

U 1275

27 SET. 1979



HIDROGEOLOGIA Y OPERACION CAMPO  
DE SONDAJES EN TABOLANGO



**AGUA**  
**INGENIEROS**  
**CONSULTORES**  
**LTDA.**



## I N D I C E

- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES
- 1.- ANTECEDENTES
- 2.- METODOLOGIA
- 3 - HIDROGEOLOGIA
  - 3.1. Cualitativa
  - 3.2. Cuantitativa
  - 3.3. Recarga
  - 3.4. Descarga
  - 3.5. Balance Hidrológico Preliminar
- 4.- INTERFERENCIAS ENTRE LOS POZOS
  - 4.1. Introducción
  - 4.2. Intefferencias
- 5.- MODELO DE SIMULACION
  - 5.1. Descripción del Modelo
  - 5.2. Características Hidrogeológicas del Area. Defini-  
ción del Sistema
  - 5.3. Estructuración del Modelo
  - 5.4. Análisis de los Resultados
  - 5.5. Consideraciones Finales



## CONCLUSIONES

- 1.- El acuífero donde se ubica el campo de sondajes de ENAP, está sometido a condiciones freáticas y en cuanto a transmisibilidad, es relativamente uniforme, alcanzando el valor medio de esta una magnitud de  $3.000 \text{ m}^2/\text{día}$ .
- 2.- La disminución de sección de escurrimiento en la denominada angostura de Mauco, tanto en espesor como en ancho, origina una poca efectiva continuidad hacia aguas abajo.
- 3.- Las actuales fluctuaciones de nivel en el área, son de muy poca monta estacionalmente o se muestran ausentes. Ello es por efecto de barrera de control que ejerce el río sobre el acuífero, unido a la inexistencia práctica de una explotación de dicho acuífero.
- 4.- El estado de saturación en que se encuentra en la actualidad el embalse subterráneo hace inefectivas las recargas potenciales. Sin embargo, ante una fuerte sollicitación, los mecanismos de recarga cobrarán importancia.
- 5.- El modelo de simulación entrega como resultado el hecho de que en el área existe respaldo suficiente para una explotación continua de  $400 \text{ l/s}$ , con una configuración de captaciones similar a la que existe actualmente en Tabolango, e independiente de las consideraciones de interferencia mutua entre sondajes, situación que se analiza expresamente y en forma separada.
- 6.- Las transmisibilidades determinadas y los rendimientos unitarios de los pozos, hacen que los conos de depresión se extiendan mucho en plazos cortos y provoquen interferencias importantes en los pozos vecinos.
- 7.- Estas interferencias se traducen en una disminución de caudales posibles de extraer o bien, en incremento del gasto de energía necesaria para captar un caudal determinado, o la imposibilidad de obtenerlo por la limitación en el rendimiento unitario debido a descensos de nivel.



- 8.- Así por ejemplo, un uso conjunto de los cinco pozos con igual costo del agua (igual nivel deprimido) y durante 2,3 meses, conduce a obtener un caudal de 245 litros por segundo en vez de 500 l/s, cifra esta última correspondiente a la situación teórica de no interferencia entre pozos. Cabe señalar que la cifra del caudal interferido debe tomarse como una buena aproximación al valor real de las interferencias que se producirían, en atención a las limitantes señaladas en el texto y al método de cálculo de interferencias que se empleó.
- 9.- De los cálculos realizados para determinar las interferencias producidas por bombeo simultáneo de los pozos, para las condiciones allí planteadas y para las limitaciones que se explicó, resulta más económico para caudales similares, la explotación de los sondeos T-1, T-2, T-5 y T-6, manteniendo el pozo T-3 inoperativo, antes que la explotación conjunta de las cinco pozos.
- 10.- El respaldo hidrológico del área de Tabolango permite una explotación importante de agua subterránea que en un principio es no inferior a 400 l/s. Sin embargo, la actual distribución de captaciones existentes, no permite la extracción razonable de más allá de 250 litros por segundo, en operación conjunta de cuatro sondeos (T-1, T-2, T-5 y T-6).



## RECOMENDACIONES

- 1.- No se recomienda la explotación simultánea de los cinco pozos, debido al encarecimiento del agua sin aumento proporcional del caudal extraído.
- 2.- Considerando que el caudal máximo posible de extraer con el actual campo de sondajes, es inferior a los requerimientos de ENAP, y por otra parte, existe el respaldo hidrológico suficiente en el área para la extracción de un caudal mayor, recomendamos estudiar cuidadosamente el diseño de un campo de pozos adicional, el cual deberá necesariamente ampliarse a un área mayor.
- 3.- Para lograr lo anterior, es recomendable definir con mayor precisión algunos parámetros que en esta etapa han debido ser adoptados. Creemos conveniente apoyarse en un modelo de simulación que simultáneamente contemple la variación de la exigencia a que debe ser sometido el campo de pozos.
- 4.- Por otra parte, recomendamos definir la estratigrafía en el sector norte del área de Tabolango.
- 5.- Así también, recomendamos realizar pruebas de bombeo en el campo de pozos de Tabolango que contemplen la medida de niveles en pozos de observación y así determinar con exactitud los valores de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento.
- 6.- Para la determinación de pérdidas y recuperaciones en el lecho del río Aconcagua, recomendamos realizar las corridas de aforo correspondientes.
- 7.- En el caso de iniciar la explotación del campo de pozos en una primera etapa, recomendamos llevar un control estricto de los volúmenes de agua extraídos, así como de los niveles deprimidos, para así aplicar las medidas correctivas que sean necesarias.



## HIDROGEOLOGIA Y OPERACION CAMPO DE SONDAJES EN TABOLANGO

### 1.- ANTECEDENTES

El área objeto del presente estudio, se encuentra en la V Región del país, en la localidad de Tabolango, la cual dista 17 kilómetros del balneario de Con Con, lugar donde desemboca el río Aconcagua en el Océano Pacífico.

A petición de ENAP, la División de Recursos Hidráulicos de la CORFO, construyó en el área, siete sondeos de los cuales cinco fueron habilitados en definitiva como pozos susceptibles de ser explotados.

Las características más relevantes de estos pozos, y que han sido entregadas a esta Oficina por ENAP, son las que se entregan en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2.1

#### SARACTERISTICAS DE SONDAJES

Pozo N°	Profundidad	Ø	Q	Depre-	G.E.	Transmisibilidad		
ENAP CORFO	Habil. Perf.		l/s	sión(m)	l/s/m	Jacob Meyer Recup.		
1	1194	45,0	45,0	16"	110	10,00	10,10	4500
2	1060	45,0	96,8	14"	110	18,50	5,95	4500
3	1228	47,5	50,0	16"	120	16,00	4,38	500
5	1267	46,1	50,0	16"	120	13,50	31,29	15000 15000
6	1259	50,0	50,0	16"	90	14,00	6,43	1500 1500

Los valores de transmisibilidad que figuran en el cuadro anterior, deben entenderse como órdenes de magnitud, de tal forma que para los efectos de los cálculos que se entregarán en el capítulo correspondiente, los valores de este parámetro serán aquellos que se indique expresamente.

Los valores de Caudal (Q) se refieren al caudal indicado como máximo de explotación, en condiciones de funcionamiento de un solo sondeo y para la profundidad de nivel estático existente a la fecha de ejecución de la prueba de bombeo correspondiente. Dado que la situación de explotación real será de varios (3 o más) pozos a la vez, es que este caudal se verá modificado, y la determinación de la magnitud de esta modificación, constituye uno de los objetivos de este estudio.



## 2.- METODOLOGIA

El presente estudio se ha desarrollado metodológicamente dividido en dos grandes capítulos; uno abocado a definir la hidrogeología general del área de Tabolango, enmarcada esta por Rautén al oriente y por Mauco al poniente. El otro, se refiere específicamente a la batería de sondajes de Tabolango y a las interferencias mutuas que provocan entre sí los pozos al operar conjuntamente, y su incidencia regional.

En relación a este último punto, vale decir su incidencia regional, es que se ha empleado un modelo de simulación hidrológica, para realizar el análisis conjunto de diversos factores de recarga y descarga que se encuentran presentes en el área, y muy especialmente la conexión entre el río y el acuífero.

Para la explotación conjunta de los pozos de Tabolango se ha recurrido a la simulación operacional en configuraciones de 5, 4 y 3 pozos operando simultáneamente, para distintos períodos de tiempo de bombeo continuo. Esta simulación considera fundamentalmente la explotación desde el almacenamiento del acuífero.

Definido entonces el sistema subterráneo, así como el funcionamiento de los pozos, se logra concluir y recomendar las decisiones que deben tomarse para satisfacer la demanda que genera la Planta Con Con de ENAP.



### 3.- HIDROGEOLOGIA

#### 3.1. CUALITATIVA

Geologicamente, el valle del Aconcagua en el área en donde se encuentra Tabolango, está emmercado por rocas antiguas. En su flanco sur afloran rocas graníticas paleozoicas, mientras que en el flanco norte, afloran rocas metamórficas prepaleozoicas y paleozoicas.

Ambas unidades litológicas constituyen acuíferos y para los efectos del escurrimiento subterráneo, constituyen las condiciones de borde del sistema.

