

66  
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**"ESTUDIO DEL CAMPO DE POZOS QUE ABASTECE DE AGUA A  
LA REFINERIA MIGUEL HIDALGO EN TULA, HGO.  
APLICACION DEL METODO DE COOPER"**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTAN**

**ARTURO GONZALEZ HERRERA  
IGNACIO PALOMARES HERNANDEZ**

**MEXICO, D. F. 1988**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

I N D I C E

|  | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCION . . . . .   | 1    |
| <br>   |      |
| CAPITULO I.- EL AGUA, ELEMENTO ESENCIAL EN EL FUN -<br>CIONAMIENTO DE LA REFINERIA "MIGUEL -<br>HIDALGO" |      |
| I.1.- Cantidades de agua necesarias<br>y su distribución. . . . .  | 10   |
| I.2.- Calidad del agua extraída. . .   | 15   |
| I.3.- Calidad del agua en las dife -<br>rentes etapas de tratamiento<br>para su uso en la Refinería.. .  | 21   |
| I.3.1.- Pretratamiento. . . . .  | 23   |
| I.3.2.- Potabilización. . . . .  | 27   |
| I.3.3.- Planta desmineralizadora y -<br>desaerador . . . . .   | 30   |
| <br>   |      |
| CAPITULO II.- ASPECTOS GEOLOGICOS DE LA ZONA EN ES -<br>TUDIO.   |      |
| II.1.- Geología regional . . . . .   | 35   |
| II.2.- Ubicación de los pozos. . . . .   | 39   |
| II.3.- Hidrología del subsuelo . . . . .   | 41   |

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>CAPITULO III.- METODO DE COOPER PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES ACUIFERAS. TRANSMISIBILIDAD Y ALMACENAMIENTO</b>               |      |
| III.1.- Teoría elemental del método de Cooper . . . . .   | 54   |
| III.2.- Determinación de las constantes acuíferas, Transmisibilidad y Almacenamiento . . . . .  | 68   |
| <br>  |      |
| <b>CAPITULO IV.- ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA, PARA SATISFACER LA DEMANDA PRESENTE Y FUTURA DE LA REFINERIA</b> |      |
| IV.1.- Elementos para el procedimiento analítico . . . . .  | 81   |
| IV.2.- Alternativa de funcionamiento para la primera etapa. . . . .   | 85   |
| IV.3.- Alternativa de funcionamiento para la primera y segunda etapas . . . . .   | 87   |
| IV.4.- Alternativa de funcionamiento para todas las etapas. . . . .   | 89   |
| IV.5.- Gráficas abatimiento-tiempo para diferentes pozos. . . . .   | 91   |

|  | Pág. |
|--|------|
| COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES. . . . . | 98   |
| APENDICE . . . . .                     | 103  |
| BIBLIOGRAFIA . . . . .                 | 123  |

## **I N T R O D U C C I O N**

El tema, razón de este trabajo, nació como uno de los objetivos de nuestra participación en el área de Ingeniería Civil del Programa Escuela-Industria, mediante el convenio PEMEX-UNAM-IMP, para la prestación de Servicio Social, Prácticas de Desarrollo Profesional y elección de tema de Tesis relacionado con la Industria Petrolera.

Durante un periodo de seis meses nos incorporamos en la Refinería " MIGUEL HIDALGO " a algunos de los Departamentos de la Superintendencia Local de Construcción Zona Centro, perteneciente a la Subdirección de Proyecto y Construcción de Obras (S.P.C.O.) de Petróleos Mexicanos.

Siendo el abastecimiento de agua primordial como servicio para el buen funcionamiento de esta industria y por su relación con la Ingeniería Civil, fueron motivos para la elección de Tema para nuestra recepción profesional.

La Refinería "Miguel Hidalgo" se encuentra ubicada a aproximadamente 87 Km al noroeste de la Cd. de México y a 9 Km de la población de Tula de Allende, Hgo., en los límites de los municipios de Atitalaquia y Tula, en los ex-ejididos de El Llano, San Pedro Alpuyea y la Soledad.

Se escogió este lugar por su ubicación estratégica con las poblaciones de Poza Rica, Ver., y Salamanca, Gto., lugares de donde proviene el producto para su proceso, además de influencia de mercados potenciales, así como de la red de comunicaciones y el clima.

DATOS GENERALES MAS IMPORTANTES DEL LUGAR.

|                                      |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Altitud sobre el nivel del mar       | 2066 m.               |
| Zona Sísmica, Clasificación          | B                     |
| Temperatura: Mes más caliente        | 30.6 C                |
| mes más frío                         | 3.6 C                 |
| Presión media anual                  | 756.4 mm Hg           |
| Dirección de los vientos: Dominantes | N-E                   |
| Reinantes                            | N-E                   |
| Velocidad de los vientos: Dominantes | 87.2 Km/h med.        |
| Reinantes                            | 94.7 " máx.           |
| Época de Lluvias meses de            | Junio, Julio y Agosto |
| Precipitación media anual            | 594.2 mm              |
| Clima                                | Templado - Frío.      |

La construcción de la Refinería se inicia en el año 1972 con la perforación de pozos de agua, ya que dependiendo de la existencia de esta sustancia se podía dar marcha a la realización de tan majestuosa e importante obra.

La construcción de la Refinería constará de CUATRO ETAPAS.

El 18 de marzo de 1973, siendo Presidente Constitucional de la República Mexicana, el Lic. Luis Echeverría Álvarez simbólicamente colocó la primera piedra, y el 18 de marzo de 1976 él mismo inauguró oficialmente la Refinería con la Primera Etapa y desde esa fecha recibió el nombre de "Miguel Hidalgo".

La capacidad instalada de la Primera Etapa es de 150 000 Bls/día y cuenta con seis plantas que son : La Primaria Combinada, la Reductora de Viscosidad, la Catalítica, la Hidrodesulfuradora, la de Tratamiento de Aguas Amargas, y la planta de Tratamiento de agua. Para dar servicios auxiliares a estas plantas se construyeron: Tres Calderas de Vapor, tres Torres de enfriamiento, el Cuarto de Turbogeneradores, quince Subestaciones Eléctricas, el Área de Quemadores y Tratamiento de Efluentes. Para el almacenamiento se construyeron sesenta-

-y cinco Tanques verticales de distintas capacidades y productos, y diez tanques esféricos de 15 000 Bls. de cap. de gas. La terminal de Ventas y las esferas fueron las primeras instalaciones de esta industria.

También existen edificios Administrativos, dos Almacenes, diversos Talleres y una Estación de Bomberos.

La superficie total que ocupa esta Primera Etapa es de 450 Ha., que aumentará a más de 700 Ha. con las obras de la Segunda, Tercera y Cuarta Etapas.

La Segunda Etapa fué inaugurada simbólicamente el 18 de marzo de 1987 por el Lic. Miguel de la Madrid H., Presidente Constitucional de nuestra República. Contempla las Plantas Primaria # 2, la de Destilación al Vacío # 2 y la Estabilizadora de Gasolinas. Para sus servicios auxiliares se construyeron dos Torres de Enfriamiento, ocho Subestaciones Eléctricas, una Caldera de Vapor y dos Quemadores de Fosa.

Para aumentar la capacidad de almacenamiento se están construyendo cuarenta y siete Tanques verticales de diferentes capacidades y doce tanques esféricos.

La Tercera Etapa comprende la construcción de seis plantas que son : Las Hidros de Destilados Intermedios III y IV, la Hidros de Naftas II, la Reformadora de Naftas II, la Tratadora y Fraccionadora II, y la Planta de Azufre III. Se ampliará el almacenamiento con la construcción de cientosiete Tanques verticales pequeños.

Para la Cuarta Etapa se considera la construcción del Tren de Lubricantes comprendida por ocho plantas, que son : Desasfaltadoras I y II, la Redestiladora, las de Extracción con Furfural I y II, las Desparafinadoras I y II, la Hidros III y la de Azufre II.

**ALCANCE.**

Como el tema es relacionado con el abastecimiento de agua a la Refinería es necesario conocer la demanda. En el capítulo I se cita de manera somera y general la distribución de agua, su calidad y su tratamiento para los diferentes usos que se hace de ella. Es tratado de esta manera ya que su estudio más completo compete a otras profesiones; aún así es oportuno mencionarlo pues el ejercicio del Ingeniero Civil se relaciona con grupos multidisciplinarios en obras de gran magnitud, como es el caso de una Refinería.

Es en el capítulo II donde se mencionan los aspectos geológicos de la región y en base a esta información se determinó la ubicación de los 22 pozos profundos, algunos de los cuales están ya perforados y en operación y otros en proceso de construcción.

En el capítulo III se proporciona la herramienta teórica necesaria para poder predecir el comportamiento hidráulico del acuífero.

El método utilizado es consecuencia de los trabajos de los investigadores: Theis, Jacob y Cooper.

Con los datos de pruebas de bombeo proporcionado por Petróleos Mexicanos, son obtenidos los parámetros acuíferos. Transmisibilidad y Almacenamiento.

El último capítulo muestra la forma como se hacen funcionar los pozos calculándose los abatimientos de los mismos al través del tiempo.

Es importante aclarar que damos alternativas de funcionamiento de los pozos por Etapas para mostrar la aplicabilidad del método, sin que sea realmente de esa manera como esté funcionando o vaya a funcionar el lote.

C A P I T U L O I

EL AGUA. ELEMENTO ESENCIAL  
EN EL FUNCIONAMIENTO  
DE LA  
REFINERIA "MIGUEL HIDALGO"

## I.1 CANTIDADES DE AGUA NECESARIAS Y SU DISTRIBUCION.

El agua es una sustancia esencial e indispensable para el metabolismo de los seres vivos, para la higiene de las personas, para el alojamiento de desechos, para producción de energía eléctrica, para procesos industriales, etc.

Las aguas naturales de las que puede disponer el hombre son de tres tipos: meteóricas, superficiales y subterráneas, siendo estas últimas, las de mayor potencial y generalmente las de mejor calidad.

El agua para uso industrial, requiere tener ciertas cualidades físicas y químicas; el agua potable debe cumplir además, con una calidad bacteriológica específica.

El agua subterránea, al atravesar diversas formaciones geológicas, absorbe diversas sustancias extrañas en solución y suspensión en proporciones variables, dependiendo del tipo de estrato. Las sustancias pueden modificar considerablemente las propiedades, efectos y usos del agua.

Los asentamientos humanos y la situación de industrias depende, muchas veces, de la facilidad de disponer de agua en calidad aceptable y cantidad suficiente.

Actualmente la captación de agua cruda para la Refinería es por medio de un lote de diez pozos localizados en el trayecto de la carretera Tlahuelliapan-Tula y la vía P.C. México-Laredo, a través de bombas centrífugas sumergibles que la envían a dos tanques de Balance en la Estación de Rebombéo # 1 para posteriormente, por medio de bombas centrífugas horizontales, abastecer de agua a la Refinería.

Distribución de agua en la Primera Etapa.

|   | Normal<br>m <sup>3</sup> /hr | Máximo<br>m <sup>3</sup> /hr |
|---|------------------------------|------------------------------|
| 1.-Plantas de Pretratamiento de<br>agua y Desmineralizadora | 454.2                        | 454.2                        |
| 2.-Planta Potabilizadora                                    | 34.0                         | 56.7                         |
| 3.-Torres de Enfriamiento                                   | 1 376.2                      | 1 555.8                      |
| 4.-Agua de Servicio y Riego<br>de Zonas verdes              | 74.9                         | 149.8                        |
| 5.-Planta Acrilonitrilo                                     | 227.1                        | 227.1                        |
| 6.-Plantas de Proceso del<br>Petróleo                       | 120.0                        | 120.0                        |
| 7.-Terminal de Propano                                      | 16.0                         | 16.0                         |
| TOTAL   | 2 302.9                      | 2 582.6                      |

De acuerdo a la demanda de hidrocarburos destilados y gases en la zona central del país y del Valle de México, se tiene la necesidad urgente de ampliar las instalaciones de la Refinería " Miguel Hidalgo " a corto, mediano y largo plazo ( Segunda, Tercera y Cuarta Etapas ).

Para este fin se tiene el proyecto de un sistema de bombeo de agua cruda integrado por doce pozos profundos localizados en el Mpio. de Mixquiahuala, Hgo., Área de Mangas, los cuales suministrarán el agua a través de bombas centrífugas verticales a la Estación de Rebombeo # 2 que cuenta con dos tanques de Balance y de aquí se rebombee a la Refinería.

Distribución de Agua en la Segunda Etapa.

|  | Normal<br>m <sup>3</sup> /hr | Máximo<br>m <sup>3</sup> /hr |
|--|------------------------------|------------------------------|
| 1.-Pretratamiento de Agua                                    | 809.4                        | 809.4                        |
| 2.-Ptas. Primaria #2 y de<br>Vacio #2 (proceso del petróleo) | 75.4                         | 75.4                         |
| 3.-Torres de Enfriamiento                                    | 585.0                        | 608.8                        |
| 4.-Agua de Servicio y Riego                                  | 38.6                         | 77.2                         |
| <b>TOTAL</b>   | <b>1 508.4</b>               | <b>1 670.8</b>               |

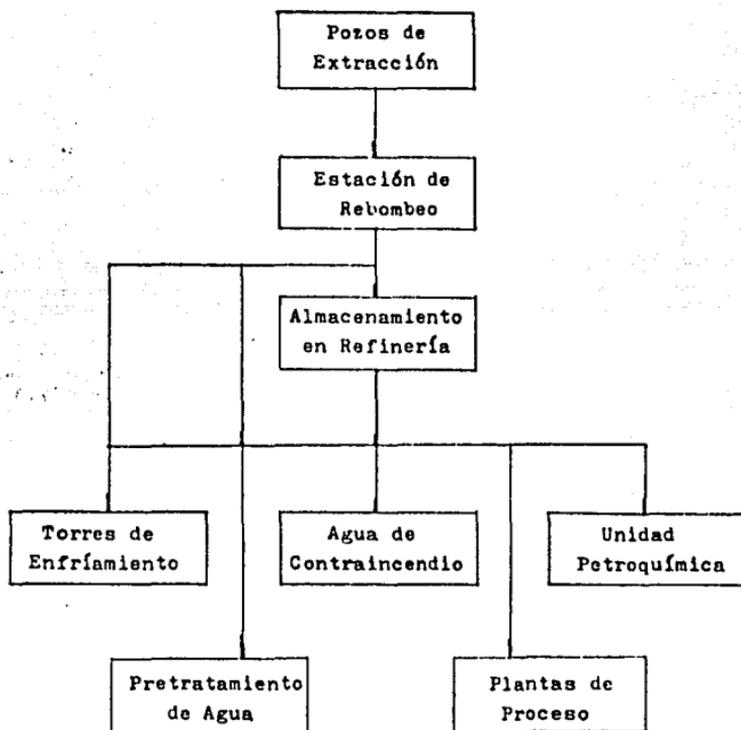
Distribución de Agua Cruda en las  
Tercera y Cuarta Etapas.

|  | Normal<br>m <sup>3</sup> /hr | Máximo<br>m <sup>3</sup> /hr |
|--|------------------------------|------------------------------|
| 1.- Pretratamiento de Agua             | 490.5                        | 750.6                        |
| 2.- Plantas de Proceso del<br>Petróleo | 45.4                         | 113.5                        |
| 3.- Torres de Enfriamiento             | 2 955.7                      | 3 543.2                      |
| TOTAL                                  | <u>3 491.6</u>               | <u>4 407.3</u>               |

RESUMEN DE CONSUMO DE AGUA

| ETAPA No.           | Gasto Normal<br>m <sup>3</sup> /hr | Gasto Máximo<br>m <sup>3</sup> /hr | Gasto Máximo<br>l.p.s. |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Primera             | 2 303.0                            | 2 583.0                            | 717.5                  |
| Segunda             | 1 508.0                            | 1 671.0                            | 464.0                  |
| Tercera y<br>Cuarta | <u>3 492.0</u>                     | <u>4 407.0</u>                     | <u>1 224.0</u>         |
| TOTAL               | 7 303.0                            | 8 661.0                            | 2 405.5                |

## DIAGRAMA DE FLUJO DE AGUA CRUDA



## 1.2 CALIDAD DEL AGUA EXTRAIDA.

La calidad de un agua es evaluada en términos de sus características físicas, químicas y biológicas y por los usos que se intente hacer con el líquido.

En base a la cantidad y calidad de los constituyentes del agua se puede decir si es aceptable desde el punto de vista de consideraciones estéticas, de salubridad y económicas.

El agua recoge impurezas, ofensivas o no, desde el momento mismo de su formación en las nubes o a través de su recorrido en los estratos geológicos o suelos.

Para establecer la calidad de un agua es necesario definir las bases en términos de las necesidades o usos benéficos específicos que vaya a darse al agua.

El agua subterránea que se extrae, tanto en el área de Mangas como en la de Teocalco, tiene una calidad que en general es buena para uso industrial, siendo los parámetros de mayor consideración, en cuanto a su afectación, los siguientes:

**TURBIEDAD:** Es causada por una gran variedad de materia suspendida que va desde un tamaño coloidal hasta partículas macroscópicas.

