IRE

CAPITULO 17

ANALISIS DE FACTORES PARA LA FORMACION Y DISEÑO DE PROYECTOS DE RIEGO CON AGUA SUBTERRANEA

17.1 CONCEPTO DE RIEGO

En regiones de lluvias anuales bajas, en aquellas donde no ocurren lluvias o en aquellas otras donde son insuficientes durante el período de crecimiento de las plantas aún cuando la precipitación anual sea muy alta, el riego es necesario para los cultivos. El riego es esencialmente una práctica complementaria de la precipitación natural.

17.2 REQUERIMIENTOS DE RIEGO

17.2.1 Ecuación general

En una expresión simplificada (Grassi, 1968) los requerimientos de riego de un proyecto durante determinado período de tiempo se establecen por la ecuación.

$$\text{Requerimiento del proyecto} = \frac{(\text{Evapotranspiración real, ponderada}) - (\text{Aportes hídricos})}{\text{Eficiencia del Proyecto}}$$

17.2.2 Definiciones

Para interpretar los conceptos que se usarán en este análisis se agrupan y definen algunos términos:

Necesidad de riego o requerimiento de riego (Nr): Dotación total de agua que debe suministrar la fuente para satisfacer, las necesidades de las parcelas de cultivo del proyecto agrícola, excluyendo las precipitaciones.

Necesidad de riego ponderada: Es el requerimiento global de una parcela o proyecto que desarrolla varios cultivos simultáneamente, con requerimientos parciales distintos.

$$\text{Nr ponderado} = \frac{(Nr \times a_c)}{A_c}$$

Donde a_c = área de cada cultivo

A_c = área total cultivada

Lámina de riego (d): Es el espesor del volúmen del agua (en mm o en m) que se formaría al extender de un modo instantáneo toda el agua sobre la superficie a regar.

Lámina bruta de riego (d_b): Es el espesor del volúmen de agua suministrada que incluye el agua neta incorporada y las pérdidas de riego y conducción (en mm o m) por unidad de superficie de riego.

Lámina de agua neta incorporada (d_i): Es el espesor del volúmen de agua almacenada en la capa edáfica explorada por las raíces y que luego se emplea en el proceso de evapotranspiración expresada en mm o metro referida a la unidad de superficie.

Eficiencia de riego (E_{fr}) o eficiencia de aplicación de agua: Es la relación entre el volúmen o lámina neta de agua incorporada (d_i) y el volúmen o lámina de derivada (d_d):

$$E_{fr} = \frac{d_i}{d_d} \cdot 100$$

Eficiencia de conducción de agua (E_{fc}): Es la relación entre el volúmen (V_d) o lámina (d_d) derivada de las propiedades y el volúmen (V_o) o lámina (d_o) entregada por la obra de cabecera o pozo:

$$E_{fc} = \frac{Vd}{Vo} 100 = \frac{d_d}{d_o} 100$$

Eficiencia total del proyecto (E_{ft}) es $E_{ft} = Efr \times E_{fc}$ y se expresa en decimales o porcentaje.

17.2.3 Informacion básica para el diseño

Para calcular los requerimientos netos de agua del proyecto se necesita conocer: a) área a regar; b) programa de cultivos del proyecto; c) ciclo vegetativo de cada cultivo; d) uso consuntivo de agua o evapotranspiración actual de cada cultivo; g) precipitación; f) eventual aporte de agua de fuentes superficiales; g) otros aportes hídricos; h) eficiencia de aplicación del agua de conducción y operación del sistema de riego; i) número de horas reales de operación por día; j) número de días asignados para el riego. Interesa conocer, sobretodo, el caudal que corresponde al período de máximas necesidades. Para cálculos económicos interesan el volúmen total de agua necesaria y el tiempo real total de operación de riego.

17.3 ESTIMACION DE LOS DATOS DE CALCULO

17.3.1 Precipitación efectiva (Pe)

En el balance hídrico, la precipitación significa la casi totalidad del aporte hídrico al suelo.

Como una parte de la precipitación es interceptada la vegetación (intercepción foliar) parte escurre por la superficie del terreno y parte percola bajo de las raíces, la altura de la lámina retenida en la capa radicular es la que debe computarse. Esa parte se llama precipitación efectiva (Pe).

$$Pe = P \times C \text{ siendo } C < 1$$

Blaney y Criddle, citados por Grassi (1968), proponen la curva de precipitación efectiva en función de la precipitación media mensual, que se da en Fig. 17.1

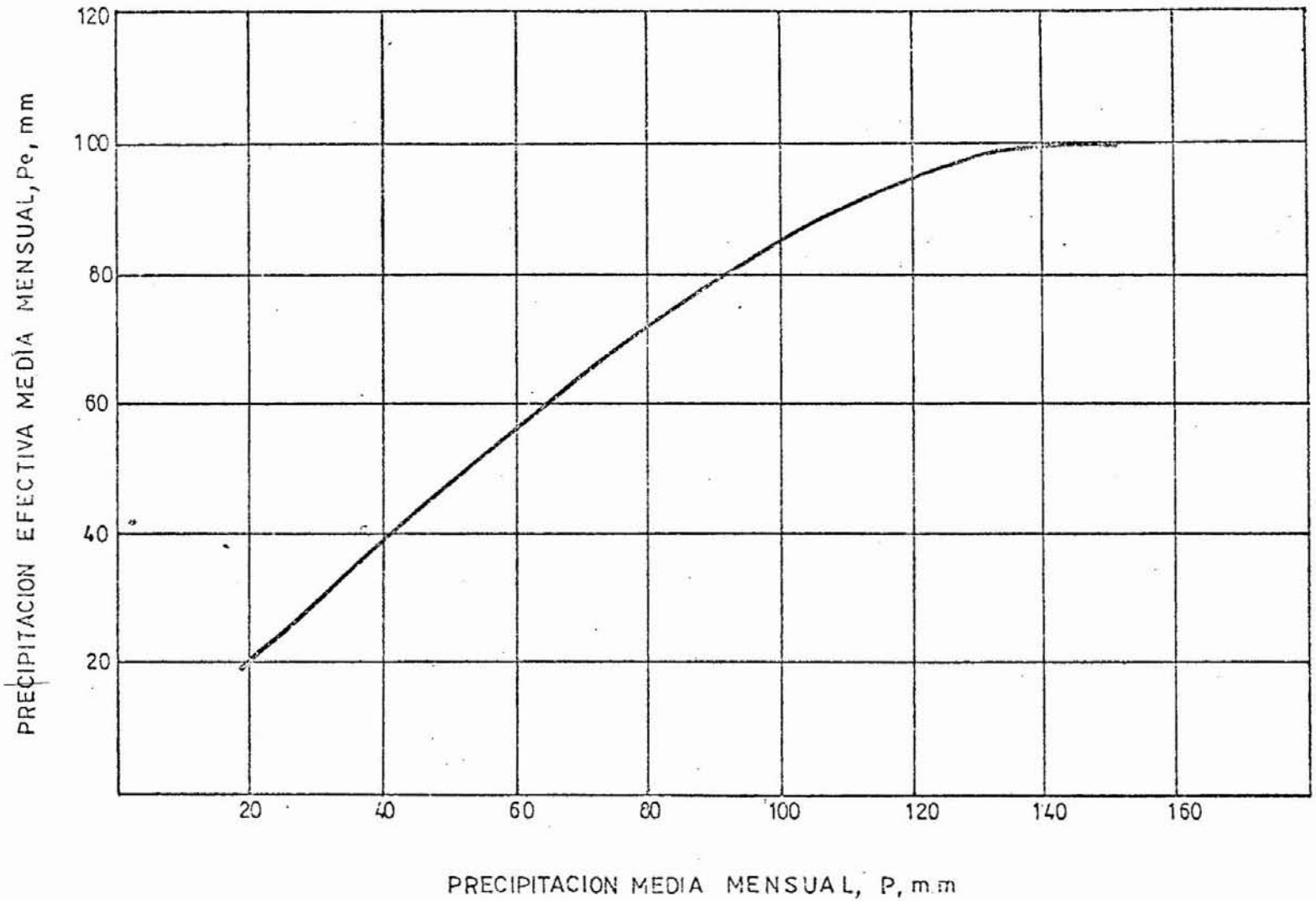
TABLA 17.1

Precipitación Efectiva
(en Grassi, 1968)

Se aplican coeficientes decrecientes cada una pulgada (25 mm) de incremento en el total de lluvia mensual.

Precipitación mensual	Precipitación efectiva mensual		
mm	Coeficiente	Incremento	Acumulado
25	0,95	24	24
50	0,90	22	46
75	0,82	20	66
100	0,65	16	82
125	0,45	11	93
150	0,25	6	99
150	0,05	1	0

Fig. 17.1 PRECIPITACION EFECTIVA (según Blaney y Criddle, en Grassi, 1966)



17.3.2 Estimación de la evapotranspiración

A los efectos del balance hídrico se requiere estimar la evapotranspiración, pero lo que se cuenta son los métodos de medición directa de una superficie libre de agua, de radiación neta, y basados en datos meteorológicos.

En áreas de desarrollo agrícola, con estaciones experimentales, se cuenta con información meteorológica completa que permite usar el o los métodos de cálculo adecuados. En otros casos más favorables, se cuenta con balances hídricos locales y con guias de riego por cultivo.

Por otra parte muchos proyectos de desarrollo de agua subterránea se refieren a zonas áridas o semiáridas, sin tradición agrícola o con información agro-meteorológica incompleta. Con el objeto de facilitar al proyectista los datos necesarios para el diseño de las obras de captación de agua se incorpora a continuación algunos métodos de estimación de evapotranspiración.

La extensa bibliografía en español que trata acerca de los métodos para estimar la evapotranspiración nos exime de tratarlos en este Manual.