El valle del Aconcagua en esta área, se encuentra formado en su superficie plana, por material aluvial que ha relleno el valle de erosión hasta su superficie actual. Este relleno sedimentario cuaternario tiene un espesor del orden de 100 metros y ha sido cortado en toda su potencia por el pozo T-2 (CORFO 1.060), el cual registra una potencia de 86,10 metros hasta llegar a la roca sana e impermeable.

El límite natural hidrogeológico hacia aguas abajo del área de Tabolango corresponde a un umbral rocoso que se encuentra a una profundidad máxima de solo 30 metros bajo la superficie del terreno, en Mauco.

Este umbral estaría actuando como una barrera opuesta al escurrimiento subterráneo, represándolo hacia aguas arriba. Por otra parte, este umbral rocoso independizaría hidrogeológicamente el área de Tabolango de aquella aguas abajo de Mauco, en proporción importante respecto del total del espesor saturado existente en el área.

El relleno sedimentario, granulométricamente, es relativamente grueso, distinguiéndose fracciones que van desde bolones hasta arcilla, y siendo las fracciones intermedias (ripio, grava y arena) las preponderantes. Por ello, estos sedimentos tienen características de permeabilidad comparativamente altas.

En el cuadro siguiente, se entregan valores de espesor de los distintos estratos que se han cortado en cada sondaje, definiendo así unidades estratigráficas correlacionables para el área de Tabolango.



CUADRO N° 3.1.1  
UNIDADES ESTRATIGRAFICAS IDENTIFICADAS

POZO	ESTRATO	DE	HASTA	ESPESOR	GRANULOMETRIA
T-1	I	0,0	36,4	36,4	Fracciones gruesas a medias
	II	36,4	45,0	8,6	Fundamentalmente arcilla
T-2	I	0,0	43,8	43,8	Fracciones gruesas a medias
	II	43,8	66,1	22,3	Fracciones medias y finas
	III	66,1	85,1	20,0	Principalmente fracciones finas
	IV	86,1	96,8	?	Roca fundamental
T-3	I	0,0	6,1	6,1	Fracc. gruesas y medias
	II	6,1	23,3	17,2	Fracc. medias y finas
	III	23,3	49,0	25,7	Fracc. muy finas
T-5	I	0,0	12,3	12,3	Fracc. gruesas y medias
	II	12,3	47,5	35,2	Fracc. medias y finas
	III	47,5	50,0	2,5	Fracc. muy finas
T-6	I	0,0	32,6	32,6	Fracc. gruesas y medias
	II	32,6	80,0	47,4	Fracc. medias y finas

Del análisis del cuadro anterior se desprende que en el área existe un primer horizonte acuífero (I), que va desde la superficie del terreno hasta una profundidad variable entre 6,1 y 43,8 metros.

Se advierte además una clara correspondencia entre el caudal que entrega el pozo y la mayor o menor potencia de este estrato I.

Áreasmente esta estrato I tiene sus mayores potencias hacia la ribera sur del valle, disminuyendo notablemente hacia la ribera norte. Hacia aguas abajo del área de Tabolango, en general la potencia se mantiene alta, en torno a los 35 a 40 metros. Hacia aguas arriba, esta disminuye para mantenerse alta sólo muy próximo a la ribera sur.

Bajo esta unidad I, subyace un segundo estrato (II) que presenta una granulometría inferior en tamaño respecto del estrato I. En el área que nos ocupa, se le ha atravesado en un espesor de hasta 35,2 metros en el pozo T-5 (COREFC 1.267).



Arealmente se presenta este estrato II en toda el área, variando solamente su techo, el cual corresponde en general a la base del estrato I, el que como se dijo, posee potencia variable.

Si comparamos granulométricamente ambos estratos ( I y II), cuyo conjunto sobreyace al estrato III, se advertirá que la permeabilidad de aquel que se encuentra desde la superficie del terreno hacia abajo, es superior a la de aquel que lo subyace.

El estrato III tiene una mayor preponderancia de materiales finos del tipo limo y arcilla, los que le imprimen en general una baja permeabilidad.

Este estrato III se ha depositado sobre la roca fundamental, quedando entonces limitado el paquete sedimentario compuesto por estos tres estratos por esta, que es sana e impermeable.

### 3.2. CUANTITATIVA

Para la evaluación cuantitativa de un acuífero o zona acuífera, es necesario conocer los valores de ciertos parámetros que se agrupan bajo la denominación de constantes elásticas.

Estas constantes elásticas son la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento.

La transmisibilidad se define como el producto del valor de la permeabilidad por la potencia o espesor del acuífero. En consecuencia, la transmisibilidad corresponde al caudal que fluye a través de una sección de ancho unitario y de alto igual al espesor del acuífero, bajo un gradiente hidráulico unitario. Se le designa con el símbolo T y tiene las dimensiones de longitud<sup>3</sup>/tiempo x longitud o longitud<sup>2</sup>/tiempo y se le expresa comúnmente en m<sup>2</sup>/día.

El coeficiente de almacenamiento corresponde al volumen de agua almacenado o proporcionado por área unitaria del acuífero a raíz del cambio unitario de la carga normal al área unitaria. Se le designa por S y es adimensional. En la práctica, se le considera, en el caso de acuíferos libres, equivalente a la porosidad efectiva o al volumen de agua drenable gravitacionalmente por unidad de volumen.



### 3.2.1. Cálculo de T

Sobre la base de la información existente, la cual consiste en los antecedentes de pruebas de bombeo realizadas en cada uno de los sondeos que se incorporarían a la batería de explotación, se ha calculado los valores de transmisibilidad.

Puesto que en las pruebas de bombeo que se hicieron no se midió el nivel deprimido en pozo alguno salvo aquel que se estaba bombeando, sólo ha sido posible aplicar el método de Jacob al bombeo, método que constituye una aproximación gráfica al método matemático establecido por Theis en 1935.

Por otra parte, al finalizar el bombeo en cada sondeo, se ha medido la recuperación o ascenso del nivel deprimido. Estas medidas han sido utilizadas para el cálculo de la transmisibilidad empleando el método de Jacob.

En general, las pruebas de recuperación eliminan la limitante que significan las pérdidas de carga en el sondeo y reflejarían más fielmente los valores de T.

#### 3.2.1.1. Pozo T-3 (CORFO 1.228)

Los valores de T determinados son los siguientes de acuerdo al caudal de prueba:

Q l/s	Bombec m <sup>3</sup> /día	RECUPERACION m <sup>2</sup> /día
30	660	1.080
40	375	856
50	357	1.336
50	346	--
70	125	1.346
70	280	--
80	165	--

Se advierte una disminución general de la transmisibilidad en función del incremento del caudal. Por otra parte, la estratigrafía de este pozo indica que el estrato I ( el de mayor permeabilidad) sólo alcanza hasta los 6,1 metros de profundidad y bajo el, el estrato II tiene un contenido de finos considerable, lo cual estaría indicando una transmisibilidad en general baja, y comparativamente muy inferior con respecto a los sondeos vecinos.



Sobre la base del antecedente que entregan las pruebas realizadas, especialmente aquellas de recuperación, se le asignará al área próxima al pozo T-3 un valor de transmisibilidad de 1.500 m<sup>2</sup>/día.

### 3.2.1.2. Pozo T-1 (CORFO 1.194)

El valor de la transmisibilidad determinado a través de bombeo para el área vecina a este pozo es de 3.440 m<sup>2</sup>/día. No se efectuó prueba de recuperación. Se le asignará un valor de T = 4.500 m<sup>2</sup>/día, valor que guarda relación con la potencia del estrato I, la cual es de 36,4 metros.

### 3.2.1.3. Pozo T-6 (CORFO 1.259)

Los valores determinados a través de pruebas de bombeo realizadas en este sondaje son:

Q l/s	Bombeo m <sup>2</sup> /día	Recuperación m <sup>2</sup> /día
80	525	2.815
90	410	--

Habidas las consideraciones relacionadas con las pérdidas de carga en un sondaje que se bombeo, se le asignará al área en torno a este pozo, un valor de T de 3.000 m<sup>2</sup>/día.

### 3.2.1.4. Pozo T-5 (CORFO 1.267)

En este sondaje se realizó pruebas de bombeo que entregan el siguiente valor de T, utilizando el método de Jacob:

Q l/s	Bombeo m <sup>2</sup> /día	Recuperación m <sup>2</sup> /día
120	17.280	10.560

Este valor se muestra muy por sobre los valores obtenidos en sondajes vecinos y próximos, y no se ajusta a la transmisibilidad del área.

La ubicación muy próxima al río, donde se perforó este pozo, permitiría una interconexión río-acuífero muy eficiente y en consecuencia, provocaría un gradiente hidráulico muy bajo en torno al sondaje y por lo tanto, la transmisibilidad aparecería muy elevada.



Sobre la base de la estratigrafía y los valores de T en pozos vecinos, se le asignará al área en torno a este pozo un valor de  $T = 4.500 \text{ m}^2/\text{día}$ .

### 3.2.1.5. Pozo T-2 (CORFO 1.060)

A diferencia de los demás pozos, este sólo posee pruebas de caudal variable y no tiene pruebas de bombeo realizadas en el a caudal constante. Sin embargo, sobre la base de estas pruebas y de la estratigrafía, se le asignará al área en torno a él, una transmisibilidad de  $4.500 \text{ m}^2/\text{día}$ .

### 3.2.2 Alcances a los Valores de T

Cabe señalar que siendo la transmisibilidad un parámetro de vital importancia para los cálculos de hidrología subterránea, habría sido interesante contar con pruebas de bombeo en las cuales se hubiera medido el nivel del espejo de agua en pozos vecinos o de observación, además de aquellas que se realizaron en el pozo de bombeo mismo.