La turbiedad causa inseguridad en el consumidor y aumenta la dificultad de tratamiento.

**SOLIDOS TOTALES:** Son la suma de los sólidos suspendidos y los sólidos disueltos; en los primeros hay una parte que puede ser sedimentable en cierto tiempo cuando el agua está reposando.

La determinación de los sólidos suspendidos es de gran importancia en el tratamiento de aguas, ya que nos sirve para definir la necesidad y diseño de tanques de sedimentación, filtros, etc.

**SILICE (  $\text{SiO}_2$  ):** Su presencia en el agua para uso industrial es indeseable por las incrustaciones que provoca en calderas, tuberías y otros equipos.

**CLORO:** El cloro libre o residual es causado por la presencia de ácido hipocloroso, el ión hipoclorito, el cloro y las cloraminas que no reaccionaron con los iones ferrosos, los nitritos y los sulfuros.

Los cloruros son aniones que están presentes en el agua en diferentes concentraciones y pueden aumentar con el contenido mineral. En proporciones razonables, no son dañinos para la

la salud, siendo el límite máximo recomendable para el agua potable 250 p.p.m.

En la industria las altas concentraciones de cloruros aceleran la corrosión en calderas, reactores, etc. En comparación con las aguas de mares, ríos y lagos, las aguas subterráneas presentan menor concentración de cloruros.

**ALCALINIDAD:** En aguas naturales es originada principalmente por la presencia de bicarbonatos y carbonatos alcalino-térreos y alcalinos, hidróxidos y amoníaco.

Las aguas altamente alcalinas no son aceptables para uso potable ni para uso industrial, ya que producen malestar en personas y animales, pueden matar plantas y ocasionan corrosión en tuberías, calderas y otros equipos donde son usadas.

**DUREZA:** En la mayoría de las aguas es causada principalmente por la presencia de iones  $\text{Ca}^{++}$ , y  $\text{Mg}^{++}$ . Todos los cationes metálicos, excepto los alcalinos, también producen dureza en el agua.

El agua dura posee varias propiedades indeseables: hace consumir grandes cantidades de jabón en el lavado, pues forma un precipitado con éste. Desde el punto de vista industrial el

agua dura es indeseable porque las sales de Ca y Mg precipitan cuando se calienta el agua o se evapora parcialmente en una caldera ocasionando incrustaciones, las cuales aún no se pueden evitar del todo pese a los avances teóricos de la química del agua y del desarrollo de dispositivos sofisticados a base de intercambio iónico, como las zeolitas o como los polifosfatos que tienen poder secuestrante del Ca y Mg.

La dureza es adquirida por el agua de las formaciones geológicas que ha atravesado en su recorrido.

Por lo que respecta a la salud el agua dura no causa normalmente trastornos significativos.

En la tabla I.2.1 se muestran los resultados del análisis químico del agua procedente de los pozos de Petróleos Mexicanos, y puede verse que como el agua no presenta alcalinidad a la fenilftaleína, la alcalinidad total es debida a la presencia de bicarbonatos.

El contenido de cloro se encuentra en el rango permisible, o sea, aunque siendo corrosivos no llegan a presentar serios problemas.

La presencia de fosfatos es mínima (de cero a una ppm) aunque en pozos poco profundos puede incrementarse por la -

contaminación de agua de riego.

El contenido de sílice es ligeramente alto, presentándose como sílice soluble, que puede ocasionar problemas de incrustaciones y como materia suspendida que puede ser removida por coagulación y filtración.

El contenido de sólidos totales está por arriba del límite máximo permisible, que es de 650 p.p.m. por lo que se requerirá de un tratamiento de coagulación y ablandamiento puesto que también la dureza está por arriba del límite máximo fijado de 350 p.p.m.

La turbiedad está a la mitad de lo establecido que son 10 unidades Jackson.

TABLA I.2.1 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA(CRUDA).

|                               | Área de Mangas |                            | Teocalco |                            |
|-------------------------------|----------------|----------------------------|----------|----------------------------|
|                               | p.p.m.         | ppm como CaCO <sub>3</sub> | p.p.m.   | ppm como CaCO <sub>3</sub> |
| <b>Cationes</b>               |                |                            |          |                            |
| Ca <sup>++</sup>              | 85.2           | 213                        | 88       | 220                        |
| Mg <sup>++</sup>              | 35.5           | 145                        | 32       | 131                        |
| Na <sup>+</sup>               | 209.2          | 456                        | 224.7    | 490                        |
| K <sup>+</sup>                | 34.3           | 44                         | 34       | 43                         |
| <b>Aniones</b>                |                |                            |          |                            |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 487.8          | 400                        | 450      | 370                        |
| OH <sup>-</sup>               | 0              | 0                          | 0        | 0                          |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | 0              | 0                          | 0        | 0                          |
| Cl <sup>-</sup>               | 205.9          | 290                        | 210.6    | 297                        |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 161            | 168                        | 208.6    | 217                        |
| SiO <sub>2</sub>              | 64             | -                          | 67       | -                          |
| STD                           | 1290           | -                          | 1220     | -                          |
| S.S.                          | 0              | -                          | 0        | -                          |
| Mat. org.                     | 0              | -                          | 0        | -                          |
| Turbiedad                     | 4              | -                          | 5        | -                          |
| Dureza Total                  | -              | 358                        | -        | 351                        |
| Alc "F"                       | -              | 0                          | -        | 0                          |
| Alc "M"                       | -              | 400                        | -        | 370                        |
| Fe                            | 0              | -                          | 0        | -                          |
| S                             | 0              | -                          | 0        | -                          |
| Al                            | 0              | -                          | 0        | -                          |
| Zn                            | 0              | -                          | 0        | -                          |
| Ni                            | 0              | -                          | 0        | -                          |
| pH                            | 7.9            | -                          | 7.7      | -                          |
| Temperatura                   | 21°C           | -                          | 22°C     | -                          |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | 0              | -                          | 0        | -                          |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 2.8            | -                          | 1.5      | -                          |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 1.2            | -                          | 4.5      | -                          |

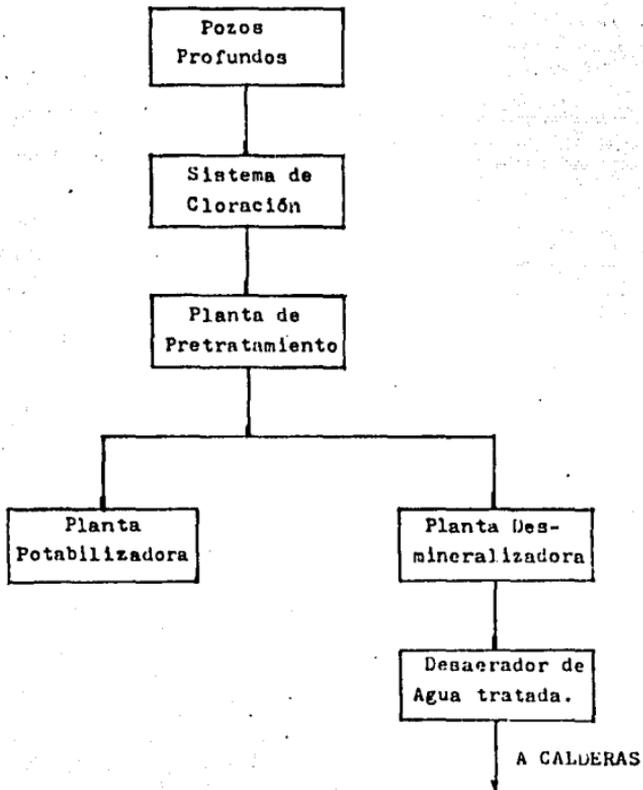
### 1.3 CALIDAD DEL AGUA EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE TRATAMIENTO PARA SU USO EN LA REFINERIA.

La Refinería , para llevar a cabo sus actividades de producción y servicios, necesita agua en diferente calidad : para riego de áreas verdes y sistema contraincendio se usa tal y como llega de los pozos; para calderas y otros equipos se re quiere agua libre de sustancias incrustables o corrosivas, ya que ésto provocaría un aumento en el costo de mantenimiento, una disminución en la eficiencia de operación, o se reduzca la vida económica de los mismos.

El tratamiento del agua cruda, es pues de gran importan cia para el buen funcionamiento de la Refinería. Puede ser tan sencillo como una simple cloración o filtración, o tan complicado como el proceso de desmineralización donde la química del agua es compleja. El tratamiento está orientado a eliminar la dureza, la alcalinidad, los sólidos totales, las bacterias patógenas, etc.

El diagrama siguiente muestra en forma sencilla las diferentes etapas de tratamiento del agua hasta llegar al punto en donde se requiere con una más alta pureza.

## DIAGRAMA DE TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA.



### I.3.1 PRETRATAMIENTO.

El tratamiento del agua se inicia en la línea de llegada del rebombec mediante un sistema de cloración a 0.2 ppm eliminando parcialmente la materia orgánica, incluidos los microorganismos, para después enviarla a los Tanques de Almacenamiento, a la Planta de Pretratamiento y a las Torres de Enfriamiento.

En la Planta de Pretratamiento, mediante el tratador-floculador, el agua se purifica por coagulación y precipitación de las impurezas y su posterior remoción por sedimentación y filtración.

En forma resumida las funciones de la planta son las siguientes :

- Reducción de turbidez, color y materia orgánica.
- Ablandamiento del agua con  $\text{Ca(OH)}_2$  .  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y en algunos casos  $\text{NaCl}$ . Ésto es para abatir la dureza y la alcalinidad debida a bicarbonatos.
- Coagulación con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
- Desmineralización parcial
- Reducción de  $\text{SiO}_2$  .  $\text{CO}_2$  y Fe.

En la Tabla I.3.1 se muestra el resultado del análisis químico del agua a la salida de la Planta de Pretratamiento.

El diagrama de la página siguiente muestra la secuencia que tiene el agua dentro de la Planta.

## DIAGRAMA DE PRETRATAMIENTO

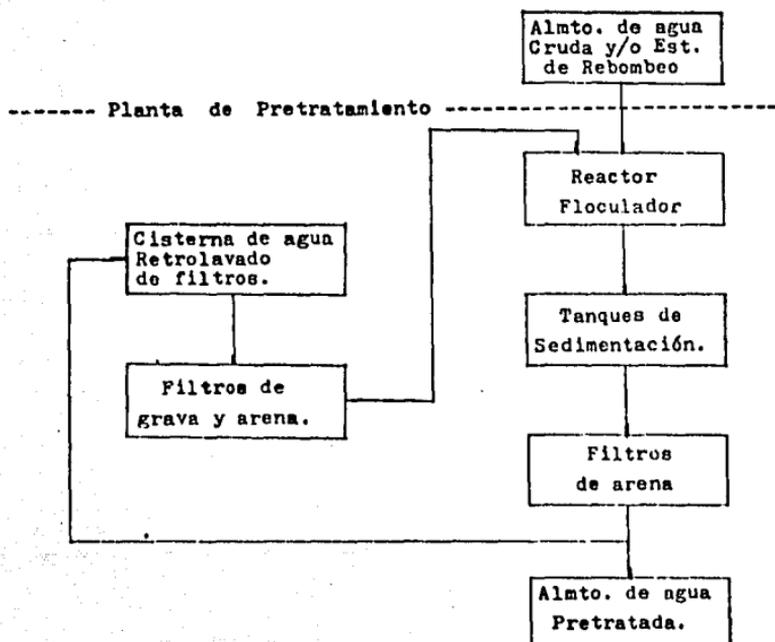


TABLA I.3.1 CALIDAD DEL AGUA PRETRATADA

|                               | p.p.m. | ppm como CaCO <sub>3</sub> | p.p.m. Límite. |
|-------------------------------|--------|----------------------------|----------------|
| <b>Cationes</b>               |        |                            |                |
| Ca <sup>++</sup>              |        | 20.5                       |                |
| Mg <sup>++</sup>              |        | 45.1                       |                |
| Na <sup>+</sup>               |        | 456.5                      |                |
| K <sup>+</sup>                |        | 32                         |                |
| <b>Aniones</b>                |        |                            |                |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |        | 0                          |                |
| OH <sup>-</sup>               |        | 0                          | 10-30          |
| CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>  |        | 100.2                      |                |
| Cl <sub>2</sub> <sup>-</sup>  |        | 273.1                      |                |
| SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>  |        | 180.9                      |                |
| SiO <sub>2</sub>              | 40     |                            | 60             |
| STD                           | 775    |                            |                |
| S.S.                          | 0      |                            |                |
| Mat. org.                     | 0      |                            |                |
| Turbiedad                     | 0      |                            |                |
| Dureza Total                  |        | 65.7                       | 100            |
| Alc "P"                       |        | 0                          |                |
| Alc "M"                       |        | 0                          |                |
| Fe                            | 0      |                            |                |
| S                             | 0      |                            |                |
| Al                            | 0      |                            |                |
| Zn                            | 0      |                            |                |
| Ni                            | 0      |                            |                |
| pH                            | 10.1   |                            |                |
| Temperatura                   | 23°C   |                            |                |
| PO <sub>4</sub> <sup>=</sup>  | 0      |                            |                |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0      |                            |                |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0      |                            |                |

### I.3.2 POTABILIZACION.

El aspecto del agua no basta para saber si es apropiada para el consumo humano, pues puede contener sustancias nocivas que actuen como venenos, aunque de efecto lento, o bacterias y otros parásitos que produzcan enfermedades y que no sean apreciables a simple vista.

Para producir agua potable en la Refinería, al caudal de llegada de la Planta de Protratamiento se hace pasar por filtros de carbón activado y clorándose a 0.6 ppm a la salida de éstos, para posteriormente ser distribuido a los lugares de consumo. Ver diagrama de Potabilización.

En la Tabla I.3.2 se el resultado del análisis químico de calidad del agua a la salida del Tratamiento de potabilización y puede observarse que las posibles sustancias nocivas están ausentes.

## DIAGRAMA DE POTABILIZACION

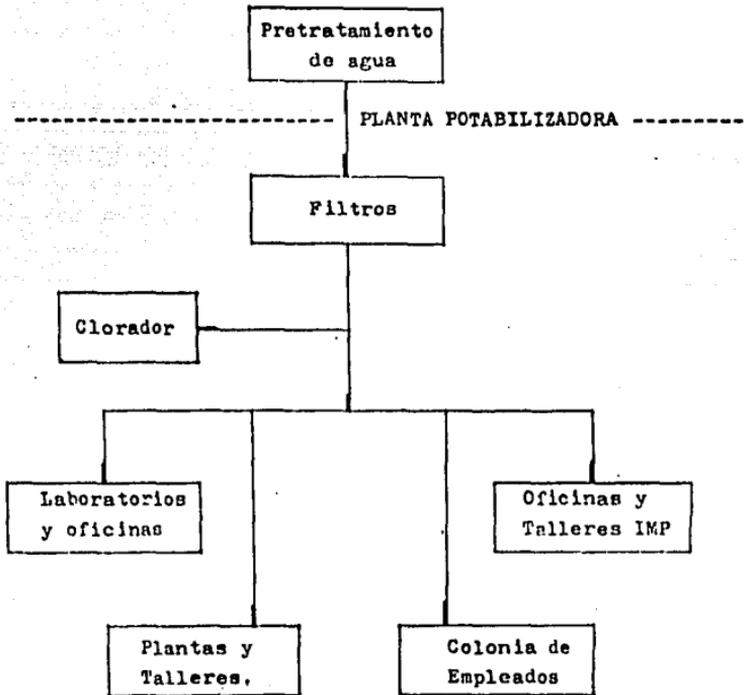


TABLA I.3.2 ANALISIS DEL AGUA POTABLE.

| PRUEBAS              |                          | Resultado | Especif. |
|----------------------|--------------------------|-----------|----------|
| Dureza Total         | ppm como $\text{CaCO}_3$ | 122       | 300 Máx. |
| Alcalinidad          | " " "                    | 70        | 400 "    |
| Sólidos Totales      | p.p.m.                   | 670       | 1 000 "  |
| Turbiedad            | Unidad Jackson           | 4         | 10 "     |
| Magnesio             | p.p.m.                   | 17        | 125 "    |
| Fierro               | "                        | 0         | 0.3 "    |
| Cobre                | "                        | 0         | 2 "      |
| Plomo                | "                        | 0         | 0.1 "    |
| pH                   |                          | 9         | 10.6 "   |
| Colonias Bacterianas | Bac/ ml                  | 2         | 200 "    |
| Microrganismos coli  | "                        | Ausentes  | 20 "     |

### I.3.3 PLANTA DESMINERALIZADORA Y DESAEREADOR

Del total del agua pretratada que llega a la planta Desmineralizadora más de la mitad pasa a través de las unidades catiónicas débiles en donde se abate la dureza en un 85 %. Este efluente se une al resto en las unidades catiónicas fuertes, en donde la dureza se abate a cero. Posteriormente el agua es llevada a una torre descarbonatadora en donde es eliminado la mayor parte del bióxido de carbono. El agua es colectada en una cisterna para ser enviada a los intercambiadores aniónicos y eliminarle los cloruros, sulfatos, el residuo de  $\text{CO}_2$  y reducir el sílice ( $\text{SiO}_2$ ) a un valor de 0.2 ppm.