Los métodos más usados se discuten en la bibliografía citada al final del capítulo.

17.3.3 Balance hídrico

El balance hídrico es una operación contable mensual que relaciona los aportes de agua y almacenamiento de humedad y las pérdidas por evapotranspiración, estableciéndose así un resultado de excedentes y deficiencias mensuales. (Véase Tabla 17.8).

El método de Thorntwaite (1948) de cálculo por la evapotranspiración y un almacenamiento de 100 mm máximo en el perfil del suelo ya fue desarrollado en el Capítulo 15.

Thorntwaite - Mather (1957) propusieron otros valores de almacenamiento de agua según suelo y vegetación (Tabla 17.2) con los que se ajusta mejor el cálculo para casos especiales de cultivos.

17.3.3.1 Necesidad de riego o requerimiento de riego (Nr)

La necesidad de riego de determinado cultivo en particular, durante un período con posible déficit en el balance hídrico, resulta de restar a la evapotranspiración actual (ET) los aportes hídricos: precipitación efectiva (Pe) y aporte de humedad del perfil (d_i) (diferencia de la lámina inicial y final del período),

$$N_f = ET - (Pe + di) \qquad (17.1)$$

El almacenaje di depende del tipo de suelo y de cultivo (Tabla 17.2)

Las necesidades de riego de determinado cultivo se calculan para su período vegetativo, por mes, dado que los registros de precipitación media se dan mensualmente.

17.3.4 Pérdidas y desperdicios de agua

17.3.4.1 Pérdidas en la propiedad

Cuando la(s) perforacion(es) están dentro de la propiedad a irrigar las pérdidas y desperdicios de agua son función de las características edáficas, de la técnica de riego, de la nivelación, etc. La eficiencia de riego (Efr) se mide como diferencia de esas pérdidas con 100 ó con la unidad, según se expresen como porcentaje o decimal. No siempre es posible tabular todas las variables. Las Tablas 17.9 17.10, 17.11 y 17.12 indican las pérdidas y eficiencias según características físicas de los suelos, topografía, sistema de riego y clima. Para riegos por superficie y por aspersión.

Según Grassi (1968), 65% es una eficiencia razonablemente buena para riego por superficie y un 75% es buena eficiencia para riego por aspersión.

17.3.4.2 Pérdidas en los canales

Las pérdidas en los canales ocurren por infiltración, y desperdicios en la operación del sistema. En canales de riego extensos estas pérdidas significan en EE.UU. un promedio de 38% (Israelsen, 1952) es decir una eficiencia de conducción Efc = 62%.

En la Figura 17.2 se dá un gráfico para calcular pérdidas por infiltración en los canales.

En Tabla 17.3 se dan las pérdidas en canales según el U.S. Bureau of Reclamation Service. El área de infiltración se determina en función del perímetro mojado y la longitud del canal.

En el caso de baterías de perforaciones que alimentan sectores de un proyecto de riego, con canales de tierra de corto recorrido de riego suele considerarse una eficiencia de conducción Efc de 70% (Soil Conservation Service; Bureau of Reclamation, U.S.A.).

TABLA 17.2

Capacidad Provisional de Almacenaje de Agua Segun Suelo y Vegetación.

(Según Thorntwaite-Mather, 1957)

Tipo de suelo	Zona radicular (mm)	Disponibilidad de agua (mm)
	a) espinacas, arvejas remolachas, zanahorias, etc.	
A - arena fina	0,50	50
B - franco arenoso fino	0,50	75
C - franco limoso	0,63	125
D - franco arcilloso	0,40	100
E - arcilloso	0,25	75
	b) maíz,algodón, tabaco,granos,cereales	
A - arena fina	0,75	75
B - franco arenoso fino	1,00	150
C - franco limoso	1,00	200
D - franco arcilloso	0,80	200
E - arcilloso	0,50	150
	c) alfalfa,pastos,arbustos	
A - arena fina	1,00	100
B - franco arenoso fino	1,00	150
C - franco limoso	1,25	250
D - franco arcilloso	1,00	250
E - arcilloso	0,68	200
	d) montes frutales	
A - arena fina	1,50	150
B - franco arenoso fino	1,68	250
C - franco limoso	1,50	300
D - franco arcilloso	1,00	250
E - arcilloso	0,68	200

donde:

Efr = eficiencia de riego en la parcela
Efc = eficiencia de conducción en canales

TABLA 17.3

Pérdidas de Conducción por m^3/m^2 de Perímetro Mojado de Canal en 24 Horas (Bureau of Reclamation Service E.U.A.) (en M.O.P., 1967).

Material	Número de Pruebas	Pérdidas (m^3/m^2)		
		Máximo	Mínimo	Medio
Grava y arena	2	1,10	0,44	0,77
Grava	38	2,15	0,07	0,52
Grava y roca descompuesta.	9	0,87	0,27	0,47
Arena	5	0,55	0,25	0,39
Roca desintegrada	18	0,53	0,12	0,38
Arena y roca suelta	7	0,26	0,19	0,22
Marga arenosa (°)	60	1,13	0,03	0,33
Suelo franco	5	0,44	0,26	0,33
Arena y cenizas volcánicas	21	0,51	0,07	0,27
Grava y cenizas	5	0,47	0,12	0,27
Arcilla y grava	18	0,41	0,05	0,24
Arcilla y arena	12	0,44	0,15	0,25
Adobe (ladrillo o arcilla).	9	0,28	0,14	0,20
Arcilla y pizarra	7	0,31	0,09	0,18
Conglomerado y marga	2	0,14	0,12	0,13
Caliza	2	0,15	0,12	0,13
Arcilla impermeable	12	0,23	0,03	0,10
Arcilla y marga	12	0,34	0,02	0,09
Cemento	9	0,33	0,02	0,10

(°) Marga = arcilla + caliza

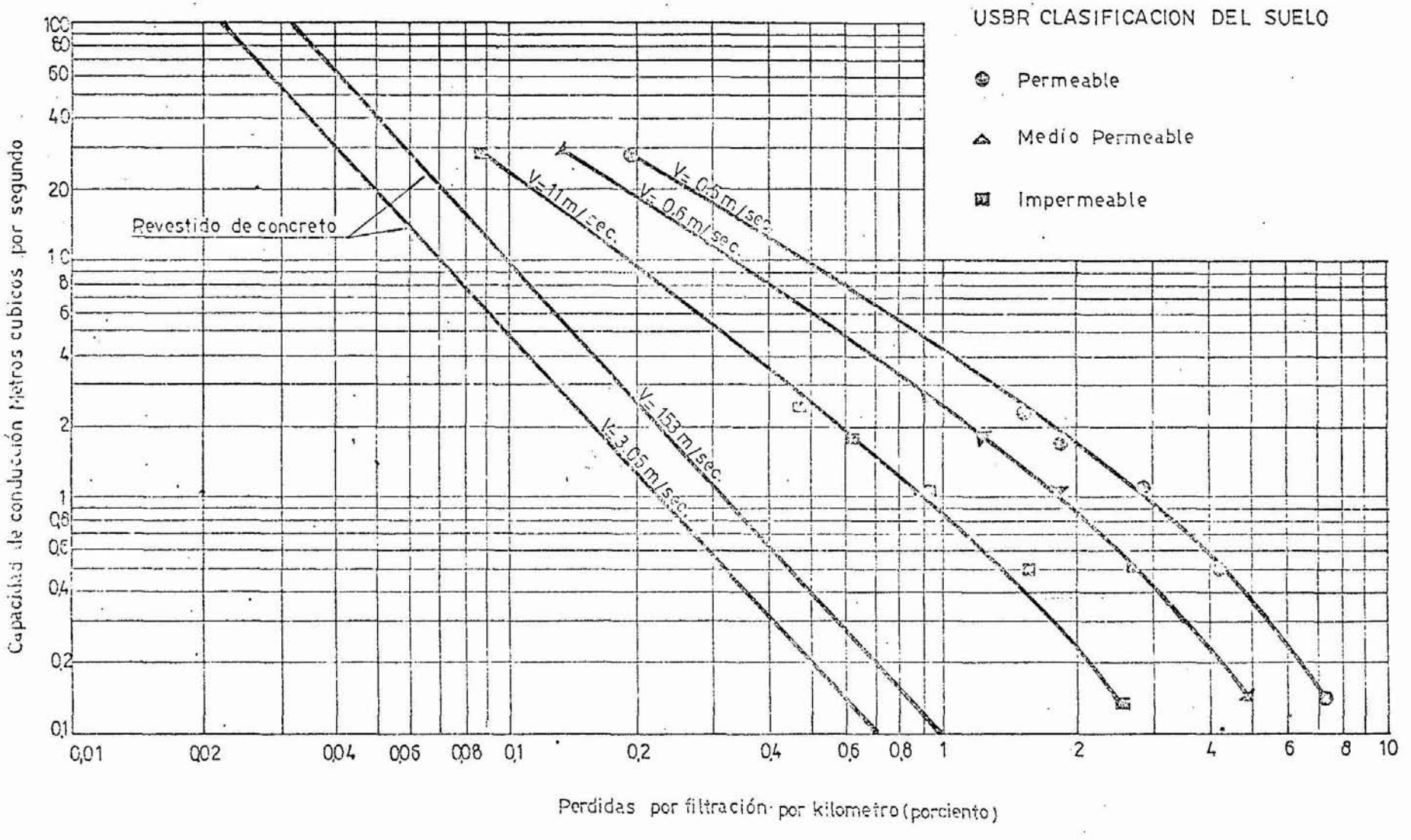


Fig.17.2 FILTRACION DEL CANAL VS. CAPACIDAD DE CONDUCCION.
(en Grassi, 1968)

TABLA 17.4

Pérdidas y Eficiencias de Riego Según Tipos de Suelos (Según Blaney y Criddle, en Grassi, 1968).

