ	6.35	151.58	15	55
Nº4	4.76	86.65	9	46
6	3.36	68.83	7	39
8	2.38	50.77	5	34
10	2.00	14.61	2	32
16	1.19	58.95	6	26
20	0.840	24.28	2	24
30	0.590	24.12	2	22
40	0.420	24.26	2	20
50	0.297	32.66	3	17
60	0.250	14.12	2	15
80	0.177	26.67	3	12
100	0.149	15.89	2	10
140	0.105	43.35	4	6
200	0.074	35.82	4	2
Fondo: pasa malla Nº 200 22.23				
Peso de la muestra seca: 1,000.00 grs.				

CUADRO 9

Universidad Nacional Agraria La Molina
 Programa Académico de Ingeniería Agrícola
 Laboratorio D.R.A.T.

MUESTRA: Material Filtro
 Protector LM-4

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

Mallas	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gramos)	Porcentaje Parcial Retenido	Porcentaje Acumu- lado que pasa
3/4 ⁱⁱ	19.10			
1/2 ⁱⁱ	12.70			
3/8 ⁱⁱ	9.52	-	-	100
1/4 ⁱⁱ	6.35	307.75	31	69
Nº4	4.76	692.25	69	-
6	3.36			
8	2.38			
10	2.00			
16	1.19			
20	0.840			
30	0.590			
40	0.420			
50	0.297			
60	0.250			
80	0.177			
100	0.149			
140	0.105			
200	0.074			

Fondo: pasa malla Nº 200

Peso de la muestra seca: 1,000.00 grs.

CUADRO 10

Universidad Nacional Agraria La Molina Programa Académico de Ingeniería Agrícola Laboratorio D.R.A.T.	MUESTRA: Material Filtro Protector LM-8
---	--

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

Mallas	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gramos)	Porcentaje Parcial Retenido	Porcentaje Acumu- lado que pasa
3/4"	19.10			
1/2"	12.70			
3/8"	9.52			
1/4"	6.35			
Nº4	4.76	-	-	100
6	3.36	630.65	63	37
8	2.38	369.35	37	-
10	2.00			
16	1.19			
20	0.840			
30	0.590			
40	0.420			
50	0.297			
60	0.250			
80	0.177			
100	0.149			
140	0.105			
200	0.074			

Fondo: pasa malla Nº 200

Peso de la muestra seca: 1,000.00 grs.

CUADRO 11

Universidad Nacional Agraria La Molina
 Programa Académico de Ingeniería Agrícola
 Laboratorio D.R.A.T.

MUESTRA: Material Filtro
 Protector LM-16

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

Mallas	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gramos)	Porcentaje Parcial Retenido	Porcentaje Acumu- lado que pasa
3/4"	19.10			
1/2"	12.70			
3/8"	9.52			
1/4"	6.35			
Nº 4	4.76			
6	3.36			
8	2.38	-	-	100
10	2.00	289.62	29	71
16	1.19	710.38	71	-
20	0.840			
30	0.590			
40	0.420			
50	0.297			
60	0.250			
80	0.177			
100	0.149			
140	0.105			
200	0.074			

Fondo: pasa malla Nº 200

Peso de la muestra seca: 1,000.00 grs.

CUADRO 12

Universidad Nacional Agraria La Molina
Programa Académico de Ingeniería Agrícola
Laboratorio D.R.A.T.

MUESTRA: Suelo Base

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

Mallas	Abertura (mm.)	Pesos Retenidos (gramos)	Porcentaje Parcial Retenido	Porcentaje Acumu- lado que pasa
3/4"	19.10			
1/2"	12.70			
3/8"	9.52			
1/4"	6.35			
Nº 4	4.76			
6	3.36			
8	2.38			
10	2.00			
16	1.19			
20	0.840			
30	0.590			100
40	0.420	11.180	1	99
50	0.297	27.675	3	96
60	0.250	41.052	4	92
80	0.177	310.123	31	61
100	0.149	318.932	32	29
140	0.105	201.218	20	9
200	0.074	68.115	7	2
Fondo: pasa malla Nº200		21.705	2	-
Peso de la muestra seca: 1,000.00 grs.				

CUADRO 13. - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS SIN FILTROPROTECTOR

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.52	1.79	2.24	2.57	3.20	3.66	4.02
Ts		0.42	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
1	79.1	1.52	1.79	2.24	2.56	3.19	3.61	3.99
2	66.2	1.43	1.64	2.04	2.35	2.90	3.31	3.66
3	57.1	1.36	1.53	1.89	2.18	2.63	3.08	3.41
4	44.6	1.24	1.38	1.68	1.93	2.37	2.71	2.97
5	39.8	1.18	1.30	1.59	1.82	2.22	2.54	2.78
6	33.9	1.10	1.21	1.44	1.66	2.01	2.28	2.52
7	28.8	0.99	1.10	1.28	1.48	1.78	2.03	2.25
8	25.5	0.94	1.02	1.19	1.36	1.65	1.86	2.06
9	21.6	0.86	0.93	1.07	1.18	1.44	1.60	1.79
10	19.1	0.80	0.85	0.98	1.08	1.29	1.43	1.60
11	17.8	0.77	0.81	0.92	1.01	1.21	1.34	1.47
12	16.8	0.75	0.78	0.88	0.96	1.14	1.26	1.40
13	15.8	0.72	0.75	0.83	0.90	1.06	1.18	1.30
14	14.7	0.69	0.72	0.78	0.85	0.99	1.11	1.21
15	13.7	0.66	0.69	0.75	0.80	0.92	1.00	1.13
16	12.8	0.64	0.66	0.69	0.75	0.84	0.92	1.02
17	11.8	0.60	0.62	0.65	0.69	0.77	0.84	0.92
18	9.3	0.52	0.54	0.54	0.56	0.60	0.61	0.66
19	7.5	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.48
T(°C)		21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4
Q(cm ³ /s)		4.2	5.0	7.0	8.5	11.8	14.0	16.0
S _{e-s} (m)		1.10	1.35	1.81	2.14	2.77	3.23	3.59
J _{e-s}		1.55	1.93	2.58	3.06	3.94	4.61	5.12
S ₂₋₈ (m)		0.49	0.62	0.85	0.99	1.25	1.45	1.60

CUADRO 14.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR
 LAMBER L.M. 4; ESPESOR DE 5 cm.(2"). REJILLA CRIBADA

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.64	2.04	2.31	2.58	2.86	3.23	3.54
Ts		0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41
1	79.1	1.64	2.02	2.29	2.55	2.84	3.20	3.53
2	66.2	1.49	1.82	2.05	2.28	2.51	2.82	3.13
3	57.1	1.38	1.68	1.90	2.10	2.31	2.59	2.89
4	44.6	7.22	1.47	1.64	1.80	1.98	2.18	2.46
5	39.8	1.15	1.35	1.52	1.67	1.82	2.02	2.27
6	33.9	1.03	1.21	1.34	1.46	1.59	1.74	1.93
7	28.8	0.92	1.08	1.18	1.28	1.38	1.50	1.66
8	25.5	0.85	0.98	1.06	1.14	1.23	1.33	1.48
9	21.6	0.73	0.83	0.88	0.94	1.00	1.07	1.18
10	19.1	0.64	0.69	0.74	0.77	0.81	0.87	0.92
11	17.8	0.60	0.64	0.69	0.71	0.73	0.76	0.81
12	16.8	0.56	0.59	0.62	0.62	0.64	0.66	0.69
13	15.8	0.52	0.54	0.56	0.57	0.57	0.58	0.60
14	14.7	0.50	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53
15	13.7	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50
16	12.8	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
17	11.8	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48
18	9.3	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
19	7.5	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
T(°C)		22.0	22.0	22.4	22.0	21.4	21.0	21.0
Q(cm ³ /s)		12.0	16.0	18.5	21.0	24.0	27.5	30.5
S _{e-s} (m)		1.22	1.62	1.89	2.16	2.45	2.82	3.13
J _{e-s}		1.74	2.32	2.70	3.08	3.50	4.03	4.48
S ₂₋₈ (m)		0.64	0.84	0.99	1.14	1.28	1.49	1.65