Esta limitante sólo permite entonces, obtener valores de T que son una buena aproximación al valor real y en consecuencia, debe tenerse presente que los cálculos que se han efectuado y en los cuales interviene este parámetro, tienen tras sí esta limitante.

### 3,2,3, Calculo del Coeficiente de Almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento requiere para ser calculado, de a lo menos un pozo de observación en el cual se haya medido la depresión del nivel estático durante la ejecución de la prueba de bombeo correspondiente.

Sobre la base de antecedentes de sondajes ubicados a cierta distancia de Tabolango ( 10 Kms. aguas arriba en el valle del Aconcagua), como es el caso del sondaje Esmeralda (CORFO 1.044) se ha estimado un valor del coeficiente de almacenamiento de 10 %.

La inexactitud en la determinación de este coeficiente, conlleva a una modificación proporcional en la variación de niveles obtenida en los cálculos posteriores.



### 3.3. RECARGA

El sistema subterráneo en Tabolango esta constituido por un paquete sedimentario cuaternario, permeable, enmarcado por rocas fundamentales impermeables.

Sus límites para los efectos del presente estudio estan configurados por las localidades de Rautén y Mauca, al este y oeste respectivamente.

La recarga del sistema proviene fundamentalmente de varios factores, los que se analizan brevemente a continuación.

#### 3.3.1. Caudal subterráneo ingresante

El caudal subterráneo que ingresa al sistema ha sido calculado mediante la expresión:

$$Q = T \times i \times L$$

donde:

Q = caudal subterráneo en m<sup>3</sup>/día

i = gradiente hidráulico = 0,75

L = Largo de la sección considerada = 1.480 metros

T = transmisibilidad = variable entre 1.500 y 4.500 m<sup>2</sup>/día

El caudal resultante es de 35.940 m<sup>3</sup>/día, lo que equivale a un caudal de 416 litros por segundo.

Al tener la sección considerada (Rautén) sectores de distintas transmisibilidades, se ha calculado el valor de Q, ponderando los valores de T de cada sector de la sección por su correspondiente longitud.

#### 3.3.2. Infiltración desde el río

La presencia del río Acencagua en el área de Tabolango representa sin duda la fuente de recarga potencial considerada de la mayor importancia.

En el presente, y dadas las condiciones de nivel freático del acuífero, el río actúa más bien como una barrera de control de dicho nivel, mostrando una condición de efluencia o influencia según las variaciones que aquel experimente.

Estas condiciones se verán modificadas si el área es sometida a una fuerte explotación que descienda regionalmente los niveles, donde el río se mostrará en esas nuevas condiciones como una fuente efectiva de recarga hacia el acuífero.



Las actuales recargas o recuperaciones que experimenta el sector son por lo tanto, variables estacional y arealmente.

### 3.3.3. Infiltración por riego

El área de riego en Tabolango es de aproximadamente 250 hectáreas. Se estima que el riego de esta superficie produce una infiltración neta que recargaría el acuífero. De acuerdo a experiencias realizadas en otras zonas, aproximadamente el 40 % del volumen de agua aplicada al año constituiría infiltración y por ende, recarga.

Ello significa que si la tasa de riego es de 18.000 m<sup>3</sup>/ha/año, la infiltración sería de 1.800.000 m<sup>3</sup>/año en toda el área de riego, cifra que equivale a 57 litros por segundo.

### 3.3.4. Infiltración por precipitaciones

La superficie receptora de las precipitaciones del área de Tabolango se calculó en 40 Kms<sup>2</sup> y la precipitación media para un año 50 % de excedencia es de 400 mm. De ello se desprende que la precipitación que cae en el área es de 16.000.000 m<sup>3</sup>/año, sin embargo, debido al estado de saturación actual del embalse subterráneo y por el poco tiempo que estas aguas se encuentran disponibles para recarga, nos hace desestimar su importancia como elemento de recarga.

## 3.4. DESCARGA

En el área de Tabolango no existe descarga artificial apreciable, sólo existen norias cuyo caudal de explotación no tiene incidencia en los volúmenes subterráneos existentes.

La descarga natural está representada por los siguientes parámetros.

### 3.4.1. Caudal subterráneo saliente

El caudal subterráneo que sale del área por la sección de la angostura de Mauce, se ha estimado utilizando la misma expresión señalada para el caudal que ingresa, en 17.540 m<sup>3</sup>/día, cifra que significa 203 litros por segundo.



### 3.4.2. Evapotranspiración de freatofitas

La superficie del área de Tabolango cubierta por este tipo de vegetación se calculó en 7,2 Kms.<sup>2</sup>. Utilizando los valores calculados por Rendel, Palmer y Tritton (1967) para el área de Mauco, se obtiene como evapotranspiración 935 mm/año, y si se considera que el 80 % de la superficie total contribuye a esta descarga, se determina un volumen de 7.064.064 m<sup>3</sup>/año, cifra que equivale a 224 litros por segundo.

### 3.4.3. Descarga del acuífero

El concepto de descarga del acuífero se refiere al caudal que este entrega y aporta al escurrimiento superficial, lo que se traduce principalmente en la existencia de vertientes en la parte baja del área (Mauco) y en incrementos en el caudal medio del río en esa zona.

Valen en este caso, las expresiones vertidas con respecto a la relación río-acuífero y vice-versa en el punto 3.3.2. anterior.

### 3.5. BALANCE HIDROLOGICO PRELIMINAR

Dada la situación de equilibrio que existe en el sistema subterráneo de Tabolango, se considera que los factores que tienen incidencia en él, son el caudal subterráneo ingresante y saliente, la evapotranspiración de las freatofitas y la recarga por infiltración de regadío, con lo que se llega a la siguiente expresión:

$$\text{Superavit} = 416 + 57 - 203 - 223 = 42 \text{ l/s}$$

El superavit resultante, considerando las limitantes presentes en la determinación de los parámetros que intervienen en el cálculo, se estima representa un estado de equilibrio para las condiciones medias anuales en que se han definido los factores que intervienen en el balance.

Para condiciones estacionales, existiría de acuerdo a la recarga o descarga que experimente el área, según se indicó anteriormente en relación a la condición de efluencia o influencia del río Acencagua hacia el acuífero, un superavit mayor o un déficit.



#### 4.- INTERFERENCIAS ENTRE LOS POZOS

##### 4.1. INTRODUCCION

El hecho de que se explote agua subterránea mediante un sondeo, genera un cono de depresión, el cual es función del caudal y del tiempo de bombeo. Si la expansión areal de este cono es tal que alcanza o supera la distancia que lo separa de un segundo pozo, producirá en este último un descenso del nivel estático, lo cual trae aparejado una disminución del caudal que este último puede entregar.

Esta situación se agrava en el caso en que los pozos bomben simultáneamente y más aún en el caso de que sean varios los pozos que se explotan en forma simultánea, como es el presente caso de Tabolango.

El área de Tabolango, tiene en general las siguientes características que se superponen en sus efectos, disminuyendo el rendimiento de los pozos.

- a) Proximidad de los sondeos al contacto roca-relleno, es decir, a la barrera impermeable que significan las rocas que conforman el flanco sur del valle. Ello aumenta la interferencia producida por cada sondeo que bombea.
- b) Proximidad de los pozos entre sí, lo que sumado a las transmisibilidades relativamente altas (conos de expansión más que de profundización, provocan interferencias tras un corto lapso de tiempo de bombeo continuo.

##### 4.2. INTERFERENCIAS

Para el cálculo de las interferencias producidas por bombeo continuo, se ha asumido los siguientes valores de ciertos parámetros:

- a) Tiempo = se ha calculado las interferencias para 10.000, 100.000 y 1.000.000 de minutos de bombeo continuo, lo que significa aproximadamente una semana, 2,3 meses y dos años, respectivamente.
- b) Caudal de bombeo = se ha asumido un nivel dinámico constante e igual para todos los pozos, lo que implica un caudal inferior a aquel máximo de bombeo. Para un nivel dinámico de siete metros en todos los pozos, excepto el pozo T-5 en que se adoptó un nivel dinámico de 3,5 mts., este caudal es el siguiente:



POZO	T-1	T-2	T-3	T-5	T-6
Caudal 1/s	100	70	40	120	70

En una primera iteración, se calculó las curvas de agotamiento de cada sondeo, interferidos por el bombeo de los pozos restantes, utilizando diversas combinaciones, que se señalan a continuación:

- A) Bombeo simultáneo de los pozos T-1, T-2, T-3, T-5 y T-6.
- B) Bombeo simultáneo de los pozos T-1, T-2, T-5 y T-6, permaneciendo inactivo el pozo T-3.
- C) Bombeo simultáneo de los pozos T-1, T-2 y T-5, permaneciendo inactivos los pozos T-3 y T-6.

Es interesante señalar que en este cálculo, se considera el área de Tabolango carente de recarga por una parte, y el gradiente hidráulico igual a 0, por otra, lo que significa que el agua subterránea no tendría movimiento. En estas condiciones se logra simular una aproximación a una condición de sequía prolongada, lo que implica que se estaría explotando agua subterránea proveniente exclusivamente del almacenamiento del embalse subterráneo.