Pérdidas - Eficiencias	Tipo de Suelo		
	Liviano (arenoso) %	Medio (franco) %	Pesado (arcilloso) %
Pérdidas en los laterales sin revestir	15	10	5
Pérdidas por escurrimiento superficial	5	10	25
Pérdidas por percolación profunda	35	15	10
Superficie de riego en la parcela	60	75	65
Eficiencia de riego en la propiedad	45	65	60

17.3.4.3 Eficiencia total de riego (Eft)

La eficiencia total de riego se obtiene por:

$$Eft = Efr. Efc \qquad (17.2)$$

donde:

Efr = 100% - % pérdidas por riego = eficiencia de riego en la propiedad.

Efc = 100% - % pérdidas en canales = eficiencia de conducción.

17.4 CALCULO DE REQUERIMIENTOS MENSUALES DE AGUA

17.4.1 Proyectos con planificación de cultivos

Aún cuando la frecuencia de riego de los distintos cultivos sea por períodos inferiores a un mes, resulta conveniente calcular el balance hídrico de cada cultivo y del proyecto total por mes en coincidencia con los datos metereológicos promedios mensuales.

Las necesidades de agua mensuales del proyecto toman en cuenta los requerimientos ponderados de riego de los culti-

vos y la eficiencia total del riego

$$Nrp = \frac{Nr\ ponderado}{Eft} \qquad (17.3)$$

Expresado como caudal ficticio contínuo medio mensual,en l/s/Ha.,se obtiene:

$$qrp = \frac{0,116\ \Sigma\ (Nr.a)}{td.\ Efr.\ Efc} \qquad (17.4)$$

o bien, como lámina bruta de riego, en mm por mes

$$DBR = \frac{\Sigma\ (Nr.a)}{Efr.\ Efc} \qquad (17.5)$$

o también:

$$DBR\ (m^3/Ha) = \frac{10\ \Sigma\ (Nr.a)}{Efr.\ \ Efc}$$

donde:

Nrp = necesidad de riego del proyecto en mm/m

Nr ponderado = $\frac{\Sigma\ (Nr.a)}{} = \frac{\Sigma\ (Nr.a_c)}{Ac}$ en mm/mes

Nr = necesidad de riego de cada cultivo en mm/mes

a = relación del área de cada cultivo (a_c) respecto del área total de cultivo (Ac), ($a = \frac{a_c}{Ac}$) en por ciento.

qrp = caudal ficticio contínuo medio del mes en l/s/Ha. que requiere el riego del proyecto.

DBR = lámina bruta de riego, mm por mes

Eft = Efr. Efc = eficiencia total del proyecto en por-ciento.

Efr = eficiencia de riego en por ciento.

Efc = eficiencia de conducción en por ciento

td = tiempo de operación riego, en días por mes

Conociendo las necesidades de riego Nr mensuales de cada cultivo se puede elaborar el cuadro anual de requerimientos del proyecto a los efectos del diseño de las perforaciones que han de abastecer el agua de riego.

17.4.2 Proyectos sin planificación de cultivos

En ciertos casos se hace necesario elaborar un estudio de prefactibilidad de aprovechamiento del agua subterránea, así como también establecer los requerimientos máximos posibles de riego para establecer número y diseño de perforaciones, distancias y grados de interferencia en un área determinada, sin una previa planificación de cultivos. En tales casos el criterio del proyectista puede apoyarse en las prácticas agrícolas y adoptar el cultivo de mayor requerimiento de riego mensual para calcular la fórmula (17.13).

17.5 DEMANDA INSTANTANEA DE LAS PERFORACIONES

17.5.1 Períodos operativos

Los proyectos de riego abastecidos con perforaciones tienen la ventaja de que el tiempo de operación permite mejores ajustes en función de la demanda real. Dicho en otros términos, el o los regantes pueden elaborar sus programas de riego de acuerdo a sus reales necesidades y no estar constreñidos por turnos de riego preestablecidos. Dado el costo de bombeo y la menor eficiencia del riego nocturno se prefiere el riego diurno, en los métodos superficiales. Por otra parte en algunas áreas, donde hay tarifas eléctricas diferenciales para horarios de valle de consumo, puede convenir a la economía del proyecto el riego por aspersión en horas de la noche, sin problemas de eficiencia. Todo ello hace que adquiera importancia en el diseño de las perforaciones el período operativo mensual y diario.

17.5.2 Período de demanda máxima

Para el diseño interesa el período de demanda máxima del proyecto de riego. Es decir, el mes de máximo requerimiento de riego que deberá ser satisfecho por las perforaciones.

17.5.3 Gasto máximo

La relación entre el caudal de agua, el tiempo de aplicación, la superficie regable y el espesor que ha de ser aplicado se determina como sigue (Israelsen, 1952):

$$q \cdot t = a \cdot d_b \qquad (17.6)$$

$$q = \frac{a \cdot d_b}{t} \qquad (17.7)$$

donde: q = caudal, en m^3/segundo

t = tiempo de riego, en segundos

a = superficie regable en m^2

d_b = lámina bruta de riego a aplicar, en metros, que debe ser suministrada por las perforaciones.

Haciendo:

$q = q_{rp}$ = caudal ficticio unitario del mes de máxima necesidad de riego del proyecto, en litros/segundo/Ha.

d = DBR = lámina bruta de riego, en mm por mes

a = 1 hectárea

t_r = tiempo total de riego, en horas

la ecuación (17.7) resulta:

$$q_{rp} = \frac{2,78 \text{ DBR}}{t_r} \qquad (17.8)$$

entonces:

$$Q_{rp} = q_{rp} \cdot A \qquad (17.9)$$

y reemplazando q_{rp}

$$Q_{rp} = \frac{2,78 \cdot \text{DBR}. A}{\text{td}. \quad \text{th}} \qquad (17.10)$$

donde:

Q_{rp} = caudal instantáneo a suministrar por la fuente de agua en l/segundos para el riego del área total del proyecto en el mes de máxima necesidad de riego.

A = área cultivable a regar en el mes de máxima necesidad de riego.

td.th = tr = tiempo total de riego en horas.

siendo:

td = número de días de riego en el mes

th = número de horas de suministro de agua por día de riego.

y reemplazando DBR por su ecuación (17.5) resulta:

$$Q_{rp} = \frac{2,78 \ \Sigma \ (Nr.a). A}{\text{td}. \ \text{th}. \ \text{Efr}. \ \text{Efc}.} \qquad (19.11)$$

que es el gasto de el o los pozos que deberán abastecer el proyecto de riego.

17.6 CALCULO DE REQUERIMIENTO DE RIEGO

Ejemplo 17.1

Calcular el requerimiento de agua mensual de un sector de un proyecto agrícola en Caramuca, Estado Barinas (Venezuela), cuya fuente de abastecimiento sea el agua subterránea, con los siguientes datos básicos indicados en Tablas (CIDIAT,1970).

17.6.1 Datos básicos del proyecto

17.6.1.1 Programa de cultivos del sector

Cultivo	Area	Ciclo Vegetativo
Caraota-Frijoles	30%	2 meses de Nov. a Marzo.
Cacao	40%	Permanente
Tomate	10%	3 meses de Nov. a Marzo
Plátano	20%	Permanente

17.6.1.2 Datos climáticos

Se dan en Tabla 17.5

17.6.1.3 Eficiencia total de riego (E_{ft}).

Eficiencia de conducción, recorridos cortos, E_{fc} = 95%

Eficiencia de riego parcelario
- Suelos clase 2, por surcos E_{fr} = 60%
- Suelos clase 4, por surcos Efr = 40%

Eficiencia total:

Suelos 2 : 0,95 x 0,60 = 0,57 = Eft

Suelos 4 : 0,95 x 0,40 = 0,38 = Eft

17.6.2 Metodología

17.6.2.1 Balance hidrológico

En Tabla 17.6 se da el cálculo del balance hidrológico considerando:

d_i = 100 mm máximo (véase procedimiento en Capítulo 15)

Resulta así un período de excedente de agua entre Junio y Octubre y un período de déficit hídrico de Diciembre a Abril, que requerirá riego para cultivos.

En las Tablas 17.7 a 17.9 se han estimado (CIDIAT, 1970) las necesidades de riego de los cultivos calculando la evapotranspiración (ET) en base a la evaporación (Ev) por un método adecuado.

TABLA 17.5

Datos Climáticos Promedios.
Estación Barinas, Venezuela. (CIDIAT, 1970)

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Temperatura °C	26,1	26,9	28,1	27,5	26,7	25,8	25,3	25,4	26,3	26,5	26,3	25,8	26, 4 med. anual.
Evaporación (tanque) mm.	216	234	251	183	167	144	150	161	170	164	159	183	2.193 mm.
Precipitación mm (Años 1950/69)	10	7	24	115	230	225	204	188	170	171	115	18	1.477 mm.
Horas de sol (1941-1946)	255	220	232	162	171	149	176	180	205	212	232	251	2.445

TABLA 17.6

Balance Hídrico.
Estación Barinas

	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	AÑO
Evapotranspiración Potencial ET_p (x).	146	134	115	120	129	136	131	127	146	173	187	201	1.745 mm
Precipitación P	115	230	225	204	188	170	171	115	18	10	7	24	1.477 mm
Agua Disponible en el perfil d_i	0	96	100	100	100	100	100	88	0	0	0	0	
Exceso	0	0	106	84	59	34	40	0	0	0	0	0	323 mm
Déficit	31	0	0	0	0	0	0	0	40	163	180	177	591 mm

(x) Los valores de ET_p se obtuvieron aplicando un factor de reducción ET_p = 0,8 Ev

17.6.2.2 Estimación de la necesidad de riego (Nr) por cultivo.

TABLA 17.7

Estimación de Necesidad de Riego de Caraota-Frijoles para Cuatro Períodos de Cultivo.