CUADRO 15.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 4; ESPESOR DE 10 cm. (4''). REJILLA CRIBADA

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.42	1.90	2.17	2.49	2.76	3.09	3.43
Ts		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
1	79.1	1.40	1.86	2.12	2.46	2.73	3.04	3.38
2	66.2	1.34	1.74	1.95	2.23	2.48	2.75	3.07
3	57.1	1.29	1.63	1.83	2.09	2.32	2.56	2.86
4	44.6	1.22	1.49	1.66	1.87	2.05	2.26	2.50
5	39.8	1.19	1.42	1.58	1.76	1.92	2.10	2.33
6	33.9	1.14	1.32	1.44	1.59	1.73	1.89	2.06
7	28.8	1.09	1.21	1.30	1.41	1.51	1.64	1.76
8	25.5	1.04	1.13	1.19	1.28	1.35	1.45	1.56
9	21.6	0.98	1.02	1.03	1.09	1.13	1.18	1.23
10	19.1	0.94	0.95	0.96	0.98	0.99	1.03	1.04
11	17.8	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95
12	16.8	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
13	15.8	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
14	14.7	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
15	13.7	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
16	12.8	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
17	11.8	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
18	9.3	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
19	7.5	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
T(°C)		23.5	22.0	22.5	21.0	22.0	22.0	22.0
Q(cm ³ /s)		3.4	8.6	11.5	14.8	17.6	21.3	24.6
Se-s(m)		0.52	1.00	1.27	1.59	1.66	2.19	2.53
Je-s		0.76	1.43	1.82	2.27	2.67	3.14	3.63
S2-8(m)		0.30	0.61	0.76	0.95	1.13	1.30	1.51

CUADRO 16. - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 8; ESPESOR DE 5 cm. (2^o). REJILLA CRIADA

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		0.94	1.44	1.72	2.13	2.61	3.05	3.45
Ts		0.45	0.45	0.46	0.46	0.42	0.42	0.43
1	79.1	0.94	1.44	1.72	2.12	2.59	3.04	3.43
2	66.2	0.88	1.33	1.58	1.93	2.36	2.74	3.08
3	57.1	0.84	1.25	1.49	1.82	2.20	2.56	2.82
4	44.6	0.79	1.14	1.34	1.64	1.95	2.27	2.48
5	34.8	0.76	1.09	1.28	1.56	1.83	2.12	2.32
6	33.9	0.72	0.99	1.15	1.40	1.64	1.89	2.05
7	28.8	0.68	0.91	1.04	1.25	1.44	1.64	1.79
8	25.5	0.64	0.84	0.96	1.13	1.29	1.47	1.60
9	21.6	0.60	0.76	0.83	0.98	1.10	1.22	1.33
10	19.1	0.57	0.68	0.75	0.84	0.94	1.02	1.13
11	17.8	0.54	0.64	0.71	0.80	0.87	0.94	1.00
12	16.8	0.53	0.61	0.66	0.72	0.80	0.85	0.91
13	15.8	0.52	0.58	0.62	0.68	0.72	0.77	0.81
14	14.7	0.50	0.55	0.58	0.60	0.65	0.69	0.69
15	13.7	0.48	0.50	0.53	0.53	0.54	0.56	0.57
16	12.8	0.47	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
17	11.8	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
18	9.3	0.46	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
19	7.5	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
T(°C)		20.2	20.4	20.2	20.0	20.2	21.4	20.8
Q(cm ³ /s)		3.70	7.70	9.80	12.6	17.3	20.8	24.0
S _{e-s} (m)		0.49	0.99	1.26	1.67	2.19	2.63	3.02
J _{e-s}		0.70	1.42	1.80	2.38	3.12	3.76	4.30
S ₂₋₈ (m)		0.24	0.49	0.62	0.80	1.07	1.27	1.48

CUADRO 17.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 8; ESPESOR DE 10 cm(4¹¹), REJILLA CRIBADA

Man. Nº	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.51	1.72	2.07	2.46	2.97	3.41	3.81
Ts		0.48	0.49	0.47	0.46	0.45	0.45	0.45
1	79.1	1.51	1.72	2.06	2.45	2.95	3.38	3.77
2	66.2	1.36	1.54	1.84	2.17	2.62	2.98	3.32
3	57.1	1.26	1.44	1.70	1.99	2.39	2.71	3.03
4	44.6	1.11	1.23	1.45	1.68	2.01	2.27	2.51
5	39.8	1.04	1.15	1.34	1.54	1.83	2.06	2.25
6	33.9	0.93	1.01	1.15	1.32	1.55	1.72	1.90
7	28.8	0.83	0.90	1.01	1.13	1.32	1.45	1.59
8	25.5	0.75	0.80	0.88	0.98	1.12	1.21	1.33
9	21.6	0.62	0.66	0.71	0.75	0.82	0.87	0.90
10	19.1	0.55	0.56	0.57	0.58	0.62	0.62	0.62
11	17.8	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
12	16.8	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
13	15.8	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
14	14.7	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
15	13.7	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
16	12.8	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
17	11.8	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
18	9.3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
19	7.5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
T(°C)		24.0	24.0	24.0	23.0	24.0	24.0	23.0
Q(cm ³ /s)		10.8	13.0	17.0	21.5	27.0	31.8	36.5
S _{e-s} (m)		1.03	1.23	1.60	2.00	2.52	2.96	3.36
J _{e-s}		1.46	1.76	2.29	2.85	3.60	4.22	4.81
S _{2-g} (m)		0.61	0.74	0.96	1.19	1.50	1.77	1.99

CUADRO 18. - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 8; ESPESOR 10 cm(4''). REJILLA RANURADA(8rpv)