Debido a la disminución de caudal que se percibe en los sondeos, los niveles tienden a disminuir con un ritmo decreciente, por lo que tras sucesivas iteraciones se ha llegado para 2,3 meses de bombeo continuo a las curvas de agotamiento que se entregan en el gráfico 4.2.1.

En cada iteración se ha tomado el caudal resultante de la curva de agotamiento para iguales depresiones que las señaladas, producto de la iteración anterior.

Se ha tomado 2,3 meses de bombeo continuo, debido a que este lapso reflejaría las condiciones más críticas que se encontrarían en los meses estivales.

Por otra parte, se consideró la operación conjunta de todos los sondeos, ya que esta condición es la peor que podría encontrarse.

Para determinar el efecto de la barrera geológica impermeable (contacto roca-relleno) se utilizó el método del pozo imagen, el cual consiste en simular la explotación de un pozo de idénticas característi-



cas que el pozo real y ubicado equidistantemente con respecto a la barrera impermeable. Lo anterior significa simular entonces la explotación conjunta de un total de 10 pozos: cinco pozos reales y sus correspondientes cinco pozos imágenes.

De las curvas que se entregan en el gráfico 4.2.1., se desprende que la disminución de caudal con respecto al caudal máximo que entrega cada pozo si se explota simultáneamente en vez de explotarse solo es la que se entrega a continuación:

<u>POZO</u>	<u>T-1</u>	<u>T-2</u>	<u>T-3</u>	<u>T-5</u>	<u>T-6</u>
Caudal l/s	63	50	31	48	53

De lo anterior se colige que el caudal que entregarían el conjunto de pozos en operación simultánea es de 245 litros por segundo.

A modo de complementación, se entrega en el gráfico 4.2.2. la situación de bombeo simultáneo de los pozos T-1, T-2, T-5 y T-6, permaneciendo inactivo el pozo T-3, para un bombeo de 2,3 meses continuos. De ella se desprende que para depresiones iguales que aquellas señaladas anteriormente, los caudales que entregan los pozos son los siguientes:

<u>POZO</u>	<u>T-1</u>	<u>T-2</u>	<u>T-5</u>	<u>T-6</u>
Caudal l/s	68	57	66	56

En consecuencia, el total del caudal que se obtiene para las depresiones señaladas (bajo el nivel de terreno) es de 247 litros por segundo.

Complementando, igualmente, en el gráfico 4.2.3. se entrega la situación de bombeo simultáneo de los pozos T-1, T-2 y T-5, para las depresiones señaladas y para un tiempo en que se bombee continuamente durante 2,3 meses:

<u>POZO</u>	<u>T-1</u>	<u>T-2</u>	<u>T-5</u>
Caudal l/s	86	66	75



El caudal total que se obtiene con esta configuración de pozos en explotación e inactivos es de 212 litros por segundo.

En el cuadro siguiente, se entrega como resumen, los caudales totales e individuales que entregan los pozos, si estos son bombeados solos o en las configuraciones indicadas.

POZO	T-1	T-2	T-3	T-5	T-6	TOTAL
Bombea solo	110	110	70	120	90	500 l/s
Bombean 5	63	50	31	48	53	245 l/s
Bombean 4	68	57	--	66	56	247 l/s
Bombean 3	86	66	--	75	--	212 l/s

Es interesante señalar que las curvas de los gráficos antes mencionados (4.2.1., 4.2.2. y 4.2.3.), corresponden a una iteración que si bien no es la solución final producto de un número muy superior de iteraciones que las efectuadas, si reflejan claramente el comportamiento de los pozos en las diversas configuraciones de operación conjunta que se estableció.

De todas formas, de los resultados de los cálculos que se efectuó, se desprende claramente que, en las condiciones planteadas para el cálculo de las interferencias mutuas entre los pozos, es decir, condiciones de ausencia de recarga y gradiente hidráulico = 0, la explotación del pozo T-3 no incide mayormente en cuanto al caudal con que contribuye en la explotación simultánea de los 5 pozos. Es decir, la interferencia que produciría en los pozos restantes, en cuanto a la disminución de caudal que provoca en pozos vecinos, es equivalente al caudal que este aporta, interferido por los otros sondeos.

Finalmente, debemos decir que la solución final de las interferencias, efectuando innumerables iteraciones, se encontrará en los gráficos mencionados, a profundidades del nivel dinámico determinadas entre los 7 metros de nivel dinámico definido para todos los pozos por igual (excepto el T-3) y las profundidades que se entregan en el cuadro siguiente:

POZO	T-1	T-2	T-3	T-5	T-6
Profundidad(m)	15,2	11,3	12,9	5,2	16,6



## 5.- MODELO DE SIMULACIÓN

### 5.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La concepción matemática del modelo aplicado en el área de Tabolango está basada en el programa desarrollado por PINDER para el U.S.G.S., en el año 1970, con las modificaciones necesarias introducidas por nuestra Oficina para la adecuada simulación de las condiciones de borde y continuidad requeridas.

Fundamentalmente, a través de él se define la situación de niveles estáticos en la región para las diversas solicitaciones a las que el acuífero es sometido, y para los intervalos de tiempo que sean de interés conocerlos.

Matemáticamente se resuelve el problema a través del sistema de diferencias finitas, en que cada unidad (o celda) en que se divide el acuífero tiene sus características hidrogeológicas propias (transmisibilidad y almacenamiento), definiéndose también para cada una de ellas sus vinculaciones con el sistema superficial, y sus condiciones de sollicitación artificial (explotación).

### 5.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS DEL AREA. DEFINICION DEL SISTEMA

El sistema a modelar se extiende a todo lo ancho del valle del río Aconcagua, en la zona de las captaciones actuales, y en una longitud de 5.400 mts.

En base a los valores de transmisibilidad determinados con las pruebas de bombeo disponibles, y discutidas en puntos anteriores se entrego el gráfico 5.2. en el cual se ha vertido por celda los valores de T extrapolados. Estos valores de T fueron considerados arealmente constante durante el análisis, justificándolo por el hecho de que la variación del espesor saturado con la explotación iba a ser pequeña frente a la potencia del acuífero.

Para el coeficiente de almacenamiento sin embargo, no se dispone de ningún antecedente directo en la zona, y hemos debido adoptar la determinación más próxima realizada, que aunque cae fuera del área, posee hidrogeológicamente características análogas, al menos en cuanto a tipo de escurrimiento (feóctica). Por otra parte, si bien no tenemos antecedentes específicos de la zona, en acuífe-



ros libres como el presente su rango de variación es relativamente estrecho. Adoptaremos un valor uniforme de 10 %.

La presencia y acción del río en uno u otro sentido como recarga o descarga del acuífero, ha sido analizada por el modelo en cada instante según la situación de los niveles en el acuífero, en relación al río. La permeabilidad vertical del lecho del río según experiencias de infiltración realizadas en análogas situaciones, la hemos considerado variable entre 0,5 y 1,0 m/día. Estos valores se refieren a resultados obtenidos en infiltrómetros con carga de agua lateral y corresponden a la velocidad de infiltración en régimen (valor mínimo) al cual asintotizan en lapsos de tiempo variables entre 10 y 30 días. Sobre este punto y el almacenamiento, volveremos más adelante en la discusión de los resultados.

El movimiento actual del agua subterránea en el valle, es similar al sentido de escurrimiento del agua superficial, es decir, desde Rautón hacia aguas abajo. En el gráfico 5.3 se entregan los valores del nivel estático en cada celda, referido al nivel medio del mar.

En cuanto a los caudales subterráneos que ingresan y salen del área, han sido calculados para las condiciones actuales (sin explotación), y debido a la no existencia de fluctuaciones naturales, son prácticamente constantes año a año y estacionalmente. Condicionados también a los antecedentes de transmisibilidad existentes, estas cifras alcanzan a 416 l/s que ingresan y 203 l/s que salen del área.

### 5.3 ESTRUCTURACION DEL MODELO

La zona a modelar ha sido dividida en un total de 532 celdas (23 x 19) de tamaño variable, correspondiéndole mayor densidad (menor tamaño de las celdas), al área en que se ubican las captaciones. Ello ha sido con el propósito de obtener en esta área la mejor precisión en el comportamiento. (gráfico 5.1.).

A cada una de las celdas se le ha asignado un valor de transmisibilidad, y nivel estático inicial, obtenido, como se ha dicho, por interpolación y extrapolación de los valores conocidos. (gráficos 5.2 y 5.3.)

Internamente en la modelación en cada celda que contiene al río, este fue considerado recto, adaptándose a las sinuosidades reales, y con un ancho equivalente de 8 metros. La continuidad o conexión entre río y acuífero no se hizo completamente eficiente, sino que asig-



namos la permeabilidad del lecho anteriormente dicha a un espesor equivalente de 1,0 m bajo el fondo del río.

Los lapsos de tiempo al término de los cuales se ejecuta el cálculo iterativo de la situación de niveles y el balance hidrogeológico, son incrementados en progresión geométrica, siendo el instante inicial adoptado de 0,5 segundos. Las salidas para nuestros fines sin embargo, las hemos realizado en forma mensual. El período total de simulación alcanza a un período de un año.

La continuidad hacia aguas arriba del área de Tabolango, fue impuesta provocando el ingreso de un caudal subterráneo similar al que ocurre sin explotación, y en una zona suficientemente alejada como para que no produzca alteración por efecto de las singularidades originadas por la explotación misma. Ello (la no influencia hasta dicha zona) se vió corroborado con las distintas corridas que fueron efectuadas en el modelo.