(CIDIAT, 1970)

Meses	N	D	D	E	E	F	F	M
Ev	159	183	183	216	216	234	234	251
ET	73,8	128,2	85,9	150,3	100,7	159,8	107,1	166,7
Pe	88	0	0	0	0	0	0	0
Nr	0	128,2	85,9	150,3	100,7	159,8	107,1	166,7

TABLA 17.8

Estimación de Necesidad de Riego de Tomate para Consumo en Fresco con Alternativas de Comienzo de Cultivo en Noviembre, Diciembre y Enero.

(CIDIAT, 1970)

	N	D	E	D	E	F	E	F	M
Ev mm	159	183	216	183	216	234	216	234	251
ET mm	66,5	153,3	175,9	77,4	179,0	187,1	90,8	191,1	195,1
Pe mm	90,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nr mm	0	153,3	175,9	77,4	179,0	187,1	90,8	191,1	195,1

TABLA 17.9

Cálculo de Necesidad de Riego (CIDIAT, 1970)
Plátano: Cultivo permanente, riego por surco

	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M
Ev	183	167	144	150	161	170	164	159	183	216	234	251
ET	147,8	137,4	120,9	127,4	136,4	140,8	135,5	132,0	153,7	180,1	191,6	199,8
Pe	0	96,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	88,0	0	0	0	0
Nr	147,8	41,4	20,9	27,4	36,4	40,8	35,5	44,0	153,7	180,1	191,6	199,8

CACAO: Cultivo permanente. Igual a PLATANO

Nr	147,8	41,4	20,9	27,4	36,4	40,8	35,5	44,0	153,7	180,1	191,6	199,8

17.6.2.3 Cálculo de necesidad de riego ponderado mensual

TABLA 17.10

Distribución Areal de Cultivos: Plátano: 0,2; Cacao: 0,4; Caraota-Frijoles: 0,3; (Diciembre-Enero y Febrero-Marzo); Tomate: 0,1 (Enero-Febrero-Marzo).

Meses	Nr x a								Nr ponderado (mm)
	Plátano		Cacao		Caraota - Frijoles		Tomate		
	Nr	a=0,2	Nr	a=0,4	Nr	a=0,3	Nr	a=0,1	Σ Nr a
Abril	147,8	29,56	147,8	59,12	0	0	0	0	88,7
Mayo	41,4	8,28	41,4	16,56	0	0	0	0	24,8
Junio	20,9	4,18	20,9	8,36	0	0	0	0	12,5
Julio	27,4	5,48	27,4	10,96	0	0	0	0	16,5
Agosto	36,4	7,28	36,4	14,56	0	0	0	0	21,8
Septiemb.	40,8	8,16	40,8	16,32	0	0	0	0	24,6
Octubre	35,5	7,10	35,5	14,20	0	0	0	0	21,3
Noviembre	44,0	8,80	44,0	17,60	0	0	0	0	26,4
Diciembre	153,7	30,74	153,7	61,48	85,9	25,77	0	0	118,0
Enero	180,1	36,02	180,1	72,04	150,3	45,09	90,8	9,08	162,2
Febrero	191,6	38,32	191,6	76,64	107,1	32,13	191,1	19,11	166,2
Marzo	199,8	39,96	199,8	79,92	166,7	50,01	195,1	19,51	189,4

Los mayores requerimientos de riego se dan en los meses de Diciembre a Abril, lo que coincide con el balance hídrico.-

17.6.2.4 Cálculo de lámina bruta mensual de riego DBR

TABLA 17.11

	N	D	E	F	M	A
Nr ponderado mm	26,4	118,0	162,2	166,2	189,4	88,7
Eft suelo 2	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
DBR mm	46,3	206,1	252,2	292,3	310,1	155,1
DBR m^3/Ha.	463	2.061	2.522	2.923	3.301	1.551
DBR l.s.Ha (x)	0,18	0,80	0,98	1,13	1,29	0,60
Eft suelo 4	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
DBR mm	69,6	310,1	426,9	437,1	495,0	233,5
DBR m^3/Ha.	696	3.101	4.269	4.371	4.950	2.335
DBR l.s.Ha.	0,27	1,20	1,66	1,69	1,91	0,90

(x) 1 m^3/Ha/mes = 0,00386 l.s.Ha.

El mes de mayor requerimiento unitario es Marzo, con 1,29 l.s.Ha. para suelos Clase 2 y 1,91 l.s.Ha. para suelos clase 4.

17.6.2.5 Dotación de riego del proyecto en el mes de máximo requerimiento.

El gasto necesario para suplir la necesidad de riego en el mes de máximo requerimiento se establece según la superficie de cultivos del proyecto de los distintos suelos del área:

Suelos Clase 2

$$Qr_2 = \frac{2,78 \times 1,29 \times A_2}{td. \quad th} \quad \text{litros/segundo}$$

Suelos Clase 4

$$Qr_4 = \frac{2,78 \times 1,91 \times A_4}{td. \quad th} \quad \text{litros/segundo}$$

o también:

$$Qrp = \frac{2,78}{td.th} \quad (1,29. A_2 + 1,91.A_4) \quad \text{litros/segundo}$$

td = días de riego por mes

th = horas de riego por día de trabajo

A_2 = área de cultivo en suelo Clase 2, en Ha.

A_4 = área de cultivo en suelo Clase 4, en Ha.

17.7 ESTIMACION DEL CAUDAL DE AGUA SUBTERRANEA NECESARIO PARA UN PROYECTO DE RIEGO.

Una vez establecidos los requerimientos de riego de un proyecto agrícola, deben considerarse dos casos:

a) Abastecimiento conjunto: agua superficial + agua subterránea.

b) Abastecimiento de 100% agua subterránea.

17.7.1 Abastecimiento conjunto

Puede darse cualquier combinación de las siguientes alternativas:

a) Fuente superficial con obras de derivación:
   - con pronunciado déficit estacional o
   - con caudal insuficiente.

b) Fuente superficial con obras de regulación:
   - con dotación limitada por propiedad ó
   - con regulación anual irregular.

c) Fuente subterránea:
   - para cubrir déficit estacional;
   - para cubrir déficit permanente ó
   - para cubrir el margen de irregularidad hiperanual del abastecimiento superficial.

d) Ampliación de proyectos de riego

17.7.1.1 Proyectos mal diseñados

En el caso de déficits aperiódicos de obras de regulación anual, algunas veces mal dimensionadas, el grado de cobertura del abastecimiento mínimo necesario con agua subterránea resultará de un estudio de factibilidad en función de la importancia de los cultivos y plantaciones comprometidos. Deberá considerarse, en tal caso, como un costo adicional de la obra de regulación diseñada en defecto.

17.7.1.2 Ampliación de áreas de riego

En algunos proyectos con obras de derivación, con excedentes estacionales, puede considerarse la factibilidad de ampliar el área de riego con agua subterránea.

17.7.1.3 Déficit de agua superficial

Para cualquier alternativa deben establecerse un balance mensual de requerimientos de riego y disponibilidad de agua superficial (aforos, dotaciones, déficits).

El balance mensual se obtiene por:

$$Qrp - q_s = q_{as} \quad l/s \qquad (17.13)$$

donde:

Qrp = caudal de riego en litros/segundos

q_s = caudal a entregar por la fuente superficial en l/s.

q_{as} = déficit a cubrir con agua subterránea en l/s.

El mayor déficit mensual es el caudal que deberá ser abastecido mediante pozos.

17.7.1.4 Cálculo del agua subterránea necesaria

Ejemplo 17.2

Se analiza una alternativa de riego en el proyecto Caramuca, Estado Barinas, Venezuela, con derivación de los ríos Caramuca, Caño José y Vizcaína cuyos caudales mínimos medios se dan en Tabla 17.12.

El área de cultivos tiene:

2.340 Ha. Suelos Clase 2
820 Ha. Suelos Clase 4

El programa de cultivos y sus requerimientos de riego son los calculados en Tabla 17.10.

17.1.4.1 Balance de requerimiento de agua subterránea

En Tabla 17.12 se desarrolla el balance mensual de oferta y demanda. En el mes de Marzo se dá el mayor déficit, con 4.305 litros/segundo a cubrir con agua subterránea. El diseño del campo de pozos que complementaría el proyecto y el cálculo del número de pozos se basará en el mes de máximo déficit del balance, es decir en el requerimiento de 4.305 litros/segundo de caudal ficticio contínuo o también:

$$Qrp = \frac{720\ Q}{th.\ td} \quad \text{litros/segundo}$$

de producción de los pozos, siendo th el número de hora de bombeo por día y td el número de días/mes de riego.

17.7.2 Abastecimiento de 100% de agua subterránea

Se procede según lo indicado en la fórmula (17.10) o en el ejemplo, párrafo 17.6.2.5:

$$Qrp = \frac{2{,}78\ DBR.A}{td.\ \ th} \quad \text{litros/segundo}$$

17.8 ESTIMACION DEL NUMERO DE POZOS NECESARIOS

17.8.1 Características de acuíferos

Para calcular el número de perforaciones de determinado diseño necesarios para abastecer de agua subterránea a un proyecto de riego se requiere conocer o estimar:

a) Coeficiente de transmisibilidad (T)

b) Coeficiente de almacenamiento (S)

TABLA 17.12

Balance de Requerimientos de Agua Subterránea. Alternativa de Riego Mixto, para el Anteproyecto Caramuca, Barinas, Venezuela.