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.45	1.78	2.24	2.65	3.04	3.51	3.96
Ts		0.98	0.98	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95
1	79.1	1.44	1.78	2.21	2.68	3.01	3.47	3.91
2	66.2	1.37	1.67	2.08	2.42	2.75	3.16	3.56
3	57.1	1.32	1.55	1.87	2.18	2.45	2.85	3.16
4	44.6	1.22	1.39	1.63	1.84	2.06	2.34	2.56
5	39.8	1.18	1.32	1.52	1.70	1.88	2.12	2.30
6	33.9	1.14	1.23	1.38	1.52	1.66	1.85	1.98
7	28.8	1.10	1.15	1.26	1.37	1.47	1.60	1.70
8	25.5	1.06	1.11	1.19	1.26	1.33	1.45	1.52
9	21.6	1.00	1.02	1.04	1.07	1.09	1.15	1.18
10	19.1	1.00	1.00	1.02	1.04	1.05	1.10	1.11
11	17.8	1.00	1.00	1.01	1.03	1.03	1.07	1.07
12	16.8	0.99	1.00	1.01	1.02	1.02	1.07	1.05
13	15.8	0.99	0.99	1.00	1.02	1.02	1.06	1.04
14	14.7	0.99	0.99	1.00	1.02	1.02	1.05	1.03
15	13.7	0.99	0.99	0.99	1.01	1.01	1.05	1.02
16	12.8	0.99	0.99	0.99	1.01	1.01	1.04	1.02
17	11.8	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.03	1.01
18	9.3	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.02	1.01
19	7.5	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01
T (°C)		21.3	21.8	22.0	22.0	22.5	22.0	22.5
Q(cm ³ /s)		5.7	9.47	14.6	19.2	24.3	30.0	35.8
S _{e-s} (m)		0.47	0.80	1.28	1.69	2.09	2.56	3.01
J _{e-s}		0.68	1.14	1.82	2.40	2.99	3.66	4.30
S _{2-g} (m)		0.31	0.56	0.89	1.16	1.42	1.71	2.04

CUADRO 19.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 8-16; ESPESOR DE 10cm(4"). REJILLA RANURADA 8(rpv)

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.51	1.80	2.24	2.69	3.16	3.54	3.94
Ts		0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96	0.96
1	79.1	1.48	1.76	2.21	2.65	3.11	3.47	3.88
2	66.2	1.43	1.70	2.09	2.43	2.84	3.16	3.60
3	57.1	1.38	1.60	1.95	2.27	2.63	2.92	3.30
4	44.6	1.30	1.46	1.76	1.98	2.25	2.51	2.80
5	39.8	1.27	1.41	1.66	1.86	2.10	2.33	2.56
6	33.9	1.21	1.33	1.49	1.67	1.87	2.09	2.25
7	28.8	1.15	1.23	1.36	1.49	1.64	1.78	1.93
8	25.5	1.11	1.17	1.25	1.34	1.45	1.53	1.67
9	21.6	1.01	1.02	1.04	1.07	1.12	1.16	1.22
10	19.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03
11	17.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
12	16.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
13	15.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
14	14.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.01
15	13.7	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.01
16	12.8	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.01
17	11.8	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.01
18	9.3	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
19	7.5	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
T (°C)		22.5	22.5	22.5	22.2	22.0	22.5	22.5
Q(cm ³ /s)		5.7	9.25	14.0	19.2	25.0	29.5	34.8
Se-s(m)		0.53	0.82	1.26	1.71	2.18	2.58	2.98
Jc-s		0.76	1.16	1.76	2.44	3.12	3.68	4.25
S2-8(m)		0.32	0.53	0.84	1.09	1.39	1.63	1.93

CUADRO 20.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 16; CON ESPESOR DE 5 cm. (2"). REJILLA CRIBADA

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m. de agua)						
Te		1.38	1.68	2.06	2.44	2.87	3.42	3.98
Ts		1.04	1.05	1.04	1.04	1.07	1.05	1.05
1	79.1	1.38	1.68	2.05	2.42	2.85	3.41	3.94
2	66.2	1.34	1.62	1.95	2.25	2.63	3.14	3.60
3	57.1	1.32	1.56	1.87	2.14	2.48	2.97	3.37
4	44.6	1.29	1.49	1.75	1.97	2.23	2.66	3.00
5	39.8	1.28	1.46	1.68	1.87	2.11	2.51	2.81
6	33.9	1.25	1.41	1.60	1.76	1.96	2.30	2.56
7	28.8	1.21	1.35	1.51	1.64	1.80	2.10	2.33
8	25.5	1.19	1.30	1.45	1.55	1.70	1.95	2.15
9	21.6	1.17	1.25	1.35	1.44	1.54	1.75	1.88
10	19.1	1.13	1.21	1.29	1.35	1.44	1.61	1.73
11	17.8	1.13	1.18	1.26	1.32	1.38	1.53	1.63
12	16.8	1.13	1.17	1.23	1.28	1.34	1.48	1.56
13	15.8	1.11	1.15	1.21	1.25	1.32	1.42	1.48
14	14.7	1.11	1.14	1.18	1.21	1.26	1.36	1.39
15	13.7	1.10	1.12	1.15	1.17	1.19	1.26	1.29
16	12.8	1.09	1.09	1.09	1.10	1.11	1.15	1.17
17	11.8	1.08	1.08	1.08	1.09	1.10	1.10	1.10
18	9.3	1.08	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09
19	7.5	1.07	1.07	1.07	1.07	1.09	1.09	1.09
T(°C)		23.5	23.5	23.5	22.2	25.0	25.0	25.0
Q(cm ³ /s)		2.10	4.50	7.30	10.4	14.0	20.0	26.0
S _{e-s} (m)		0.34	0.63	1.02	1.40	1.80	2.36	2.92
J _{e-s}		0.48	0.91	1.44	2.00	2.57	3.37	4.17
S _{2-g} (m)		0.15	0.32	0.50	0.70	0.93	1.19	1.45

CUADRO 21.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS CON FILTROPROTECTOR LAMINAR L.M. 16; ESPESOR DE 10 cm (4"). REJILLA CRIBADA

Man. N°	Radio (cm)	Carga Hidráulica, h (m de agua)						
Te		1.36	1.61	1.88	2.14	2.43	2.71	3.01
Ts		0.88	0.88	0.88	0.87	0.86	0.85	0.83
1	79.1	1.35	1.60	1.86	2.14	2.43	2.71	3.00
2	66.2	1.30	1.51	1.74	1.95	2.18	2.43	2.66
3	57.1	1.24	1.43	1.64	1.82	1.99	2.24	2.44
4	44.6	1.16	1.29	1.42	1.56	1.72	1.89	2.05
5	39.8	1.11	1.23	1.34	1.46	1.59	1.72	1.86
6	33.9	1.05	1.13	1.23	1.30	1.42	1.51	1.60
7	28.8	1.01	1.07	1.11	1.18	1.26	1.33	1.40
8	25.5	0.97	1.01	1.04	1.09	1.15	1.19	1.25
9	21.6	0.93	0.94	0.97	0.98	1.02	1.04	1.07
10	19.1	0.91	0.91	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95
11	17.8	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91
12	16.8	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91
13	15.8	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91
14	14.7	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91
15	13.7	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
16	12.8	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
17	11.8	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
18	9.3	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
19	7.5	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
T(°C)		23.0	24.0	24.0	25.0	25.0	25.0	22.0
Q(cm ³ /s)		5.25	8.25	11.8	14.2	17.0	20.6	24.0
Se-s(m)		0.48	0.73	1.00	1.27	1.57	1.86	2.18
Je-s		0.69	1.05	1.51	1.82	2.24	2.67	3.11
S ₂ -8		0.33	0.50	0.70	0.86	1.03	1.24	1.41

CUADRO N° 22 : Valores de Caudal Total, Descarga Específica a 40 cm. del centro del pozo y Gradiente Hidráulico entre los piezómetros 2 y 8.

