



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"

DETERMINACION DE LAS PERDIDAS POR
FILTRACION EN UN ESTANQUE
ARTIFICIAL DE EVAPORACION
SOLAR DE 1400HA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

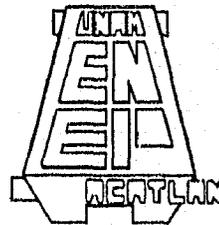
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO

ACATLAN 1996
Asesor Gabriel Auvinet G.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

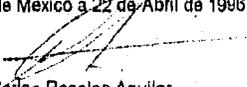
SR. JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.
PRESENTE.

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 16 de Mayo de 1995, me complace notificarle que esta Jefatura de Programa tuvo a bien asignarle el siguiente tema de tesis titulado "DETERMINACION DE LA PERDIDAS POR FILTRACION EN UN ESTANQUE ARTIFICIAL DE EVAPORACION SOLAR DE 1400 HA." que el cual se desarrollar como sigue:

- Introducción.
- I. Descripción del evaporador.
 - II. Estudios Geotécnicos.
 - III. Pruebas de infiltración a gran escala.
 - IV. Análisis Químicos.
- Conclusiones Generales y Recomendaciones.

Asi mismo fue designado como asesor de tesis el Sr. Dr. Gabriel Auvinet Guichard, profesor de la D.E.P.F.I. Ruego a usted, tomar nota en cumplimiento de lo especificado en la Ley de profesiones, deber prestar Servicio Social durante un tiempo minimo de seis meses, como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Esta comunicación deber imprimirse en el interior de la tesis.

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Acatlán Edo. de México a 22 de Abril de 1996


Ing. Carlos Rosales Aguilar.
Jefe del Programa de Ingeniería Civil



EN P. ACATLAN
EF. CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis padres María del Carmen y Félix, por todo su amor y apoyo que me han brindado en la vida, ya que gracias a ellos he llegado a realizar mis metas.

A mis hermanos Isabel y Paco, porque siempre han estado y estarán conmigo en las buenas y en las malas.

A mi abuela Isabel, por haber sido una segunda madre.

A mi tía Aurora y a los Rojas, por haber formado parte de una etapa muy importante de mi vida.

A mi tío Paco y Marcela, por el cariño que siempre me han brindado.

A mis amigos Raúl, Iñaky y Fernando, por ser mis hermanos.

A mis amigos Jorge Rojas y Jorge Fernández, por compartir conmigo sus vidas y su amistad durante la universidad.

En fin a todos aquellos que tienen un lugar en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Instituto de Ingeniería U.N.A.M., principalmente al Dr. Gabriel Auvinet por haberme incluido en este proyecto tan importante y su apoyo incondicional para la realización de este trabajo.

A Equipos Industriales de Baja California (EIBC), por la invitación a Mexicali para conocer el proyecto y brindarme toda la información necesaria para realizar este trabajo.

Al Ing. Pedro Souza, por permitirme trabajar en su empresa y apoyarme en la realización de mi carrera.

A la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán (ENEP Acatlán) y a los profesores Valera Negrete, Ávila Prieto, López Manjarrez, Flores Núñez, Manuel Gómez y Zurita Esquivel, por haberme dado la formación, madurez y responsabilidad que se requiere para salir adelante en cualquier lugar.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	vi
CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DEL EVAPORADOR.....	8
1.1 <u>Antecedentes</u>	8
1.2 <u>Diseño y construcción</u>	8
1.3 <u>Estado actual</u>	11
1.4 <u>Perspectivas</u>	13
CAPITULO 2. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.....	15
2.1 <u>Antecedentes</u>	15
2.2 <u>Estudio del subsuelo mediante sondeos someros</u>	15
2.3 <u>Principios fundamentales sobre el flujo de agua en suelos</u>	22
2.3.1 <u>Ley de Darcy</u>	22
2.3.2 <u>Redes de flujo</u>	24
2.3.3 <u>Mecanismos de filtración</u>	26
2.4 <u>Pruebas de permeabilidad de campo</u>	29
2.5 <u>Pruebas de permeabilidad de laboratorio</u>	35
2.5.1 <u>Objetivo</u>	35
2.5.2 <u>Introducción</u>	35
2.5.3 <u>Desarrollo de las pruebas</u>	36
2.5.4 <u>Resultados</u>	37
2.5.5 <u>Propuesta de un nuevo permeámetro</u>	39
2.6 <u>Estimación de las filtraciones</u>	39
2.7 <u>Conclusiones</u>	40
CAPITULO 3. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN A GRAN ESCALA.....	41
3.1 <u>Planteamiento</u>	41
3.2 <u>Balances de masa</u>	41
3.2.1 <u>Información recibida</u>	41
3.2.2 <u>Desarrollo</u>	42
3.2.3 <u>Resultados brutos</u>	43

3.2.4 Corrección de resultados.....	44
3.3. Prueba en el dren #324.....	46
3.4 Conclusiones.....	47
CAPITULO 4. ANÁLISIS QUÍMICOS.....	49
4.1 Antecedentes.....	49
4.2 Resultados de análisis de muestras en pozos y en la laguna.....	49
4.2.1 Concentraciones salinas.....	50
4.2.2 Temperaturas.....	51
4.3 Conclusiones.....	52
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXO I. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE CAMPO.....	57
I.A Prueba USBR E-19.....	57
I.B Prueba Lefranc-Mandel.....	63
ANEXO II. PRUEBA DE PERMEABILIDAD CON PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE.....	66
ANEXO III. PLANOS DEL PERMEÁMETRO PROPUESTO.....	71
ANEXO IV. ANÁLISIS QUÍMICOS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Fig 1 *Vista general en planta de las lagunas de evaporación y cristalización*

Fig 2 *Impermeabilización de los vasos de cristalización*

Fig 3 *Operación actual de la laguna de evaporación*

Fig 4 *Macro Proyecto "Cerro Prieto"*

Fig 5 *Configuración de pozos.*

Fig 6 *Perforación de pozos con posteadora manual.*

Fig 7 *Perforación de pozos por medios mecánicos.*

Fig 8 *Localización y temperatura de pozos "profundos" y pozos superficiales.*

Fig 9 *Perfil estratigráfico, bordo oriente.*

Fig 10 *Perfil estratigráfico, bordo poniente.*

Fig 11 *Perfil estratigráfico, bordo sur.*

Fig 12 *Perfil estratigráfico, bordo norte.*

Fig 13 *Elevación del terreno natural y nivel freático*

Fig 14 *Dispositivo experimental de Darcy*

Fig 15 *Porción de una red de flujo*

Fig 16 *Mecanismos de filtración*

Fig 17 *Prueba tipo USBR E-19*

Fig 18 *Prueba tipo USBR E-19 (esquema)*

Fig 19 *Prueba tipo Lefranc-Mandel*

Fig 20 *Prueba tipo Lefranc-Mandel con extensión*

Fig 21 *Permeabilidades obtenidas en el perímetro de la laguna.*

- Fig 22 *Permeómetro de carga variable y pared flexible.*
- Fig 23 *Resultados brutos obtenidos de la prueba a gran escala en el evaporador*
- Fig 24 *Resultados obtenidos de la prueba a gran escala con un factor de corrección de 0.64 en la evaporación*
- Fig 25 *Prueba a gran escala en el dren # 324*
- Fig 26 *Gráfica típica de recuperación de nivel en el dren #324*
- Fig 27 *Concentración salina en pozos perimetrales y en la laguna*
- Fig 28 *Temperaturas en pozos perimetrales y en la laguna*
- Fig 29 *Condiciones posibles para la realización de pruebas USBR E-19*
- Fig 30 *Dispositivo para la realización de pruebas USBR E-19*
- Fig 31 *Formato para pruebas USBR E-19*
- Fig 32 *Prueba Lefranc-Mandel*
- Fig 33 *Permeómetro*
- Fig 34 *Identificación de válvulas y reguladores de presión*
- Fig 35 *Formato de registro de pruebas con permeómetro de carga variable.*

LISTA DE TABLAS

- Tabla I *Resultados de pruebas de permeabilidad en pozos de 5m de profundidad*
- Tabla II *Coefficientes de permeabilidad obtenidos en pozos de 1.5m de profundidad*
- Tabla III *Propiedades de las muestras ensayadas.*
- Tabla IV *Permeabilidades obtenidas bajo distintas presiones.*

INTRODUCCIÓN

El campo geotérmico de Cerro Prieto es uno de los complejos más grandes del mundo para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo con fines de producción de electricidad (CFE, 1994). La capacidad instalada es de 620 MW.

La zona geotérmica se encuentra ubicada en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, Baja California, entre los meridianos 115° 12' y 115° 18' longitud oeste y los paralelos 32° 22' y 32° 26' de latitud norte, destacando como rasgo geográfico el volcán de Cerro Prieto que alcanza una elevación de 260 m.s.n.m.

La región es árida con clima extremoso, variando su temperatura de 2 grados bajo cero en invierno a 47 grados en verano, siendo las lluvias muy escasas con una precipitación media anual de 80mm.

El aprovechamiento de la energía del fluido contenido en el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto se logra mediante pozos profundos. El fluido extraído de los pozos activados se separa por centrifugación en su parte líquida (agua) y en vapor. El agua separada experimenta una segunda evaporación parcial con objeto de aprovechar parte de la energía que aún conserva. Finalmente, la salmuera remanente se descarga en una laguna de evaporación o se reinyecta en pozos no productivos.

Desde fines de los años setenta, se consideró como extremadamente atractiva la recuperación de algunas de las sales contenidas en la salmuera residual, en particular del cloruro de potasio y del litio. FERTIMEX realizó, con la asesoría de varios organismos, incluyendo el Instituto de Ingeniería de la UNAM, un estudio de factibilidad que condujo a la elaboración de un proyecto ejecutivo y a la construcción, en 1982, de una laguna de 1.4km² que pudiera funcionar como evaporador solar para la concentración de la salmuera hasta el punto de saturación en cloruro de sodio. Asimismo, se construyeron unos vasos de cristalización con una superficie total de 800,000m² para cosecha de cloruro de sodio y potasio. Por diversos motivos, entre los que destaca la desaparición de FERTIMEX, no se concluyó el proyecto y el concentrador ha sido empleado por CFE como simple laguna de descarga en la que se elimina por evaporación la mayor parte de la salmuera de desecho. El resto se reinyecta en pozos no productivos. Para aumentar la superficie de evaporación, se han construido unas extensiones del evaporador de 4.3 km².

Recientemente, la Compañía Equipos Industriales de B.C., S.A. de C.V. (EIBC) decidió revivir el proyecto y realizar nuevos estudios de factibilidad basados en datos actualizados de composición química y de gasto de salmuera disponible. Se consideró además importante evaluar el comportamiento del evaporador existente con objeto de estimar los volúmenes de materia prima realmente disponibles. Con este fin, EIBC encargó al Instituto de Ingeniería una investigación orientada a la estimación de las pérdidas por filtración en la laguna de evaporación.

Para evaluar las filtraciones se propuso la metodología siguiente:

- a) Revisar la información recopilada por la Comisión Federal de Electricidad durante los últimos años en cuanto a manejo de salmueras y a condiciones ambientales, con objeto de establecer balances que permitan despejar la magnitud aproximada de las filtraciones registradas.
- b) Instalar un sistema de instrumentación orientado a determinar en secciones típicas las condiciones de flujo hidráulico que se presentan bajo los bordos periféricos de las lagunas. La instrumentación consiste en tubos ranurados colocados hasta 5m de profundidad que permiten realizar pruebas de permeabilidad en los estratos superficiales del subsuelo. Los pozos pueden además usarse para medir temperaturas y muestrear el fluido infiltrado y comparar sus características químicas con las del agua de la laguna.
- c) Realizar pruebas de permeabilidad en el laboratorio sobre muestras de suelo extraídas en pozos a cielo abierto.
- d) Observar el comportamiento de la laguna durante un periodo determinado en condiciones tan controladas como sea posible y suspendiendo las extracciones, de común acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (Prueba de permeabilidad a gran escala).