Requerimiento de riego (l/s)	Suelo	Superficie	Balance Mensual l/s. Noviembre	Diciemb.	Enero	Febrero	Marzo	Abril	
	2	2.340 Ha(x)	421,	1.872	2.293	2.644	3.019	1.404	Caudal
	4	820 (x)	221,	984	1.361	1.385	1.566	738	Máximo
	Total	3.160 Ha	642,	2.856	3.654	4.029	4.585	2.142	4.585 l/s
Caudal mínimo promedio Ríos Caño José+Caramuca+ +Vizcaína (l/s) (x).			2.610	1.000	560	440	280	450	Caudal Mínimo. 280 l/s.
Déficit a cubrir con agua subterránea			0	1.856	3.094	3.589	4.305	1.692	Caudal Máximo. 4.305 l/s

(x) CIDIAT, 1970; Proyecto de desarrollo agropecuario Caramuca. Alternativa derivación de aguas Río Paguey, Mérida, Venezuela.

c) Caudal específico de las perforaciones

d) Relación tiempo-depresión de perforaciones

e) Gasto máximo de una perforación de diámetro dado.

La teoría y práctica de obtención de estos datos mediante pruebas de bombeo se ha desarrollado en la Primera Parte de este Manual (Capítulos 9, 10 y 11).

17.8.2 Estimación de características

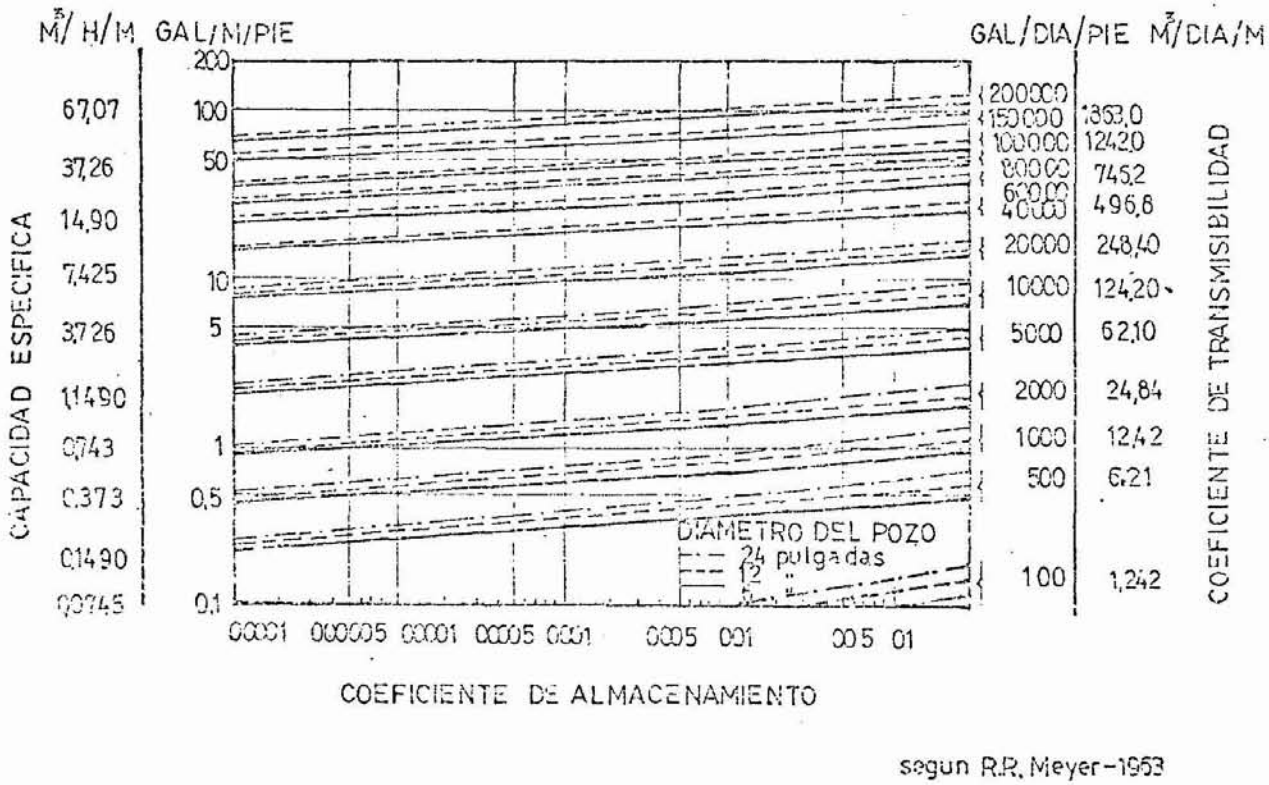


Fig. 17.3 Relación capacidad específica-almacenamiento-transmisibilidad (en Ruíz Huidobro, 1971).

No siempre se disponen de estudios cuantitativos detallados de agua subterránea para estudios de prefactibilidad de desarrollo agrícola. Pero, a menudo se conoce información hidrogeológica general, tal como espesor de acuíferos y aforos de perforaciones del área que permiten, por analogía con estudios detallados de cuencas vecinas, estimar, con criterio conservador, una primera aproximación de coeficientes de

permeabilidad y de almacenamiento. Con sondeos geoeléctricos y perforaciones puede conocerse el espesor del acuífero y entonces se obtiene el coeficiente de transmisibilidad.

Ruíz Huidobro (1971) cita un ábaco de Meyer R. (1963) Fig. 17.3, que permite estimar la transmisibilidad de un acuífero a partir de la capacidad específica (gasto/depresión) de pozos de distinto diámetro y coeficiente de almacenamiento conocido o estimado o viceversa.

17.8.3 Estimación de rendimientos y depresiones de pozos

La aplicación práctica de las características de acuíferos, medidas o estimadas, es la predicción del rendimiento de las perforaciones y efectos de la depresión que el bombeo origina. Con los ábacos de Meyer (1963), (Fig. 17.3) o de Factor A. (1969), (Fig. 18.5) para coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento conocidos, estimados o extrapolados, pueden estimarse rendimientos específicos y viceversa.

Newcome R. (1967.a) ha construído un ábaco (Fig. 17.4) que relaciona la transmisibilidad a la depresión y rendimiento de una perforación ideal. Este ábaco es útil para estimar los rendimientos de pozos a distintas depresiones, o viceversa, dado el gasto de un pozo estimar la profundidad de instalación de la bomba. Un tercer ábaco, tiempo-depresión, (Fig. 17.5) para distintas transmisibilidades, permite estimar la depresión que se operará a distancias dadas del pozo después de cierto tiempo de bombeo contínuo, y calcular el grado de interferencia entre pozos. Con este dato se establece la distancia entre pozos más convenientes.

17.8.4 Cálculo del número y espaciamiento de pozos

Ejemplo 17.4

Sea la alternativa del anteproyecto del Ejemplo 17.2, con los siguientes datos:

Q = 4.305 l/s en el mes de máximo déficit

td = 25 días de operación por mes

th = 16 horas de bombeo por día

NE = nivel estático del acuífero artesiano, promedio=6m

H = profundidad promedio del acuífero = 30 m

S = almacenamiento = 1×10^{4}

T = transmisibilidad estimada = 1.240 m^3/día/m

t = período de bombeo en Diciembre-Abril = 120 días

= superficie de riego 3.160 Ha.

E = eficiencia.