SIN F-P			F-P 16-2"			F-P 16-4"		
Q (cm ³ /s)	q_{40} (x10 ⁻²) (cm/s)	J ₂₋₈	Q (cm ³ /s)	q_{40} (x10 ⁻²) (cm/s)	J ₂₋₈	Q (cm ³ /s)	q_{40} (x10 ⁻²) (cm/s)	J ₂₋₈
4.2	0.95	1.20	2.1	0.47	0.37	5.25	1.18	0.81
5.0	1.13	1.52	4.5	1.01	0.79	8.25	1.86	1.23
7.0	1.58	2.09	7.3	1.64	1.23	11.8	2.66	1.72
8.5	1.91	2.43	10.4	2.34	1.72	14.2	3.20	2.11
11.8	2.66	3.07	14.0	3.15	2.29	17.0	3.83	2.53
14.0	3.15	3.56	20.0	4.50	2.92	20.6	4.64	3.05
16.0	3.60	3.93	26.0	5.86	3.56	24.0	5.41	3.46
F-P 8-2"			F-P 8-4"			F-P 8-4" (*)		
3.7	0.83	0.59	10.8	2.43	1.50	5.7	1.28	0.76
7.7	1.73	1.20	13.0	2.93	1.82	9.5	2.13	1.38
9.8	2.21	1.52	17.0	3.83	2.36	14.6	3.29	2.19
12.6	2.84	1.97	21.5	4.84	2.92	19.2	4.32	2.85
17.3	3.90	2.63	27.0	6.08	3.69	24.3	5.47	3.49
20.8	4.68	3.12	31.8	7.16	4.35	30.0	6.76	4.20
24.0	5.41	3.64	36.5	8.22	4.89	35.8	8.06	5.01
F-P 8-16-4" (*)			F-P 4-2"			F-P 4-4"		
5.7	1.28	0.79	12.0	2.70	1.57	3.4	0.77	0.74
9.25	2.08	1.30	16.0	3.60	2.06	8.6	1.94	1.50
14.0	3.15	2.06	18.5	4.17	2.43	11.5	2.59	1.87
19.2	4.32	2.68	21.0	4.73	2.80	14.8	3.33	2.33
25.0	5.63	3.42	24.0	5.41	3.14	17.6	3.96	2.78
29.5	6.64	4.00	27.5	6.19	3.66	21.3	4.80	3.19
34.8	7.84	4.74	30.5	6.87	4.05	24.6	5.54	3.71

CUADRO N° 23 : Valores de Caudal Total, Descarga Específica a 15 cm. del centro del pozo y Gradiente Hidráulico entre los piezómetros 9 y 17.

SIN F-P			F-P LM 4-2"			F-P LM 4-4"		
Q (cm ³ /s)	q_{15} (x10 ⁻²) (cm/s)	J_{9-17}	Q (cm ³ /s)	q_{15} (x10 ⁻²) (cm/s)	J_{9-17}	Q (cm ³ /s)	q_{15} (x10 ⁻²) (cm/s)	J_{9-17}
4.2	2.52	2.67	12.0	7.2	2.45	3.4	2.04	0.71
5.0	3.00	3.18	16.0	9.9	3.47	8.6	5.16	1.02
7.0	4.20	4.29	18.5	11.1	3.98	11.5	6.90	1.12
8.5	5.11	5.00	21.0	12.6	4.59	14.8	8.88	1.73
11.8	7.09	6.84	24.0	14.4	5.20	17.6	10.56	2.14
14.0	8.41	7.76	27.5	16.5	5.92	21.3	12.78	2.65
16.0	9.61	8.88	30.5	18.3	7.14	24.6	14.76	3.16
F-P LM 8-2"			F-P LM 8-4"			F-P LM 8-4" (*)		
3.7	2.22	1.35	10.8	6.5	1.12	5.7	3.42	0.10
7.7	4.62	2.86	13.0	7.8	1.53	9.5	5.68	0.31
9.8	5.88	3.67	17.0	10.2	2.04	14.6	8.76	0.51
12.6	7.56	5.20	21.5	12.9	2.45	19.2	11.52	0.71
17.3	10.38	6.43	27.0	16.2	3.16	24.3	14.60	0.92
20.8	12.48	7.65	31.8	19.0	3.67	30.0	18.00	1.22
24.0	14.40	8.78	36.5	21.9	3.98	35.8	21.48	1.73
F-P LM 8-16-4" (*)			F-P LM 16-2"			F-P LM 16-4"		
5.7	3.42	0.20	2.1	1.26	0.86	5.25	3.15	0.32
9.25	5.55	0.31	4.5	2.70	1.68	8.25	4.95	0.41
14.0	8.4	0.51	7.3	4.38	2.68	11.8	7.06	0.73
19.2	11.5	0.82	10.4	6.25	3.56	14.2	8.53	0.77
25.0	15.0	1.33	14.0	8.41	4.50	17.0	10.2	1.26
29.5	17.7	1.73	20.0	12.0	6.63	20.6	12.4	1.43
34.8	20.9	2.14	26.0	15.6	7.96	24.0	14.4	1.78

(*) Con rejilla ranurada.

CUADRO 24.- VALORES DE CAUDAL TOTAL, CAUDAL UNITARIO Y PERDIDAS DE CARGA ENTRE LOS PIEZOMETROS 9 y Ts, PARA CADA SECUENCIA EXPERIMENTAL

Sin F-P			F-P LM 4-2''			F-P LM 4-4''		
Q (cm ³ /s)	q _u (m ² /día)	Δh _{g-s} (m)	Q (cm ³ /s)	q _u (m ² /día)	Δh _{g-s} (m)	Q (cm ³ /s)	q _u (m ² /día)	Δh _{g-s} (m)
4.2	3.02	0.44	12.0	8.64	0.31	3.4	2.44	0.08
5.0	3.59	0.49	16.0	11.50	0.41	8.6	6.18	0.12
7.0	5.03	0.64	18.5	13.30	0.46	11.5	8.27	0.13
8.5	6.12	0.75	21.0	15.10	0.52	14.8	10.64	0.19
11.8	8.48	1.01	24.0	17.25	0.59	17.6	12.65	0.23
14.0	10.06	1.17	27.5	19.77	0.66	21.3	15.31	0.28
16.0	11.52	1.36	30.5	21.93	0.77	24.6	17.69	0.33
F-P LM 8-2''			F-P LM 8-4''			F-P LM 8-4''(*)		
3.7	2.66	0.15	10.8	7.78	0.14	5.7	4.1	0.02
7.7	5.54	0.30	13.0	9.36	0.17	9.5	6.81	0.04
9.8	7.06	0.37	17.0	12.24	0.24	14.6	10.5	0.08
12.6	9.07	0.52	21.5	15.48	0.29	19.2	13.8	0.11
17.3	12.46	0.68	27.0	19.44	0.37	24.3	17.47	0.14
20.8	14.98	0.80	31.8	22.86	0.42	30.0	21.57	0.20
24.0	17.28	0.90	36.5	26.28	0.45	35.8	25.74	0.23
F-P LM 8-16-4''(*)			F-P LM 16-2''			F-P LM 16-4''		
5.7	4.1	0.03	2.15	1.51	0.13	5.25	3.78	0.05
9.25	6.65	0.04	4.5	3.24	0.20	8.25	5.94	0.06
14.0	10.6	0.06	7.3	5.26	0.31	11.8	8.46	0.09
19.2	13.8	0.09	10.4	7.49	0.40	14.2	10.22	0.11
25.0	17.97	0.14	14.0	10.08	0.47	17.0	12.24	0.16
29.5	21.21	0.28	20.0	14.40	0.69	20.6	14.83	0.19
34.8	25.0	0.26	26.0	18.72	0.82	24.0	17.28	0.24