El objeto de este trabajo es el de revisar brevemente los antecedentes, analizar los resultados de los estudios realizados y presentar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

CAPITULO I. DESCRIPCIÓN DEL EVAPORADOR Y DE SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN

1.1 Antecedentes

En la fig 1. se muestra la configuración inicial de la laguna y de los vasos de cristalización. Se construyó el estanque de evaporación solar de 1400ha en una zona ocupada en parte previamente por una pequeña laguna de descarga. Se formó el almacenamiento por encima del terreno natural mediante bordos de tierra compactada de 38km de largo y hasta 3.5m de altura. La profundidad del estanque varía aproximadamente entre 0 (algunas islas) y 3.0m.

El proyecto contemplaba que se alcanzaría el punto de saturación en cloruro de sodio en el centro de la laguna concentradora y que la salmuera saturada sería bombeada desde el punto central a los vasos de cristalización donde el cloruro de sodio y de potasio precipitados podrían ser cosechados.

1.2 Diseño y construcción

Los aspectos de ingeniería civil a los que se prestaron mayor atención en el estudio de factibilidad y en el diseño del estanque de evaporación solar, realizados en 1981, fueron los siguientes:

- a) *Pérdidas de salmuera por filtraciones.* Se aceptó que el flujo de salmuera a través del subsuelo estaría gobernado por la ley de Darcy y su magnitud se estimó a partir de análisis convencionales de redes de flujo. Para determinar la permeabilidad de los materiales superficiales se realizaron pruebas de permeabilidad de campo de acuerdo con la norma E-19 del U.S. Bureau of Reclamation. Se realizaron asimismo pruebas de permeabilidad en el laboratorio, utilizando el permeámetro de carga variable y pared flexible que se describe en el inciso 2.5. Debido a la inexistencia de una estratificación definida, el suelo se consideró como homogéneo y se le atribuyó el coeficiente de permeabilidad correspondiente a los materiales más permeables encontrados (10^{-3} cm/s). Se dio al estanque una forma de caracol para minimizar las pérdidas de sales. Con este diseño, el fluido que circula cerca de los diques exteriores, donde ocurrirán las principales filtraciones, es una salmuera de baja concentración con lo que se reduce la pérdida de materia prima.

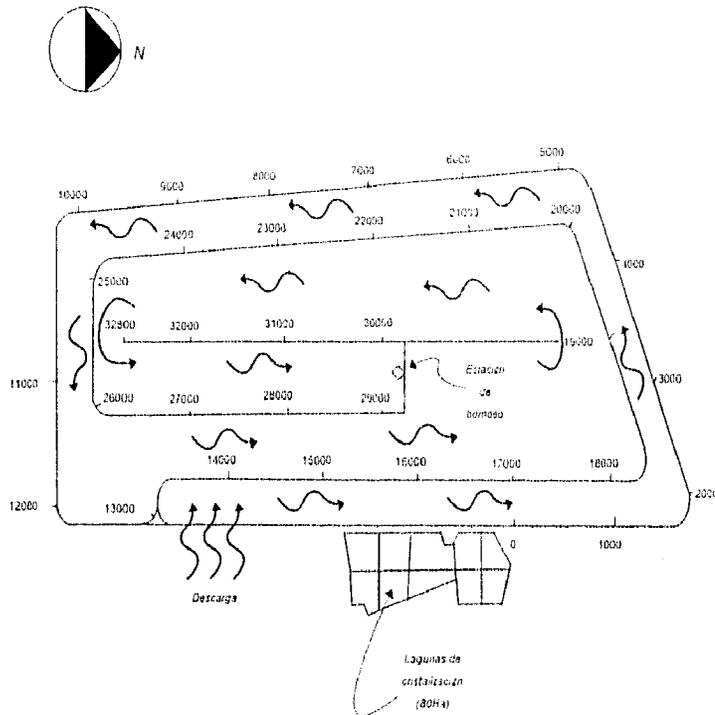


Fig 1 Vista general en planta de las lagunas de evaporación y cristalización.

- b) *Difusión de sales hacia el acuífero.* Se consideró que este flujo, de origen químico queda regido por la ley de Fick:

$$J = -AD \left(\frac{\delta C}{\delta z} \right)$$

donde:

- J gasto, en mol/s
- D coeficiente de difusión, en cm^2/s
- C concentración de sales, en mol/cm^3
- z profundidad, en cm
- A área de infiltración, en cm^2

Para medir el coeficiente de difusión se llevaron a cabo una serie de pruebas de laboratorio en columnas de suelo. Los resultados muestran que, para arenas permeables, la convección debida al gradiente de densidad da lugar a un coeficiente de difusión aparentemente alto. En arcillas o limos la difusión es por lo contrario muy lenta. Nuevamente, el subsuelo se consideró homogéneo con un valor conservador del coeficiente de difusión D (10^{-4} cm²/s).

Los parámetros de permeabilidad y de difusión fueron introducidos, junto con los de evaporación, en un modelo de diferencias finitas que simula el comportamiento transitorio y estacionario de la laguna de evaporación. El modelo mostró que las pérdidas no constituirían un obstáculo a la factibilidad del proyecto.

- e) *Estabilidad de bordos de tierra bajo condiciones estáticas y dinámicas.* Debido a la baja altura de los bordos y a la profundidad del estanque, este aspecto no se consideró realmente crítico. Sin embargo, se tuvo especial cuidado al seleccionar materiales de los bancos de préstamo disponibles que fueran poco susceptibles a erosión interna para construir los diques exteriores. Estos diques se construyeron con una arcilla plástica (CH o CL con un límite líquido $w_L > 30\%$ e índice de plasticidad $I_p > 15\%$) y fueron protegidos contra la erosión por medio de grava y enrocamientos obtenidos de los abanicos aluviales de la Sierra de los Cucapahs y del volcán Cerro Prieto. Para los bordos internos, se consideró que cualquier material, excepto arena o grava permeable, sería aceptable. Debido a la escasez de materia granular, FERTIMEX aceptó que algunos tramos se dejaran con un talud de pendiente muy poco pronunciada (hasta 10 a 1) pero sin protección. En zonas inundadas se empleó una mezcla de grava y suelo fino hasta el espejo del agua. Se presentaron dificultades constructivas cerca de las manifestaciones geotérmicas donde era común encontrar zonas de suelo alterado químicamente y de consistencia muy blanda. Estos materiales tuvieron que ser desplazados con relleno granular antes de construir los bordos. Se introdujeron ligeras modificaciones en el alineamiento de los bordos para minimizar la construcción dentro de las zonas inundadas o con una alta actividad geotérmica.
- d) *Impermeabilización de vasos de cristalización.*

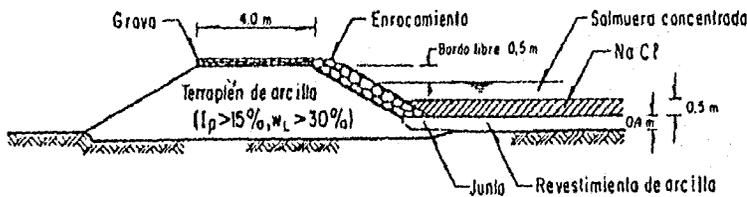


Fig 2 Impermeabilización de los vasos de cristalización

Los vasos de cristalización fueron impermeabilizados en la forma indicada en la Fig 2. Se colocó un revestimiento de arcilla plástica de 40cm de espesor en el fondo de los vasos. El revestimiento fue compactado en dos capas utilizando una técnica que permite minimizar la permeabilidad (Auvinet, 1986). El proyecto considera que se dejará cristalizar en el fondo una capa de 50cm de cloruro de sodio para protección mecánica del revestimiento y acceso del equipo para cosecha.

1.3 Estado actual

El estado actual de la laguna fue evaluado durante varias visitas realizadas a la zona, y con base en la información siguiente proporcionada por CFE :

- Plano general de la laguna y de la planta con escala 1 a 10000
- Esquema de la configuración actual de la laguna con indicación de la dirección de flujo (Fig 3)
- Secciones de bordos de la laguna de evaporación cada km. de sus ampliaciones y de las lagunas de cristalización
- Geometría del dren # 324, paralelo al bordo oriente.

Actualmente, el concentrador funciona como laguna de almacenamiento y evaporación con las siguientes alteraciones respecto a las condiciones iniciales:

- La parte sur del bordo central y un tramo de más de 1km del deflector interior poniente están erosionados y sólo emergen cuando el nivel de la laguna se encuentra bajo.
- El nivel de operación de la laguna es mayor que el previsto (típicamente entre 1.2 y 12.5m.s.n.m en vez de 11.5m.s.n.m.). Sin embargo, en algunas partes, se forman islotes que no desaparecen totalmente cuando se alcanza el nivel máximo.
- El flujo en la laguna no sigue la trayectoria inicial (Fig 3).
- Se han instalado alcantarillas a través de los bordos para canalizar el flujo.
- Se han construido dos ampliaciones, una en la parte sur y otra en la parte poniente del evaporador que se usan para incrementar la evaporación cuando se requiere.
- El gasto actual de salmuera que entra al evaporador es aproximadamente el doble del gasto inicial de proyecto.
- Existen importantes depósitos de sílice cerca de la descarga de salmuera a la laguna

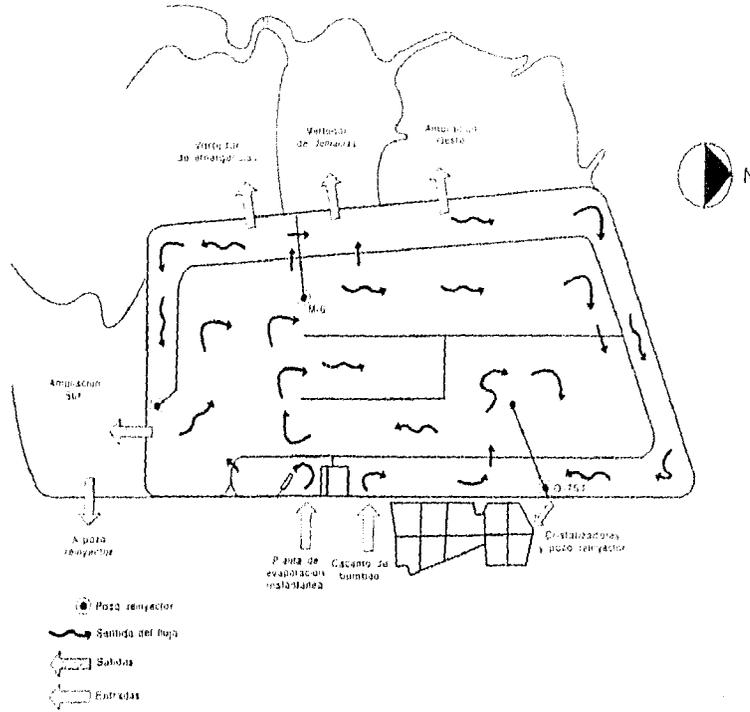


Fig 3 Operación actual de la laguna de evaporación

De acuerdo con la información proporcionada por CFE, el área inundada de la laguna de evaporación puede calcularse en función de la cota del espejo de agua en m.s.n.m., con la siguiente ecuación:

$$A = (G + C \cdot G_1 + C^2 \cdot G_2) \cdot 10^6$$

donde:

- A = área inundada en m²
- G = constantes determinadas mediante mediciones topográficas
- C = cota del espejo de agua en m.s.n.m.

para $11.5 < C < 12.0$ m.s.n.m., se tiene:

$$\begin{aligned}G &= 822.252198 \\G1 &= -153.274452 \\G2 &= 7.13712679\end{aligned}$$

para $12.0 < C < 12.5$ m.s.n.m.

$$\begin{aligned}G &= -1676.43814 \\G1 &= 269.908138 \\G2 &= -10.776018\end{aligned}$$

para $12.5 < C < 12.7$ m.s.n.m.

$$\begin{aligned}G &= -389.151382 \\G1 &= 62.2015454 \\G2 &= -2.39817751\end{aligned}$$

1.4 Perspectivas

Equipos Industriales de Baja California, S.A. de C.V. (EIBC), busca retomar el proyecto iniciado por FERTIMEX, adoptando una serie de mejoras con el fin de aprovechar de manera eficiente todos los componentes de la salmuera. En la fig 4 se muestra el macro proyecto "Cerro Prieto".