La simulación de las condiciones de bot' de hacia aguas abajo resulta menos importante, por cuanto la continuidad hidrogeológica como hemos visto, se ve prácticamente interrumpida naturalmente en la zona de MAUCO. En todo caso en nuestro desarrollo, y como un factor de seguridad adicional, hemos optado por exigir a la simulación la entrega hacia aguas abajo del límite de simulación, de un caudal constante y permanente de 203 litros por segundo, que es el agua que se ha calculado anteriormente para la salida del sistema subterráneo.

En cuanto a los sondajes, ellos fueron simulados con explotaciones variables entre 185 y 400 l/s en forma permanente y constante durante todo el período de simulación.

Otro tipo de recarga, fuera de la conexión río-acuífero, como regadío, precipitaciones no fueron consideradas tanto por su escaso monto, como por mantener un coeficiente adicional de seguridad.

#### 5.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como hemos dicho anteriormente, el objetivo seguido en la simulación era el análisis del comportamiento regional del acuífero para la explotación a que habría de ser sometido.

Múltiples alternativas fueron analizadas



especialmente con sistemas de conexión río-acuífero de mayor eficiencia, simulando la continuidad hacia aguas abajo permitiendo el drenaje libre y menores caudales de explotación.

Los resultados en las distintas corridas efectuadas nos han indicado como más favorable (y por otra parte resulta obvio), la mayor explotación simulada (400 l/s en conjunto) con la inferior conexión con el río ( $K = 0,5$  m/día), forzando una extracción de 203 l/s como caudal pasante hacia aguas abajo.

La respuesta del acuífero a este sistema de sollicitación (que el modelo nos entrega para todos los puntos del acuífero) lo hemos presentado a través de dos perfiles (transversal y longitudinal) que se muestran en los gráficos 5.4 y 5.5., en función del tiempo y que representan solamente los descensos producidos en relación a la situación primitiva. La situación de la superficie freática en relación al nivel del mar, es mostrada también en un corte longitudinal en la zona de captaciones, en el gráfico 5.7.

Junto a ello, hemos querido presentar la forma en que varía el nivel en dos puntos cercanos a la zona de captación - celdas (13,8) y (5,10)-, pero no incluidas dentro de ella.

Un estudio cuidadoso de las variaciones del nivel en función del tiempo nos muestra claramente el ritmo decreciente de su descenso al cabo del tercer mes, y prácticamente una estabilización al término del período de simulación. Aún más, en algunas zonas incluso se percibe un ascenso en ellos producto de la mayor incidencia que en esas zonas va adquiriendo la recarga desde el río. En todo caso, para efectos prácticos, podemos decir que la nueva situación alcanzada de equilibrio con dicha explotación será muy próxima a la entregada al término de la simulación.

Debemos hacer énfasis en que para el tamaño mínimo de las celdas elegidas (100 x 100 mts.) los descensos de nivel obtenidos son válidos como niveles medios en el área, e indudablemente no corresponden a los niveles dinámicos en los sondeos mismos que deben obtenerse como se indicó en el análisis de las interferencias.

#### 5.5. CONSIDERACIONES FINALES

Como en cualquier modelo de simulación, algunas simplificaciones y asunciones fue necesario ejecutar,



especialmente por la carencia de algunos antecedentes.

Entre ellas, las de mayor importancia han sido las ausencia de datos sobre almacenamiento. Una mala estimación del coeficiente de almacenamiento puede llevarnos a un distinto comportamiento de los niveles en función del tiempo, aunque probablemente su incidencia en el nivel final de equilibrio sea de poca significación.

Tampoco hemos tenido gran confianza en los valores disponibles para el cálculo de los valores de T, aunque por ahora los consideramos de una precisión aceptable. De gran interés hubiera sido disponer al menos de algún antecedente aguas abajo de la zona de explotación para analizar en forma detallada la variación del caudal efluente del área. Recordemos que en este sentido limitamos el modelo en la angostura de MAUCO y pusimos como condición la mantención del actual caudal hacia aguas abajo.

Otro aspecto importante y que merece algunos comentarios, es que se supuso el río en el área con un escurrimiento prácticamente constante en el período de simulación. Sabido es que la realidad no es esa y que al menos existen períodos a lo largo del año (invierno y comienzos de verano) en que por los mayores caudales en el río se provocan mejores condiciones de conexión (recarga) al infiltrarse zonas que durante períodos largos se encontraban secas, y por consecuencia tienen mejores permeabilidades. Ello indudablemente se transformará en formas de variación distintas a las presentadas, en forma análoga a lo que ocurriría con una explotación discontinua de los sondeos, y en todo caso, otorga un adicional margen de seguridad.