CUADRO N°25.- VALORES DEL NUMERO DE REYNOLDS, CALCULADOS EN BASE A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA

CADA UNO DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS, A DIFERENTES DISTANCIAS DEL CENTRO DEL POZO

Sin Material F-P								
			Suelo Base		$\delta g = 0.017 \text{ cm.}$		$n = 0.45$	
			$r_1 = 7.5 \text{ cm.}$		$r_2 = 15 \text{ cm.}$		$r_3 = 60 \text{ cm.}$	
Q (cm^3/s)	T° ($^\circ\text{C}$)	$v(x10^{-2})$ (cm^2/s)	$c_m(x10^{-2})$ (cm/s)	$R_p(x10^{-2})$	$c_m(x10^{-2})$ (cm/s)	$R_p(x10^{-2})$	$c_m(x10^{-2})$ (cm/s)	$R_p(x10^{-2})$
4.2	21.4	0.974	5.05	16.03	2.52	8.00	0.63	2.00
5.0	21.4	0.974	6.01	19.07	3.00	9.52	0.75	2.38
7.0	21.4	0.974	8.41	26.69	4.20	13.33	1.05	3.37
8.5	21.4	0.974	10.21	32.40	5.11	16.22	1.28	4.06
11.8	21.4	0.974	14.17	44.97	7.09	22.50	1.77	5.62
14.0	21.4	0.974	16.82	53.38	8.41	26.69	2.10	6.66
16.0	21.4	0.974	19.22	60.99	9.61	30.50	2.40	7.62

CUADRO Nº 25.- VALORES DEL NUMERO DE REYNOLDS, CALCULADOS EN BASE A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA CADA UNO DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS, A DIFERENTES DISTANCIAS DEL CENTRO DEL POZO

Con F-P LM 4-2"		Suelo base			$\delta g=0.631$ cm.		$n=0.54$	
		$\delta g=0.017$ cm.			$n=0.45$			
		$r_1=7.5$ cm.			$r_2=15$ cm.		$r_3=60$ cm.	
Caudal, Q (cm ³ /s)	Tempe- ratura (°C)	$v(x10^{-2})$ (cm ² /s)	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp(x10 ⁻²)
12.0	22.0	0.960	14.4	20.58	7.2	0.23	1.8	5.8
16.5	22.0	0.960	19.8	28.3	9.9	0.31	2.48	7.98
18.5	22.4	0.951	22.2	32.02	11.1	0.36	2.78	9.04
21.0	22.0	0.960	25.2	36.01	12.6	0.41	3.15	10.14
24.0	21.4	0.974	28.8	40.56	14.4	0.46	3.60	11.42
27.5	21.0	0.983	33.0	46.05	16.5	0.52	4.13	12.99
30.5	21.0	0.983	36.0	51.07	18.3	0.58	4.58	14.40
Con F-P LM-4-4"		Suelo Base			$\delta g=0.631$ cm.		$n=0.54$	
		$\delta g=0.017$ cm.			$n=0.45$			
3.4	23.5	0.926	4.08	6.04	2.04	3.02	.51	1.7
8.6	22.0	0.960	10.32	14.75	5.16	7.37	1.29	4.15
11.5	22.5	0.949	13.8	19.95	6.9	9.97	1.73	5.63
14.8	21.0	0.983	17.76	24.78	8.88	12.39	2.22	6.98
17.6	22.0	0.960	21.12	30.18	10.56	15.09	2.64	8.50
21.3	22.0	0.960	25.56	36.52	12.78	18.36	3.2	10.30
24.6	22.0	0.960	29.52	42.18	14.76	21.09	3.69	11.88

CUADRO N° 25.- VALORES DEL NUMERO DE REYNOLDS, CALCULADOS EN BASE A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA CADA UNO DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS, A DIFERENTES DISTANCIAS DEL CENTRO DEL POZO

Con F-P LM 8-2"			Suelo base			$r_g=0.335$ cm.	$n=0.51$	
						$r_g=0.017$ cm.	$n=0.45$	
			$r_1=7.5$ cm.		$r_2=15$ cm.		$r_3=60$ cm.	
Caudal (cm ³ /s)	Tempe- ratura (°C)	$v(x10^{-2})$ (cm ² /s)	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp(x10 ⁻²)
3.7	20.2	1.002	4.44	4.43	2.22	0.07	0.56	1.73
7.7	20.4	0.997	9.24	6.33	4.62	0.14	1.16	3.60
9.8	20.2	1.002	11.76	8.02	5.88	0.18	1.47	4.53
12.6	20.0	1.007	15.12	10.27	7.56	0.23	1.89	5.80
17.3	20.2	1.002	20.76	14.16	10.38	0.32	2.60	8.02
20.8	21.4	0.974	24.96	17.52	12.48	0.40	3.12	9.90
24.0	20.8	0.988	28.80	19.93	14.40	0.45	3.60	11.26
Con F-P LM 8-4"			Suelo Base			$r_g=0.335$ cm.	$n=0.51$	
						$r_g=0.017$ cm.	$n=0.45$	
10.8	24.0	0.916	12.96	9.67	6.48	4.84	1.62	5.47
13.0	24.0	0.916	15.60	11.64	7.8	5.82	1.95	6.58
17.0	24.0	0.916	20.4	15.23	10.2	7.61	2.55	8.60
21.5	23.0	0.938	25.8	18.80	12.9	9.40	3.23	10.64
27.0	24.0	0.916	32.4	24.18	16.2	12.09	4.05	13.67
31.75	24.0	0.916	38.1	28.44	19.05	14.22	4.76	16.06
36.5	23.0	0.938	43.8	31.92	21.9	15.96	5.48	18.06

CUADRO 1°25.- VALORES DEL NUMERO DE REYNOLDS, CALCULADOS EN BASE A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA CADA UNO DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS, A DIFERENTES DISTANCIAS DEL CENTRO DEL POZO