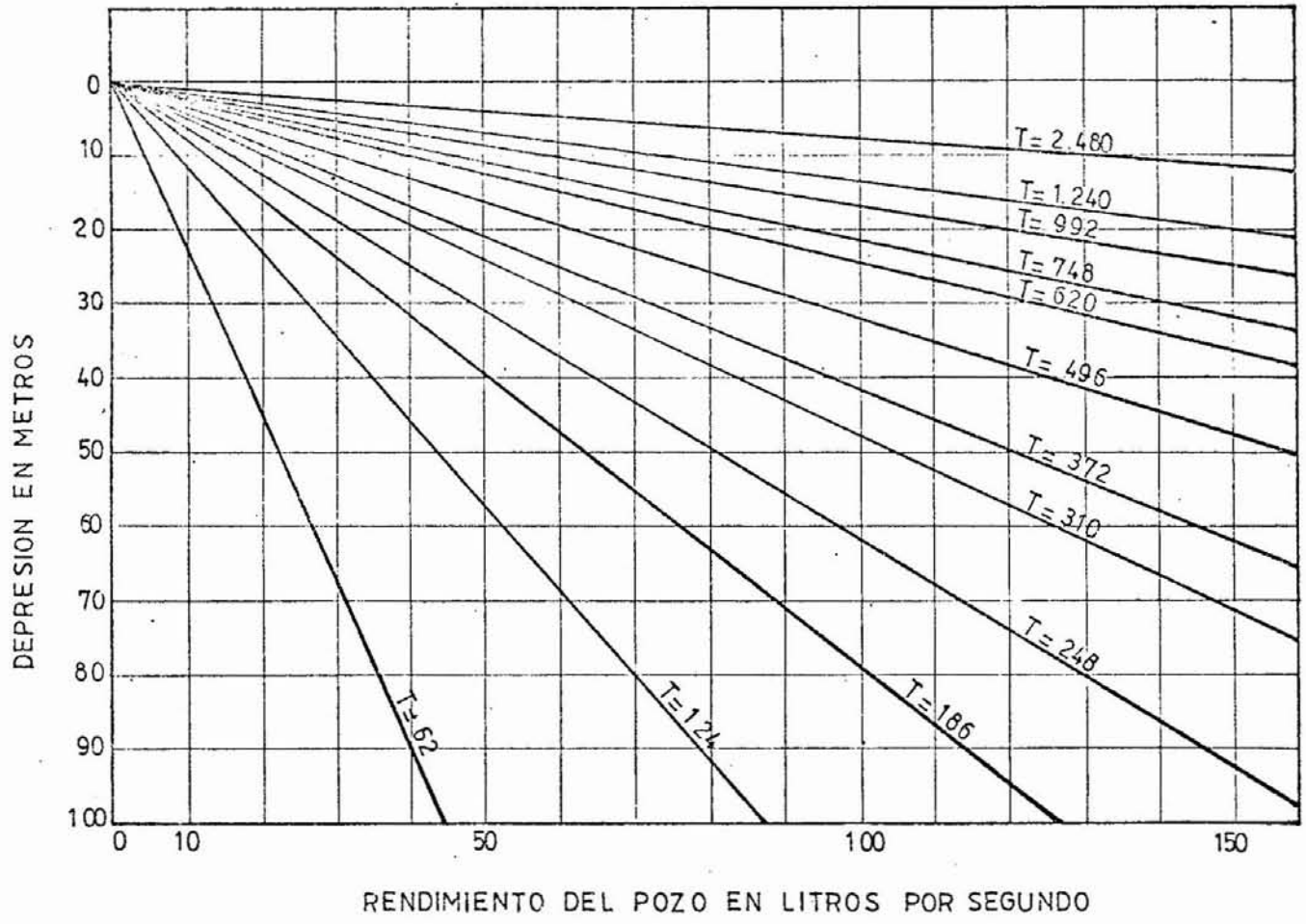


Fig. 17.4 – Relación transmisibilidad – depresión – rendimiento. Datos basados en un pozo artesiano de 12", de 100 % de eficiencia y 1 dia de bombeo. Para menor eficiencia disminuye proporcionalmente el rendimiento. Cuando se conoce la transmisibilidad o se la estima, puede establecese la depresion causada por distintas descargas del pozo, o el rendimiento del pozo para distintas depresiones. Cuando se conoce el rendimiento y depresion de un pozo puede estimarse el rango de – transmisibilidad del acuífero. Para menor eficiencia, aumentar la transmisibilidad (segun R. Newcome 1967). —

17.8.4.1 Cálculo del gasto de las perforaciones

$$Qrp = Q. \frac{30 \times 24}{td. \; th} = \frac{4305 \times 720}{25 \times 16}$$

$$Qrp = 7.750 \text{ l/s}$$

17.8.4.2 Cálculo del número de perforaciones

17.8.4.2.1 Coeficiente de seguridad.

Se prevee que puede haber contingencias agrícolas, climáticas o mecánicas que obliguen a bombear algunos pozos en forma contínua durante el 50% del período de bombeo, es decir durante 60 días. En el gráfico depresión-tiempo de Newcome, Fig. 17.5 con la recta de T = 1.240 medimos que a los 60 días de bombeo la depresión incrementa 150% respecto del primer día. Luego el coeficiente de seguridad es:

$$C_{60} = \frac{1}{\Delta S} = \frac{1}{150/100} = \frac{100}{150}$$

$$C_{60} = 0{,}667$$

17.8.4.2.2 Depresión máxima de cálculo

La depresión máxima del 1° día de bombeo es:

$$s_1 = H - N.E = 30 - 6 = 24 \text{ m.}$$

Afectándola con el coeficiente de seguridad C_{60}

$$s_{60} = s_1 . C_{60} = 24 \times 0{,}667$$

$$s_{60} = 16 \text{ m.}$$

17.8.4.2.3 Rendimiento por pozo

Con T = 1.240 y s_{60} = 16 m., se mide en el gráfico transmisibilidad-depresión-rendimiento que el caudal unitario es:

$$Q_u = 120 \text{ litros/segundo}$$

Por tanto, el número de perforaciones necesarias es:

$$n = \frac{Qrp}{Q_u} = \frac{7.750}{120}$$

$$n = 64 \text{ pozos}$$

donde:

Qrp = gasto máximo requerido en litros/segundo

Q_u = gasto de un pozo

17.8.4.3 Diseño de los pozos

Se trata en el Capítulo 18.

17.8.4.4 Espaciamiento de pozos

En los ejemplos considerados, el área de cultivo de mayor requerimiento de agua por Ha es la de suelo Clase 4. Por ello, convendrá asignar a esa área todo el aporte de agua superficial del mes de mínimo caudal.

Entonces, de acuerdo a la Tabla 17.12 del balance de requerimiento (ap. 17.7.1.4.1).

$$Q_4 = 1.566 - 280 = 1.286 \text{ litros/segundo}$$

$$A_1 = 820 \text{ Ha.}$$

luego, en el período operativo se deberá bombear:

$$Qrp4 = \frac{1.286 \times 30 \times 24}{td. \; th} = \frac{1.286 \times 720}{25 \times 16} = 2.300 \text{ l/s}$$

$$n_4 = \frac{Qrp4}{Q_u} = \frac{2.300}{120} = 18 \text{ pozos}$$

cada pozo regará un máximo de:

$$a_4 = \frac{\Delta_4}{n_4} = \frac{820}{18} = 45,5 \text{ Ha} = 45,5 \times 10^4 m^2$$

Asumiendo idealmente una distribución en damero de parcelas cuadradas; la separación media entre pozos será:

$$\sim_4 = \sqrt{45,5 \times 10^4} = 675 \text{ m}$$

y en las parcelas de suelo Clase 2

$$\sim_2 = 715 \text{ m}$$

Esta distancia entre pozos es aceptable.

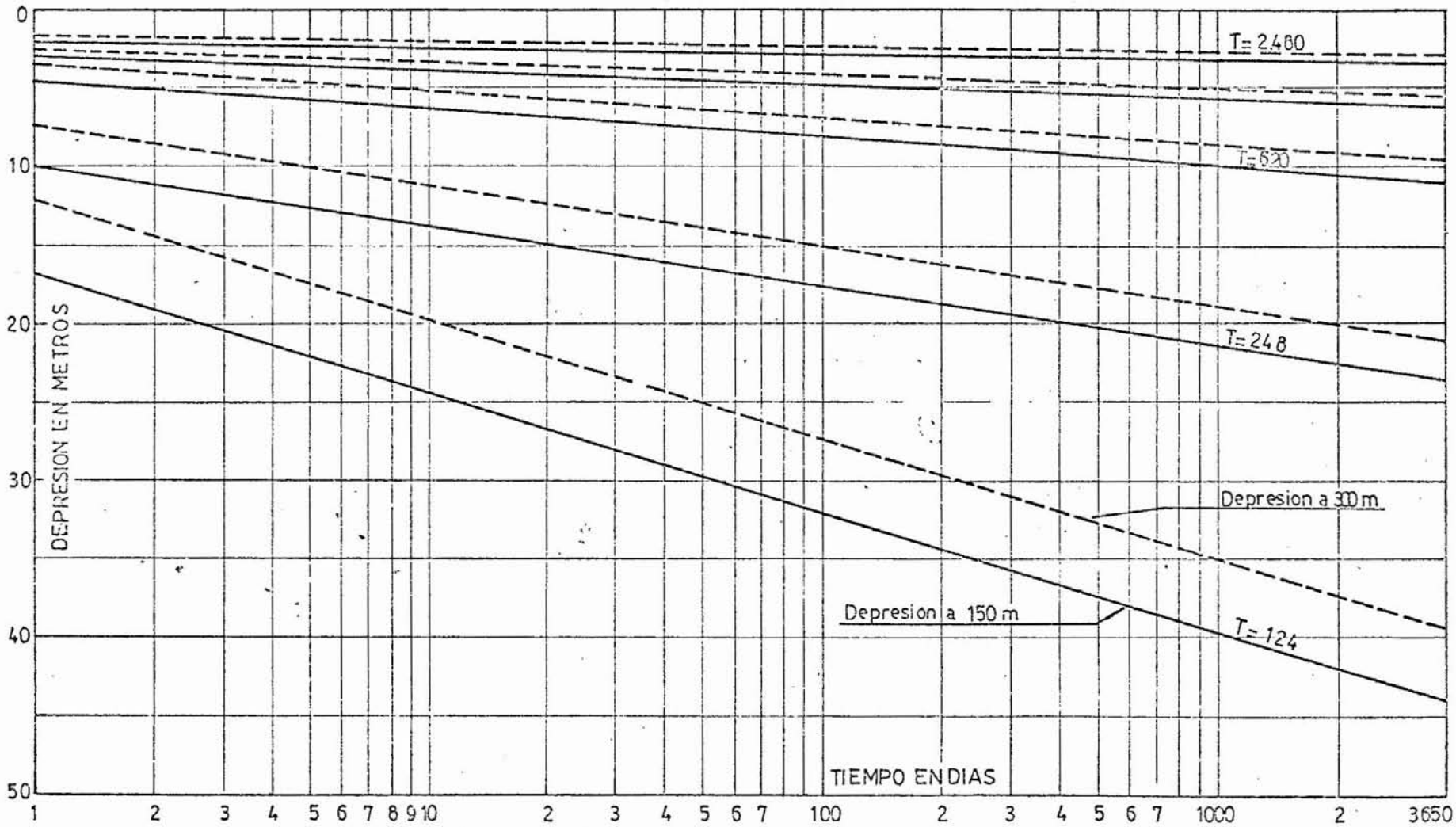


Fig. 17.5 - Relación tiempo - depresion para acuiferos de caracteristicas conocidas. Para gastos distintos la depresion variará proporcionalmente (segun R. Newcome, 1967)

Dos criterios de distribución de pozos se indican en Figura 17.6 A y B.

17.8.5 Interferencia de pozos

Con los datos de caudal y depresión obtenidos de Fig. 17.5 tiempo-depresión se construye el gráfico depresión-distancia con el procedimiento indicado en el ap. 11.2.7.5.1 y se establece el grado de interferencia de cada pozo a las distancias encontradas. Las fórmulas (9-59) y (9-60) resuelven el efecto del conjunto de perforaciones.