Con la finalidad de mejorar la calidad del agua el efluente se hace pasar por la Unidad Pulidora para abatir los sólidos disueltos a un valor de 10 ppm, el  $\text{OH}^-$ , el  $\text{SiO}_2$  y posible dureza remanente. El agua ya pulida se manda a almacenamiento en donde se envía a un desaereador para subir la temperatura y abatir el oxígeno a un valor de 0.005 ppm, la cual es adecuada para ser usada en calderas. Ver resultado de análisis químico en la tabla I.3.3.

El diagrama de la siguiente página muestra la secuencia del flujo en el tratamiento de desmineralización y desaeración.

## PLANTA DESMINERALIZADORA Y DESAERADOR

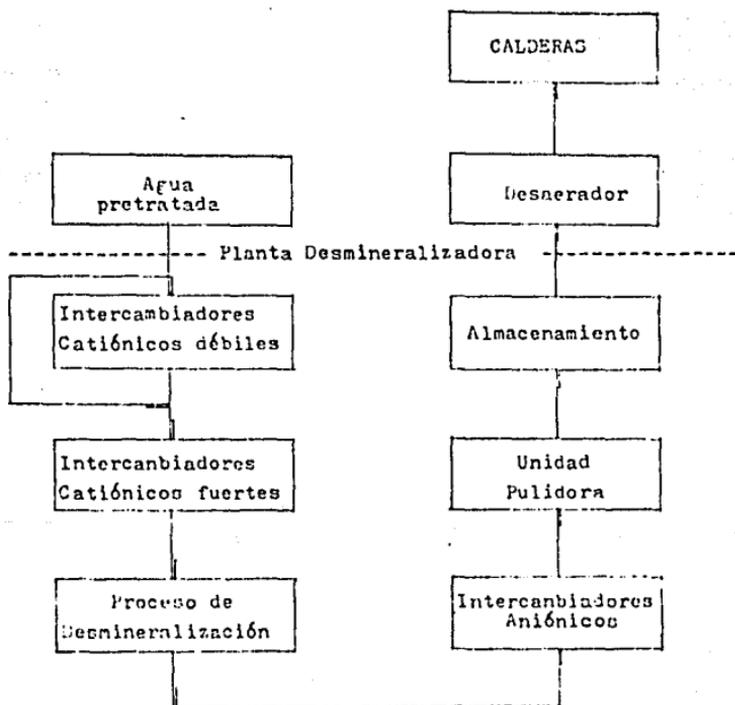


TABLA I.3.3 RESULTADOS DE OPERACION DE LA PLANTA PULIDORA

|                  | p.p.m. |
|------------------|--------|
| Calcio           | 0.0    |
| Magnesio         | 0.0    |
| Sodio            | 1.0    |
| Fe               | 0.0    |
| Bicarbonatos     | 0.0    |
| Carbonatos       | 0.0    |
| Hidróxidos       | 1.0    |
| Cloruros         | 0.0    |
| Sulfatos         | 0.0    |
| Nitratos         | 0.0    |
| SiO <sub>2</sub> | 0.05   |
| CO <sub>2</sub>  | 0.0    |
| O <sub>2</sub>   | 0.005  |
| Aceite           | 0.1    |

C A P I T U L O      I I

ASPECTOS GEOLOGICOS  
DE LA  
ZONA EN ESTUDIO

## II.1 GEOLOGIA REGIONAL.

La zona se encuentra localizada fuera de la Cuenca de México, prácticamente en la zona limítrofe norte del espacio norte de dicha cuenca.

Consecuentemente, las manifestaciones y episodios geológicos que se han suscitado, así como las características litoestratigráficas y estructurales, guardan una gran similitud con las que aparecen en esa parte norte de la Cuenca de México.

Esta zona del altiplano, junto con la Cuenca de México, quedan comprendidos dentro de una grandiosa zona volcánica que atraviesa la República Mexicana de Oeste a Este y ocupa, por lo tanto, un lugar donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde el principio del periodo Terciario, en el cual empezaron a aparecer sedimentos de origen volcánico.

Las erupciones aparecidas en distintos ciclos formaron acumulaciones tan extraordinarias de lavas, tobas y brechas que han originado que en la actualidad no existan afloramientos de elementos de calizas marinas en el área, que constituyen el basamento de la Cuenca de México, siendo la excepción, las venta-

-nas de sedimentos marinos cretácicos que aparecen al sur de la cuenca, por el alto Amacuzac y al norte de ella, por la Región de Tula, afloramientos que se presentaron en anticlinales dirigidos generalmente en dirección norte.

En el plano # 1, se muestra la geología de la zona, formado principalmente de las cartas geológicas del INEGI, las cuales fueron modificadas ligeramente de acuerdo a las aportaciones de la fotogeología y recorridos de campo realizados en estudios previos al proyecto.

Puede observarse que en general la zona está formada por rocas calizas, areniscas, conglomerados, así como formaciones salinas predominantemente yesosas y por depositaciones aluviales recientes.

Una porción de estas formaciones son de permeabilidad reducida, tales como las calizas y las arcillas. Por otro lado las areniscas y los conglomerados favorecen la circulación de agua. Sin embargo, se hallan grandes caudales de importancia por tratarse de calizas del periodo Terciario, quedando comprendidas en las épocas del oligoceno a la del plioceno.

Las rocas basálticas están representadas por andesitas

- y basaltos que ocurren en forma de corrientes lávicas, tobas líticas y aglomerados.

Los afloramientos importantes de este tipo de rocas se tienen a lo largo de los cauces de los ríos Tula y Salado, constituyendo además, el armado principal de los cerros El Huitel, Colorado y Xicuco.

Los materiales piroclásticos que forman el relleno del Valle de Tula, están formados por tobas pumíticas, derivadas de cenizas correlacionables con las series de Nochistongo y Requena. Estos depósitos en la región de Nochistongo y Tula, incluyen importantes espesores de tobas lacustres bentoníticas.

Por los sondeos que se han realizado en las inmediaciones de Tula se tiene conocimiento que los depósitos continentales de esa parte alcanzan espesores hasta de 250 m., observándose dos tipos de tobas: las superficiales entre 80 y 100 metros de profundidad, que son más arenosas y con lentes de carbonato de calcio (caliche), y que pueden considerarse como poco permeables a permeables, favoreciendo consecuentemente, a la recarga del acuífero; las tobas más profundas son, por lo general, arcillas de tipo bentonítico, constituyendo una zona de acuíclusa.

Se puede observar que en la zona próxima a Tula, o a las instalaciones de Petróleos Mexicanos, el espesor de materiales tobáceos es muy grande.

Las rocas terrígenas, de naturaleza calcárea, se detectan a 375 metros de profundidad y pueden ser correlacionables con la formación Mezcala.

Hacia la zona noroeste de Tula, los derrames basálticos se encuentran a poca profundidad, e inclusive se tienen afloramientos que propician la infiltración de agua.

Para concluir, los depósitos recientes están formados por suelos transportados de origen aluvial, producto de la intemperización de los materiales tobáceos regionales y están representados por horizontes no consolidados de arcillas, arenas, gravas y bolcos recientes y que en algunos lugares se intercalan con tobas y fragmentos de roca ígnea.

## II.2 UBICACION DE LOS POZOS.

Como se mencionó en el Capítulo I, la necesidad de satisfacer la demanda futura de agua para uso industrial requiere, como consecuencia, incrementar la extracción de agua por ser los pozos una fuente que ofrece grandes ventajas de economía y operación.

Primeramente son perforados 10 pozos, los cuales cubrieron la Etapa inicial. Actualmente se contempla la perforación de 12 pozos más, cuya pretensión es cubrir completamente la demanda de la Refinería en su operación total.

Es a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos la encargada de autorizar la solicitud, con base en los estudios geohidrológicos que dispone de la zona y siguiendo un programa preestablecido de explotación del acuífero, esto con el fin de proteger descargas comprometidas, quedando bajo la responsabilidad de Petróleos Mexicanos los probables daños que pudiera ocasionar a terceros. Un caso particular es el manantial del cerro El Colorado, del cual se abastecen de agua varias poblaciones.

Para determinar la zona de explotación, considerando -

- todas las apremiantes ya mencionadas, es necesario efectuar una recopilación de información existente en dependencias de Gobierno y organismos descentralizados que hayan realizado trabajos de alumbramiento de aguas subterráneas en la zona, con el fin de conocer las extracciones que se hacen al acuífero, así como las propiedades geohidrológicas más significativas. Es de mucha ayuda también, efectuar trabajos de Fotogeología y así seleccionar la zona para la ubicación de los pozos.

En el plano #2, es mostrada la ubicación del lote de pozos. En dicho sitio se efectuó un trabajo de geofísica consistente en sondeos eléctricos, con el objeto de definir la estratigrafía del subsuelo.

Con el propósito de evitar interferencias entre los pozos, se recomienda que se distancien entre sí, en mil metros o más, favoreciendo esta distribución a que en el futuro Petróleos Mexicanos disponga de zona para ubicar más pozos, así como de impedir, que otra entidad invada con sus instalaciones, el área interna de influencia.

### 11.3 HIDROLOGIA DEL SUBSUELO.

Esta fuera de duda que la circulación del agua en estado líquido no se realiza desde el mar hacia la tierra, como antiguamente se creía. Por el contrario, el ciclo normal que las aguas siguen comienza en la evaporación que se produce en las superficies libres, tanto en los mares como en los lagos y ríos a la que se suma la transpiraciones de los seres vivos, cargándose así la atmósfera de vapor de agua que precipita en forma de lluvia, nieve o granizo, sobre la tierra evaporándose de nuevo parcialmente y corriendo el resto hacia el mar para cerrar el ciclo, bien resbalando por encima de la corteza terrestre, o bien infiltrándose en ella y constituyendo así las aguas subterráneas.

Una vez que el agua ha penetrado en el terreno, su régimen depende de la naturaleza del subsuelo y de su permeabilidad, variando según se trate de formaciones porosas o fisuradas.

El agua procedente de las precipitaciones, comienza a descender por efecto de la gravedad, a través de los intersticios que existen entre las partículas. No obstante, este descenso de las aguas por el subsuelo no tiene lugar en todo su vo-

-lumen, sino que una porción más o menos grande se evapora, bien directamente, o mediante la transpiración de los vegetales que la absorben. La zona del subsuelo en que tiene lugar este fenómeno recibe el nombre de zona de evaporación.

La porción de agua que sigue penetrando una vez pasada la zona de evaporación, tiende a llenar los poros del terreno, sustituyendo parcialmente el aire que anteriormente ocupaba los huecos y continúa su descenso hasta encontrar una capa impermeable, o poco permeable. Quedan así definidas otras dos zonas, la llamada de aereación y la de saturación, ésta última es la que contiene al manto freático y en la que puede fluir fácilmente el agua hacia una dirección determinada cuando las presiones lo favorezcan.

La distribución del agua a través de las formaciones geológicas del subsuelo, depende de los siguientes factores:

- Clima actual, reciente o pasado
- Naturaleza del material que forma el subsuelo de la región.
- Estratigrafía (secuencia y distribución de los diferentes tipos de materiales).
- Estructura geológica (ubicación especial de los di-

ferentes unidades estratigráficas).

- Topografía o morfología de la superficie de la región.

Dos ciencias importantes intervienen en gran medida para el estudio del subsuelo: por una parte la Geología, contribuyendo en el análisis del material que lo constituye, y por otra, la Hidrología, que se interesa en los espacios vacíos que existan entre las partículas componentes del subsuelo. Es la naturaleza del material quien determina el tamaño, la interconexión y la distribución de los espacios vacíos.

La magnitud de los espacios abiertos, toma en consideración que no todos pueden transmitir agua, ya que las pequeñas aberturas pueden atraer las partículas de agua mediante fuerzas intermoleculares. La magnitud de dichas aberturas puede variar considerablemente siendo extremadamente difícil, si no es que imposible, representarlas numéricamente, por lo que los Hidrólogos enuncian esta magnitud, como la capacidad de una cierta área de suelo para transmitir agua.

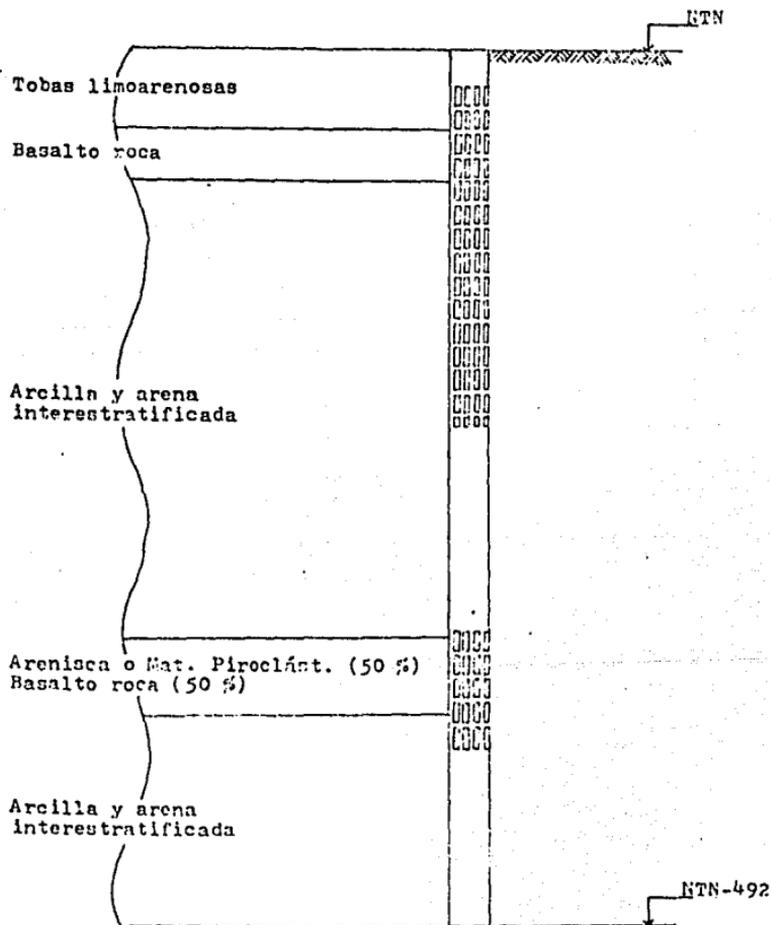
Cuando lo mencionado anteriormente se define en términos de la cantidad de agua que pasa por una unidad de área, bajo un gradiente hidráulico unitario, se le denomina Permeabilidad, y así mismo son definidos otros dos parámetros, el de -

Transmisibilidad, que nos indica el agua que se mueve a través de la formación, y el de Almacenamiento, indicando la cantidad de agua que puede ser removida por bombeo. (Ver apéndice).

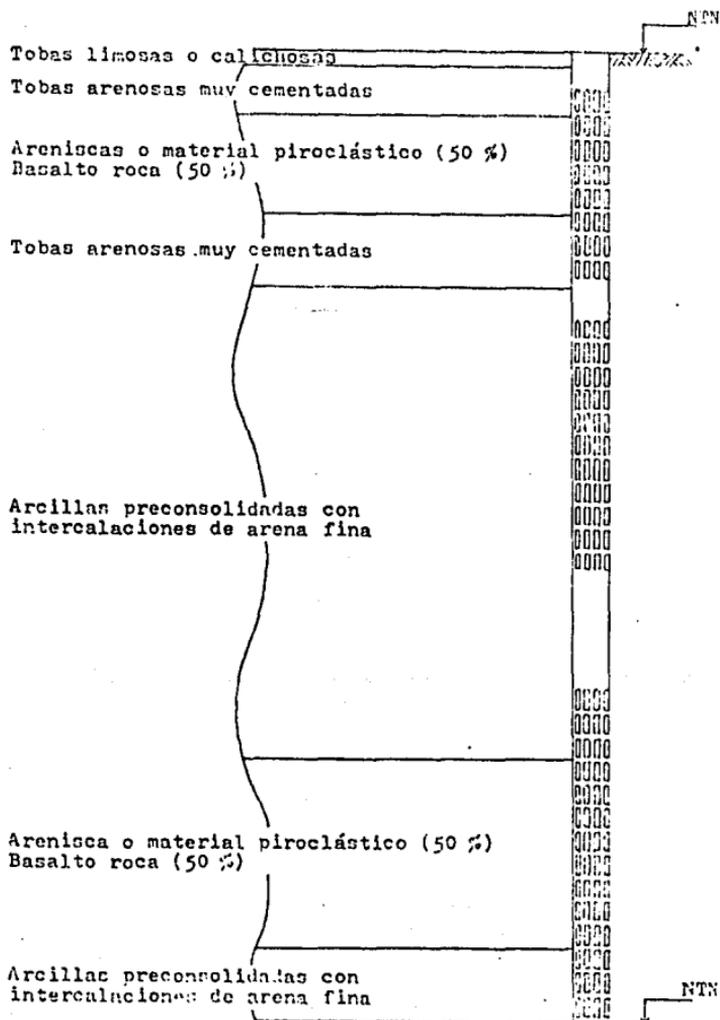
Por lo anterior expuesto puede notarse que en los valores de Transmisibilidad y Almacenamiento, para una formación específica, interviene de manera significativa la constitución del suelo, así como todos los efectos provocados por las condiciones existentes durante las pruebas de bombeo, necesarias para la determinación de tales parámetros.