Con F-P LM 8-4" (*)					Suelo Base		$\delta g=0.335$ cm.		$n=0.51$	
					$\delta g=0.017$ cm.		$n=0.45$			
			$r_1=7.5$ cm.		$r_2=15$ cm.		$r_3=60$ cm.			
Caudal Q (cm ³ /s)	Tempe- ratura (°C)	$v(x10^{-2})$ (cm ² /s)	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Pp(x10 ⁻²)		
5.70	21.3	0.976	6.84	4.79	3.42	2.40	0.86	2.72		
9.47	21.8	0.965	11.36	8.05	5.68	4.02	1.42	4.55		
14.60	22.0	0.960	17.52	12.48	8.76	6.24	2.19	7.05		
19.20	22.0	0.960	23.04	16.41	11.52	8.20	2.88	9.27		
24.33	22.5	0.949	29.2	21.04	14.60	10.52	3.65	11.89		
30.00	22.0	0.960	36.0	25.64	18.00	12.82	4.50	14.49		
35.00	22.5	0.949	42.96	30.95	21.48	15.47	5.37	17.49		
Con F-P LM 8-2" + 16-2" (*)					Suelo base		$\delta g=0.335; 0.196$ cm.		$n=0.51 ; 0.52$	
					$\delta g=0.017$ cm.		$n=0.45$			
5.70	22.5	0.949	6.84	4.93	3.42	1.47	.86	2.80		
9.25	22.5	0.949	11.1	8.00	5.55	2.39	1.39	4.53		
14.00	22.5	0.949	16.8	12.10	8.4	3.61	2.1	6.84		
19.20	22.2	0.956	23.04	16.48	11.52	4.92	2.85	9.21		
25.00	22.0	0.960	30.0	21.36	15.0	6.38	3.75	12.07		
29.50	22.5	0.949	35.4	25.50	17.7	7.62	4.43	14.43		
34.80	22.5	0.949	41.76	30.08	20.88	8.98	5.22	17.0		

(*) Con rejilla removida

CUADRO Nº 25.- VALORES DEL NUMERO DE REYNOLDS, CALCULADOS EN BASE A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA CADA UNO DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS, A DIFERENTES DISTANCIAS DEL CENTRO DEL POZO

Con F-P LM 16-2"		Suelo Base			$\delta g=0.196$ cm.	$n=0.52$	$\delta g=0.017$ cm.	$n=0.45$
		$r_1=7.5$ cm.			$r_2=15$ cm.		$r_3=60$ cm.	
Caudal (cm^3/s)	Tempe- ratura ($^{\circ}\text{C}$)	$v(x10^{-2})$ (cm^2/s)	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp.	$q_m(x10^{-2})$ (cm/s)	Rp($x10^{-2}$)
2.1	23.5	0.926	2.52	1.11	1.26	0.04	0.32	1.07
4.5	23.5	0.926	5.41	2.39	2.70	0.09	0.68	2.27
7.3	23.5	0.926	8.77	3.87	4.38	0.15	1.10	3.67
10.4	22.2	0.956	12.49	5.33	6.25	0.20	1.56	5.04
14.0	25.0	0.895	16.82	7.67	8.41	0.29	2.10	7.25
20.0	25.0	0.895	24.02	10.96	12.01	0.41	3.00	10.36
26.0	25.0	0.895	31.23	14.25	15.62	0.54	3.90	13.47
Con F-P LM 16-4"		Suelo Base			$\delta g=0.196$ cm.	$n=0.52$	$\delta g=0.017$ cm.	$n=0.45$
5.25	23.0	0.938	6.31	2.75	3.15	1.37	0.79	2.60
8.25	24.0	0.916	9.91	4.42	4.95	2.21	1.24	4.18
11.75	25.0	0.895	14.11	6.44	7.06	3.22	1.76	6.08
14.2	25.0	0.895	17.06	7.78	8.53	3.89	2.13	7.36
17.0	25.0	0.895	20.42	9.32	10.21	4.66	2.55	8.81
20.6	25.0	0.895	24.74	11.29	12.37	5.64	3.09	10.67
24.0	22.0	0.960	28.83	12.26	14.41	6.13	3.60	11.59

CUADRO N°26.- VALORES DE "COEFICIENTE DE PESISTENCIA" (λ) Y "NUMERO DE PEYNOLDS" (Re) CALCULADOS PARA CADA UNO DE LOS SISTEMAS CON MATEPIAL F-P LAMINAR

$q_m = q_{30}$								$j = j_{6,7}$							
FP 16-2"		FP 16-4"		FP 8-2"		FP 8-4"		FP 4-2"		FP 4-4"		FP 8-4"(*)		FP 8-16-4" (*)	
λ (10 ⁻³)	Re (10 ⁻²)	λ (10 ³)	Re (10 ⁻²)												
46.0	2.1	10.9	5.2	17.9	3.4	5.2	10.9	4.5	11.6	28.2	3.4	7.6	5.4	11.2	5.6
19.4	4.5	6.6	8.4	8.3	7.2	4.4	13.2	3.2	15.5	9.4	8.3	5.5	9.1	7.0	9.1
10.4	7.3	4.7	12.2	6.8	9.0	3.4	17.2	2.9	18.0	6.6	11.2	3.4	14.1	4.0	13.7
6.8	10.1	3.9	14.7	5.6	11.6	2.6	21.3	2.3	21.3	5.0	14.0	2.4	18.6	2.9	18.6
4.8	14.5	3.3	17.6	4.1	16.0	2.0	27.3	2.2	22.9	4.3	16.9	1.9	23.7	1.8	24.2
3.1	20.7	2.6	21.3	3.4	19.8	1.7	32.2	1.9	26.0	3.3	20.6	1.6	28.9	2.1	28.8
2.1	26.9	2.3	23.2	2.8	22.5	1.4	36.1	1.8	28.8	2.9	23.8	1.4	34.9	1.6	33.9
$q_m = q_{60}$								$j = j_{2,3}$							
61.3	1.1	29.2	2.6	38.7	1.7	11.6	5.5	10.3	5.8	58.4	1.7	20.5	2.7	20.5	2.8
36.4	2.3	15.9	4.2	18.1	3.6	8.0	6.6	6.9	8.0	20.1	4.2	18.1	4.6	15.7	4.5
20.5	3.7	9.8	6.1	12.7	4.5	7.5	8.6	5.9	9.0	12.2	5.6	13.3	7.1	9.6	6.8
13.4	5.0	8.7	7.4	9.4	5.8	5.2	10.6	5.5	10.1	8.6	7.0	8.8	9.3	6.0	9.2
9.8	7.3	8.9	8.8	7.2	8.0	4.3	13.7	4.7	11.4	7.0	8.5	6.8	11.9	4.5	12.1
5.6	10.4	6.0	10.7	6.2	9.9	3.6	16.1	4.1	13.0	5.6	10.3	4.7	14.5	3.7	14.4
4.7	13.5	5.2	11.6	6.1	11.3	2.9	18.1	3.5	14.4	4.7	11.9	4.2	17.5	3.3	17.0

(*) Usados con rejilla ranurada (8 rpv)

B

ANALISIS DE REGRESION LOGARITMICA SIMPLE APLICADO A LA RELACION ENTRE
LA CARGA HIDRAULICA (h) Y LA DISTANCIA AL CENTRO DEL POZO (r)

La ecuación de regresión empleada es:

$$h = b \operatorname{Lnr} + C \quad (27)$$

donde:

h = carga hidráulica en m.

r = distancia al centro del pozo en m.

b = pendiente de la recta logaritmica (coeficiente de regresión).

C = constante

Los coeficiente de regresión b y a, así como el coeficiente de determinación r^2 , son determinados aplicando el Programa "Logarithmic Curve Fit" hecho para la calculadora de bolsillo HP-25.