Las labores que, por el momento, se tienen contempladas en el evaporador son las siguientes:

- Arreglar bordos erosionados.
- Dragar algunas zonas para permitir que el flujo siga la trayectoria inicialmente prevista.
- Finalmente, permitir que la salmuera fluya entre los bordos hasta el centro de la laguna para que se concentre y de ahí pueda en el futuro ser bombeada a los vasos de cristalización.

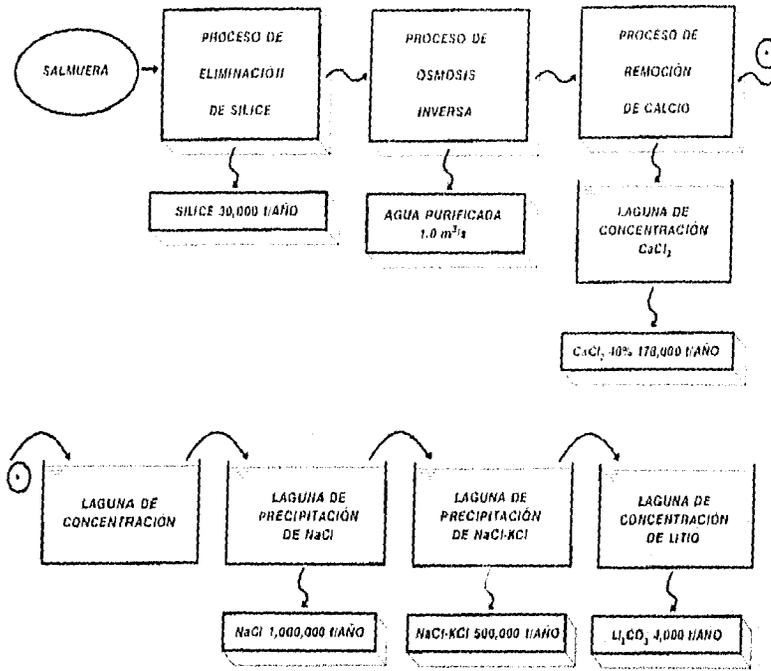


Fig 4 Macro Proyecto "Cerro Prieto"

CAPITULO 2. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

2.1 Antecedentes

El campo geotérmico de Cerro Prieto y la zona de construcción de la laguna se localizan en el delta del río Colorado, en las estribaciones de la cordillera Cucapah y cerca del volcán Cerro Prieto. El campo está cruzado por varias fallas geológicas emparentadas con el sistema de fallas de San Andrés. La capa superficial, de 500 a más de 1000 m de espesor está formada por sedimentos aluviales, sobre todo arcillas, limos y arenas finas con algo de grava. Estos sedimentos están subyacidos por mantos de lutitas y areniscas saturadas de agua caliente. Se piensa que las fracturas a través del basamento granítico y las intrusiones de magma proporcionan la fuente de calor del campo geotérmico. Cerca del extremo poniente del campo se encuentran abanicos aluviales formados por arenas y gravas permeables. Una característica distintiva del sitio es la presencia de manantiales termales, volcanes de lodo y otras manifestaciones volcánicas superficiales. La zona es altamente sísmica y está afectada frecuentemente por sismos de focos poco profundos (< 30 km).

En la zona se realizaron varios sondeos de exploración hasta profundidades de 30 m para el diseño de cimentaciones de la planta termoeléctrica (Moreno, 1969). Asimismo, se excavaron numerosos pozos a cielo abierto. No es posible definir un perfil estratigráfico típico ya que el subsuelo está formado por capas y lentes de arcilla, limo y arena fina distribuidas aleatoriamente.

2.2 Estudio del subsuelo mediante sondeos someros

Con el fin de obtener mayor información sobre las características del subsuelo, se perforaron 34 pozos de 5m de profundidad, a cada 500m en todo el perímetro de la laguna de evaporación. La configuración de estos pozos se muestra en la fig 5.

La información obtenida en cada pozo fue la siguiente:

1. Perfil estratigráfico hasta 5m de profundidad.
2. Localización del nivel freático.
3. Temperatura del agua en el pozo.
4. Concentración de sales.
5. Permeabilidad horizontal.

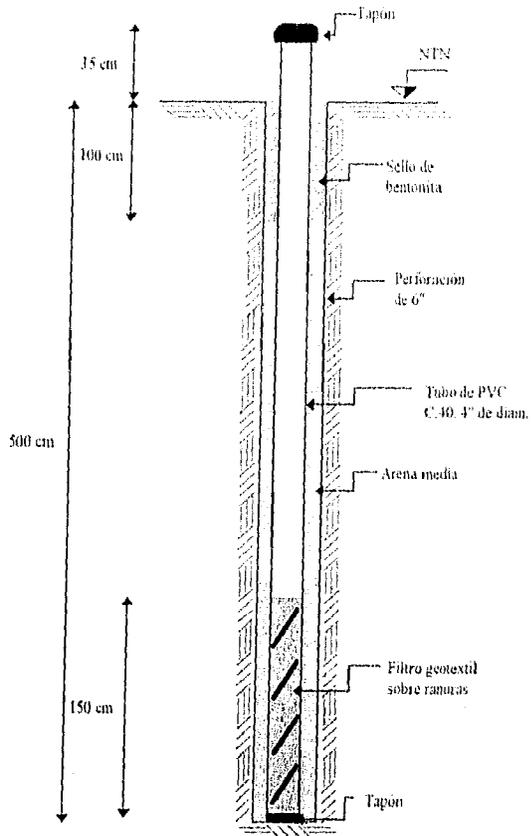


Fig 5 Configuración de pozos.

Proceso constructivo de los pozos:

1. Se realizó una perforación de 6" de diámetro y 5m de profundidad con posteadora manual, en aquellos lugares donde predominaba la arcilla; y con posteadora mecánica, en los lugares donde predominaban los limos y arcillas arenosas. La perforación mecánica se realizó con agua como estabilizante para no alterar la permeabilidad del suelo.

2. Se introdujo en la perforación un tubo de PVC (C.40, 4" de diámetro) ramificado en su parte inferior y cubierto con un filtro de geotextil.
3. El espacio entre el tubo y la perforación se relleno con arena graduada.
4. Por último, se colocó un sello de bentonita en la parte superior del pozo de 1m de profundidad, asimismo se colocó un tapón sobre el tubo de PVC, todo esto con el fin de evitar que el pozo se contamine o se tape.



Fig 6 Perforación de pozos con posteadora manual.

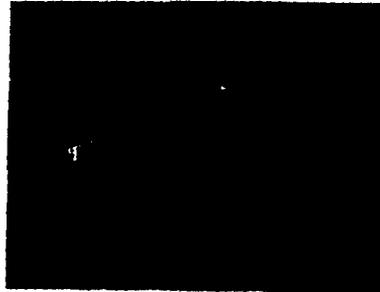


Fig 7 Perforación de pozos por medios mecánicos.

Se obtuvieron los contenidos de agua a cada 50cm, y a cada metro la clasificación (SUCS), la granulometría, los límites de Atterberg y el índice de plasticidad. Los resultados obtenidos en laboratorio permitieron definir los perfiles que se muestran a continuación:

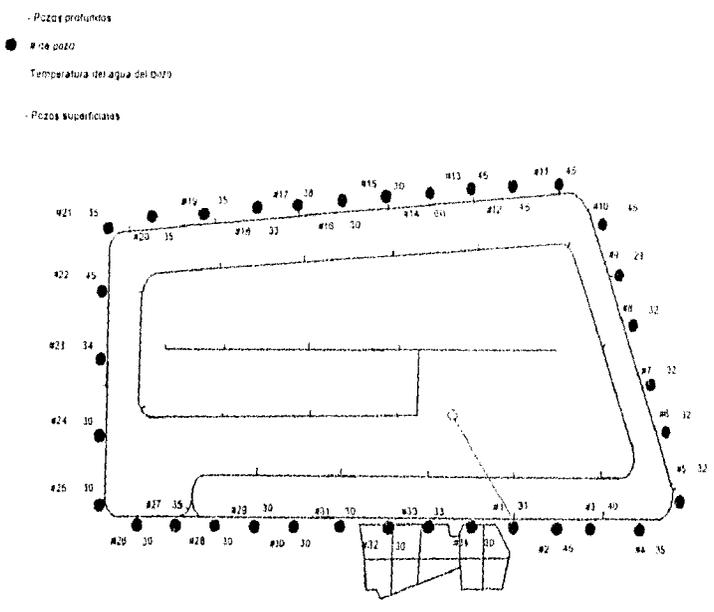


Fig 8 Localización y temperatura de pozos "profundos" y pozos superficiales.

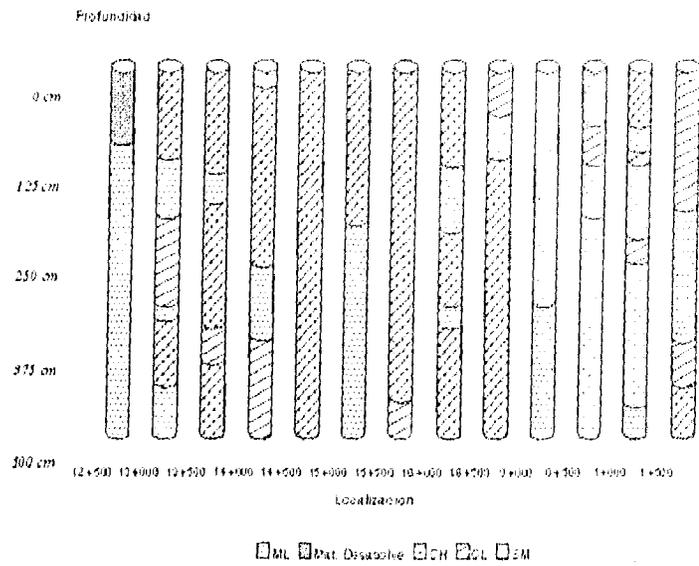


Fig 9 Perfil estratigráfico, bordo oriente.

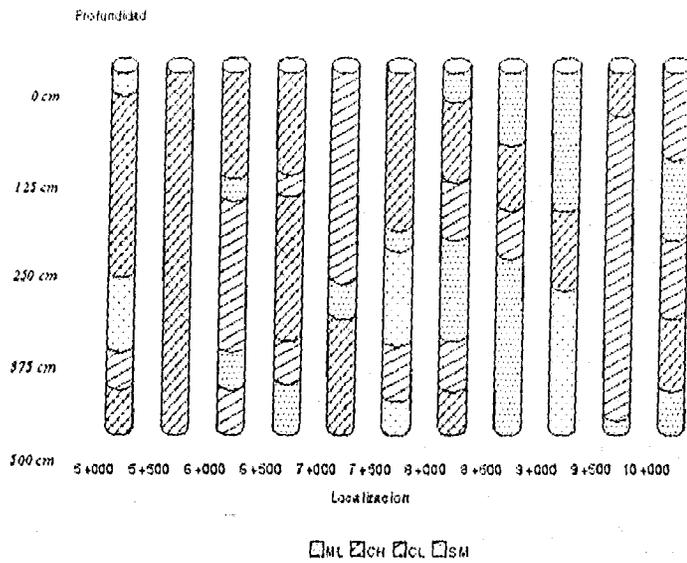


Fig 10 Perfil estratigráfico, bordo poniente.