En complemento a este capítulo, y para tener una idea más clara de la constitución del subsuelo en que se aloja el acuífero que abastece de agua a la Refinería; es de mucha importancia el conocimiento de sus características geológicas para el análisis de la potencialidad del mismo, para lo cual presentamos cortes geológicos de algunos de los pozos del área de Teocalco.

## CORTE GEOLOGICO, POZO No. 3



## CORTE GEOLOGICO, POZO No. 7



## CORTE GEOLOGICO, POZO No. 5

Tobas limoarenosas

Basalto roca

Corrientes de basalto interestratificado

Tobas limoarenosas

Arcilla preconsolid. c/intercalación de arena fina

Tobas limoarenosas  
Arcilla preconsolidada con intercalaciones  
de arena gruesa

Arcilla preconsolid. c/intercalación de arena fina

Tobas limoarenosas

Arcilla preconsolidada con intercalaciones  
de arena gruesaArcilla preconsolidada con intercalaciones  
de arena finaArcilla preconsolidada con intercalaciones  
de arena gruesaLutitas calcáreas tobáceas y  
corrientes de basalto

Basalto roca

Corrientes de basalto interestratificado

Lutitas calcáreas tobáceas con  
corrientes de basalto

Areniscas o material vitroclástico

Lutita calcárea tobácea c/corrientes de basalto

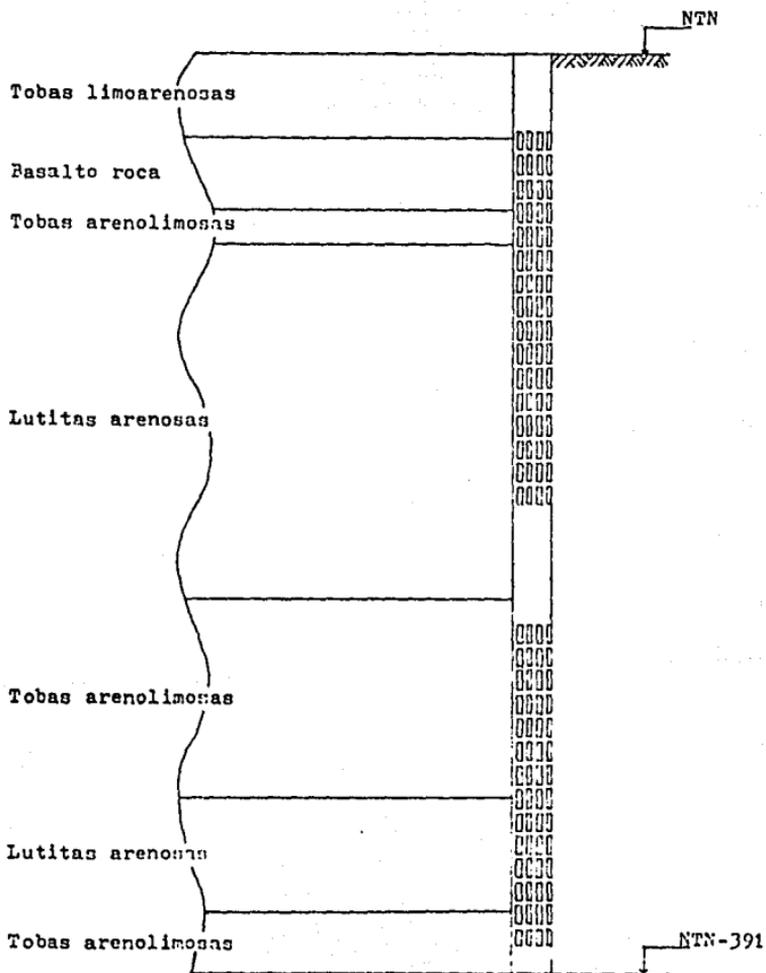
Basalto roca

NTN-412

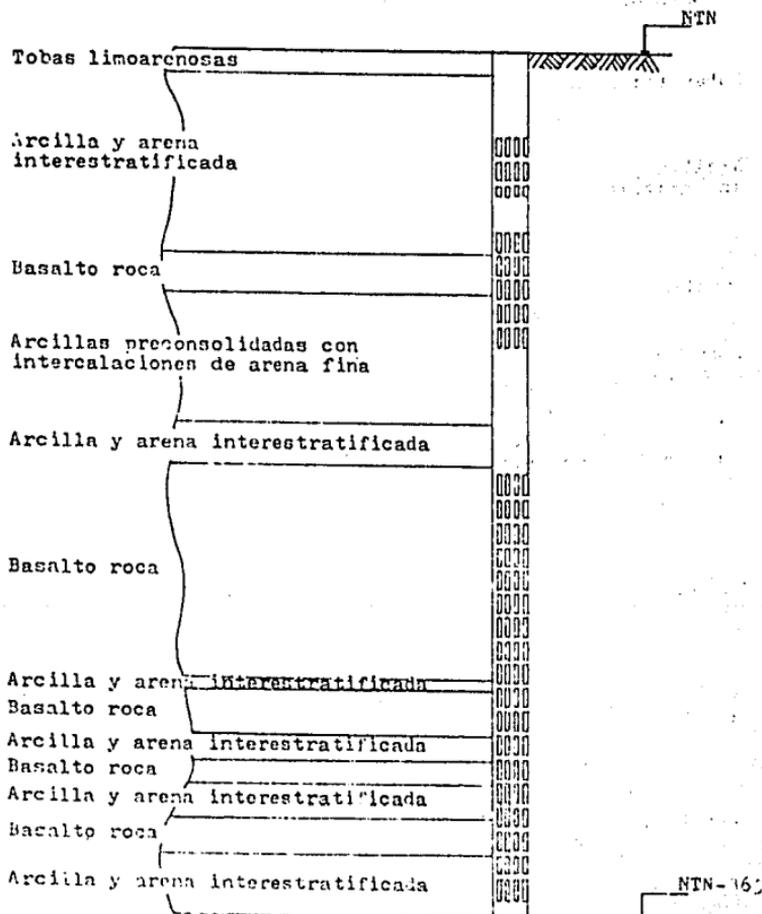




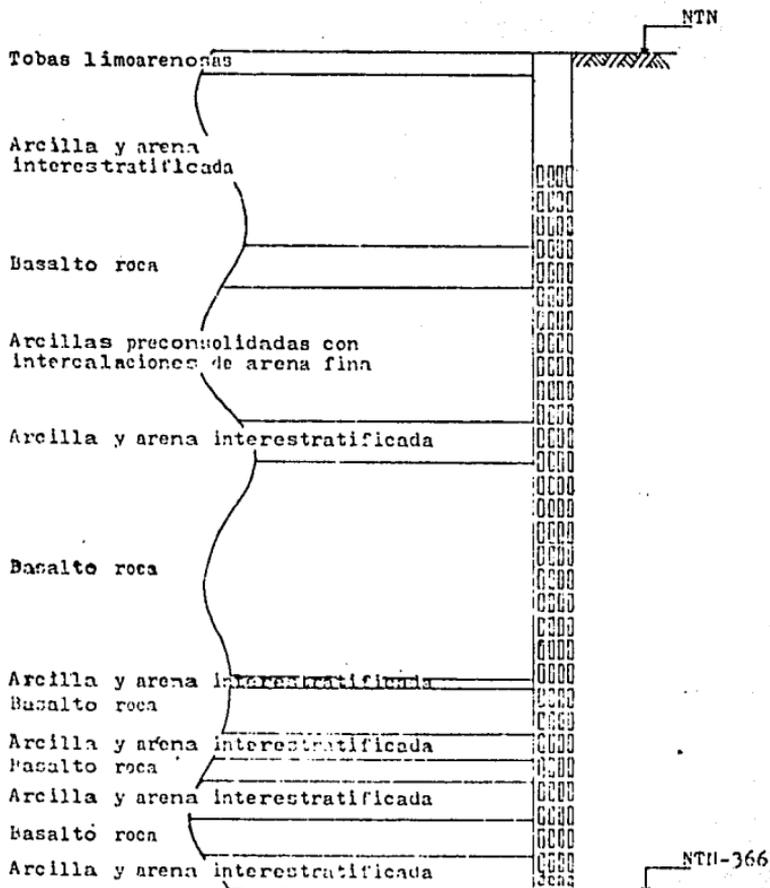
## CORTE GEOLOGICO, POZO No. 13



## CORTE GEOLOGICO, POZO No. 19



## CORTE GEOLOGICO, POZO No. 21







C A P I T U L O    I I I

METODO DE COOPER PARA LA DETERMINACION

DE LAS CONSTANTES ACUIPERAS.

TRANSMISIBILIDAD

Y

ALMACENAMIENTO

### III.1 TEORIA ELEMENTAL DEL METODO DE COOPER.

Régimen inestable de escurrimiento en un medio capilar radial. Acuífero confinado.

La fórmula de régimen inestable o de no equilibrio, que desarrolló Theis en 1935, toma en cuenta el efecto del tiempo de bombeo en la descarga y puede predecir el abatimiento sin tener que esperar a que los niveles en los pozos de observación se hayan establecido, así también los parámetros del acuífero se pueden determinar a partir de las mediciones abatimiento-tiempo realizadas en un sólo pozo, en vez de utilizar dos pozos de observación como lo exigiría el uso de la fórmula de régimen establecido.

Partiendo de la fórmula de Theis se obtendrá la expresión que se utilizará en el método de Cooper.

$$a = \frac{q}{4\pi T} w(u) \dots\dots\dots (A)$$

a: abatimiento, en metros, en el punto de interés con bombeo a gasto constante.

Q: gasto de bombeo, en  $m^3/\text{seg}$

W(u): función de pozo, que corresponde a la siguiente integral:

$$\int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \dots$$

donde:

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

r: distancia, en metros, del centro del pozo de bombeo al centro del pozo de observación.

S: coeficiente de almacenamiento del acuífero, adimensional.

T: coeficiente de transmisibilidad, en  $m^2/s$ .

t: tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo hasta la medición del abatimiento, en segundos.

\* Para la deducción de la fórmula de Theis, ver

apéndice.

Trabajando con la función de pozo, Jacob observó que para valores grandes de t (valores pequeños de u;  $u < 0.02$ ) los términos más allá de  $\ln(u)$  de la serie convergente, no influyen

significativamente en los valores de abatimiento, y por lo tanto, dichos valores se ajustan sensiblemente a una recta, cuando se grafica en papel semilogarítmico, abatimientos contra tiempos. Ver fig. III.1

Entonces, la ecuación de Theis queda:

$$a = \frac{q}{4\pi T} \left[ -0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right] \dots\dots\dots (B)$$

Ahora si  $\ln X = 0.5772$  ;  $X = 1.78104$

Entonces:

$$a = \frac{q}{4\pi T} \left[ -\ln(1.78104) - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right]$$

aplicando las leyes de los logaritmos,

$$a = \frac{q}{4\pi T} \left[ \ln \frac{4Tt/r^2 S}{1.78104} \right]$$

$$a = \frac{q}{4\pi T} \left[ \ln \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \right]$$

$$a = \frac{q}{4\pi T} \left[ \ln(2.25Tt) - \ln(r^2 S) \right]$$

$$a = \frac{q}{4\pi T} \left[ \text{Ln}(2.25T/S) - \text{Ln}(r^2/t) \right]$$

$$a = - \frac{q}{4\pi T} \left[ \text{Ln}(r^2/t) - \text{Ln}(2.25T/S) \right]$$

transformando Ln a Log, tenemos:

$$a = - \frac{2.3 q}{4\pi T} \left[ \text{Log}(r^2/t) - \text{Log}(2.25T/S) \right]$$

$$\frac{a}{q} = - \frac{2.3}{4\pi T} \left[ \text{Log}(r^2/t) - \text{Log}(2.25T/S) \right]$$

Esta fórmula es utilizada cuando se tiene un pozo de observación y uno de extracción.

Ahora, para un pozo de observación y dos pozos de extracción 1 y 2:

$$a_1 = - \frac{2.3q_1}{4\pi T} \left[ \text{Log}(r_1^2/t_1) - \text{Log}(2.25T/S) \right]$$

$$a_2 = - \frac{2.3q_2}{4\pi T} \left[ \text{Log}(r_2^2/t_2) - \text{Log}(2.25T/S) \right]$$

$$a_1 + a_2 = - \frac{2.3Q_1}{4\pi T} \text{Log}(r_1^2/t_1) - \frac{2.3Q_2}{4\pi T} \text{Log}(r_2^2/t_2) + \\ + \frac{2.3Q_1}{4\pi T} \text{Log}(2.25T/S) + \frac{2.3Q_2}{4\pi T} \text{Log}(2.25T/S)$$

Dividiendo por  $Q_T$  :  $Q_T = Q_1 + Q_2$  :

$$\frac{a_1 + a_2}{Q_T} = - \frac{2.3Q_1}{4\pi TQ_T} \text{Log}(r_1^2/t_1) - \frac{2.3Q_2}{4\pi TQ_T} \text{Log}(r_2^2/t_2) + \\ + \frac{2.3Q_1}{4\pi TQ_T} \text{Log}(2.25T/S) + \frac{2.3Q_2}{4\pi TQ_T} \text{Log}(2.25T/S)$$

$$\frac{a_1 + a_2}{Q_T} = - \frac{2.3}{4\pi T} \left[ (Q_1/Q_T) \text{Log}(r_1^2/t_1) - (Q_2/Q_T) \text{Log}(r_2^2/t_2) \right] + \\ + \frac{2.3}{4\pi T} \left[ (Q_1/Q_T) \text{Log}(2.25T/S) + (Q_2/Q_T) \text{Log}(2.25T/S) \right]$$

finalmente :

$$\frac{a_1 + a_2}{Q_T} = - \frac{2.3}{4 \pi T} \left[ (Q_1/Q_T) \text{Log}(r_1^2/t_1) - (Q_2/Q_T) \text{Log}(r_2^2/t_2) \right] +$$

$$+ \frac{2.3}{4 \pi T} \left[ \text{Log}((2.25T/S) \left( \frac{Q_1 + Q_2}{Q_T} \right)) \right]$$

Esta expresión se puede generalizar para un pozo de observación y varios de extracción :

$$\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{Q_T} = - \frac{2.3}{4 \pi T} \left[ \sum_{i=1}^n ((Q_i/Q_T) \text{Log}(r_i^2/t_i)) - \text{Log}((2.25T/S) \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \right)) \right]$$

Simplificando :

$$\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{Q_T} = - \frac{2.3}{4 \pi T} \left[ \sum_{i=1}^n ((Q_i/Q_T) \text{Log}(r_i^2/t_i)) - \text{Log}(2.25 T/S) \right]$$

En esta fórmula se observa que el abatimiento total en el pozo de observación, por unidad de gasto total, es igual a la suma de los productos de las fracciones de los gastos de -

- cada pozo, con respecto al gasto total, por los logaritmos respectivos de los cocientes de los cuadrados de las distancias a sus tiempos. Este es el Principio de Superposición.

Si se logran 2 pruebas, con sus respectivos abatimientos ( $s_1$ ), tendremos dos ecuaciones que resolviéndolas simultáneamente nos darán los valores de T y S.

Otra manera de obtenerlas es como lo realiza Cooper.

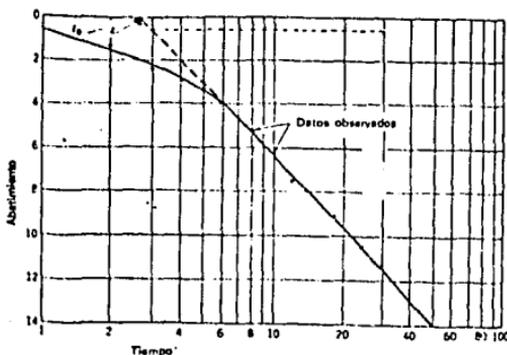


Fig. III.1 Gráfica característica del método de Jacob, en una prueba de bombeo.