Debe tenerse en cuenta que, la depresión originada por el bombeo discontínuo es mucho menor que la motivada por un bombeo contínuo, para el cual es válido el gráfico depresión tiempo de Fig. 17.5.

Obsérvese en dicho gráfico que un pozo de 63 l/s provoca una depresión de 4,5 m a 300 m de distancia después de un bombeo contínuo durante 120 días. Para mayor caudal la depresión es proporcionalmente mayor, y a mayor distancia es proporcionalmente menor, según se vión en ap. 11.2.7

17.9 UBICACION DE LOS POZOS

La solución del emplazamiento de el ó los pozos del proyecto debe resolverse en función de los siguientes factores:

A. hidrogeología
B. topografía del área irrigable
C. interferencia entre pozos
D. otros factores de diseño

17.9.1 Según factores hidrogeológicos

17.9.1.1 En propiedades pequeñas

La localización está restringida al marco de la propiedad.

17.9.1.2 En propiedades grandes

Cuando el área a irrigar abarca menor extensión que la total puede resultar conveniente un estudio hidrogeológico a costos compatibles con el costo del proyecto total. Interesa localizar el sector de menor profundidad y mayor caudal específico de acuíferos como criterio de selección. El menor costo de bombeo y la mayor producción por pozo son los objetivos del estudio.

17.9.1.3 En proyectos de desarrollo

Los estudios hidrogeológicos son indispensables para conocer las características del acuífero, así como para seleccio

nar distintas alternativas de ubicación de los pozos. En algunos casos de riego combinado (agua superficial+agua subterránea) o donde la calidad de los suelos no sea coincidente con el área hidrogeológicamente más conveniente, los pozos se ubican fuera del área de riego y se distribuyen por un sistema de canalización existente o construído al efecto.

17.9.2 Según factores topográficos

17.9.2.1 Riego por gravedad

Por razones económicas (menor inversión inicial y menor costo de bombeo) debe evitarse en lo posible la elevación adicional del agua bombeada del pozo. Por tanto, si los factores hidrogeológicos no influyen, conviene ubicar el o los pozos en posición topográfica que domine el área de riego.

En los proyectos de riego o en las grandes propiedades, el diseño de riego debe contemplar la ubicación de los pozos en forma tal que la conducción del agua tenga versatibilidad, de modo que una misma parcela o grupo de parcelas puedan ser irrigadas indistintamente por dos pozos, como ocurre en Fig. 17.7, Caso A: Parcela C regable por pozos 4 ó 3; Parcela B, regable por pozos 3 ó 2.

Esto es conveniente cuando un pozo queda fuera de servicio o cuando alguno de los cultivos requiere riegos más frecuentes o mayor lámina de agua.

17.9.2.2 Riego por aspersión

La topografía tiene poca incidencia en la ubicación del pozo, que responde más bien a la planificación del riego.

17.9.3 Según condiciones de interferencia

Toda planificación de riego por bombeo debe evitar o disminuir al máximo los efectos de interferencia entre pozos.

El proyectista puede prever y decidir dentro de la propiedad o área del proyecto con libertad.

Pero en áreas agrícolas con pequeñas propiedades, deben contemplarse situaciones donde juega la opinión de otros propietarios o situaciones de hecho preexistentes, como en el ejemplo de Fig. 17.8.

En tales casos, la localización del pozo requiere un análisis económico de la inversión inicial y del costo de operación en relación a las alternativas posibles.

El uso de tuberías de conducción y la mayor altura de bombeo puede compensarse, con creces, por la mayor eficiencia de conducción.

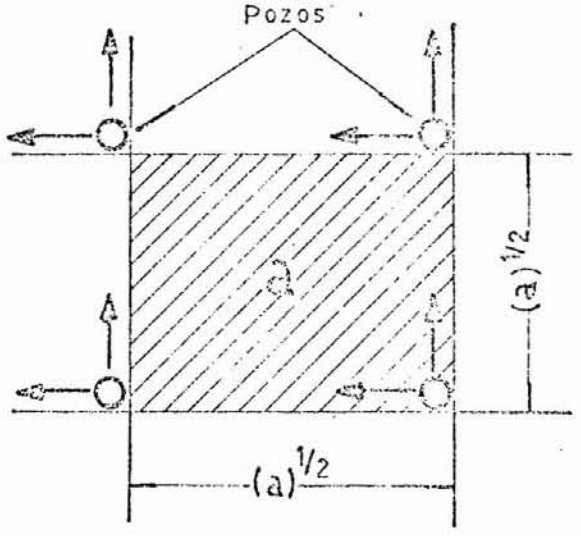


Fig. 17. 6. A
UBICACION DE POZOS EN DAMERO DE UNIDADES RECTANGULARES (el cono de depresión tiene radios iguales)

a = Area regable con un pozo;

$(a)^{1/2}$ = Longitud de un lado del cuadrado = separación entre pozos

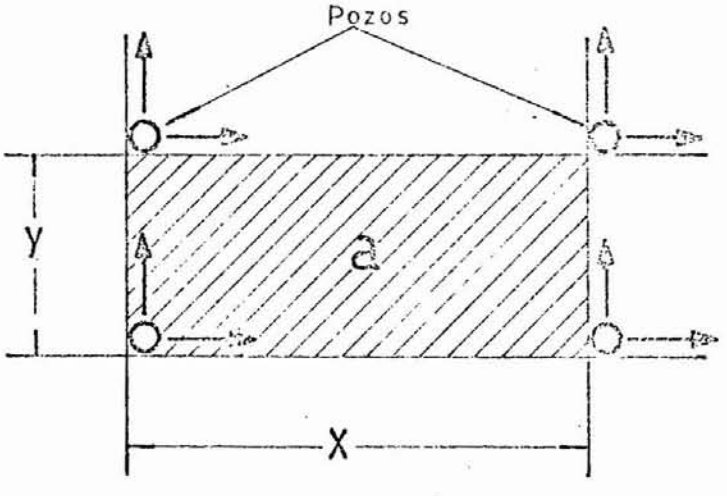
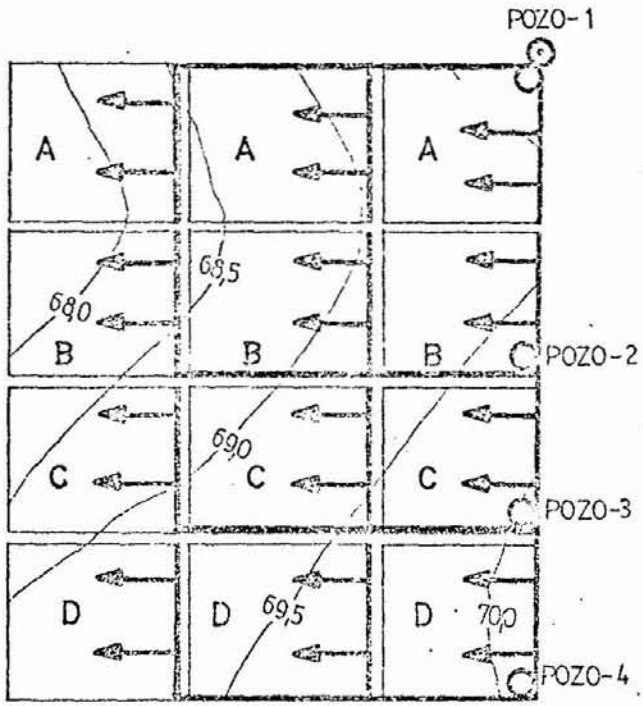


Fig. 17.6. B
UBICACION DE POZOS EN RETICULADO DE UNIDADES RECTANGULARES (recomendable cuando el cono de depresión de los pozos tiene seccion oval)

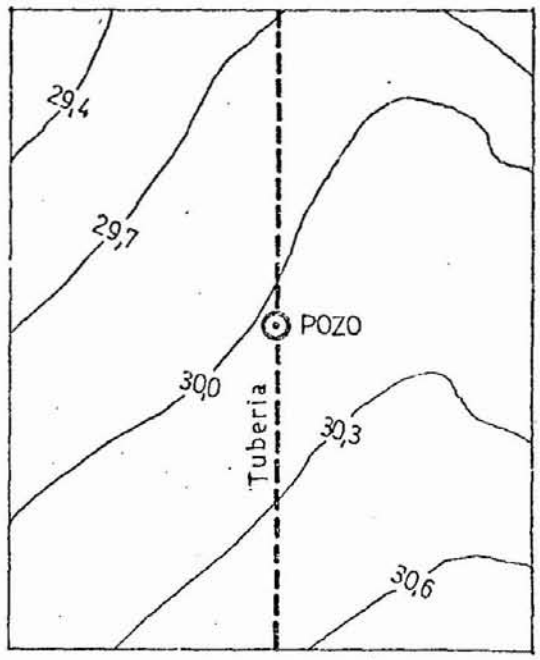
a = Area regable con un pozo

X = Separación mayor entre pozos; proporcional al radio mayor del cono; dirección subparalela a la dirección del flujo subterraneo.—

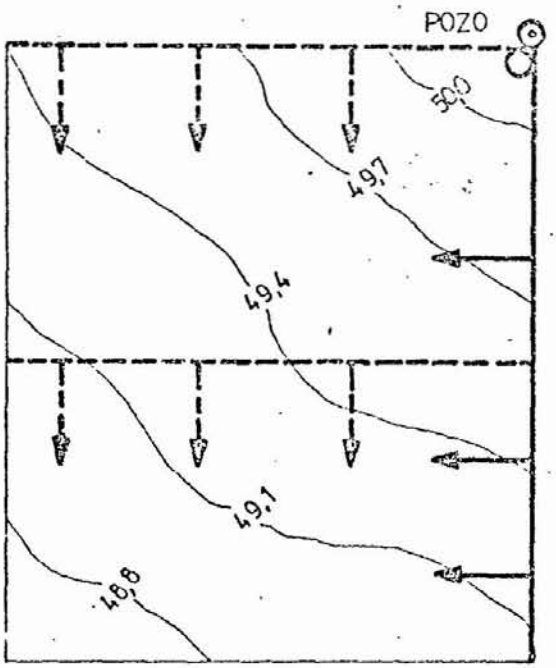
y = Separación minima admisible por la interferencia entre pozos; proporcional al radio menor del cono de depresión.—