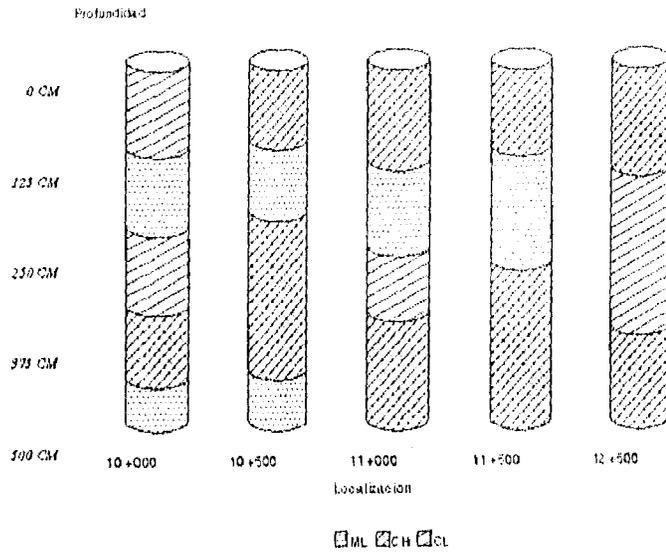


Fig 11 Perfil estratigráfico, bordo sur.

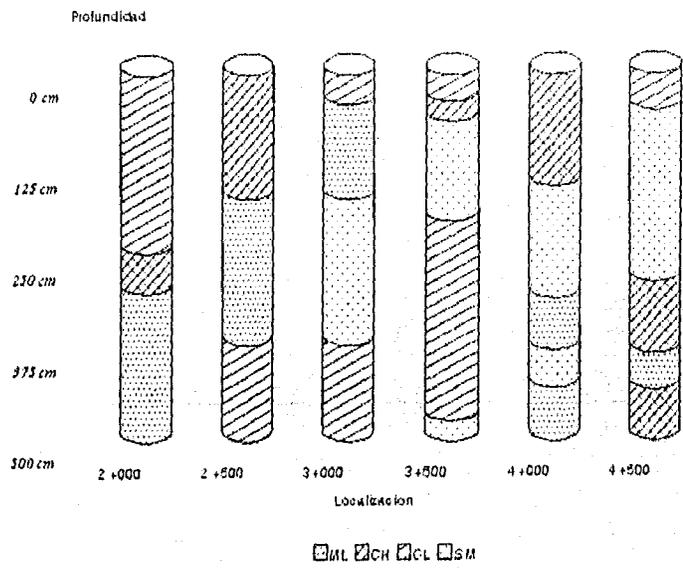


Fig 12 Perfil estratigráfico, bordo norte.

Como se observa, no es posible definir una secuencia estratigráfica típica, sin embargo, existen cuatro tipos de suelos predominantes: arcilla de alta compresibilidad (CH), arcilla arenosa de baja compresibilidad (CL) con contenido de arena de 1 a 33 %, limo arenoso de baja compresibilidad (ML) con contenido de arena de 2 a 45 % y arena fina limosa (SM) con contenido de finos de 17 a 44 %.

También es posible apreciar que los suelos con mayor contenido de arenas se encuentran en la parte noreste de la laguna y los suelos más finos en la parte sudeste.

Con la ayuda de una sonda eléctrica se pudo definir la profundidad del nivel freático (fig 13); en algunos pozos se presentó artesianismo (#6, #7, #14, #22, #24, #25, #26 , #31 y #32). En estos pozos fue necesario agregar una extensión al tubo de PVC de 1.30m de longitud para poder realizar las pruebas de permeabilidad con un gradiente suficiente.

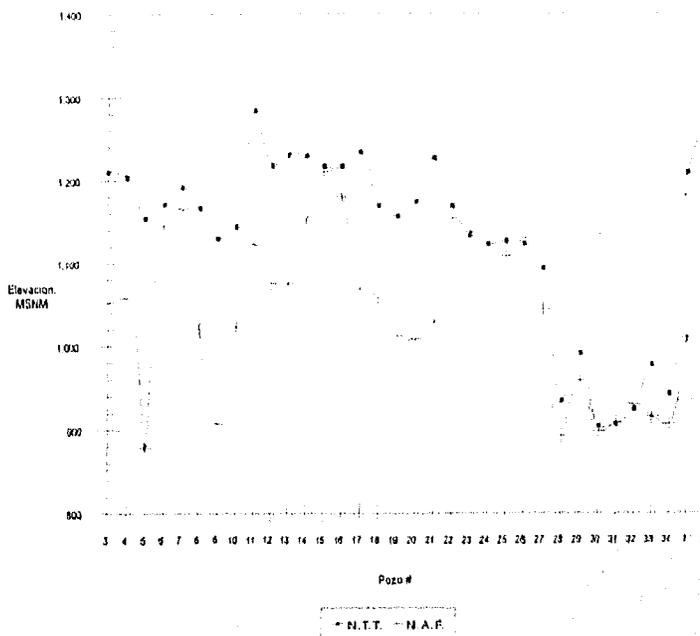


Fig 13 Elevación del terreno natural y nivel freático

2.3 Principios fundamentales sobre el flujo de agua en suelos

2.3.1. Ley de Darcy¹

Las bases para el análisis del flujo a través de los suelos fueron elaboradas por Henri Darcy en 1856. Investigó las características del flujo del agua en los suelos mediante investigaciones sobre materiales térreos utilizando un modelo como el que se muestra en la fig 14. Con este dispositivo Darcy demostró que para velocidades suficientemente pequeñas, el gasto queda expresado por:

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = kAi \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.1)$$

en donde:

- A = Área transversal de la muestra.
- i = Gradiente hidráulica del flujo.

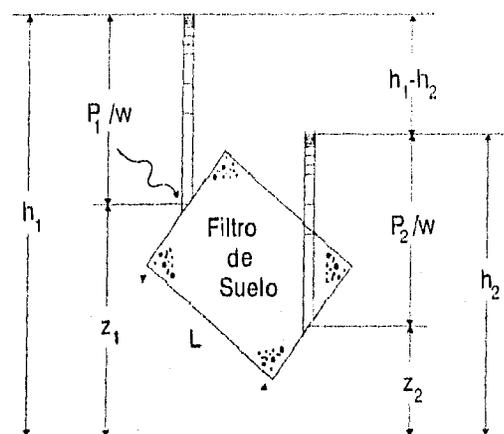


Fig 14 Dispositivo experimental de Darcy

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

¹ Este inciso es un resumen del libro: Juárez Badillo y Rico Rodríguez, "Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos", Ed. LIMUSA, Tomo I, 3ra. Edición, 1989, México D.F., pp.193 a 196

En cualquier punto la carga piezométrica h es la carga de elevación z , más la carga de presión (p/γ_w). La carga de velocidad se desprecia debido a la pequeñez de las velocidades del agua en un medio poroso. La diferencia $h_1 - h_2$ representa la pérdida de energía en forma de calor debido al desplazamiento L .

Debido a lo anterior se puede observar que el flujo del agua a través del suelo no depende únicamente de la presión sino de la carga hidráulica total: que es suma de los dos factores antes mencionados y no solo de la presión.

La ecuación de continuidad del gasto establece que:

$$Q = Av$$

Substituyendo esta ecuación en la 3.1, se obtiene:

$$v = ki \quad (3.2.)$$

en donde v es la velocidad del flujo.

Esta ecuación nos indica que la velocidad de flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico; esto se refiere a que, la ley de Darcy es aplicable solo para flujo laminar. Ya que los modelos de Darcy fueron construidos con arenas finas, con mayor razón, será aplicable en suelos más finos (mezclas de limos y arcillas o arcillas puras) ya que la velocidad del flujo es menor y por lo tanto será laminar.

Como se puede observar en la ecuación 3.2, aparece una constante física de proporcionalidad k , llamada coeficiente de permeabilidad, que adquiere las unidades de velocidad, ya que el gradiente hidráulico es adimensional. Esto permite definir al coeficiente de permeabilidad como la velocidad del flujo a través del suelo que está sujeto a un gradiente hidráulico unitario. Se puede definir también como la facilidad con que el agua fluye a través del suelo, y esta facilidad a su vez depende de toda una serie de propiedades físicas del suelo como son:

en suelos finos (Boyton S.S. 1985):

1. Temperatura.
2. Contenido de humedad.
3. Grado de saturación.
4. Tamaño de grumos arcillosos.
5. Distribución de tamaño de poros.
6. Químicos del líquido permeante.
7. Edad del espécimen de prueba.
8. Relación de vacíos.

2.3.2. Redes de flujo²

Las bases para el método de las redes de flujo fueron desarrolladas por Forchleimer a principios de este siglo, " que sigue siendo el arma más sencilla y poderosa de que el ingeniero dispone para la resolución práctica de los problemas diarios que involucre el flujo de agua en suelos". Desde que el método fue popularizado por A. Casagrande a partir de 1937. Desde entonces la solución gráfica de la ecuación de Laplace, que constituye el Método de las Redes de Flujo, se ha transformado en el método más utilizado por todos los ingenieros.

Para aceptar la ecuación de continuidad se deben establecer las siguientes hipótesis:

1. El régimen es establecido.
2. El suelo está saturado.
3. El agua y las partículas sólidas son incompresibles en sí mismas.
4. El flujo no modifica la estructura del suelo en ninguna forma.

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

Si ahora se supone válida la ley de Darcy podrá escribirse para la velocidad de descarga a través del elemento:

$$V = -K \frac{\partial h}{\partial l}$$

Lo cual expresando el gradiente hidráulico a través de sus tres componentes, da lugar a:

$$V_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$V_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$V_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Substituyendo estas ecuaciones en la ecuación de continuidad:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Para el análisis de un flujo bidimensional en una región de flujo dada:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (3.3)$$

² Este inciso es un resumen del libro: Juárez Badillo y Rico Rodríguez, "Mecánica de Suelos, Flujo de Agua en Suelos", Ed. LIMUSA, Tomo III, 1991, México D.F., pp. 1 a 9 y 33 a 37

Si el suelo a través del que ocurre el flujo en estudio es, además, isótropo en lo referente a la permeabilidad, entonces:

$$K_x = K_y = K$$

Simplificando la ecuación 3.3, tenemos:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \nabla^2 h = 0$$

A esta ecuación se le conoce como la ecuación de Laplace.

La convención mas conveniente para el trazo de una red de flujo, es la siguiente:

1. Dibujar las líneas de flujo de manera que el gasto que pase por el canal formado entre cada dos de ellas sea el mismo (Δq).
2. Dibujar las líneas equipotenciales de manera de que la caída de carga hidráulica entre cada dos de ellas sea la misma (Δh).

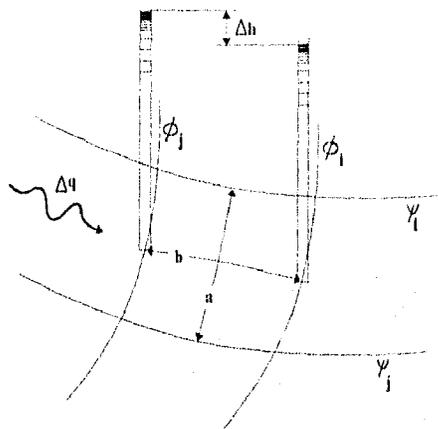


Fig 15 Porción de una red de flujo

Según la ley de Darcy:

$$\Delta q = Ka \frac{\Delta h}{b}$$

$$\Delta q = \frac{q}{n_f} \quad y \quad \Delta h = \frac{q}{n_e}$$

en donde n_f es el numero de canales de flujo y n_e es el numero de caídas de potencial. Por lo tanto obtenemos:

$$q = Kh \frac{n_f a}{n_e b}$$

Si se acepta la relación a/b igual a la unidad, se tendrá una red de flujo formada por cuadrados, en los que por cada canal pasara el mismo gasto y entre cada dos líneas equipotenciales habrá la misma caída de potencial. La ecuación podrá escribirse:

$$q = Kh \frac{n_f}{n_e}$$

que es la fórmula sencilla que permite calcular el gasto por unidad de longitud normal a la sección estudiada, que ocurre a través de una región de flujo en la que se ha dibujado la red correspondiente.

2.3.3, Mecanismos de filtración

Las pérdidas de agua por infiltración hacia el subsuelo en condiciones de flujo establecido para almacenamientos superficiales están regidas por las ecuaciones de flujo en medios porosos. Dependiendo de las condiciones de frontera prevalecientes, la ecuación diferencial de Laplace, corresponderá a diversos mecanismos de filtración.