Trabajando la parte recta, Cooper deduce los parámetros del acuífero T y S de la manera siguiente :

De la expresión (B), se tiene:

$$a_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left( -0.5772 - \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_1} \right)$$

$$a_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left( -0.5772 - \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_2} \right)$$

Obteniendo el incremento de abatimiento, tenemos :

$$a_1 - a_2 = -\frac{Q}{4\pi T} \left[ \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_2} + 0.5772 \right] + \frac{Q}{4\pi T} \left[ \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_1} + 0.5772 \right]$$

simplificando:

$$a_2 - a_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_1} - \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_2} \right]$$

de acuerdo a las leyes de los logaritmos :

$$a_1 - a_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4T} - \operatorname{Ln}(t_1) - \operatorname{Ln} \frac{r^2 S}{4T} + \operatorname{Ln}(t_2) \right]$$

$$a_2 - a_1 = \frac{Q}{4\pi T} \ln(t_2/t_1)$$

despejando T :

$$T = \frac{Q}{4\pi (a_2 - a_1)} \ln(t_2/t_1)$$

transformando el Ln a Log, se tiene :

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi (a_2 - a_1)} \text{Log}(t_2/t_1)$$

por simplificación, si consideramos el incremento de abatimiento que corresponda a un ciclo completo de la escala logarítmica, resulta que :

$$\text{Log}(t_2) - \text{Log}(t_1) = 1$$

y por consiguiente:

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi (a_2 - a_1) / \text{Log}_{\text{ciclo}}}$$

$$T = \frac{2.3/4\pi}{\Delta a/Q} \dots\dots\dots (1)$$

De la misma gráfica :

$$\text{si } a = 0 : t = t_0$$

entonces :

$$a = 0 = \frac{q}{4\pi T} \left[ -0.5772 - \text{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_0} \right]$$

simplificando y despejando S :

$$0.5772 = - \text{Ln} \frac{r^2 S}{4Tt_0}$$

$$0.5772 = - \text{Ln} \frac{4Tt_0}{r^2 S}$$

$$-0.5772 = - \text{Ln}(Tt_0) + \text{Ln}(r^2 S)$$

$$\text{si } \text{Ln} X = -0.5772 \quad ; \quad X = 0.5615$$

entonces :

$$\text{Ln}(S) = \text{Ln} \frac{4Tt_0}{r^2} + \text{Ln}(0.5615)$$

$$\text{Ln}(S) = \text{Ln} \frac{0.5615(4Tt_0)}{r^2}$$

Obteniendo antilogaritmos :

$$S = \frac{0.5615(4Tt_0)}{r^2}$$

Finalmente :

$$S = \frac{2.25 T}{\frac{r^2}{t_0}} \dots\dots\dots (2)$$

donde :

$$\frac{r^2}{t_0} \text{ es la intersección de la recta para}$$

$$\frac{a}{q} = 0 .$$

Recordemos que la fórmula para el coeficiente de Almacenamiento (2), es para cuando se cuenta con un pozo de extracción y uno de observación.

Para el caso de una descarga múltiple, obtendremos una expresión para S precisamente de la ecuación para esta condición.

$$\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{Q_T} = - \frac{2.3}{4 T} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) - \text{Log}(2.25 T/S) \right]$$

para  $\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{Q_T} = 0$  ;  $t = t_0$  ;

$$0 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) \right)_0 - \text{Log}(2.25 T/S)$$

Ordenando :

$$\text{Log}(2.25 T/S) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) \right)_0$$

Despejando S :

$$\text{Log S} = \text{Log}(2.25 T) - \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) \right)_0$$

$$\text{Log}(S) = \text{Log}(2.25 T) - \text{Log} \left[ \text{Log}^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) \right)_0 \right]$$

Aplicando antilogaritmos y ordenando :

$$S = \frac{2.25 T}{\text{Log}^{-1} \left( \frac{Q_i}{Q_T} \text{Log} \left( \frac{r_i^2}{t_i} \right) \right)} \dots\dots\dots (1')$$

De manera similar se puede proceder para la obtención de T para una descarga múltiple, resultando :

$$T = \frac{2.3/4}{\Delta R_i / Q_T} \dots\dots\dots (2')$$

Las fórmulas (1') y (2') serán utilizadas en la obtención de los parámetros acuíferos de los mantos de los cuales se abastece de agua a la Refinería, para posteriormente, poder predecir su comportamiento.

A continuación se anexan los resultados de las pruebas de bombeo, a gasto constante, efectuadas en el lote de pozos de Petróleos Mexicanos.

DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ABATIMIENTO-TIEMPO  
BOMBEANDO A GASTO CONSTANTE.

| POZO DE EXTRACCION | GASTO DE BOMBEO CTE. |
|--------------------|----------------------|
| #                  | m <sup>3</sup> /seg. |
| 3 ( Teocalco )     | 0.0403               |
| 5 "                | 0.0869               |
| 7 "                | 0.0695               |
| 9 "                | 0.1564               |
| 13 "               | 0.1390               |
| 19 "               | 0.1173               |
| 21 "               | 0.1080               |

| POZO DE OBSERVACION | TIEMPO DE BOMBEO | ABATIMIENTO |
|---------------------|------------------|-------------|
| #                   | (Horas)          | (metros)    |
| 11 ( Teocalco )     | 204              | 0.32        |
|                     | 240              | 0.65        |
|                     | 360              | 1.43        |
|                     | 480              | 2.07        |

### III.2 DETERMINACION DE LAS CONSTANTES ACUIFERAS, TRANSMISIBILIDAD Y ALMACENAMIENTO.

La determinación de los parámetros T y S para un depósito específico es de gran importancia, ya que con ellos se puede inferir el comportamiento del acuífero al cual pertenecen.

El principio de Superposición representa una gran herramienta para analizar las pruebas de bombeo, involucrando la amplia variedad de condiciones del acuífero.

Con lo descrito en el subcapítulo anterior, puede observarse que el método de Cooper posee una gran versatilidad, pues el procedimiento de análisis es el mismo para n descargas diferentes en un simple pozo de bombeo, como para n pozos bombeando a gasto constante, así mismo, si se han obtenido abatimientos o recuperaciones.

De acuerdo a los datos y resultados abatimiento-tiempo contenidos en la tabla del subcapítulo anterior, y de las distancias respectivas de los pozos de bombeo al de observación, tomadas del plano No. 2, se procederá a la determinación de las constantes Transmisibilidad y Almacenamiento del acuífero en estudio.

Ahora sólo nos resta aplicar la siguiente expresión :

$$\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{Q_T} = - \frac{2.3}{4\pi T} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) - 2.25 T/S \right]$$

de la cual sólo tenemos como incógnitas a T y S.

Entonces, necesitamos obtener la siguiente sumatoria para cada prueba de bombeo :

$$\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i)$$

Para facilitar el trabajo manejaremos la información obtenida tal y como se muestra en la Tabla de la siguiente hoja.

Nota: Los valores de la columna  $r_1$ , de la siguiente tabla, fueron obtenidos directamente del plano No. 2 y teniendo como pozo de observación al No.11 de Teocalco (# 13), localizado en el mismo plano.

| (1)  | (2)   | (3)    | (4)     | (5)                        | (6)         | (7)     | (8)     | (9)                     | (10) | (11)     |
|------|-------|--------|---------|----------------------------|-------------|---------|---------|-------------------------|------|----------|
| Fozo | $r_i$ | t      | $r^2/t$ | $\text{Log} \frac{r^2}{t}$ | $q_i$       | (5)x(6) | (7)/(6) | $\text{Log}_{(e)}^{-1}$ | a    | a/ $q_T$ |
|      | (m)   | (s)    |         |                            | ( $m^3/s$ ) |         |         |                         |      |          |
| 3T   | 4540  | 734400 | 28.066  | 1.448                      | 0.0403      | 0.05836 |         |                         |      |          |
| 5T   | 3680  | 734400 | 18.440  | 1.266                      | 0.0869      | 0.05836 |         |                         |      |          |
| 7T   | 2358  | 734400 | 7.571   | 0.879                      | 0.0695      | 0.06110 |         |                         |      |          |
| 9T   | 1115  | 734400 | 1.693   | 0.229                      | 0.1564      | 0.03575 |         |                         |      |          |
| 13T  | 1120  | 734400 | 1.708   | 0.233                      | 0.1390      | 0.03232 |         |                         |      |          |
| 19T  | 4625  | 734400 | 29.126  | 1.464                      | 0.1173      | 0.17176 |         |                         |      |          |
| 21T  | 5340  | 734400 | 38.828  | 1.589                      | 0.1080      | 0.17163 |         |                         |      |          |
|      |       |        |         |                            | 0.7174      | 0.64092 | 0.89339 | 7.823                   | 0.32 | 0.446    |
| 3T   | 4540  | 864000 | 23.856  | 1.377                      | 0.0403      | 0.05552 |         |                         |      |          |
| 5T   | 3680  | 864000 | 15.674  | 1.195                      | 0.0869      | 0.10386 |         |                         |      |          |
| 7T   | 2358  | 864000 | 6.435   | 0.808                      | 0.0695      | 0.05619 |         |                         |      |          |
| 9T   | 1115  | 864000 | 1.439   | 0.158                      | 0.1564      | 0.02471 |         |                         |      |          |
| 13T  | 1120  | 864000 | 1.452   | 0.162                      | 0.1390      | 0.02251 |         |                         |      |          |
| 19T  | 4625  | 864000 | 24.757  | 1.394                      | 0.1173      | 0.16348 |         |                         |      |          |
| 21T  | 5340  | 864000 | 33.004  | 1.518                      | 0.1080      | 0.16401 |         |                         |      |          |
|      |       |        |         |                            | 0.7174      | 0.59029 | 0.82281 | 6.650                   | 0.65 | 0.906    |

## Continuación .....

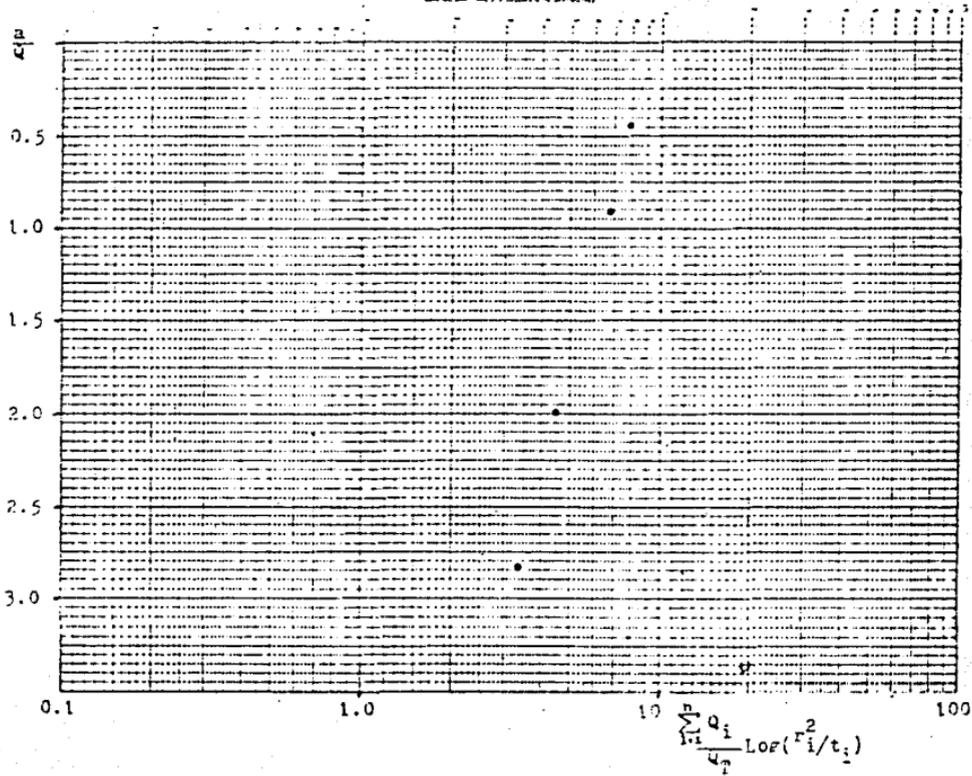
| (1)  | (2)   | (3)     | (4)     | (5)                        | (6)                 | (7)     | (8)     | (9)                      | (10) | (11)    |
|------|-------|---------|---------|----------------------------|---------------------|---------|---------|--------------------------|------|---------|
| Pozo | $r_i$ | $t$     | $r^2/t$ | $\text{Log} \frac{r^2}{t}$ | $q_i$               | (5)x(6) | (7)/(6) | $\text{Log}^{-1}$<br>(8) | $a$  | $a/q_T$ |
|      | (m)   | (s)     |         |                            | (m <sup>3</sup> /s) |         |         |                          |      |         |
| 3T   | 4540  | 1296000 | 15.904  | 1.201                      | 0.0403              | 0.04842 |         |                          |      |         |
| 5T   | 3680  | 1296000 | 10.449  | 1.019                      | 0.0869              | 0.08856 |         |                          |      |         |
| 7T   | 2358  | 1296000 | 4.290   | 0.632                      | 0.0695              | 0.04391 |         |                          |      |         |
| 9T   | 1115  | 1296000 | 0.959   | -0.018                     | 0.1564              | 0.00282 |         |                          |      |         |
| 13T  | 1120  | 1296000 | 0.968   | -0.014                     | 0.1390              | 0.00199 |         |                          |      |         |
| 19T  | 4625  | 1296000 | 16.505  | 1.217                      | 0.1173              | 0.14283 |         |                          |      |         |
| 21T  | 5340  | 1296000 | 22.003  | 1.342                      | 0.1080              | 0.14499 |         |                          |      |         |
|      |       |         |         |                            | 0.7174              | 0.46396 | 0.64672 | 4.433                    | 1.43 | 1.973   |
| 3T   | 4540  | 1728000 | 11.928  | 1.076                      | 0.0403              | 0.04338 |         |                          |      |         |
| 5T   | 3680  | 1728000 | 7.837   | 0.854                      | 0.0869              | 0.07770 |         |                          |      |         |
| 7T   | 2358  | 1728000 | 3.217   | 0.507                      | 0.0695              | 0.03527 |         |                          |      |         |
| 9T   | 1115  | 1728000 | 0.719   | -0.143                     | 0.1564              | 0.02236 |         |                          |      |         |
| 13T  | 1120  | 1728000 | 0.726   | -0.139                     | 0.1390              | 0.01933 |         |                          |      |         |
| 19T  | 4625  | 1728000 | 12.379  | 1.093                      | 0.1173              | 0.12817 |         |                          |      |         |
| 21T  | 5340  | 1728000 | 16.502  | 1.217                      | 0.1080              | 0.13149 |         |                          |      |         |
|      |       |         |         |                            | 0.7174              | 0.37433 | 0.52178 | 3.325                    | 2.08 | 2.885   |

De la Tabla anterior, las columnas (9) y (10), que son resultado del proceso de la información, nos servirán para la construcción de la gráfica, en papel semilogarítmico, de la cual obtendremos los datos necesarios para que, a través de la aplicación de las ecuaciones de Cooper, poder conocer los valores de los parámetros acuíferos Transmisibilidad (T) y Almacenamiento (S).

Entonces, los valores a graficar son :

| AntíLog $\frac{\sum_{i=1}^n q_i}{q_T}$ | Log( $r_1^2/t_1$ ) | $\frac{a}{q_T}$ |
|--|--------------------|-----------------|
| 7.823                                  |                    | 0.446           |
| 6.650                                  |                    | 0.906           |
| 4.433                                  |                    | 1.993           |
| 3.325                                  |                    | 2.825           |

La gráfica se presenta en la siguiente página.



Como se puede observar, los puntos graficados tienen como lugar geométrico sensiblemente una recta, por lo cual realizaremos un ajuste por el método de mínimos cuadrados, cuya ecuación de la recta nos proporcionará unos valores mas representativos.

| X               | Y      | X <sup>2</sup> | XY     |
|-----------------|--------|----------------|--------|
| 0.8934          | 0.446  | 0.7981         | 0.3984 |
| 0.8228          | 0.906m | 0.6770         | 0.7455 |
| 0.6467          | 1.993  | 0.4182         | 1.2889 |
| 0.5218          | 2.835  | 0.2723         | 1.5054 |
| $\Sigma$ 2.8847 | 6.230  | 2.1656         | 3.9382 |

De la expresión de una recta :  $Y = mX + b$  tenemos:

$$m = \frac{\Sigma XY - \frac{\Sigma X \Sigma Y}{n}}{\Sigma X^2 - \frac{(\Sigma X)^2}{n}} = \frac{3.9382 - \frac{2.8847 \times 6.230}{4}}{2.1656 - \frac{(2.8847)^2}{4}}$$

$$m = -6.5045$$

$$b = \frac{\sum Y - m \sum X}{n} = \frac{6.230 - 6.5045 \times 2.8847}{4}$$

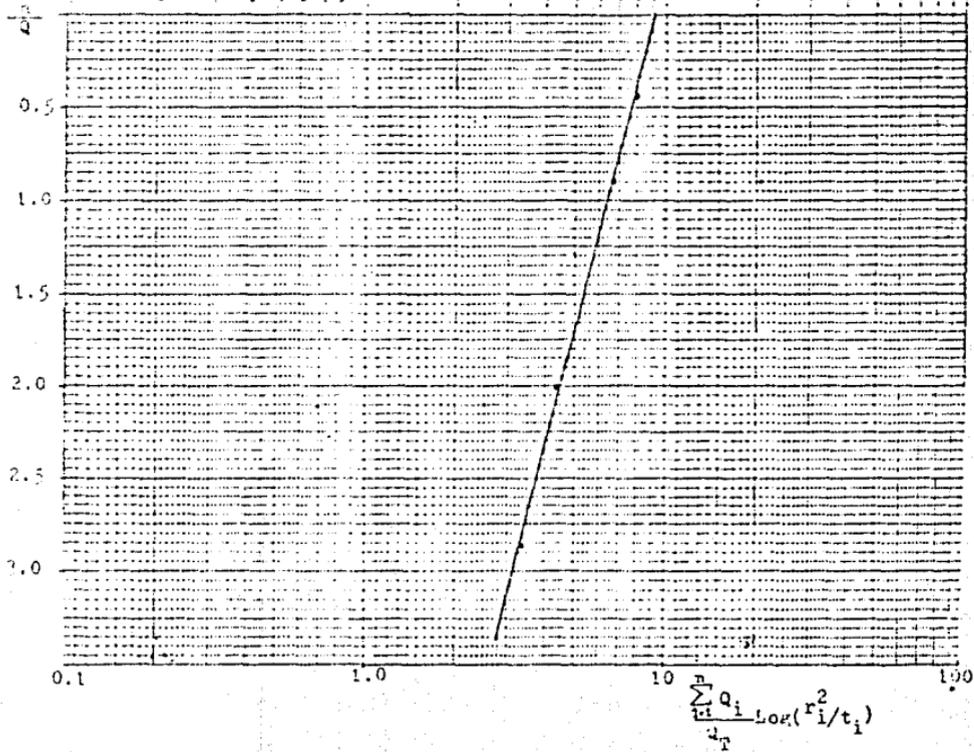
$$b = 6.2484$$

Entonces :

$$Y = - 6.5045 X + 6.2484$$

y los nuevos valores a graficar son :

| X      | AntiLog X | Y      |
|--------|-----------|--------|
| 0.8934 | 7.823     | 0.4374 |
| 0.8228 | 6.650     | 0.8963 |
| 0.6467 | 4.433     | 2.0419 |
| 0.5218 | 3.325     | 2.8544 |



Haciendo uso de la ecuación de la recta obtenida, el valor de

$$\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_T} \text{Log} \left( r_1^2 / t_1 \right)_0 \quad \text{que corresponde a} \quad \left( a / Q_T \right)_0$$

resulta ser :

$$Y = -6.5045(X) + 6.2484 = 0 \quad \text{por lo tanto :}$$

$$X = 0.9606 \text{ y, AntiLog}(X) = 9.13$$

$$\frac{a}{Q} = 6.5045$$

Log 1 ciclo

Ahora sólo nos resta sustituir los valores obtenidos en las ecuaciones de T y S dadas por Cooper.