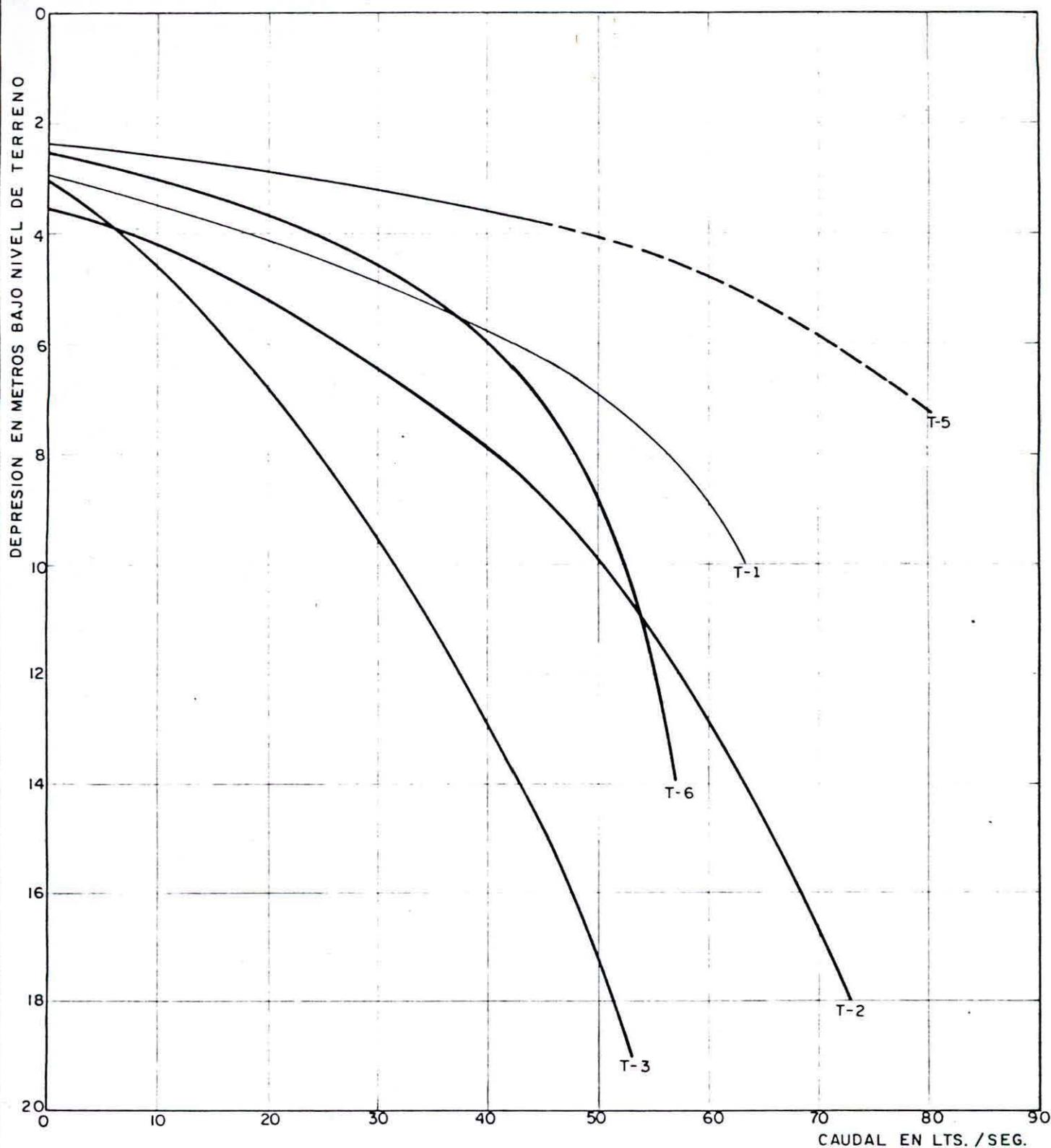


GRAFICO 4.2.1  
 CURVAS DE AGOTAMIENTO INTERFERIDAS

100.000 minutos de bombeo continuo  
 POZOS T-1; T-2; T-3; T-5; T-6

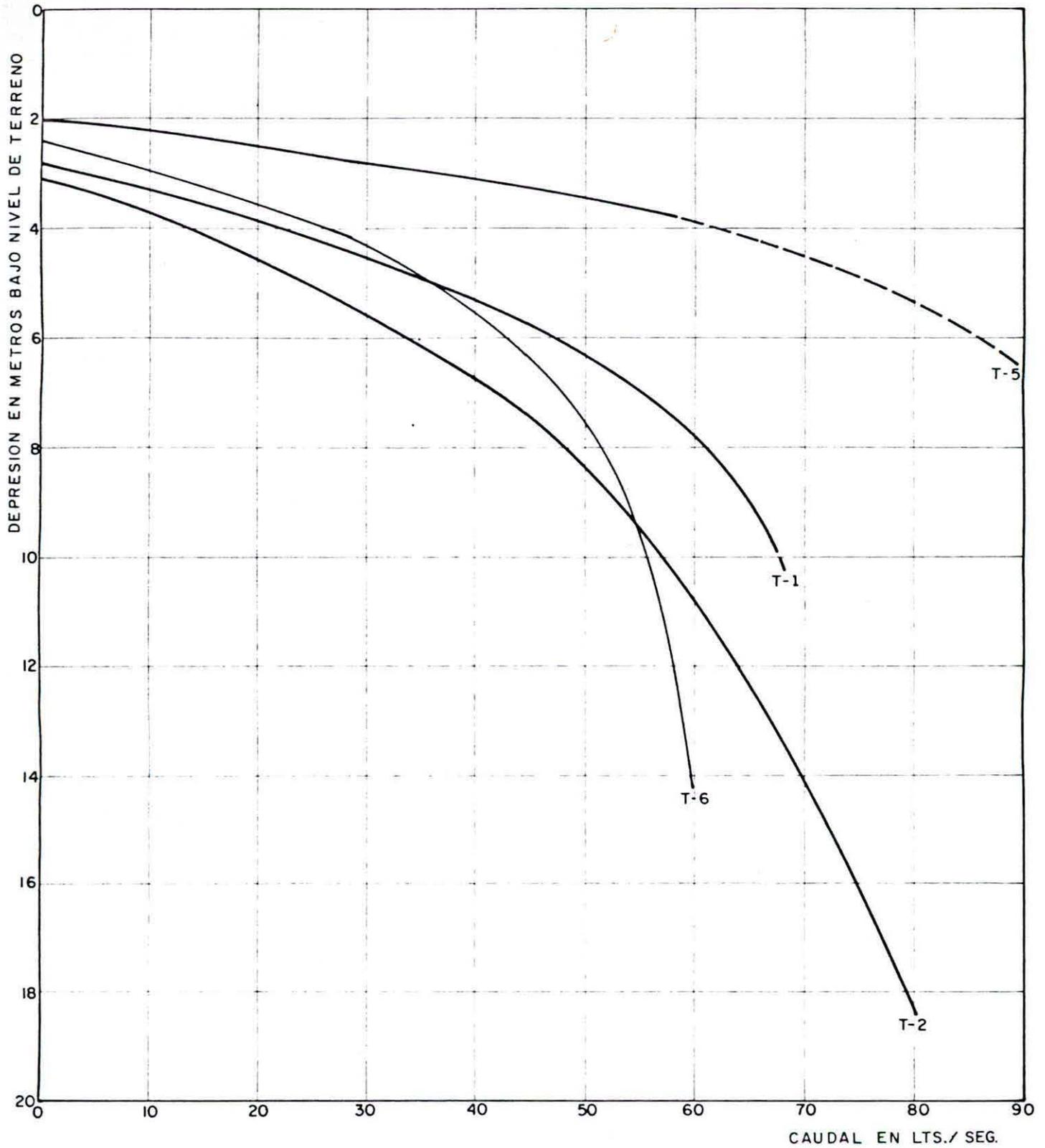


GRAFICO 4.2.2  
 CURVAS DE AGOTAMIENTO INTERFERIDAS  
 100.000 minutos de bombeo continuo  
 POZOS T-1; T-2; T-5; T-6

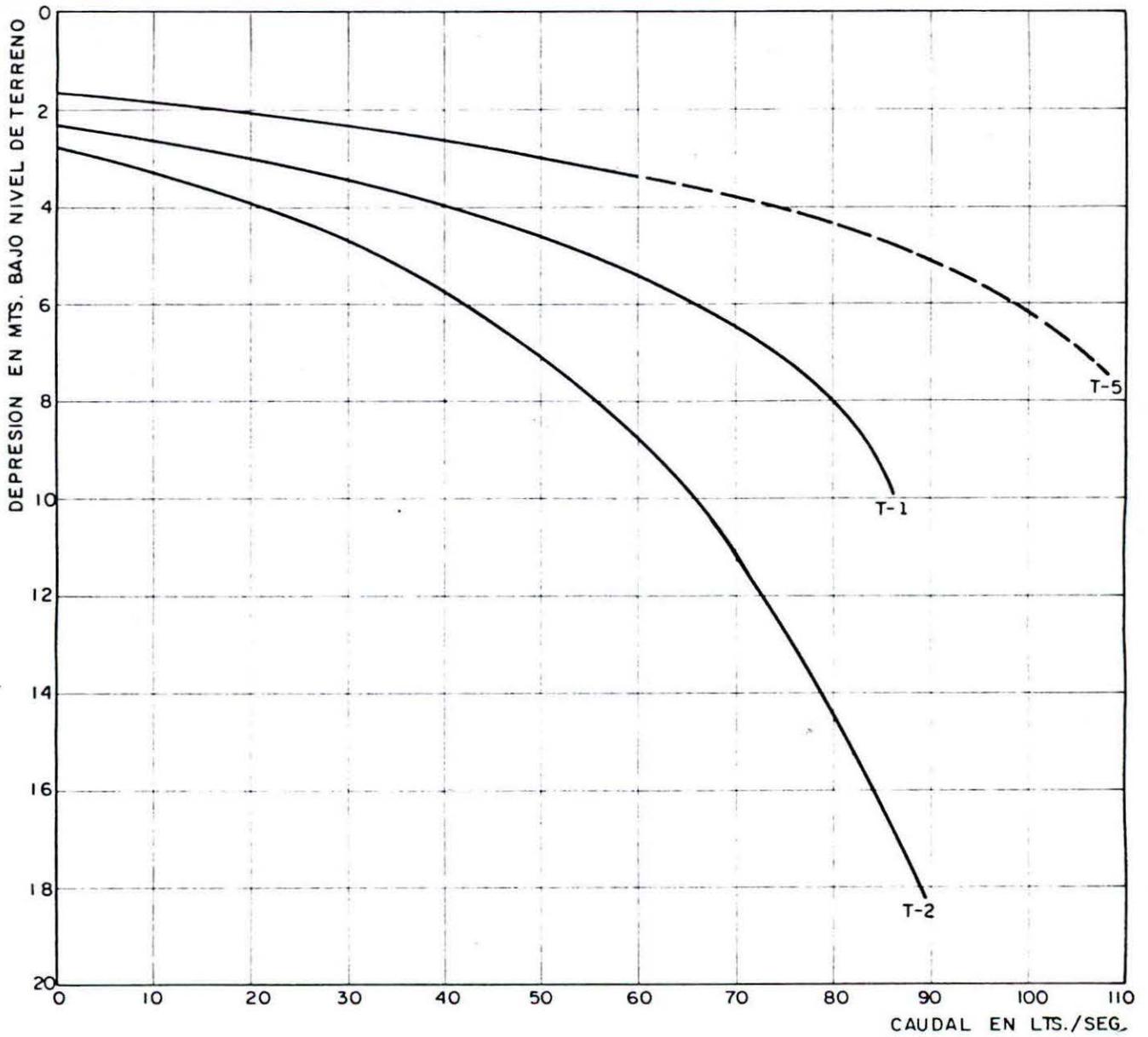
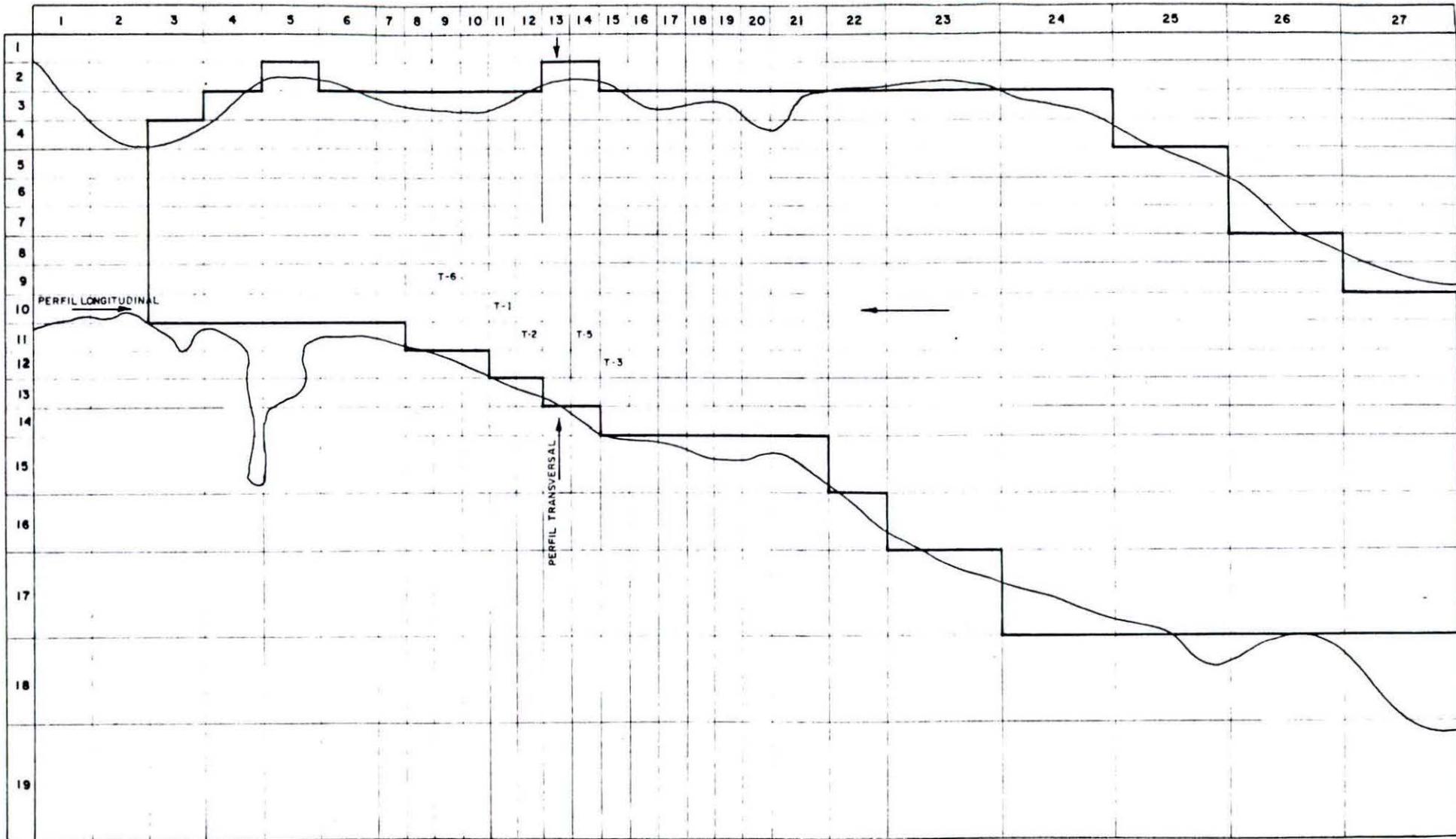