En la fig 16 se presentan tres diferentes mecanismos de filtración, en donde la permeabilidad de los bordos es despreciable (Auvinet 1986).

El mecanismo numero uno se presenta, cuando la posición del NAF (nivel de aguas freáticas) puede considerarse como una condición fija del problema. El liquido se infiltra en forma vertical descendente hacia el manto acuífero, es necesario que estas infiltraciones no alteren en forma considerable el nivel del manto acuífero. Para que se cumpla esta condición es necesario que el acuífero tenga una posibilidad de descarga mayor a las infiltraciones ocasionadas por el almacenamiento. El gasto puede calcularse según la ley de Darcy:

$$Q = K_v A \frac{t+D}{D} \text{ Gasto de infiltración (m}^3\text{/s)}$$

donde:

- K_v = permeabilidad vertical, en m/s.
- A = área del fondo del almacenamiento, en m^2 .
- t = tirante, en m.
- D = profundidad del nivel freático, en m.

El mecanismo numero dos corresponde a suelos senciblemente homogéneos en los cuales las filtraciones son suficientes para elevar el NAF hasta la altura del almacenamiento. En este caso el flujo tiende a formarse debajo de los bordns exclusivamente.

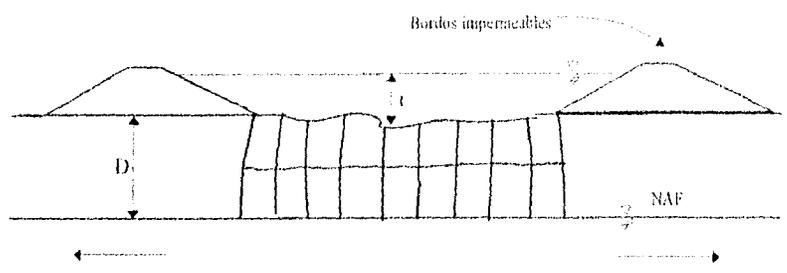
El gasto por filtración es entonces proporcional a la longitud de los bordos y depende de los coeficientes de permeabilidad del suelo (tanto horizontal como vertical) y la diferencia entre el nivel de almacenamiento y el nivel freático inducido en la periferia del estanque.

$$Q = kLh \frac{n_f}{n_v} \text{ Gasto de infiltración (m}^3\text{/s)}$$

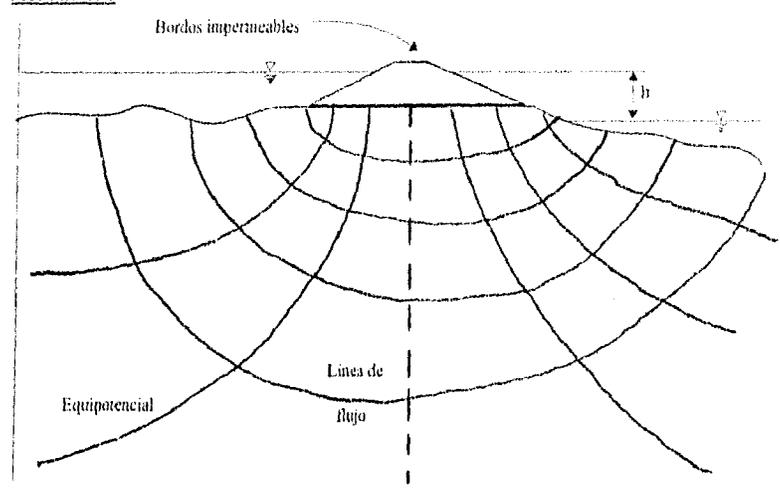
donde:

- k = coeficiente de permeabilidad del subsuelo, en m/s.
- L = perímetro del estanque.
- h = diferencia de niveles en el agua.
- n_f/n_v = factor de forma, cercano a uno si el subsuelo es homogéneo y la laguna es de grandes dimensiones.

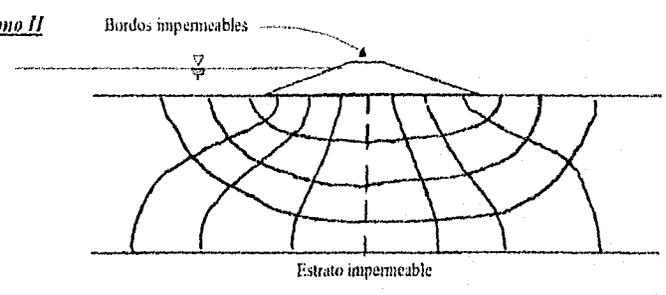
El mecanismo tres se presenta cuando se encuentra a determinada profundidad una capa impermeable continua, se modifican las líneas de flujo del mecanismo anterior como se observa en la fig 16.



Mecanismo I



Mecanismo II



Mecanismo III

Fig 16 Mecanismos de filtración

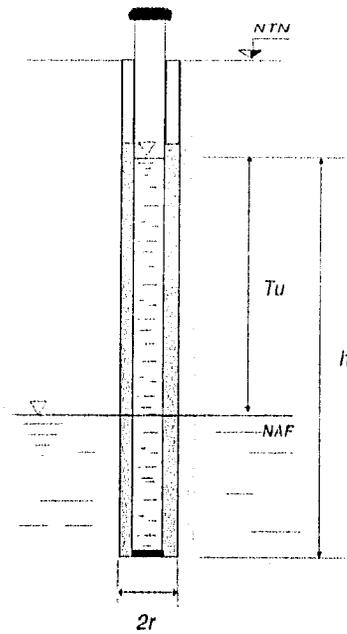
2.4 Pruebas de permeabilidad de campo

Para la obtención del coeficiente de permeabilidad de cada pozo, se realizaron pruebas de acuerdo con la norma E-19 del U.S. Bureau of Reclamation y del tipo Lefranc-Mandel (Ver Anexo I). El criterio para la realización de las pruebas fue el siguiente:



Fig 17 Prueba USBR E-19

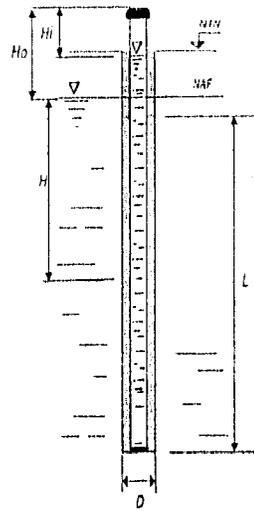
1. Pruebas USBR E-19. Se realizaron en los pozos en los que el nivel freático se encontraba por debajo del sello de bentonita.



$$K = \frac{0.0167 \ln(h/r) [Q/2\pi] (1/h^2)}{\{ (h/Tu)^{-1} - 0.5(h/Tu)^2 \}}$$

Fig 18 Prueba USBR E-19 (esquema)

2. Pruebas Lefranc-Mandel. Se realizaron en los pozos en los que el nivel freático se localizaba en la altura del sello de bentonita.



$$Q = C K (H_i - H_o) \quad C = \frac{4\pi}{(2L) \log(2L/D) - (1/2H)}$$

$$K = \frac{Q}{C (H_i - H_o)}$$

Fig 19 Prueba Lefranc-Mandel

3. Pruebas Lefranc-Mandel con extensión. Se realizaron estas pruebas en todos aquellos pozos que presentaban artesianismo.

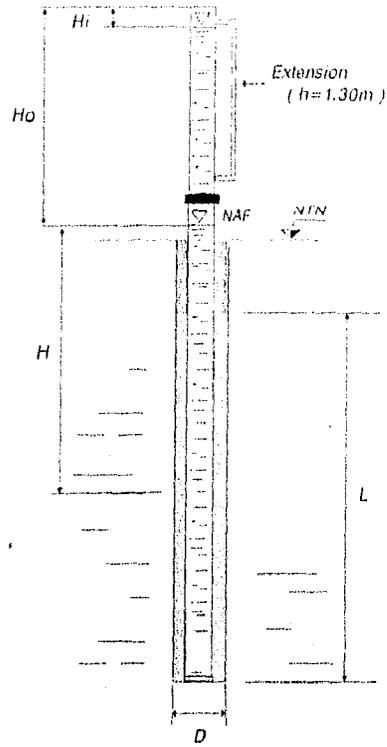


Fig 20 Prueba Lefranc-Mandel con extensión

Los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 1

Pozo #	k USBR E-19 [cm/s]	k Lefranc [cm/s]	Q ₃ [cm ³ /s]	Pozo #	k USBR E-19 [cm/s]	k Lefranc [cm/s]	Q ₃ [cm ³ /s]
1	4.05E-05		404.61	17	1.21E-05		109.36
2	2.07E-05		251.28	18	1.78E-05		170.58
3	2.34E-05		231.96	19	2.58E-05		306.57
4	3.76E-06		36.11	20	6.04E-05		731.24
5	2.13E-05		395.83	21	3.35E-05		369.68
6*		3.97E-06	20.86	22*		5.82E-06	27.81
7*		1.15E-05	47.61	23*		4.95E-06	27.71
8	4.01E-05		460.88	24*		6.93E-06	43.64
9	2.59E-05		442.93	25*		4.75E-06	33.71
10	5.73E-06		65.02	26*		1.28E-05	76.48
11	9.54E-06		60.84	27		4.31E-06	44.39
12	5.39E-05		468.64	28		4.85E-06	86.57
13	3.10E-06		26.95	29		2.02E-05	293.21
14	1.55E-06		7.59	30*		4.50E-06	79.14
15		2.20E-05	42.90	31*		4.94E-06	84.37
16*		1.22E-05	42.53	32*		1.65E-06	26.33
				33		2.52E-06	42.08
				34		9.80E-07	16.80
				<i>Gasto total filtrado en l/s =</i>			5,576

* Pozos que sufrieron artesianismo.

Tabla 1 Resultados de pruebas de permeabilidad en pozos de 5m de profundidad.

A partir de los resultados obtenidos es posible asignar al suelo un coeficiente de permeabilidad medio de 1.5×10^{-5} cm/s. La zona sudeste es la que presenta menor permeabilidad mientras la máxima se registra en el lado noroeste (fig 21). Conviene subrayar que los coeficientes de permeabilidad así determinados resultaron mucho menores que los obtenidos en 1981 en pruebas del mismo tipo, pero más superficiales.

Tomando en cuenta lo anterior y ya que el primer metro de los pozos ensayados tenía un sello de bentonita, como se mencionó anteriormente (fig 5), se consideró necesario realizar pruebas adicionales para observar si se presentaba un aumento en la permeabilidad debido a la presencia de grietas por secado en el estrato superior. Se excavaron sin ademe 5 pozos

con un diámetro medio de 15cm, en sitios donde no se presentaba artesianismo, hasta una profundidad de 1.5m.

La localización de estas pruebas se muestra en la fig 8 y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla II. Se realizaron pruebas tipo USBR E-19 . Se notó un aumento considerable en la permeabilidad:

- Pozo #3, de 4.05×10^{-5} a 5.63×10^{-5} cm/s, (1.39 veces mayor).
- Pozo #4, de 3.76×10^{-6} a 1.25×10^{-4} cm/s, (33.24 veces mayor).
- Pozo #5, de 2.15×10^{-5} a 4.38×10^{-5} cm/s, (2.04 veces mayor).
- Pozo #19, de 2.58×10^{-5} a 7.78×10^{-5} cm/s, (3.02 veces mayor).
- Pozo #20, de 6.04×10^{-5} a 8.78×10^{-5} cm/s, (1.45 veces mayor).

Pozo #	k [cm/s]
3	5.63E-05
4	1.25E-04
5	4.38E-05
19	7.78E-05
20	8.87E-05

Tabla II Coeficientes de permeabilidad obtenidos en pozos de 1.5m de profundidad.

En promedio, se tiene un incremento en la permeabilidad de 8.2 veces respecto a las pruebas más profundas, lo que confirma la hipótesis de que la capa más superficial es más permeable que los estratos subyacentes debido al agrietamiento por secado.

Por otra parte, se realizaron pruebas de achique y recuperación de nivel en los pozos profundos para verificar su funcionamiento. Estas pruebas mostraron una rápida recuperación del nivel del agua en los pozos, confirmando el funcionamiento correcto de los pozos y descartando la posibilidad de que se encuentren tapados.