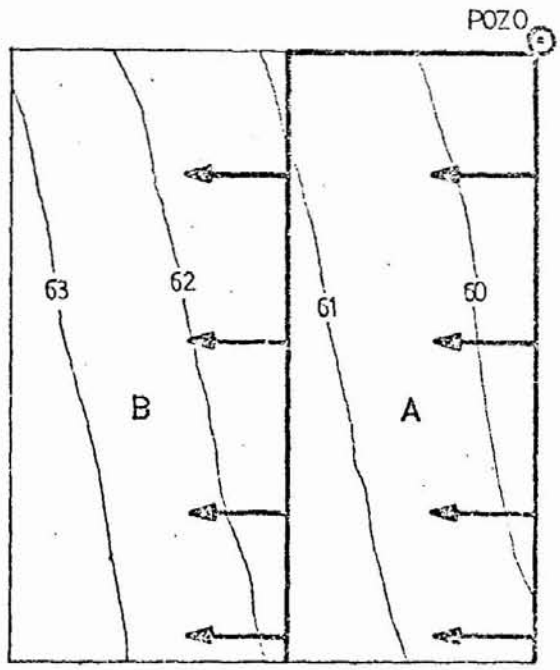
CASO-A- Esquema de riego de un parcelamiento de 180 Ha. Riego con 4 pozos. Pozos 3 y 4 pueden regar indistintamente las parcelas C. o D. El pozo 3 puede suplir al pozo 2



CASO B- Para riego por aspersión, se ubicó el pozo en el centro de la propiedad.



CASO-C- El pozo abastece el riego de toda la propiedad. Distintas alternativas de riego por gravedad.



CASO-D- El pozo puede regar parte de la propiedad. El esquema propuesto permite rotar las parcelas A y B.

Fig. 17.7 UBICACION DE LOS POZOS SEGUN LA TOPOGRAFIA Y FORMA DE RIEGO (curvas de nivel en metros)

17.9.4 Según otros factores de diseño

17.9.4.1 Economía del agua

Minimizar la longitud de conducción del agua por acequias.

17.9.4.2 Economía del espacio

Minimizar la superficie inutilizada para la agricultura por los pozos y sus instalaciones, prefiriendo los vértices de los predios.

17.9.4.3 Provisión de energía eléctrica

En proyectos con electrificación los pozos deberán situarse cerca de las líneas de energía eléctrica de alta tensión o en forma tal que minimice la longitud de las extensiones eléctricas.

17.9.4.4 Riego por aspersión

Cuando las condiciones del proyecto indiquen la conveniencia de emplear el riego por aspersión, la ubicación de los pozos estará supeditado, en parte, al diseño del sistema de riego. (Fig. 17.7 B y Fig. 17.8.Z)

17.9.4.5 Riego conjunto

Cuando el agua subterránea es un complemento del agua superficial, convendrá ubicar los pozos al lado de los canales cuya sección permita la conducción del caudal bombeado.

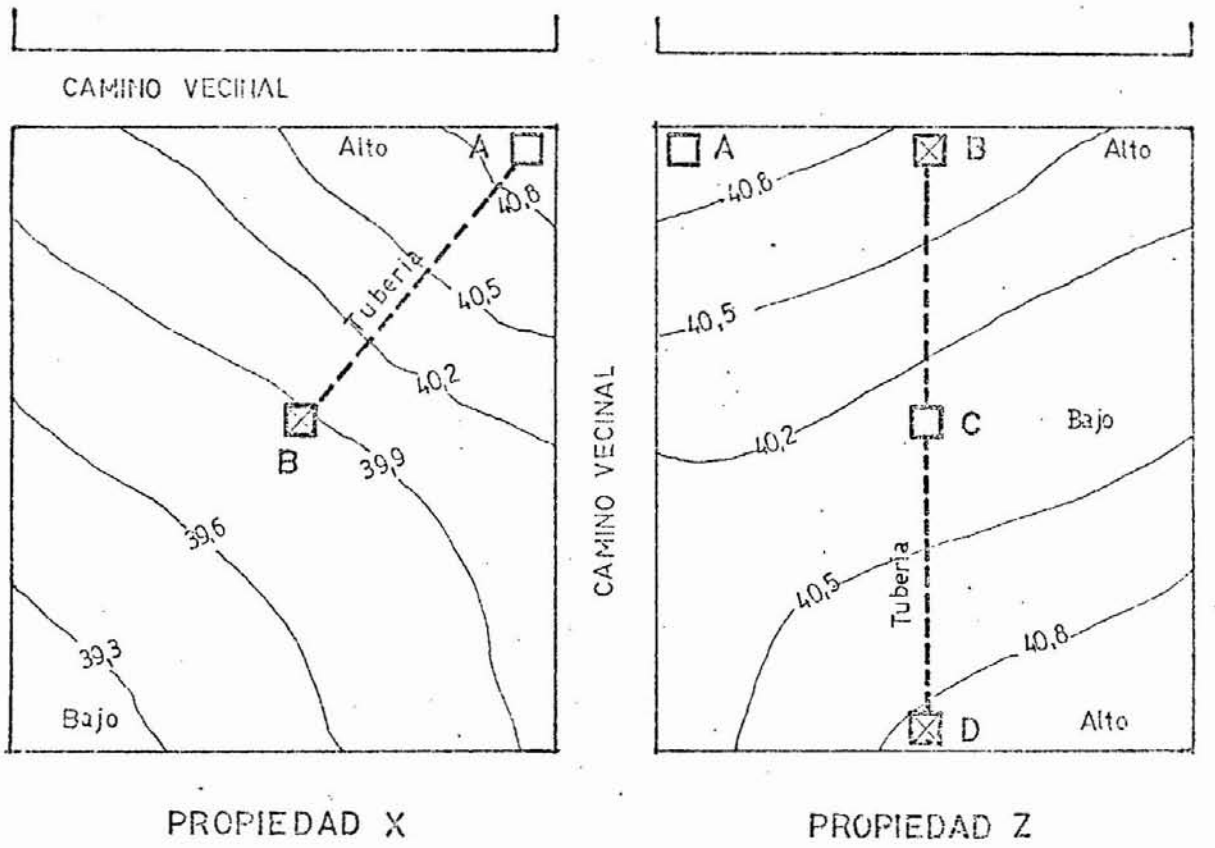


Fig. 17.8 -UBICACION DE POZOS EN PROPIEDADES VECINAS

Los puntos A de las propiedades X y Z no pueden localizar simultaneamente dos perforaciones, pues se interferirán mutuamente. En la propiedad X el desplazamiento del pozo al punto B obligará a emplear una tuberia para regar A y B solo permiten regar el area alta A - B - C. La ubicación C, con tuberias permite regar toda la propiedad; las ubicaciones B o D permite regar el 50% de la propiedad por gravedad y requieren elevar el agua hasta el sector opuesto..

BIBLIOGRAFIA CITADA

CAPITULO 17

CASTANY, G. (1963): Traite practique des eaux souterraines, Dunod, Paris.

CIDIAT (1970): Proyecto Caramuca (Estudio de prefactibilidad). Alternativa de riego con agua subterránea. 8°Curso Breve Interamericano, Mérida, Venezuela.

FACTOR, A. (1969): Métodos gráficos de estimación de la transmisibilidad o de la capacidad específica (ined.), Catamarca, Argentina.

GRASSI, C. et al. (1961): Riego y Drenaje. Primer Curso Nacional de Riego: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.

GRASSI, C. (1968): Estimación de los usos consuntivos de agua y requerimientos de riego con fines de formulación y diseño de proyectos. Criterios y procedimiento; CIDIAT, Centro Interamericano de Desarrollo de Aguas y Tierras, Documento No.53, Mérida, Venezuela.

HARGREAVES, G.H. (1968): Determinación del uso consuntivo a partir de datos de evaporación en tanque. (Trad. J. L. de la Loma); Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, Mem. Tec. No. 261, México, D.F.

ISRAELSEN, O.W. (1952): Irrigation principles and practices; John Wiley & Sons, N. York.

ISRAELSEN, O.N. y Hansen, V. (1965): Principios y aplicación del riego, 2a. Ed., Reverté, Buenos Aires, Argentina.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, Venezuela (1966): Manual de estudios preliminares para el aprovechamiento integral de cuencas hidrográficas; Dirección de Obras Hidráulicas, Caracas.

NEWCOME, R. Jr. (1967): Ground water resources of the Oascagoula River Basin, Mississippi and Alabama; U.S. Geological Survey, Water Supply Paper No. 1839-Ñ, Washington, D.C.

RUIZ Huidobro, O. (1971): Contaminación del agua subterránea en Mar del Plata: Primer Congreso Hispano-Ruso-Americano de Geología Económica, Lisboa.

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS, México (1957): Aguas subterráneas para el riego de las cosechas, S.R.H., Mem. Tec. No. 130, México, D.F.

THEIS, C.U., Brown R.H. and Meyer, R.R. (1963): Estimating the transmisibility of acquifers from the specific capacity of wells; U.S. Geol. Surv. W.S. Paper 1636-I, Washington, D.C.

THORNTWAITE, W.C. and Mather, J.C. (1957): Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the Water Balance; Drewel Institute of Technology, 10, N.York.