GRAFICO 4.2.3  
 CURVAS DE AGOTAMIENTO INTERFERIDAS

100.000 minutos de bombeo continuo

POZOS T-1; T-2; T-5



— CONTACTO ROCA-RELLENO  
— LIMITE DEL MODELO

GRAFICO 5.1  
MALLA DEL MODELO

Esc. 1:20.000







LEYENDA GRAFICOS 5.4 y 5.5.

<u>CURVA</u>	<u>DEFINICION</u>
1	20 dias de bombeo continuo
2	30 dias de bombeo continuo
3	45 dias de bombeo continuo
4	67 dias de bombeo continuo
5	101 dias de bombeo continuo
6	151 dias de bombeo continuo
7	202 dias de bombeo continuo
8	279 dias de bombeo continuo
9	392 dias de bombeo continuo

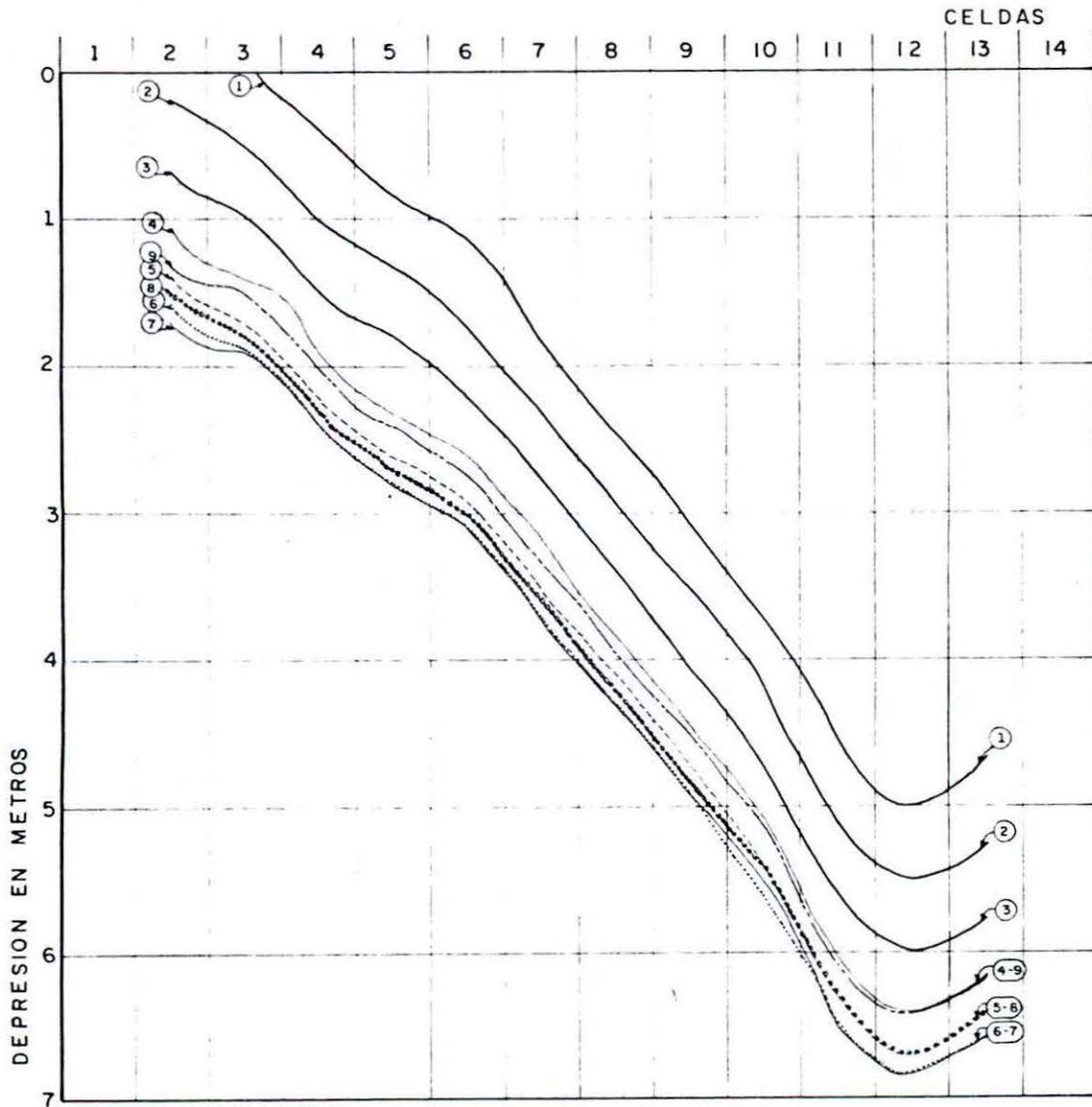


GRAFICO 5.4  
 PERFIL TRANSVERSAL  
 DEPRESIONES POR EFECTO DE BOMBEO EN  
 FUNCION DEL TIEMPO  
 (QT = 400 lts/seg.)  
 ESC. HORIZONTAL 1:10.000