De la ecuación de la recta obtenida, el valor de :

$$\text{Log}^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{Q_T} \text{Log}(r_i^2/t_i) \right)_0 \quad \text{cuando } (a/Q_T)_0 = 0$$

resulta ser :

$$Y = -6.5045(X) + 6.2484 = 0$$

despejando X :

$$X = 0.9606, \quad \text{y por lo tanto:} \quad \text{Log}^{-1}(X) = 9.130$$

La pendiente de la recta es :

$$\frac{\Delta a_1/Q_T}{\text{Log ciclo}} = 6.5045$$

Sustituyendo los valores antes obtenidos en las relaciones de Cooper (1') y (2'), tendremos los parámetros acuíferos Transmisibilidad y Almacenamiento :

$$T = \frac{2.3/4\pi}{\frac{\Delta a_1/Q_T}{\text{Log ciclo}}} = \frac{2.3/12.5664}{6.5045} = 0.02814 \quad \text{m}^2/\text{s}.$$

ESTA TESIS YA DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$S = \frac{2.25 T}{\text{Log}^{-1}\left(\frac{q_1}{q_T} \text{Log}(r_1^2/t_1)\right)_0} = \frac{2.25 \times 0.02814}{9.13}$$

$$S = 0.00693$$

C A P I T U L O      I V

ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE FUNCIONAMIENTO  
DEL SISTEMA. PARA SATISFACER LA DEMANDA DE AGUA  
PRESENTE Y FUTURA DE LA REFINERIA

#### IV.1 ELEMENTOS PARA EL PROCEDIMIENTO ANALITICO.

En el presente capítulo se analiza el funcionamiento del campo de pozos que abastece de agua a la Refinería "Miguel Hidalgo", tanto del área de Mangas como de Teocalco.

El objetivo es aplicar el método de superposición para conocer el abatimiento en cada uno de los 22 pozos en el periodo comprendido del año de 1977 al año 2022.

Del total de pozos que forman nuestro campo, 18 serán usados para satisfacer la demanda de agua en las diferentes Etapas de crecimiento de la Refinería, y los restantes servirán como relevos en el caso que se necesite dar mantenimiento a otros o cambiar equipos.

En el capítulo anterior mediante el método de Cooper y con los datos de las pruebas de bombeo se obtuvieron los parámetros acuíferos de Transmisibilidad (T) y Almacenamiento (S); para saber los abatimientos que nos interesan aplicamos la fórmula generalizada de Jacob para n pozos de bombeo, la cual tiene su origen en la expresión de Theis ( Ver apéndice ).

Para poder aplicar la fórmula, son necesarios los valores de S y T, las coordenadas, gastos y tiempos de operación de cada uno de los pozos. El número de pozos y sus gastos, son elegidos en base a lo que se les puede extraer y cubriendo la demanda de agua en cada una de las Etapas.

Fórmula de Jacob.

Partiendo de la expresión (B) del capítulo anterior y haciendo:

$$r^2 = (X_1 - X_k)^2 + (Y_1 - Y_k)^2 \quad \text{tenemos:}$$

$$s_1(x, y, t)_1 = \frac{Q_k}{4\pi T} \left[ -0.5772 - \text{Ln} \frac{(X_1 - X_k)^2 + (Y_1 - Y_k)^2}{t_1} \frac{S}{4T} \right] \dots \text{IV.1}$$

donde:

$s_1(x, y, t)_1$  : abatimiento en metros, en la coordenada  $(X_1, Y_1)$  y en tiempo  $t_1$

$(X_1, Y_1)$  : Coordenada de algún punto o pozo en metros, en donde se desea saber el abatimiento.

$(X_k, Y_k)$  : Coordenada en metros, del k-ésimo pozo de bombeo

$Q_k$  : Gasto en  $m^3/s$ , del k-ésimo pozo de bombeo.

$t_1$  : Lapso de bombeo en segundos.

S : Coeficiente de Almacenamiento  $\left(\frac{m/s}{m/s}\right)$

Para nuestro campo de pozos:  $S = 0.00693$

T : Coeficiente de Transmisibilidad  $(m^2/s)$ .

Para nuestro campo de pozos:  $T = 0.02814 m^2/s$ .

Para el caso en que se desee conocer el abatimiento en el  $i$ -ésimo pozo debido a su propia extracción, la fórmula se transforma a:

$$a_2(r, t)_i = \frac{Q_1}{4\pi T} \left[ -0.5772 - \ln \frac{r^2}{t_1} \frac{S}{4T} \right] \dots\dots IV.2$$

donde:

$r$  : Distancia en metros, del centro del pozo al límite del filtro de grava.

Resumiendo:

$a_1$  : abatimiento, en metros, en el  $i$ -ésimo pozo producido por el bombeo del resto de pozos del campo.

$a_2$  : abatimiento, en metros, en el  $i$ -ésimo pozo efecto de su propia extracción.

El abatimiento total en un pozo será entonces, la suma de  $a_1$  más  $a_2$  en el mismo intervalo de tiempo.

En el caso de querer conocer el abatimiento en un punto cualquiera o pozo donde no exista bombeo,  $Q_i$  y por consiguiente,  $a_2$ , serán ceros en la fórmula IV.2.

#### IV.2 ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO PARA LA PRIMERA ETAPA.

Como se mencionó en el capítulo I, en esta etapa la demanda de agua cruda es de  $0.7174 \text{ m}^3/\text{s}$ , que se cubrirá con 7 pozos situados en Teocalco, extrayéndose un gasto particular a cada uno, que es constante del año 1977 al año 1997, a partir del cual sufren un incremento para ayudar a cubrir la demanda de las últimas Etapas.

El procedimiento que se siguió para la determinación del abatimiento final, en cada uno de los pozos, es como se describe a continuación.

Se calculan los abatimientos con las fórmulas IV.1 y IV.2 para cada pozo con su gasto inicial, desde 1977 y hasta el año 2022. Después se vuelven a aplicar las mismas fórmulas para el incremento de gasto a partir de 1997 hasta el final del análisis obteniendo el abatimiento correspondiente, y posteriormente se suman ambos abatimientos en los mismos periodos de tiempo a partir del año del incremento.

En la siguiente tabla se muestran los abatimientos del total de pozos provocado por el bombeo de los 7 pozos que cubren la demanda de esta primera etapa.

| POZO # | COORDENADAS (m) |       | GASTO<br>m <sup>3</sup> /s | ABATIMIENTO (m) |           |       |
|--------|-----------------|-------|----------------------------|-----------------|-----------|-------|
|        | X               | Y     |                            | 1977-1982       | 1982-1987 |       |
| *3T    | 1               | 6760  | 9320                       | 0.1051          | 15.41     | 16.82 |
| 5T     | 2               | 7480  | 8560                       | 0.0869          | 15.41     | 16.82 |
| 7T     | 3               | 8220  | 7570                       | 0.1051          | 16.15     | 17.55 |
| 9T     | 4               | 8880  | 6500                       | 0.1051          | 15.54     | 16.94 |
| 13T    | 5               | 10420 | 4870                       | 0.1051          | 13.93     | 15.34 |
| 19T    | 6               | 9230  | 10330                      | 0.1050          | 15.55     | 16.96 |
| 21T    | 7               | 9980  | 11020                      | 0.1051          | 14.87     | 16.27 |
| 4M     | 8               | 18600 | 4130                       | 0.0             | 5.10      | 6.51  |
| 5M     | 9               | 18330 | 3340                       | 0.0             | 5.08      | 6.49  |
| 6M     | 10              | 18040 | 2480                       | 0.0             | 5.03      | 6.43  |
| 7M     | 11              | 17870 | 1910                       | 0.0             | 4.97      | 6.38  |
| 10M    | 12              | 20100 | 2880                       | 0.0             | 4.46      | 5.87  |
| 11T    | 13              | 9620  | 5700                       | 0.0             | 10.67     | 12.08 |
| 1M     | 14              | 21690 | 3770                       | 0.0             | 4.10      | 5.51  |
| 8M     | 15              | 19320 | 3420                       | 0.0             | 4.77      | 6.17  |
| 9M     | 16              | 18960 | 2320                       | 0.0             | 4.71      | 6.12  |
| 11M    | 17              | 18960 | 1380                       | 0.0             | 4.55      | 5.96  |
| 12M    | 18              | 19910 | 1020                       | 0.0             | 4.24      | 5.65  |
| 3M     | 19              | 19440 | 4270                       | 0.0             | 4.84      | 6.24  |
| 2M     | 20              | 20320 | 4440                       | 0.0             | 4.57      | 5.98  |
| 1T     | 21              | 6040  | 10160                      | 0.0             | 10.01     | 11.42 |
| 15T    | 22              | 6780  | 8000                       | 0.0             | 11.30     | 12.70 |

\* La T significa que el pozo es del área de Teocalco y la M que pertenece a Mangas, numerados según el proyecto.

#### IV.3 ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO PARA LA PRIMERA Y SEGUNDA ETAPAS.

La Segunda Etapa inicia su funcionamiento en el año 1987 demandando un gasto de  $0.424 \text{ m}^3/\text{s}$ , que sumado al de la Primera Etapa dan un total de  $1.1814 \text{ m}^3/\text{s}$ , que será cubierto en su totalidad por los 7 pozos anteriores e incorporándose 5 pozos del área de Mangas.

Los abatimientos en todos los pozos fueron obtenidos de manera análoga que para la Primera Etapa, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Cabe mencionar que los abatimientos se calculan para incrementos de tiempo de 5 años y el valor en la tabla correg ponde al año superior del intervalo, además el valor del abati miento es acumulativo. Se nota en la anterior tabla y en la que sigue, que aunque el pozo no bombee sí sufre abatimiento, provocado por los pozos que sí bombean.

| POZO | #  | COORDENADAS (m) |       | GASTO<br>m <sup>3</sup> /s | ABATIMIENTO (m) |           |
|------|----|-----------------|-------|----------------------------|-----------------|-----------|
|      |    | X               | Y     |                            | 1987-1992       | 1992-1997 |
| 3T   | 1  | 6760            | 9320  | 0.1051                     | 20.36           | 21.85     |
| 5T   | 2  | 7480            | 8560  | 0.0869                     | 20.56           | 21.85     |
| 7T   | 3  | 8220            | 7570  | 0.1051                     | 21.56           | 23.03     |
| 9T   | 4  | 8880            | 6500  | 0.1051                     | 21.17           | 22.67     |
| 13T  | 5  | 10420           | 4870  | 0.1051                     | 20.11           | 21.61     |
| 19T  | 6  | 9230            | 10330 | 0.1050                     | 20.81           | 22.30     |
| 21T  | 7  | 9980            | 11020 | 0.1051                     | 20.16           | 21.65     |
| 4M   | 8  | 18600           | 4130  | 0.0928                     | 19.68           | 21.18     |
| 5M   | 9  | 18330           | 3340  | 0.0928                     | 20.27           | 21.76     |
| 6M   | 10 | 18040           | 2480  | 0.0928                     | 20.24           | 21.74     |
| 7M   | 11 | 17870           | 1910  | 0.0928                     | 19.70           | 21.18     |
| 10M  | 12 | 20100           | 2880  | 0.0928                     | 18.51           | 20.00     |
| 11T  | 13 | 9620            | 5700  | 0.0                        | 16.56           | 18.05     |
| 1M   | 14 | 21690           | 3770  | 0.0                        | 12.85           | 14.35     |
| 8M   | 15 | 19320           | 3420  | 0.0                        | 15.94           | 17.42     |
| 9M   | 16 | 18960           | 2320  | 0.0                        | 15.89           | 17.36     |
| 11M  | 17 | 18690           | 1380  | 0.0                        | 14.98           | 16.28     |
| 12M  | 18 | 19910           | 1020  | 0.0                        | 13.63           | 15.12     |
| 3M   | 19 | 19440           | 4270  | 0.0                        | 15.29           | 16.79     |
| 2M   | 20 | 20320           | 4440  | 0.0                        | 14.14           | 15.63     |
| 1T   | 21 | 6040            | 10160 | 0.0                        | 14.77           | 16.27     |
| 15T  | 22 | 6780            | 8000  | 0.0                        | 16.37           | 17.86     |

Nota: Las coordenadas de todos los pozos fueron obtenidas del plano No. 2, respecto a unos ejes coordenados elegidos arbitrariamente.

#### IV.4 ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO PARA TODAS LAS ETAPAS.

Es en el año de 1997 cuando la Tercera y Cuarta Etapas entran en operación, por lo cual necesitamos bombear en 6 nuevos pozos e incrementar el gasto en 11 de los anteriores ( el pozo #2 se cancela ). La demanda para estas dos últimas etapas es de  $1.224 \text{ m}^3/\text{s}$  y la demanda total es de  $2.4054 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de los gastos de los 12 pozos primeros y el caudal de los nuevos 6 pozos, así como los abatimientos resultantes, hasta el final del análisis, se muestran en la siguiente tabla.

| POZO # | COORD. (m) |       | GASTO<br>m <sup>3</sup> /s | ABATIMIENTO (m) hasta año : |       |       |       |       |       |
|--------|------------|-------|----------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | X          | Y     |                            | 2002                        | 2007  | 2012  | 2017  | 2022  |       |
| 3T     | 1          | 6760  | 9320                       | 0.142                       | 32.39 | 35.68 | 37.36 | 39.41 | 40.54 |
| 5T     | 2          | 7480  | 8560                       | 0.0                         | 28.33 | 31.63 | 33.70 | 35.25 | 36.29 |
| 7T     | 3          | 8220  | 7570                       | 0.142                       | 35.32 | 38.13 | 40.69 | 42.24 | 43.50 |
| 9T     | 4          | 8880  | 6500                       | 0.142                       | 36.28 | 39.58 | 41.65 | 43.20 | 44.45 |
| 13T    | 5          | 10420 | 4870                       | 0.142                       | 36.09 | 39.37 | 41.46 | 43.01 | 44.26 |
| 19T    | 6          | 9230  | 10330                      | 0.142                       | 34.08 | 37.36 | 39.45 | 41.00 | 42.25 |
| 21T    | 7          | 9980  | 11020                      | 0.142                       | 33.35 | 36.64 | 38.72 | 40.28 | 41.51 |
| 4M     | 8          | 18600 | 4130                       | 0.142                       | 41.88 | 45.16 | 47.25 | 49.79 | 50.04 |
| 5M     | 9          | 18330 | 3340                       | 0.142                       | 45.13 | 46.75 | 49.53 | 50.38 | 51.69 |
| 6M     | 10         | 18040 | 2480                       | 0.142                       | 43.60 | 46.88 | 48.96 | 50.56 | 51.76 |
| 7M     | 11         | 17870 | 1919                       | 0.142                       | 42.47 | 45.76 | 47.85 | 49.40 | 50.64 |
| 10M    | 12         | 20100 | 2880                       | 0.142                       | 41.72 | 44.12 | 47.09 | 48.64 | 49.89 |
| 11T    | 13         | 9620  | 5700                       | 0.142                       | 36.58 | 39.86 | 41.97 | 43.50 | 44.75 |
| 1N     | 14         | 21690 | 3770                       | 0.142                       | 34.96 | 40.25 | 42.56 | 43.88 | 45.13 |
| 8M     | 15         | 19320 | 3420                       | 0.142                       | 42.09 | 46.38 | 48.45 | 50.42 | 51.26 |
| 9M     | 16         | 18960 | 2320                       | 0.142                       | 43.81 | 47.10 | 49.19 | 50.74 | 51.99 |
| 11M    | 17         | 18960 | 1380                       | 0.142                       | 42.43 | 45.21 | 47.90 | 48.83 | 50.08 |
| 12M    | 18         | 19910 | 1020                       | 0.142                       | 39.68 | 43.97 | 45.05 | 46.60 | 47.84 |
| 3M     | 19         | 19440 | 4270                       | 0.0                         | 36.39 | 39.77 | 41.84 | 43.42 | 44.70 |
| 2M     | 20         | 20320 | 4440                       | 0.0                         | 34.22 | 37.55 | 39.67 | 41.35 | 42.53 |
| 1T     | 21         | 6040  | 10160                      | 0.0                         | 26.64 | 29.97 | 32.09 | 33.67 | 34.95 |
| 15T    | 22         | 6780  | 8000                       | 0.0                         | 29.50 | 32.83 | 34.95 | 36.54 | 37.81 |