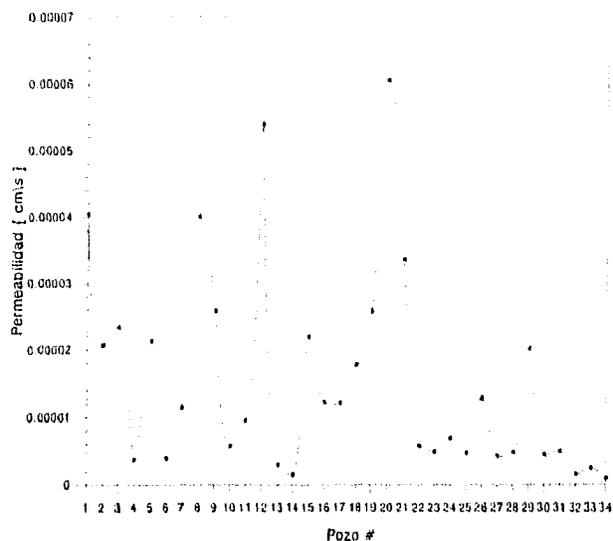


Fig 21 Permeabilidades obtenidas en el perímetro de la laguna.

2.5 Pruebas de permeabilidad de laboratorio

2.5.1. Objetivo

Determinar el coeficiente de permeabilidad en el laboratorio de materiales característicos de la laguna de evaporación solar para poder comparar los resultados con los obtenidos en pruebas de campo.

2.5.2. Introducción

Características generales del permeámetro.

Para la realización de pruebas de permeabilidad en el laboratorio se usó un permeámetro de carga variable y pared flexible. Este tipo de permeámetro, desarrollado inicialmente para suelos finos compactados, presenta las siguientes características:

1. Se puede aplicar contrapresión para aumentar el grado de saturación.
2. Se puede aplicar presión confinante para lograr un sellado total entre la muestra y el permeámetro.

3. La altura de la muestra es corta en comparación con las muestras utilizadas en cámaras triaxiales ($l = 5.5$ cm).
4. El área de la muestra es grande, por lo que se tiene un menor efecto de escala y una mayor precisión.
5. Se pueden aplicar gradientes hasta de 20.
6. El intervalo de coeficientes de permeabilidad k , que se pueden medir es de $1 \times 10^{-5} < k < 1 \times 10^{-11}$ m/s.

En la fig 22 se presenta un esquema del permeámetro de carga variable con sus componentes.

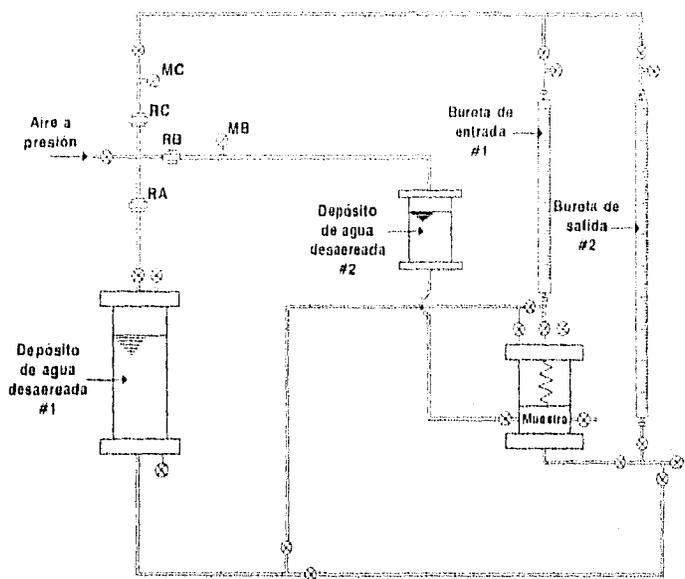


Fig 22 Permeámetro de carga variable y pared flexible.

2.5.3. Desarrollo de las pruebas

El desarrollo experimental de estas pruebas se presenta en el Anexo II.

Muestras ensayadas.

Se ensayó primero una arena fina de características conocidas (SP) con el fin de verificar el funcionamiento del permeámetro. Posteriormente, con la ayuda de los perfiles estratigráficos obtenidos de cada pozo se eligieron tres muestras representativas, realizándose también otra prueba con la arena que formaba parte del filtro de los pozos.

Se realizaron en total seis pruebas:

1. Prueba de calibración, con arena fina SP.
2. Con arcilla CH inalterada, con agua dulce.
3. Con arcilla CH inalterada, con salmuera.
4. Con limo MH "inalterado", con agua dulce.
5. Con arena SM "inalterada", con agua dulce.
6. Con arena de filtro de los pozos, con agua dulce.

Se realizó una prueba con salmuera para observar si ésta tiene alguna influencia en la permeabilidad de las arcillas, dadas las características químicas de las mismas.

Las muestras inalteradas se extrajeron en pozos a cielo abierto, arriba del nivel freático. Se empaquetaron en Mexicali y se ensayaron en los laboratorios del Instituto de Ingeniería UNAM, en la ciudad universitaria de la ciudad de México.

2.5.4. Resultados

En la Tabla III se muestran las propiedades índice de cada muestra ensayada.

Muestra No.	Prof.	w (%)	Gw (%)	F (%)	S (%)
1	1.00 a 1.30	30.8	100	73.2	26.7
2	1.50 a 1.80	8.9	34	24.71	75.28
4	***	17	62	0.7	94
5	1.00 a 1.50	37.3	74	0	100

Muestra No.	WL (%)	WP (%)	IP (%)	γ_{ur} [gr/cm ³]	SS	Clasific. SUCS
1	29.8	26.54	3.26	1.89	2.73	ML
2	***	***	***	1.73	2.73	SM
4	***	***	***	1.84	2.75	SP
5	76.2	28.7	47.5	1.68	2.84	CH

Tabla III Propiedades de las muestras ensayadas.

Muestra	G _{W0} %	Presión		
		Contrapresión Kg/cm ²	Confinante Kg/cm ²	k cm/s
#1 Limo de alta plasticidad con 26.7% de arena fina	100	1.5	2.3	3.01 a 3.77x10 ⁻⁵
		2	2.8	2.15 a 2.17x10 ⁻³
		2.5	3.3	2.15 a 2.17x10 ⁻⁵
		3	3.8	2.15 a 2.17x10 ⁻⁵
#2 Arena fina con 24.71% de finos limosos	95	1.5	2.3	2.82 a 3.10x10 ⁻⁴
		2	2.8	3.37 a 3.77x10 ⁻⁴
		3	3.8	3.36 a 4.33x10 ⁻⁴
#4 Arena mal gradonda con 0.7% de finos	98	1	1.5	2.32 a 3.29x10 ⁻³
		1.5	2	11.3 a 9.97x10 ⁻⁴
		2	2.5	5.15 a 6.43x10 ⁻⁴
		2.5	3	9.03 a 13.2x10 ⁻⁴
#5 Arcillo de alta plasticidad ensayada con salmuera.	90	1	2	5.24 a 6.38x10 ⁻⁶
		2	3	4.21 a 5.61x10 ⁻⁶
		3	4	5.82 a 8.52x10 ⁻⁶
		4	5	5.93 a 7.97x10 ⁻⁶
#5 Arcilla de alta plasticidad ensayada con agua dulce	95	1	2	13.0 a 4.35x10 ⁻⁶
		2	3	6.63 a 7.86x10 ⁻⁶
		4	5	13.0 a 3.06x10 ⁻⁶

Tabla IV Permeabilidades obtenidas bajo distintas presiones

En la Tabla IV podemos observar que se presentan valores del coeficiente de permeabilidad del orden de 13.2×10^{-4} a 3.06×10^{-6} cm/s. La permeabilidad media obtenida en pruebas de campo fue de 1.55×10^{-5} cm/s, por lo que se puede decir que el resultado obtenido en campo se encuentra dentro del intervalo de los valores registrados en laboratorio.

2.5.5. Propuesta de un nuevo permeámetro

Para el diseño del nuevo permeámetro se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones (Daniel D.E. 1984):

- Compatibilidad entre el líquido permeante y los materiales utilizados para construir el permeámetro.
- Colocación de diferentes especímenes con diferentes diámetros
- El número de piezas en contacto con el líquido permeante sea mínimo.
- No se incluirá un pistón de carga porque ocasiona una consolidación isotrópica del espécimen.
- Un tubo de acrílico de 6.3mm de espesor puede soportar presiones confinantes de hasta 560 kPa.
- Espacio suficiente entre el espécimen y el tubo de acrílico para poder medir deformaciones axiales.

Los planos a detalle del nuevo permeámetro se encuentran en el Anexo III.

La nueva celda del permeámetro estará formada por un tubo de acrílico sellado por dos tapas de aluminio, en su interior contará con una base y un cabezal que contendrán a la muestra, de acero inoxidable e intercambiables. El espécimen será confinado con agua desaerada y se protegerá con una membrana de látex que estará sujeta y sellada a la base y cabezal por o-rings.

Las buretas de entrada y de salida, como se indican en la fig 22, tendrán un diámetro mayor. Esto nos permitirá saturar a la muestra con mayor rapidez sin tener que elevar los niveles de las mismas, también disminuirán el error en la lectura por cambios de temperatura.

La utilización de este nuevo permeámetro permitirá: colocar las muestras de manera sencilla en la cámara, eliminar la oxidación en alguna de las piezas que lo conforman cuando se utilizan líquidos permeantes como la salmuera, tener la posibilidad de colocar muestras de diferentes diámetros, ya que en ocasiones la cantidad de material con la que contamos o la forma de la muestra no corresponde al diámetro manejado, y principalmente tener mayor confianza y precisión en las lecturas realizadas.

2.6 Estimación de las filtraciones

Las filtraciones pueden estimarse aceptando que se presenta el mecanismo II que se muestra en la fig 16.

Para estas condiciones, y aceptando en forma conservadora un factor de forma de la red de flujo unitario, el gasto puede calcularse aproximadamente por medio de la fórmula:

$$Q = k L h$$

donde:

- k coeficiente de permeabilidad del suelo, m/s
- L longitud del tramo de bordo considerado
- h diferencia de nivel entre el espejo de la laguna y el NAF fuera de la laguna

Considerando las condiciones geométricas y el coeficiente de permeabilidad como constantes en el tramo de bordo tributario de cada pozo, es posible calcular en forma aproximada el gasto total de filtración. Con los coeficientes de permeabilidad indicados en la Tabla I, este gasto resulta del orden de 5.6l/s. Si se toma en cuenta la existencia de un estrato superficial más permeable (Tabla II) las filtraciones calculadas alcanzan un valor mayor, pero inferior a 40l/s.

Es posible verificar que el gasto calculado es poco sensible a las variaciones de tirante (del orden de 50cm) que pueden presentarse en la laguna.

2.7 Conclusiones

De los resultados obtenidos en el campo y confirmados por las pruebas de laboratorio, se deduce que la permeabilidad de los suelos en los que se encuentra construida la laguna es extremadamente baja y por tanto las filtraciones también deben serlo. Se presenta un incremento importante de permeabilidad en las pruebas realizadas en los pozos más superficiales, probablemente por la presencia de grietas por secado. Sin embargo, aún tomando en cuenta esta permeabilidad mayor en la superficie, los gastos de filtración calculados resultan pequeños y no deberían rebasar unas cuantas decenas de litros por segundo.

También es conveniente subrayar que las filtraciones deben ser menores en la parte sudeste de la laguna ya que, en esta zona, el subsuelo es más arcilloso y contiene poca arena y por tanto presenta una permeabilidad más baja.

CAPITULO 3. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN A GRAN ESCALA

3.1 Planteamiento

Con objeto de verificar los resultados del estudio geotécnico se consideró útil realizar pruebas de infiltración a gran escala en condiciones controladas.

Por una parte, se realizó una prueba global de infiltración en la laguna de evaporación suspendiendo las extracciones durante un periodo de 12 días.