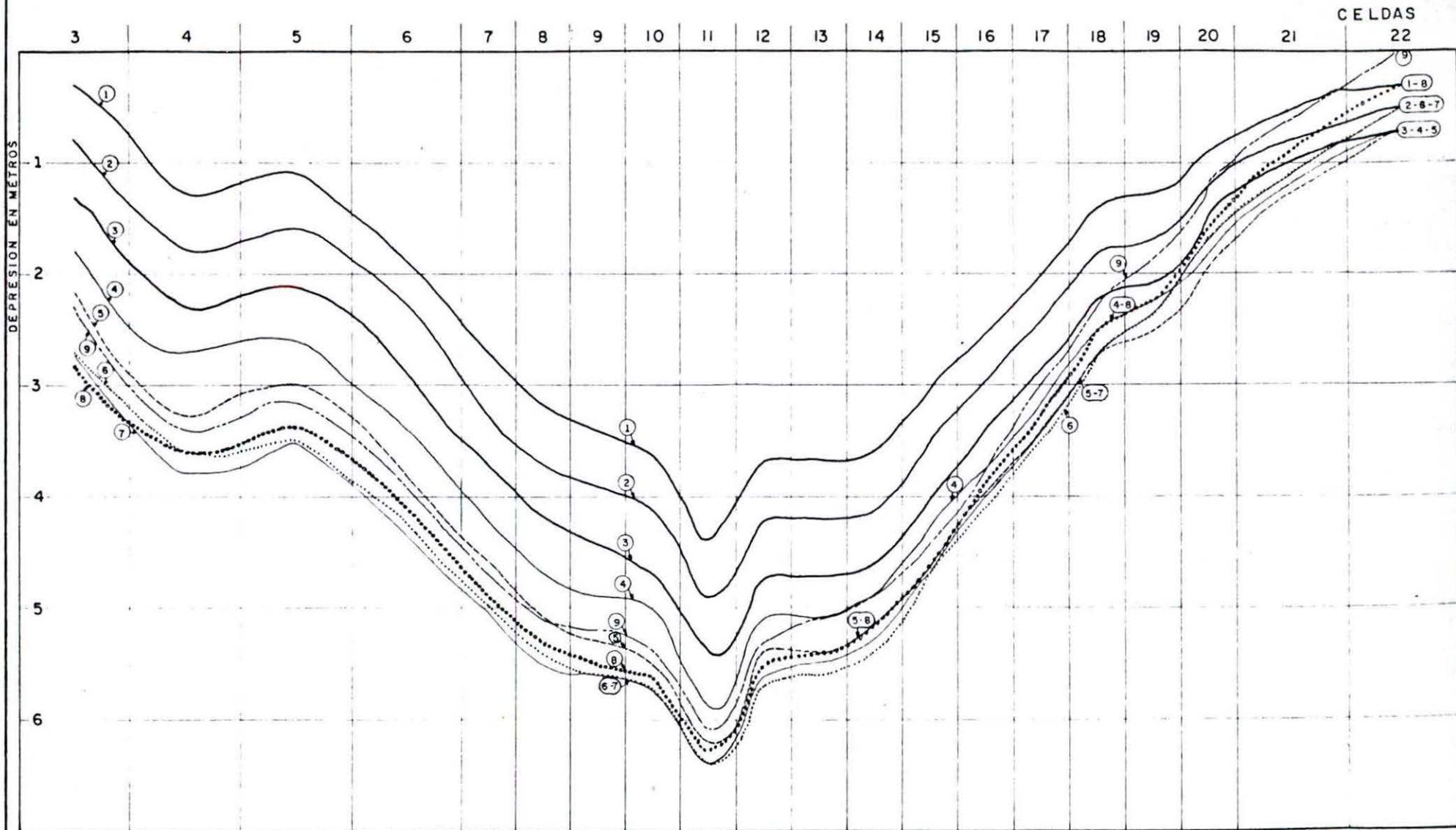
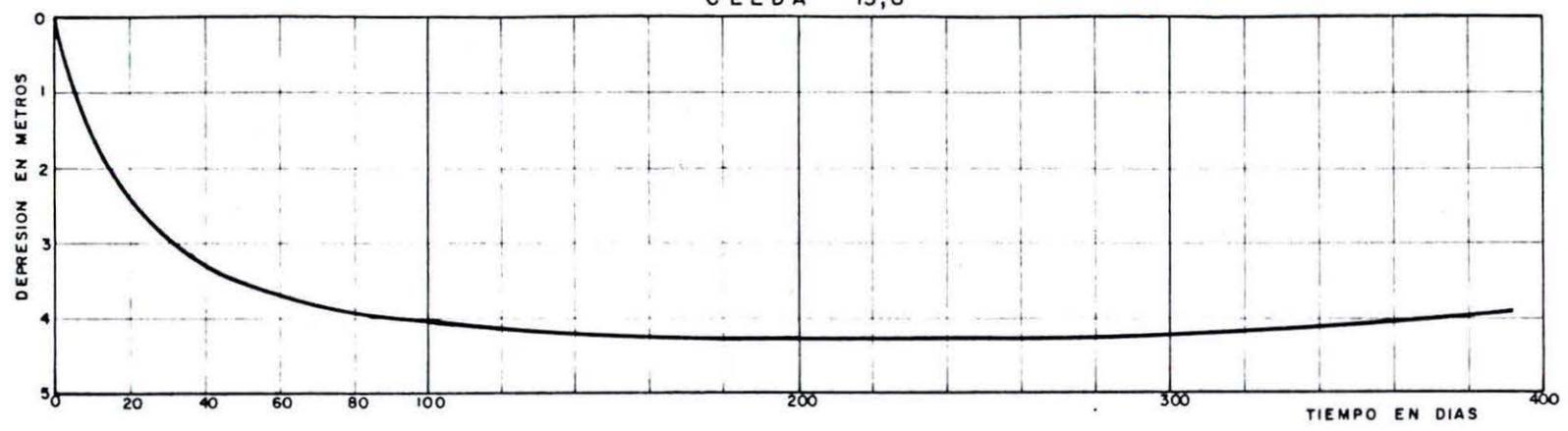


GRAFICO 5.5  
PERFIL LONGITUDINAL  
DEPRESIONES POR EFECTO DE BOMBEO EN  
FUNCION DEL TIEMPO  
(QT = 400 lts/seg.)  
ESC. HORIZONTAL 1:10,000



CELDA 13,8



CELDA 5,10

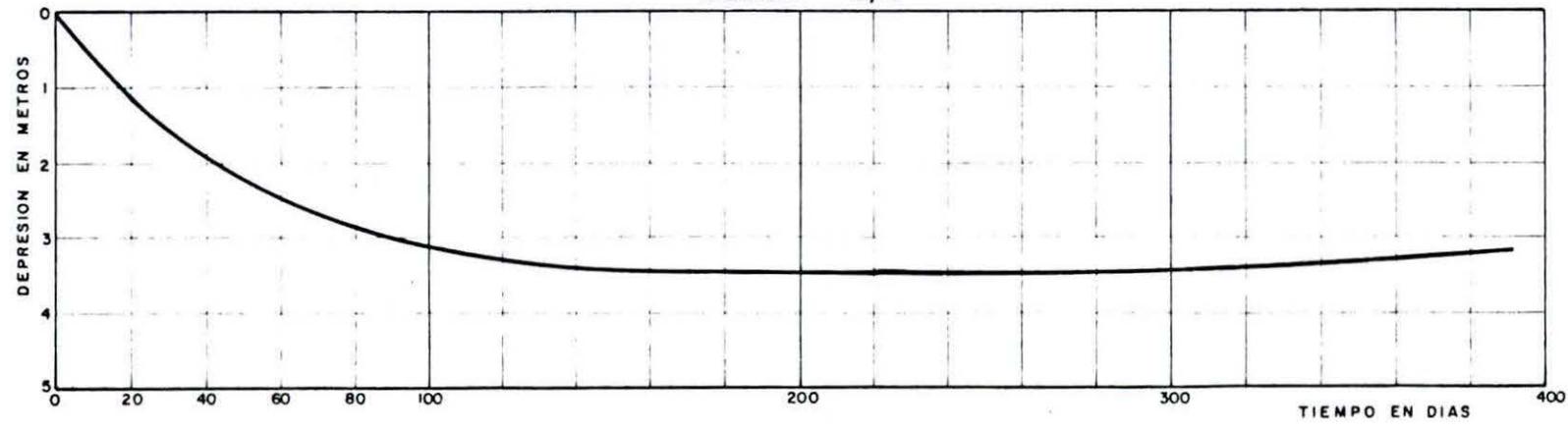


GRAFICO 5.6  
DEPRESION  $\frac{1}{2}$  TIEMPO

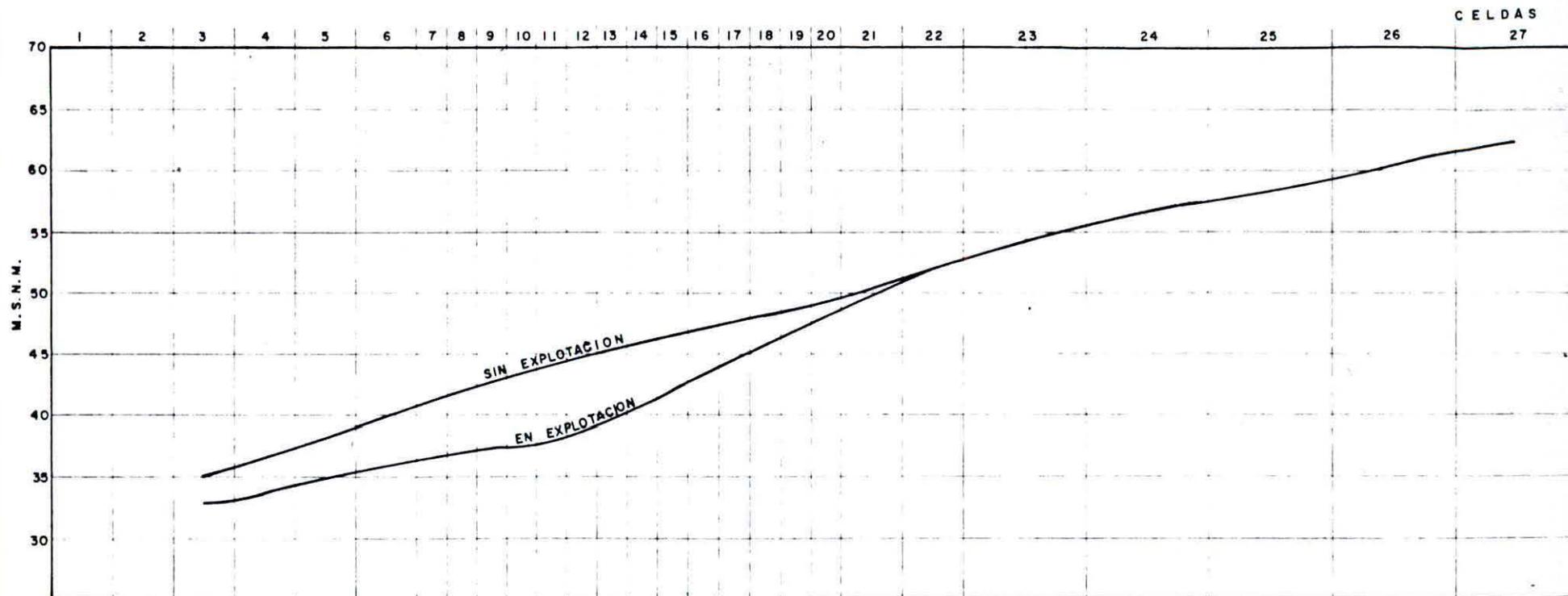


GRAFICO 5.7

SITUACION DEL NIVEL ESTATICO, (Corte longitudinal por la zona de captación)  
ANTES (Sin explotación) Y AL TERMINO DE UN AÑO DE EXPLOTACION PERMANENTE (400 lts/seg)

Esc. 1: 20.000