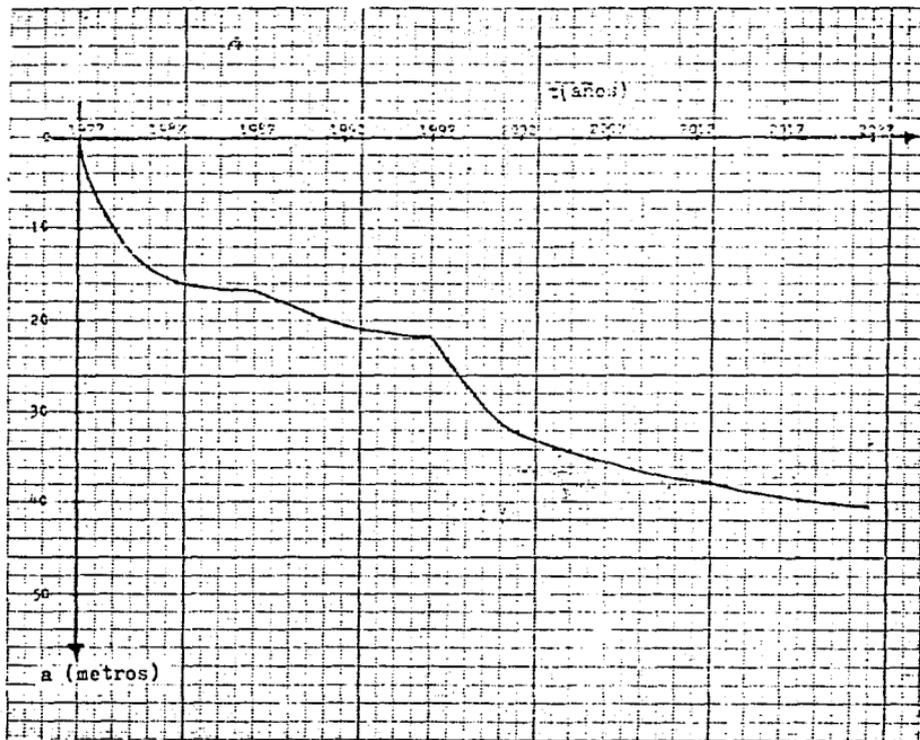
#### IV.5 GRAFICAS ABATIMIENTO-TIEMPO PARA DIFERENTES POZOS.

Debido a que las necesidades de agua de la Refinería se van incrementando de acuerdo a sus Etapas de crecimiento, no todos los pozos empiezan a funcionar en el mismo año, ni durante el mismo tiempo, ni con los mismos gastos. En vista de tales condiciones tenemos pozos con diferente características de funcionamiento, lo cual mejor se aprecia en gráficas abatimiento-tiempo.

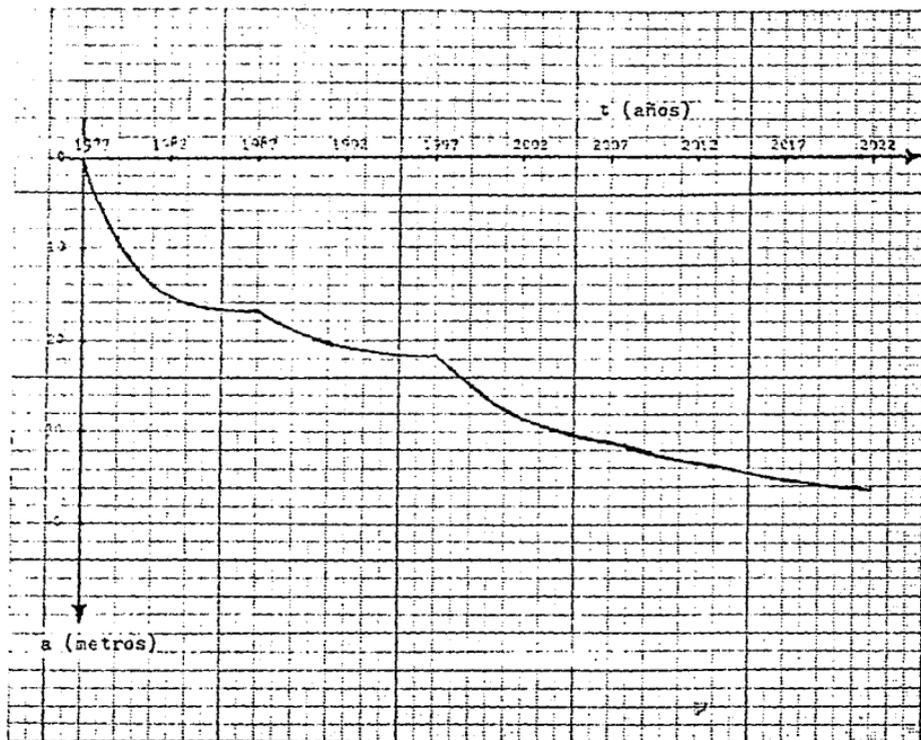
A continuación se seleccionaron 5 pozos que son representativos de estas condiciones.

- a).- Pozo # 1: Bombea durante 20 años contados a partir del inicio del análisis con un gasto de  $0.1051 \text{ m}^3/\text{s}$ , para que en 1997 sufra un incremento de  $0.0369 \text{ m}^3/\text{s}$ , sostenido hasta el final. Ver gráfica # IV.5.1
- b).- Pozo # 2: Sólo funciona los primeros 20 años con gasto constante de  $0.0869 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ver gráfica # IV.5.2
- c).- Pozo # 8: Empieza a operar 10 años después de iniciado el análisis (1987), con un gasto de  $0.0928 \text{ m}^3/\text{s}$ , y 10 años después (1997) sufre un incremento de  $0.0492 \text{ m}^3/\text{s}$ , constante hasta el final (2022). Ver gráfica # IV.5.3

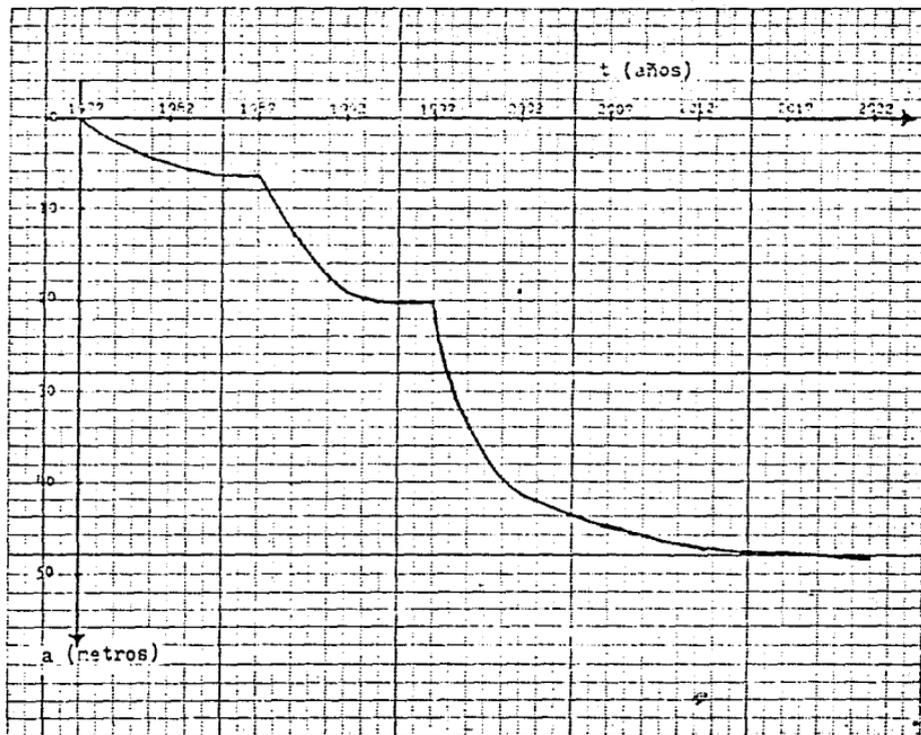
- d).- Pozo # 13: Opera los últimos 25 años del análisis, con gasto de  $0.142 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ver gráfica # IV.5.4
- e).- Pozo # 21: En el periodo considerado no se pone en operación, o sea, que sólo sufre abatimiento por el efecto de los pozos que sí están en operación. Ver gráfica # IV.5.5



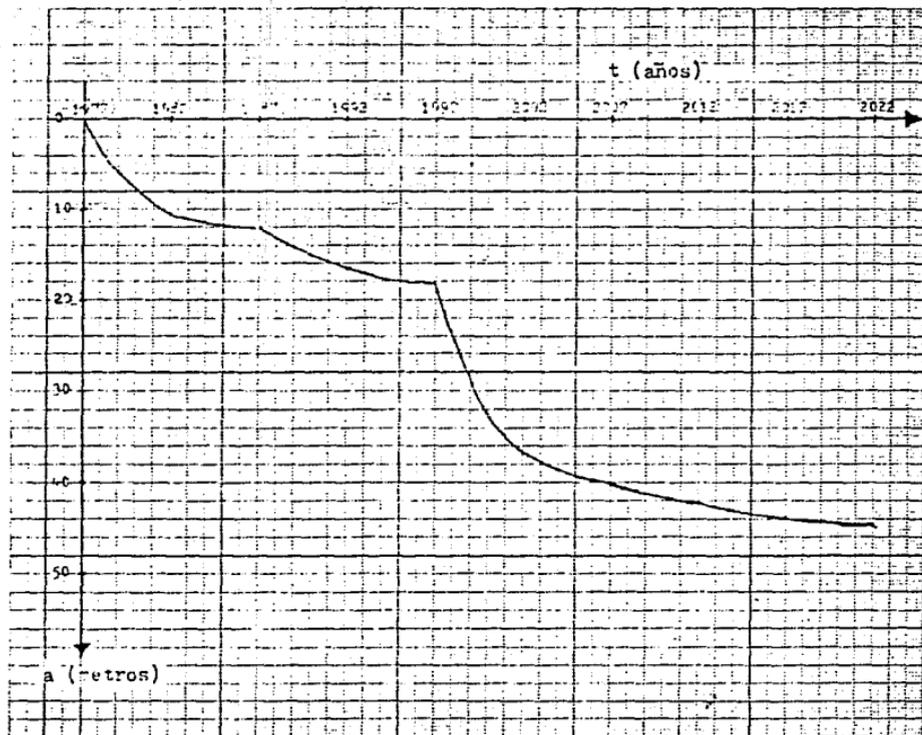
Gráfica # IV.5.1



Gráfica # IV.5.2



Gráfica # IV.5.3



Gráfica # IV.5.4

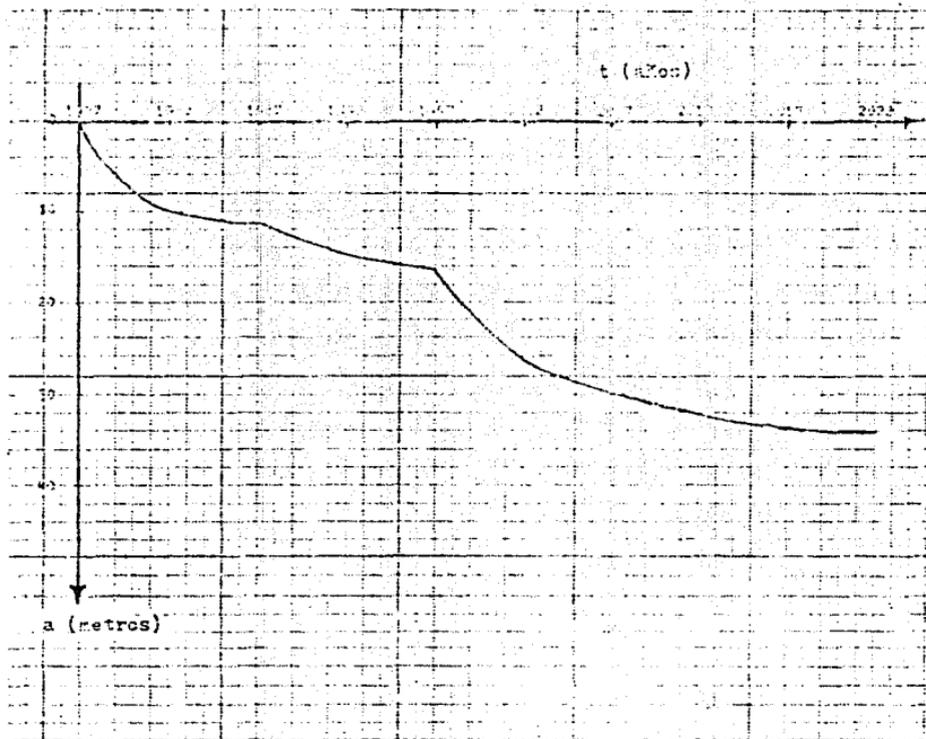


Gráfico 10.5.5

C O M E N T A R I O S

Y

R E C O M E N D A C I O N E S

El agua subterránea como fuente de abastecimiento, es la que mejores perspectivas de explotación ofrece.

La calidad del agua subterránea se modifica, tanto por los aportes de agua al acuífero, como por su contacto con la formación geológica con la que, por la lentitud del flujo, tiene intercambio iónico en procesos de adsorción y disolución de las sustancias químicas presentes.

Es de vital importancia pues, los análisis de calidad físicos, químicos y bacteriológicos del agua del acuífero antes de explotarlo y durante el tiempo de extracción ya que puede verse limitada su utilización o requerir de un proceso de purificación.

Debido a las formaciones y a la profundidad de extracción en nuestro acuífero, la contaminación no llega a ser significativa; aunque el agua del acuífero presenta altos valores de dureza y por ausencia de otras fuentes de abastecimiento, es aceptable para el uso industrial.

Es necesario definir la geología y geometría de una formación del subsuelo que contenga agua y que pueda ser aprovechada, para lo cual nos servimos de la exploración geofísica,

de la exploración subterránea por medio de sondeos y pozos, la fotogeología, etc.

La información geológica de la región, proporcionada por Petróleos Mexicanos, nos indica que el acuífero se aloja en un subsuelo compuesto por basalto fracturado, arcillas, arenas, y en menores proporciones, areniscas, material piroclástico, tobas, etc.

Los magmas básicos (basaltos y andesitas) son fluidos por lo que forman coladas delgadas que se enfrían rápidamente y forman vesículas y grietas de contracción lo que les da porosidad y permeabilidad.

Las tobas, cenizas y conglomerados son más permeables entre menos soldados estén sus granos.

Los sedimentos no endurecidos comprenden los depósitos de boleos, gravas, arenas, limos y arcillas y combinación de los mismos poseen una gran variación en su granulometría que les da un rango amplio de porosidad y permeabilidad y es en estas formaciones por las que se aporta más agua.

El método de Cooper aplicado en este trabajo, se fundamenta en las investigaciones de Theis y aunque las condiciones básicas teóricas establecidas pueden variar un poco ante

nuestra realidad son necesarias para que los problemas planteados tengan solución y ésta sea de fácil manejo.

Los resultados del método son aceptables y fueron comprobados por Cooper y Jacob en un campo de pozos de California en el año de 1957.

La teoría de Theis fue desarrollada para acuíferos confinados pero, también es aplicable a acuíferos libres cuando al graficar, a - t , en papel semilogarítmico nos den puntos que sensiblemente, se alinien.

Aunque la teoría del método no contempla las recargas que tiene el acuífero, los resultados que se obtienen caen dentro de la seguridad ya que en la realidad sí existen y por lo tanto, los abatimientos predichos siempre serán menores.

La obtención de los parámetros acuíferos, Transmisibilidad y Almacenamiento, a partir de los datos de las pruebas de abatimiento-tiempo, son una representación promedio de las condiciones geohidrológicas de la región en que se ubica el acuífero.

En el capítulo IV se hizo una predicción del comportamiento del acuífero considerando una alternativa de funcionamiento con acciones específicas, predicciones que pueden servir

nos para estudios técnicos y económicos de equipo de bombeo o para modificar políticas de explotación por lo adverso de los efectos que pudieran presentarse.