Los resultados obtenidos para cada secuencia experimental, son los siguientes:

- Sistema sin material F-P Laminar: ($r_{19} < r < r_2$)

1)	$h = 0.467 \operatorname{Lnr} - 0.549$	$r^2 = 0.99$
2)	$h = 0.577 \operatorname{Lnr} - 0.812$	$r^2 = 0.99$
3)	$h = 0.779 \operatorname{Lnr} - 1.276$	$r^2 = 0.99$
4)	$h = 0.930 \operatorname{Lnr} - 1.608$	$r^2 = 0.99$
5)	$h = 1.191 \operatorname{Lnr} - 2.163$	$r^2 = 0.99$
6)	$h = 1.423 \operatorname{Lnr} - 2.760$	$r^2 = 0.89$
7)	$h = 1.544 \operatorname{Lnr} - 2.889$	$r^2 = 0.99$

- Sistema con material F-P LM4-2¹¹ ($r_{15} < r < r_2$)

1)	h = 0.674	Lnr - 1.338	$r^2 = 1.00$
2)	h = 0.898	Lnr - 1.938	$r^2 = 1.00$
3)	h = 1.049	Lnr - 2.338	$r^2 = 0.99$
4)	h = 1.219	Lnr - 2.817	$r^2 = 0.99$
5)	h = 1.370	Lnr - 3.214	$r^2 = 1.00$
6)	h = 1.579	Lnr - 3.785	$r^2 = 0.99$
7)	h = 1.799	Lnr - 4.375	$r^2 = 1.00$

- Sistema con material F-P LM 4-4¹¹ ($r_{11} < r < r_2$)

1)	h = 0.364	Lnr - 0.026	$r^2 = 1.00$
2)	h = 0.630	Lnr - 0.905	$r^2 = 1.00$
3)	h = 0.804	Lnr - 1.403	$r^2 = 0.99$
4)	h = 1.021	Lnr - 2.020	$r^2 = 1.00$
5)	h = 1.208	Lnr - 2.556	$r^2 = 0.99$
6)	h = 1.401	Lnr - 3.086	$r^2 = 0.99$
7)	h = 1.642	Lnr - 3.769	$r^2 = 1.00$

- Sistema con material F-P LM 8-2¹¹ ($r_{15} < r < r_2$)

1)	h = 0.258	Lnr - 0.195	$r^2 = 1.00$
2)	h = 0.531	Lnr - 0.882	$r^2 = 1.00$
3)	h = 0.679	Lnr - 1.247	$r^2 = 1.00$
4)	h = 0.903	Lnr - 1.811	$r^2 = 1.00$
5)	h = 1.161	Lnr - 2.472	$r^2 = 1.00$
6)	h = 1.412	Lnr - 3.124	$r^2 = 1.00$
7)	h = 1.602	Lnr - 3.605	$r^2 = 1.00$

- Sistema con material F-P LM 8-4ⁱⁱ ($r_{10} < r < r_2$)

1)	h = 0.649	Lnr -	1.353	$r^2 = 1.00$
2)	h = 0.797	Lnr -	1.787	$r^2 = 1.00$
3)	h = 1.026	Lnr -	2.447	$r^2 = 1.00$
4)	h = 1.284	Lnr -	3.192	$r^2 = 1.00$
5)	h = 1.617	Lnr -	4.135	$r^2 = 1.00$
6)	h = 1.905	Lnr -	4.976	$r^2 = 1.00$
7)	h = 2.172	Lnr -	5.745	$r^2 = 1.00$

- Sistema con material F-P LM 8-4ⁱⁱ(*) ($r_{10} < r < r_2$)

1)	h = 0.318	Lnr -	0.032	$r^2 = 0.99$
2)	h = 0.562	Lnr -	0.713	$r^2 = 0.99$
3)	h = 0.835	Lnr -	1.496	$r^2 = 0.98$
4)	h = 1.153	Lnr -	2.476	$r^2 = 0.99$
5)	h = 1.363	Lnr -	3.047	$r^2 = 0.98$
6)	h = 1.663	Lnr -	3.897	$r^2 = 0.99$
7)	h = 2.038	Lnr -	5.088	$r^2 = 0.99$

- Sistema con material F-P LM 8-16-4ⁱⁱ(*) ($r_{10} < r < r_2$)

1)	h = 0.341	Lnr -	0.003	$r^2 = 0.99$
2)	h = 0.555	Lnr -	0.644	$r^2 = 0.99$
3)	h = 0.883	Lnr -	1.618	$r^2 = 1.00$
4)	h = 1.174	Lnr -	2.477	$r^2 = 1.00$
5)	h = 1.492	Lnr -	3.404	$r^2 = 1.00$
6)	h = 1.747	Lnr -	4.139	$r^2 = 0.99$
7)	h = 2.040	Lnr -	4.968	$r^2 = 1.00$

- Sistema con material F-P LM 16-2ⁱⁱ ($r_{16} < r < r_2$)

1)	$h = 0.168$	$Lnr + 0.666$	$r^2 = 0.99$
2)	$h = 0.324$	$Lnr + 0.261$	$r^2 = 1.00$
3)	$h = 0.522$	$Lnr - 0.239$	$r^2 = 1.00$
4)	$h = 0.705$	$Lnr - 0.709$	$r^2 = 1.00$
5)	$h = 0.922$	$Lnr - 1.255$	$r^2 = 1.00$
6)	$h = 1.215$	$Lnr - 1.954$	$r^2 = 1.00$
7)	$h = 1.481$	$Lnr - 2.617$	$r^2 = 1.00$

- Sistema con material F-P LM 16-4ⁱⁱ ($r_{10} < r < r_2$)

1)	$h = 0.313$	$Lnr - 0.029$	$r^2 = 0.99$
2)	$h = 0.486$	$Lnr - 0.543$	$r^2 = 0.99$
3)	$h = 0.664$	$Lnr - 1.070$	$r^2 = 0.99$
4)	$h = 0.840$	$Lnr - 1.594$	$r^2 = 0.99$
5)	$h = 1.017$	$Lnr - 2.107$	$r^2 = 0.99$
6)	$h = 1.219$	$Lnr - 2.707$	$r^2 = 0.99$
7)	$h = 1.408$	$Lnr - 3.262$	$r^2 = 0.99$

ANALISIS DE REGRESION LINEAL SIMPLE APLICADO A LA RELACION ENTRE LA
DESCARGA TOTAL (Q) Y EL REBATIMIENTO TOTAL (S)

La ecuación de regresión empleada es:

$$Q = a + bS \quad (28)$$

donde:

Q = Caudal total en $\text{cm}^3/\text{seg.}$

S = Rebatimiento total en cm.

a = Constante

b = Pendiente de la recta (coeficiente de regresión)

Los resultados obtenidos, haciendo uso del Programa de Calculadora
HP-25 "Linear Regression", son los siguientes:

- Sistema sin Filtroprotector

$$Q = -1.448 + 0.0479S \quad r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 4-2"

$$Q = 0.238 + 0.0967S \quad r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 4-4"

$$Q = -2.007 + 0.1057S \quad r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 8-2"

$$Q = -0.346 + 0.0803S \quad r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 8-4"

$$Q = -0.515 + 0.1097S \quad r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 8-4ⁱⁱ(*)

$$Q = -0.21 + 0.1181S$$

$$r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 8-16-4ⁱⁱ(*)

$$Q = -0.646 + 0.1177S$$

$$r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 16-2ⁱⁱ

$$Q = -1.732 + 0.0921S$$

$$r^2 = 0.99$$

- Sistema con F-P LM 16-4ⁱⁱ

$$Q = 0.345 + 0.1035S$$

$$r^2 = 1.00$$

ANALISIS DE REGRESION SIMPLE APLICADO A LA RELACION ENTRE EL CAUDAL
TOTAL (Q) Y EL REBATIMIENTO ENTRE LOS PIEZOMETROS 2 Y 8 (S_{2-8})