Por otra parte, se aisló un tramo del dren # 324, paralelo al bordo oriente de la laguna, y se realizó una prueba de recuperación del nivel de agua en este dren, después de abatirlo por bombeo.

3.2 Balances de Masa

3.2.1 Información recibida

La Comisión Federal de Electricidad tuvo a bien proporcionar la siguiente información aprovechable para fines de balances:

- Datos climatológicos:

- Medición de temperatura máxima y mínima registrada en el campo geotérmico, estación climatológica Ej. Hidalgo (Enero a Agosto de 1995).
- Medición de temperatura, bulbo seco, húmedo y humedad relativa (Junio a Agosto de 1995).
- Medición de evaporación en 24 horas, registrada en la estación Ej. Hidalgo (Enero a Agosto de 1995).

- Medición de evaporación en evaporímetro de acero inoxidable con agua dulce (Enero a Agosto de 1995).
- Medición de precipitación pluvial registrada en la estación climatológica Ej. Hidalgo (Enero a agosto de 1995).
- Medición de dirección y velocidad media del viento, registrada en la estación climatológica Ej. Hidalgo. (Enero a Agosto de 1995).
- Medición de la humedad relativa máxima y mínima registrada en la estación climatológica Ej. Hidalgo. (Enero a Agosto de 1995).

- Datos de descarga a la laguna

- Descargas de la planta de evaporación instantánea (Enero a Julio de 1995).
- Bombeo del cárcamo a la laguna de evaporación (Enero a Julio de 1995).
- Gasto total alimentado a la laguna de evaporación (Enero a Julio de 1995).
- Nivel del espejo en la laguna (Enero a Agosto de 1995).
- Medición del espejo de agua en nueve regletas colocadas en toda el área de la laguna (26/Jul/95 al 11/Jun/95).
- Entradas a la laguna (Enero a Julio de 1995).

- Datos de salida de la laguna

- Gastos reinyectados en los pozos I-1,2,3 y 4 (Enero a Agosto de 1995).
- Gastos reinyectados en los pozos M-6,7,94 y 109 (Enero a Agosto de 1995).
- Gastos reinyectados en el pozo 0-473 (Enero a Agosto de 1995).
- Gastos reinyectados en los pozos E-6 y 16A (Enero a Agosto de 1995).
- Gastos reinyectados en el pozo 303 (Enero a Agosto de 1995).
- Gastos reinyectados en el campo geotérmico de Cerro Prieto (Enero a Agosto de 1995).
- Salidas de la laguna de evaporación a la ampliación oeste (Enero a Agosto de 1995).
- Salidas de la laguna de evaporación a la ampliación vertedor (Enero a Agosto de 1995).
- Salidas de la laguna de evaporación a la ampliación sur (Enero a Agosto de 1995).
- Salidas de la laguna de evaporación a la laguna de cristalización (Enero a Agosto de 1995).
- Gasto total extraído de la laguna de evaporación (1989 a 1995).

3.2.2 Desarrollo

A partir de la información obtenida, es posible establecer balances de volúmenes de salmuera y obtener por diferencia la magnitud de las pérdidas por filtración, que constituye la incógnita. La ecuación de balance se puede escribir:

$$\text{Filtración} = \text{Entrada} - \text{Salida} - \text{Evaporación} - \text{Acumulación} - \text{Reinyección}$$

durante el periodo considerado no se presentan salidas de la laguna de evaporación por lo que se eliminan dos incógnitas y por lo tanto la ecuación queda:

$$\text{Filtración} = \text{Entrada} - \text{Evaporación} - \text{Acumulación}$$

La prueba consistió en suspender la extracción de la laguna durante un periodo de 12 días (Julio 27 a agosto 7, 1995) y en observar las variaciones de niveles en diferentes puntos de la laguna.

3.2.3 Resultados brutos

Al analizar los datos, se observa de inmediato que el gasto de alimentación de salmuera a la laguna fue bajo durante el periodo considerado (del orden de $1.54 \text{ m}^3/\text{s}$). Por lo contrario, la evaporación medida en evaporímetros conduce a un valor estimado de la evaporación alto que puede explicarse por la canícula excepcional (la más acentuada en 60 años) que se presentó en Mexicali durante la prueba (Fig 23).

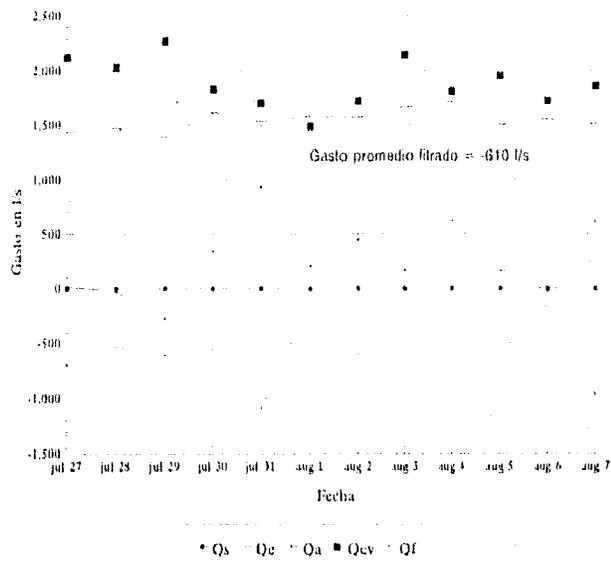


Fig 23 Resultados brutos obtenidos de la prueba a gran escala en el evaporador

3.2.4 Corrección de resultados

a) Correcciones especulativas

Es posible modificar los balances con base en consideraciones de sentido común como las siguientes:

- Las filtraciones no pueden ser negativas

- El gasto de filtración depende del tirante en la laguna. Sin embargo, las variaciones de tirante de una época a otra no son suficientes para producir cambios fuertes en el gasto de filtración. Según la ley de Darcy, una variación de tirante de 50cm no debería hacer variar las filtraciones en más de 34 % para las condiciones geométricas de la laguna.

- A consecuencia de lo anterior, debe existir una correlación entre tirante y gasto de filtración pero cualquier otra correlación significativa (positiva o negativa) que se detecte entre uno de los términos del balance y las filtraciones calculadas debe interpretarse como un error de medición sistemático (sobrestimación o subestimación sistemática) en dicho término.

- Se realizó tanto en la evaporación como en la acumulación promedios móviles en los datos iniciales, esto con el objeto de disminuir el error en las lecturas y se tenga como resultado una gráfica más estable.

b) Corrección adicional por evaporación.

Se realizó un nuevo balance aplicando un factor de corrección por área de 0.64 a la evaporación. Los resultados se presentan en la Fig 24. Considerar este factor conduce a filtraciones calculadas positivas del orden de 100 l/s.

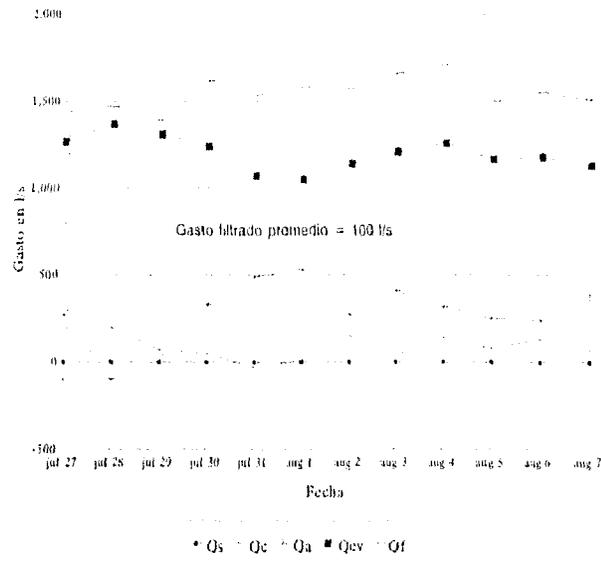


Fig 24 Resultado obtenidos de la prueba a gran escala con un factor de corrección de 0.64 en la evaporación

3.3 Prueba en el dren # 324

La localización de la prueba se indica en la Fig 25. La prueba constó de las etapas siguientes:

a) Levantamiento de perfil y secciones transversales del dren

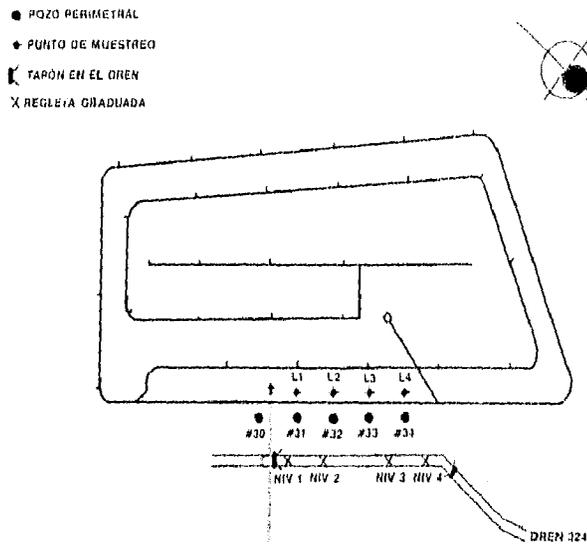


Fig 25 Prueba a gran escala en el dren # 324

- b) Levantamiento de secciones en las que se encontraban pozos de observación
- c) Achique por bombeo
- d) Observación de la recuperación del nivel (medición de niveles y temperatura, 950628 a 950811) en el dren y en los pozos de observación cercanos.

En la Fig 26 se presenta una gráfica típica de recuperación de nivel. Se observa que la recuperación es extremadamente lenta a pesar de la proximidad de la laguna, lo que confirma la muy baja permeabilidad del subsuelo, especialmente al poniente de la laguna.

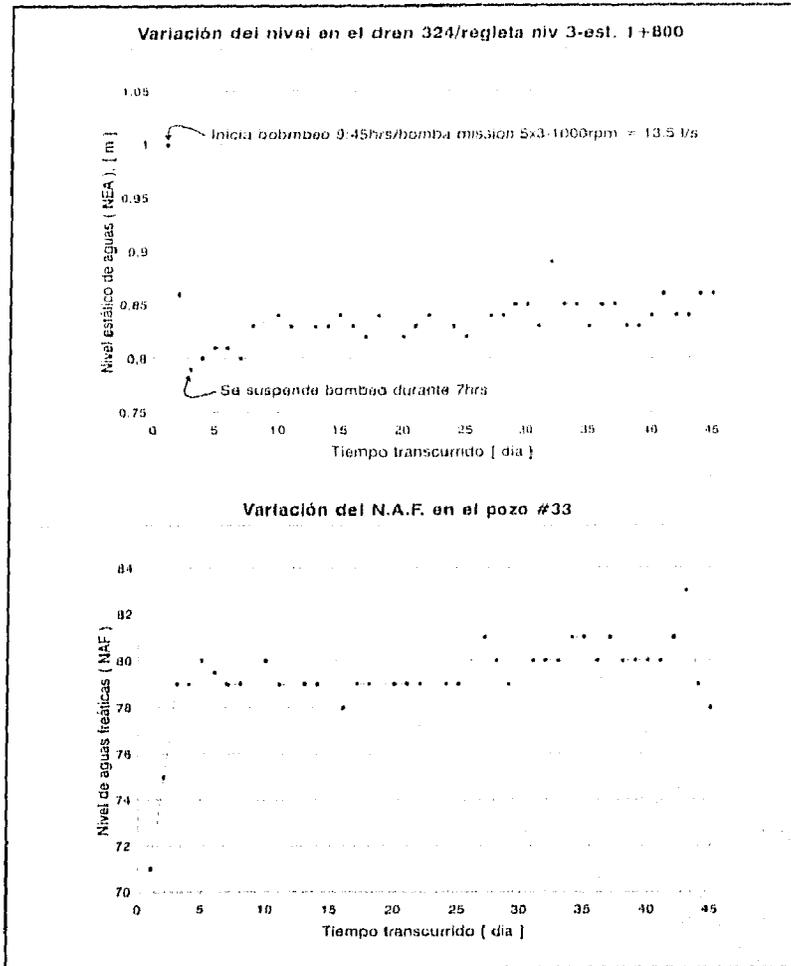


Fig 26 Gráfica típica de recuperación de nivel en el dren #324

3.2.6 Conclusiones

La prueba de infiltración global en el evaporador no es concluyente ya que deben revisarse los datos climatológicos y de alimentación del periodo de prueba. Pero sin embargo los resultados obtenidos muestran una filtración muy baja.