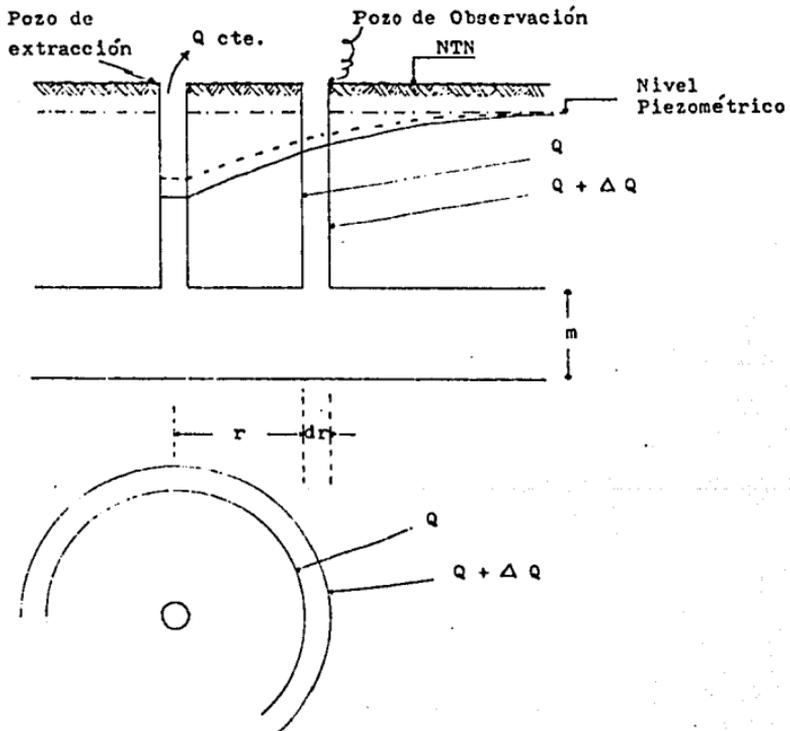
Es necesario el conocimiento de la disponibilidad del agua subterránea y de los problemas que trae consigo su explotación.

Los acuíferos tienen una gran capacidad de almacenamiento por los que el agua contenida en éstos ha sido aprovechada con una idea de recurso no renovable, sin embargo; cuando hay comunicación del acuífero con las aguas superficiales existe una parte que es renovable pero, que debe explotarse racionalmente. Además un acuífero, como almacenamiento natural de agua, es muy importante por las ventajas que presenta sobre las superficiales: No tiene evaporación ni azolve, el subsuelo sirve como filtro natural al agua, que generalmente es de mejor calidad, no altera el uso del suelo, etc.

Es muy importante remarcar, que la disponibilidad de agua en un acuífero, puede perderse si no se opera correctamente.

A P E N D I C E

DESARROLLO DE LA ECUACION DE THEIS A PARTIR DE LA  
ECUACION DE POZOS.



## CONDICIONES BASICAS TEORICAS.

- a).- Acuífero confinado y de espesor uniforme.
- b).- Medio permeable capilar isotrópico:  $v = k \partial s / \partial r$
- c).- Acuífero sensiblemente horizontal y de extensión infinita.
- d).- El pozo penetra totalmente en el acuífero.
- e).- El pozo es de diámetro infinitesimal.
- f).- El agua es compresible y el acuífero es deformable solo en dirección vertical.
- g).- Flujo inestable.

Trabajando en coordenadas cilíndricas, tenemos:

$$a = F(r, \vartheta, t) \quad \text{donde:}$$

a: abatimiento

r: distancia del pozo de extracción al de observación

$\vartheta$ : ángulo

t: tiempo

Considerando un instante, no transcurre el tiempo:

$$a = F(r, \vartheta) \quad ; \quad da = \frac{\partial s}{\partial r} dr + \frac{\partial s}{\partial \vartheta} d\vartheta$$

como el cono de abatimiento es simétrico, el abatimiento es independiente del ángulo  $\theta$ , por lo tanto:

$$da = \frac{\partial a}{\partial r} dr$$

Si se considera el cono en movimiento:  $a = f(r, t)$

Definiendo:

$I_r$ : Gradiente hidráulico a la distancia  $r$

$$I_r = \frac{\partial a}{\partial r}$$

Derivando respecto a "r":

$$\frac{dI_r}{dr} = \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} \quad ; \quad dI_r = \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} dr$$

Taylor da la siguiente aproximación:

$$I_{r+dr} = I_r + dI_r = \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} dr$$

Como el flujo es inestable (deformable en dirección vertical) :

$$q_r \neq q_{r+dr} \quad ; \quad q_r > q_{r+dr}$$

$q_{r+dr} - q_r = \Delta Q$  se le llama incremento negativo de gasto.

$\Delta Q$  es mayor a medida que  $r$  es menor, debido a la disminución de presión.

Axiomáticamente, expresamos  $\Delta Q$  en función de los parámetros acuíferos  $S$  y  $T$ .

$S$  : Coeficiente de Almacenamiento. Se define como el gasto liberado por un área horizontal unitaria de acuífero cuando el abatimiento disminuye con rapidez unitaria.

$$S = \frac{q/A}{da/dt} \quad ; \quad \frac{[L]^3 / [T][L]^2}{[L] / [T]} = \frac{[L] / [T]}{[L] / [T]} = 1$$

$S =$  adimensional.

**T** : Coeficiente de Transmisibilidad. Es el gasto que pasa a través de un área cilíndrica vertical, de altura igual al espesor del acuífero y de ancho unitario cuando el gradiente hidráulico es unitario.

$$T = k m \quad ; \quad \text{donde :}$$

**m** : es el espesor del acuífero

**k** : es el coeficiente de permeabilidad, definido como el caudal que se filtra a través de una sección unitaria de terreno bajo la carga producida por un gradiente hidráulico unitario.

$$k = \frac{Q}{A} = \frac{[L]^3/[T]}{[L]^2} = \frac{[L]}{[T]}$$

Unidades dimensionales de **T** :

$$T = k m = \frac{[L]}{[T]} [L] = \frac{[L]^2}{[T]}$$

a)  $\Delta Q$  en función de la Transmisibilidad :

$$\Delta Q = Q_{r+dr} - Q_r = A_{rad} T I_{r+dr} - A_{rad} T I_r$$

entonces :

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

dividiendo por  $r^2$  :

$$\frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{\partial a}{\partial r} \frac{1}{r} = \frac{S}{T} \frac{\partial a}{\partial t}$$

$$\frac{S}{T} \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{\partial^2 a}{\partial r^2}$$

que es la ecuación de pozos, y por lo tanto, la solución supuesta es correcta.

De la expresión (B) evaluaremos a C ;

$$Q_{\text{extracción}} = Q_{\text{estacionario}} + \Delta Q$$

como  $\Delta Q$  es negativo :

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

$$Q_{\text{neto}} = -Q_r + (Q_{r+dr} - Q_r)$$

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

b)  $\Delta Q$  en función del Almacenamiento :

$$\Delta Q = 2\pi r dr S \frac{\partial a}{\partial t} \dots\dots\dots (A)$$

Igualando las expresiones en a) y b) :

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

dividiendo por  $2\pi$  y sustituyendo los valores de  $I_r$  e  $I_{r+dr}$  :

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

dividiendo por  $T r dr$  y efectuando multiplicaciones :

$$\begin{aligned} \frac{r}{rdr} \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{dr}{rdr} \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{r}{rdr} \left( \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} dr \right) + \frac{dr}{rdr} \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} dr - \\ - \frac{1}{dr} \frac{\partial a}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial a}{\partial t} \end{aligned}$$

$$\frac{S}{T} \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{1}{dr} \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} dr - \frac{1}{dr} \frac{\partial a}{\partial r}$$

despreciando los términos de orden superior al segundo por ser infinitamente pequeños, entonces tenemos :

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

La anterior, expresión para flujo inestable en un medio poroso capilar radial, o dicho de otra manera, ecuación diferencial de incremento negativo de gasto.

Para obtener su solución, se procede de la siguiente manera :

multiplicando ambos lados por  $r^2$

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

con las siguientes condiciones :

$$\text{si } t = 0 ; S = 0 \quad \text{y} \quad \lim_{r \rightarrow \infty} S = 0$$

por inspección, la ecuación diferencial que la satisface es :

$$r \frac{\partial a}{\partial t} = -2c e^{-r^2 S / 4Tt} \dots\dots\dots (B)$$

Comprobando :

1<sup>ro</sup> . Derivando respecto de t :

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

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

Reordenando :

$$\frac{\partial (\partial a / \partial r)}{\partial t} = \frac{c}{t} (-2rS / 4Tt) e^{-r^2 S / 4Tt}$$

2<sup>do</sup> . Ahora ya se puede integrar con respecto de r :

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{c}{t} e^{-r^2 S / 4 T t}$$

3º. Volviendo a la relación supuesta, la derivaremos con respecto de  $r$  :

$$r \frac{\partial a}{\partial r} = -2 c e^{-r^2 S / 4 T t}$$

$$r \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{\partial a}{\partial r} = -2 c e^{-r^2 S / 4 T t} \quad ( - 2 r S / 4 T t )$$

$$r \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{\partial a}{\partial r} = \frac{c}{t} e^{-r^2 S / 4 T t} \quad ( r S / T )$$

multiplicando por  $r$  :

$$r^2 \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{\partial a}{\partial r} r = \frac{c}{t} e^{-r^2 S / 4 T t} \quad ( r^2 S / T )$$

donde :

$$\frac{c}{t} e^{-r^2 S / 4 T t} = \frac{\partial a}{\partial t}$$

Recordando que :

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

$$Q_r = 2\pi r T \frac{\partial a}{\partial r}$$

y sustituyendo las ecuaciones (C) y (D), respectivamente :

$$Q_{ext} = -2\pi T (-2C e^{-r^2 S/4Tt}) + 2\pi r dr S \frac{C}{t} e^{-r^2 S/4Tt}$$

tomando límites se puede escribir gasto total de extracción :

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

$$Q_T = 4\pi T C \quad ; \quad C = \frac{Q_T}{4\pi T}$$

$$\text{Unidades de } C : \frac{[L]^3/[T]}{[L]^2/[T]} = [L]$$

una vez fijado  $r$  ( dos pozos ), se puede escribir ds en lugar de  $\partial s$  :

$$da = \frac{C}{t} e^{-r^2 S/4Tt} dt$$

Obteniendo el abatimiento :

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

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

$$\frac{dt}{du} = -\frac{b}{u^2} \quad ; \quad dt = -\frac{b}{u^2} du$$

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

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

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

$$a = -C \int_{\infty}^u \frac{e^{-u}}{u} du \quad ; \quad a = C \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad ; \quad 0 :$$

$$\frac{a}{C} = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) \quad \text{Integral impropia que}$$

forma parte de la ecuación de Theis.

La integral anterior la desarrollaremos en serie de potencias, usando para ello, el número de Euler.

Se define  $C = 0.5772 \dots\dots\dots$

$$C = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots\dots\dots + \frac{1}{n} - \ln(n)$$

Se puede observar que la serie es convergente, pero no se sabe si es racional o no .

Para su estudio, la serie se dividirá en dos sumandos;

$$\text{Primero : } 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots\dots + \frac{1}{n}$$

Segundo :  $\ln(n)$

El primer sumando puede ser expresado mediante una integral impropia :

$$\frac{1}{n} = \int_0^{\infty} e^{-nx} dx$$

de manera que se puede expresar como sigue :

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} &= \int_0^{\infty} e^{-1x} dx + \int_0^{\infty} e^{-2x} dx + \int_0^{\infty} e^{-3x} dx + \dots + \int_0^{\infty} e^{-nx} dx \\ &= \int_0^{\infty} (e^{-1x} + e^{-2x} + e^{-3x} + \dots + e^{-nx}) dx \end{aligned}$$

Para tener un valor del número de Euler útil en la práctica, no es necesario tener un número infinito de  $n$  sumandos de la serie armónica.

En este caso  $n$  es finito, y la suma dentro del paréntesis de la expresión anterior, es una progresión geométrica cuyo valor se puede obtener con la expresión :

$$\text{si } x > 0 \text{ y entero } , \quad S_n = \frac{r(1-r^n)}{1-r}$$

de razón  $r = e^{-x}$  , entonces :

$$S_n = \frac{e^{-x}(1-e^{-nx})}{1-e^{-x}} = \frac{e^{-x} - e^{-nx-x}}{1-e^{-x}}$$

por lo tanto, el primer sumando queda :

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

El segundo sumando,  $\text{Ln}(n)$ , puede expresarse también como una integral impropia :

$$\text{Ln}(n) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x} - e^{-nx}}{x} dx, \text{ conocida como integral de Frullani.}$$

Agrupando los dos sumandos :

$$c = 0.5772\dots = \int_0^{\infty} \left( \frac{e^{-x} - e^{-nx-x}}{1 - e^{-x}} - \frac{e^{-x} - e^{-nx}}{x} \right) dx$$

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

multiplicando numerador y denominador del segundo término de la derecha, por  $e^x$  :

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

Agrupando las fracciones, primera con tercera, y segunda con cuarta :

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

La segunda integral es nula, y su demostración se puede consultar en el "Advanced Calculus" de George A. Gibson, pág. 478, Edit. McMillan.

Entonces :

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

sumando y restando  $1 / x(x+1)$  y reagrupando :

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

La segunda integral también es nula (Advanced Calculus George A. Gibson, pag. 479).

Entonces :

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

Fraccionando los límites de la integral, de 0 a X, y de X a  $\infty$  :

$$C = \int_0^X \frac{1}{x(x+1)} dx - \int_0^X \frac{-x}{x} dx + \int_X^{\infty} \frac{1}{x(x+1)} dx - \int_X^{\infty} \frac{-x}{x} dx$$

Despejando la última integral, que es la que nos interesa, tenemos :

$$\int_X^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = -C + \int_0^X \frac{1}{x(x+1)} dx + \int_X^{\infty} \frac{1}{x(x+1)} dx - \int_0^X \frac{e^{-x}}{x} dx$$

Descomponiendo el segundo término de la derecha en fracciones parciales, además sumando y restando  $dx/x$  al último:

$$\int_X^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = -C - \int_0^X \frac{dx}{x(x+1)} + \int_X^{\infty} \frac{dx}{x(x+1)} - \int_0^X \frac{e^{-x} - 1}{x} dx$$

A la anterior la llamaremos ecuación (D), quedando en el miembro de la derecha solo una integral impropia :

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

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

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \int_X^b \frac{dx}{(x + \frac{1}{2})^2 - (\frac{1}{2})^2} = \lim_{b \rightarrow \infty} \left[ \ln \frac{x}{x+1} \right]_X^b =$$

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

Sustituyendo este valor en la ecuación (D) :

$$\begin{aligned} \int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx &= -C - \int_0^x \frac{dx}{x+1} + \ln(x+1) - \ln(x) - \int_0^x \frac{e^{-x} - 1}{x} dx \\ &= -C - \ln(x) - \int_0^x \frac{e^{-x} - 1}{x} dx \end{aligned}$$

Desarrollando la última integral mediante la serie de McLaurin :

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

$$\begin{aligned} \int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx &= -C - \ln(x) - \int_0^x \left( -\frac{1}{1!} + \frac{x}{2!} - \frac{x^2}{3!} + \dots \right) dx \\ &= -C - \ln(x) - \left[ -x + \frac{x^2}{2 \cdot 2!} - \frac{x^3}{3 \cdot 3!} + \dots \right] \end{aligned}$$

$$= -C - \ln(x) + x - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \frac{x^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

como  $x = u$  y  $C = 0.5772$  ;

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

solución de la integral impropia a la que llegó  
Theis.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ingeniería de los Recursos Hidráulicos  
Ray K. Linsley  
Joseph B. Franzini  
Ed. C.E.C.S.A., 1ra. edición, México 1984.
- 2.- Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia.  
A.1.12. Geohidrología.  
Comisión Federal de Electricidad, México 1983.
- 3.- Modern Techniques in Ground-Water. (Studies, revista Journal)  
Dennis E. Williams  
A.W.W.A., U.S.A., julio 1971.
- 4.- Aguas Subterráneas  
Andrés Murcia Viudas.  
Ministerio de Agricultura, 3ra. edición, Madrid 1967.
- 5.- Reporte de Estudios Realizados para la Determinación de los  
Sitios para la Perforación de Pozos en las proximidades del  
río Tula y Proyecto de la Conducción a la Refinería "Miguel  
Hidalgo" en Tula, Hgo.  
Ingeniería y Procesamiento Electrónico S.A. (IPESA)  
México 1982.
- 6.- Manual de Plantas de Tratamiento de Aguas  
Ing. Fco. Gómez Zúñiga  
Refinería "Miguel Hidalgo" Tula, Hgo. México 1980

- 7.- Memoria Descriptiva del Programa para Arranque y Operación de los Pozos y Estación de Rebombéo No. 2 en Área de Mangas, Hgo.  
Refinería "Miguel Hidalgo", Tula, Hgo. México 1986.
- 8.- Manual de Operación de Calderas y Tratamiento de Aguas  
Instituto Mexicano de Petróleo  
Refinería "Miguel Hidalgo"  
Tula de Allende Hgo., México 1980.