La ecuación de regresión empleada es:

$$Q = a + bS \quad (28)$$

donde:

Q = Caudal total en $\text{cm}^3/\text{seg.}$

S = Rebatimiento entre piezómetros 2 y 8 en cm.

a = Constante

b = Pendiente de la recta (coeficiente de regresión)

Los resultados obtenidos aplicando el Programa de Calculadora HP-25
"Linear Regression", son:

- Sistema sin Filtroprotector

$$Q = -1.718 + 0.108S \quad r^2 = 0.99$$

- Sistema con Filtroprotector

$$Q = -0.098 + 0.174S \quad r^2 = 0.95$$

DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (K_s) DEL SUELO BASE
MEDIANTE LA ECUACION DE DUPUIT-THIEM

La ecuación de Dupuit-Thiem para el modelo es deducida de la siguiente manera:

Por continuidad, el caudal en cualquier sección transversal al flujo es:

$$Q = A.v \quad (29)$$

Aplicando la Ley de Darcy y reemplazando A, tenemos:

$$Q = 11.1r \times K \frac{dh}{dr} \quad (30)$$

de donde, por integración obtenemos:

$$h = \frac{Q}{11.1K} \ln r + C \quad (31)$$

Aplicando condiciones límites:

$$r = r_2 \quad ; \quad h = h_2$$

$$r = r_8 \quad ; \quad h = h_8$$

obtenemos:

$$S_{2-8} = h_2 - h_8 = \frac{Q}{11.1K} \ln r_2/r_8$$

$$\text{ó} \quad Q = \frac{11.1K}{\ln r_2/r_8} S \quad (32)$$

Comparando las ecuaciones (28) y (32):

$$b = \frac{11.1K}{\ln r_2/r_8} \quad (33)$$

de donde se obtiene que:

$$K = \frac{\ln r_2/r_8}{11.1} \times b \quad (34a)$$

Reemplazando valores y haciendo conversión de unidades; se obtiene:

$$K = 74.26 \times b \quad \text{en} \quad \text{m/día} \quad (34b)$$

De acuerdo a los resultados del Análisis de Regresión, se obtienen los siguientes valores para K:

- Sistema sin Filtroprotector

$$K_s = 8.02 \text{ m/día}$$

- Sistema con Filtroprotector

$$K_s = 12.92 \text{ m/día}$$

ANALISIS DE REGRESION LINEAL SIMPLE APLICADO A LA RELACION ENTRE LA
DESCARGA ESPECIFICA (q_{40}) Y EL GRADIENTE HIDRAULICO (J_{2-8})

La ecuación de regresión empleada es:

$$q = a + bj \quad (35)$$

donde:

- q = Descarga específica en m/seg.
- j = Gradiente hidráulico entre los piezómetros 2 y 8
- a = Intercepción de la línea de regresión con el eje de las q.
- b = Pendiente de la recta (coeficiente de regresión) = conductividad hidráulica, K en cm/seg.

Los resultados obtenidos, aplicando el Programa de la Calculadora HP-25 "Linear Regression", son los siguiente:

- Sistema sin material F-P Laminar

$$q = -0.0038 + 0.00989j \quad r^2 = 0.991$$

- Sistemas con material F-P Laminar

$$q = -0.0002 + 0.01621j \quad r^2 = 0.952$$

ANALISIS DE REGRESION LINEAL SIMPLE APLICADO A LA RELACION ENTRE LA
DESCARGA ESPECIFICA (q_{15}) Y EL GRADIENTE HIDRAULICO (J_{9-17})

La ecuación de regresión empleada es:

$$q = a + bj \quad (35)$$

donde:

- q = Descarga específica en cm/seg.
- j = Gradiente hidráulico entre los piezómetros 9 y 17
- a = Constante
- b = Pendiente de la recta (coeficiente de regresión).

Los resultados obtenidos aplicando el Programa de Calculadora HP-25 "Linear Regression" son los siguientes:

- Sistema sin Filtroprotector

$$q = -0.0066 + 0.0115j \quad r^2 = 1.00$$

- Sistema con F-P LM 4-2"

$$q = 0.014 + 0.0244j \quad r^2 = 0.99$$

- Sistema con F-P LM 4-4"

$$q = 0.002 + 0.0476j \quad r^2 = 0.96$$

- Sistema con F-P LM 8-2"

$$q = -0.002 + 0.0164j \quad r^2 = 0.99$$

- Sistema con F-P LM 8-4

$$q = -0.0017 + 0.0533j \quad r^2 = 0.99$$

- Sistema con F-P LM 8-4"(*)

$$q = 0.028 + 0.1158j$$

$$r^2 = 0.98$$

- Sistema con F-P LM 8-16-4"(*)

$$q = 0.032 + 0.0854j$$

$$r^2 = 0.98$$

- Sistema con F-P LM 16-2"

$$q = -0.007 + 0.0199j$$

$$r^2 = 0.97$$

- Sistema con F-P LM 16-4"

$$q = 0.0175 + 0.0722j$$

$$r^2 = 0.97$$

DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DE ENTRADA EMPLEANDO EL ANALISIS DE REGRESION LINEAL SIMPLE ENTRE LOS VALORES DE DESCARGA UNITARIA (q) Y LAS PERDIDAS DE CARGA ENTRE LOS PIEZOMETROS 9 y T_S (Δh_{9-S})

La ecuación de regresión utilizada es:

$$\Delta h = a + wq \quad (36)$$

donde:

Δh = Pérdida de carga entre los piezómetros 9 y T_S en m.

q = Descarga unitaria en m³/día/m.

a = Constante

w = Pendiente de la recta igual a la Resistencia de entrada en día/m.

Los resultados obtenidos haciendo uso del Programa de la Calculadora HP-25 "Linear Regression" son los siguientes:

- Sistema sin Filtroprotector

$$\Delta h = 0.103 + 0.107q \quad r^2 = 0.999$$

- Sistema con F-P LM 4-2"

$$\Delta h = 0.020 + 0.033q \quad r^2 = 0.994$$

- Sistema con F-P LM 4-4"

$$\Delta h = 0.017 + 0.017q \quad r^2 = 0.971$$

- Sistema con F-P LM 8-2^{II}

$$\Delta h = 0.017 + 0.052q$$

$$r^2 = 0.996$$

- Sistema con F-P LM 8-4^{II}

$$\Delta h = 0.017 + 0.017q$$

$$r^2 = 0.987$$

- Sistema con F-P LM 8-4^{II}(*)

$$\Delta h = -0.025 + 0.010q$$

$$r^2 = 0.994$$

- Sistema con F-P LM 8-16-4^{II}(*)

$$\Delta h = -0.038 + 0.011q$$

$$r^2 = 0.951$$

- Sistema con F-P LM 16-2^{II}

$$\Delta h = 0.08 + 0.041q$$

$$r^2 = 0.994$$

- Sistema con F-P LM 16-4^{II}

$$\Delta h = -0.022 + 0.015q$$

$$r^2 = 0.972$$