La prueba a gran escala en el dren # 324 confirma los resultados obtenidos en las pruebas de permeabilidad realizadas en los pozos perimetrales y muestra que el subsuelo de la

laguna presenta una permeabilidad muy baja, por lo que las filtraciones deberían ser también pequeñas.

CAPITULO 4. ANÁLISIS QUÍMICOS

4.1 Antecedentes

Se intentó localizar las zonas de mayor infiltración usando la composición química y la temperatura del agua como trazador. En efecto, puede pensarse que en las zonas donde existe mayor similitud entre la salinidad y temperatura del agua de la laguna y las del subsuelo en el área perimetral, existe un flujo más importante.

Con este objetivo, se realizaron análisis del agua en 17 de los pozos perimetrales (uno de cada dos) y, simultáneamente, en puntos de la laguna localizados directamente en frente de los mismos. Se midió también la temperatura en cada pozo y en la laguna.

Como antecedentes, se dispone de la composición química del agua del subsuelo medida en las zonas hidrotermales del área, antes de la construcción de la laguna (Mercado 1977) y de la composición de la salmuera de la laguna en diversos puntos de muestreo en 1990 y en 1994 (Anexo IV).

4.2 Resultados de análisis de muestras obtenidas en pozos y en la laguna

Los resultados de los análisis se presentan en forma resumida en el Anexo IV en un plano preparado por EIBC donde se indicó la temperatura, el PH, la densidad, los sólidos totales disueltos y el contenido de sodio en ppm..

En la Fig 27 se muestran comparaciones entre las concentraciones en sodio medidas en los pozos y en la laguna.

En la Fig 28 se establecen comparaciones análogas en cuanto a temperatura.

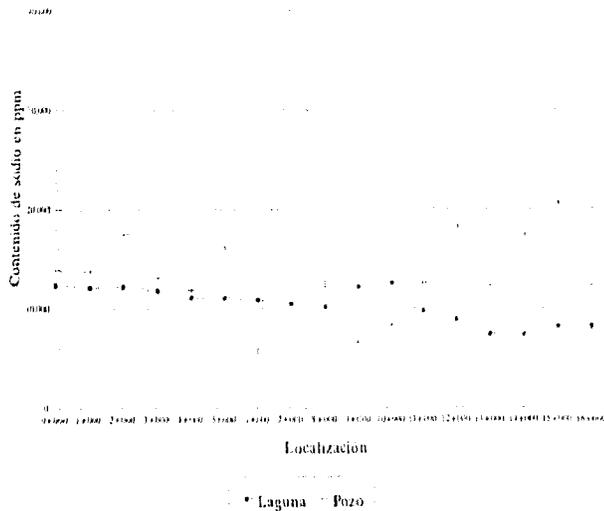


Fig 27 Concentración salina en pozos perimetrales y en la laguna

4.2.1 Concentraciones salinas

Respecto a las concentraciones salinas, pueden hacerse los siguientes comentarios:

- antes de construirse la laguna, el contenido de sodio en manifestaciones hidrotermales era del orden de 4000ppm, salvo en las zonas de manifestaciones geotérmicas más intensas (fumarolas) donde alcanzaba hasta 79800ppm.
- dentro de la laguna, en las condiciones actuales de operación, la concentración de la salmuera varía de aproximadamente 7000ppm en la descarga hasta 12500ppm a la salida a los cristalizadores. También se alcanzan concentraciones altas en la parte sudoeste del evaporador donde se ha formado una área muerta.
- en los pozos perimetrales se encontraron concentraciones de sodio que varían de 5500 a 43750 ppm , con un valor medio de 15070ppm que resulta claramente mayor que los valores registrados en la laguna. Se observa una gran dispersión de un pozo a otro, lo que indica que en las zonas de mayor salinidad inicial del subsuelo los picos de concentración no han sido borrados por dilución atribuible a la presencia de la laguna (véase pozo #15 que quizá puede asociarse con el punto 9 de Mercado).

- Existen algunos puntos de coincidencia aproximada entre la concentración del pozo y de la laguna (1, 3, 7, 9, 17) que podrían ser puntos de concentración del flujo de infiltraciones, sin embargo, en general, no parece existir correlación entre laguna y pozos, lo que es índice de que las infiltraciones son pequeñas.

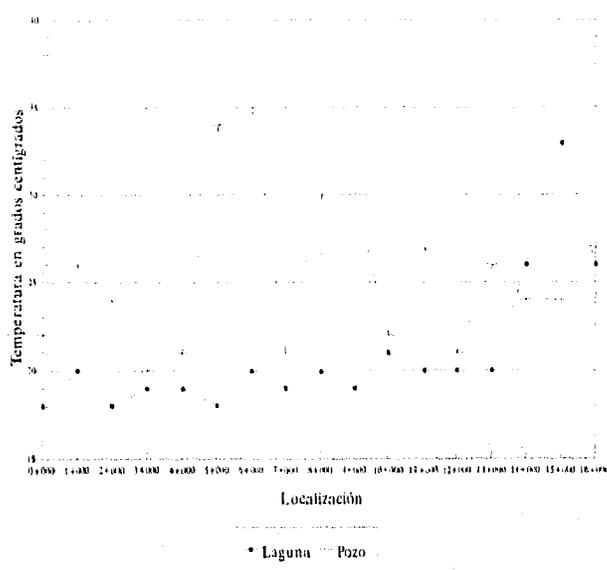


Fig 28 Temperaturas en pozos perimetrales y en la laguna

4.2.2 Temperaturas

Respecto a temperaturas, conviene subrayar lo siguiente:

- En el periodo de análisis la temperatura media de los pozos resultó de 25.5 grados, es decir claramente mayor que la de la laguna que se mantuvo ligeramente abajo de 20 grados, excepto en la zona de descarga.
- La temperatura medida en pozos presenta una fuerte dispersión con picos que deben asociarse al flujo geotérmico vertical local (principalmente pozos 11, 13, 17, y 19).
- Existen algunos puntos de coincidencia aproximada entre la temperatura del pozo y de la laguna (7, 9, 15, 17, 21, 33). De estos, solamente dos : los pozos 7 y 9 presentaron también coincidencia de concentración.

- A raíz de las observaciones anteriores y con afán de iniciar una cuantificación del fenómeno de flujo térmico vertical, se realizaron las mediciones de perfil de temperatura en pozos que se presentan en el Anexo IV. En este anexo se observa que en los pozos 10, 11, 12, 13, y sobre todo 14, la temperatura aumenta rápidamente con la profundidad y alcanza hasta 70 grados en el fondo del pozo. En este mismo Anexo se observa que por lo contrario existen algunos pozos fríos. En el caso del pozo 9, por ejemplo, el perfil obtenido refuerza la sospecha de que se encuentra en una zona donde las infiltraciones son más significativas.

4.3 Conclusiones

Los análisis químicos y las mediciones de temperatura realizadas refuerzan la idea de que las filtraciones son pequeñas puesto que, en general, no se observa correlación de salinidad ni de temperatura entre pozos perimetrales y puntos próximos de la laguna.

Existen algunas excepciones (pozos 7 y 9) que pueden corresponder a zonas de filtración más importantes.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los estudios geotécnicos realizados han permitido mostrar que la permeabilidad del subsuelo en el que se encuentra construida la laguna de evaporación de Cerro Prieto es inferior a la que se había considerado en el estudio de factibilidad de 1981 a partir de pruebas más superficiales. Tomando en cuenta estos nuevos resultados y una prueba a gran escala realizada en el dren # 324, puede concluirse que las pérdidas de salmuera por filtración para el evaporador en su conjunto no deberían rebasar algunas decenas de litros por segundo. Las filtraciones no constituyen por tanto un obstáculo al desarrollo del proyecto.

La conclusión anterior está reforzada por los análisis químicos del subsuelo en el perímetro de la laguna

Los balances de masa realizados para confirmar estos resultados no fueron concluyentes. En efecto, existe una incertidumbre fuerte sobre varios términos del balance (principalmente sobre las entradas y la evaporación) y parece imprescindible tomar en cuenta en dicho balance el efecto del aporte térmico del subsuelo, lo que requerirá estudios adicionales basados en balances de energía.

Recomendaciones

1. Realizar un estudio de balances de energía apoyados en mediciones meteorológicas, de temperatura del agua de la laguna y de temperatura del subsuelo que permitan calificar la evaporación inducida y establecer una estimación final, con la ayuda de los balances de masa, de las pérdidas por filtración de la laguna.
2. Efectuar una evaluación de las pérdidas por filtración en los vasos de cristalización, ya que una filtración aún pequeña, significaría pérdidas económicas significativas y

supondría el procesamiento de un volumen mayor de salmuera para lograr el objetivo de producción fijado, lo que a su vez requeriría disponer de un área mayor de evaporación.

3. El diseño original del evaporador se basó en un modelo matemático simplificado que permitió en particular determinar la superficie del evaporador y de los vasos cristalizadores. Realizar un nuevo modelo matemático que tome en cuenta; volumen disponible de salmuera, filtraciones estimadas, tirantes máximos y mínimos en la laguna, aportes térmicos externos, etc.

BIBLIOGRAFIA

1. Auvinet, G., abr 1981, "*Lagunas de cristalización de Cerro prieto, B.C. Estudio del procedimiento de impermeabilización*", Informe del Instituto de Ingeniería a Fertilizantes Mexicanos, S.A., proy 525.
2. Auvinet, G., jun 1983, "*Design and construction of a solar evaporation pond*", VIIIth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vancouver, Canada
3. Auvinet, G. y Esquivel, R., 1986, "*Impermeabilización de lagunas artificiales*", LIMUSA y Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
4. Auvinet, G. e Iturbe, R., dic. 1980, "*Lagunas solares para recuperación de potasio, Cerro prieto, B.C., Información básica para diseño de detalle*", Informe del Instituto de Ingeniería a Fertilizantes Mexicanos, S.A., proy 525.
5. Auvinet, G., Zavala, J. y Gutiérrez, E., mar 1980, "*Laguna de evaporación de Cerro prieto, B.C., Estudio de factibilidad. (Aspectos geotécnicos)*", Informe del Instituto de Ingeniería a Fertilizantes Mexicanos, S.A., proy 9142.
6. Badillo B. y Rico R., 1989, "*Mecánica de suelos, Fundamentos de la mecánica de suelos*", Tomo I, Ed. LIMUSA, 3ra edición, México D.F.
7. Badillo B y Rico R., 1991, "*Mecánica de suelos, Flujo de agua en suelos*", Tomo III, Ed. LIMUSA, México D.F.
8. Boyton S.S. and Daniel D.E., apr 1995, "*Hydraulic Conductivity Tests on Compacted Clay*", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. III, No. 4, pp. 465-478.

9. Carpenter G. W. and Stephenson R.W., mar 1986. "Permeability Testing in the Triaxial Cell", ASTM Geotechnical Testing GTJODJ Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 3-9.
10. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, 1994, "Geotérmica Cerro Prieto", Folleto descriptivo del proyecto
11. Daniel D.E., Trautwein S.J., Boyton S.S. and Foreman D.E., sep. 1984, "Permeability Testing with Flexible Wall Permeameters", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol 7, No. 3, pp. 113-122.
12. Gutierrez E., 1981, "Pruebas de permeabilidad en suelos finos compactados", Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
13. Hiriart, G. y Auvinet, G., G., dic 1979, "Laguna de evaporación de Cerro prieto, B.C., Estudio de factibilidad. (Aspectos geotécnicos)", Informe del Instituto de Ingeniería a Fertilizantes Mexicanos, S.A., proy 9142.
14. Hiriart, G. y Pereyra, D. "Balance de energía agua-atmósfera y algunas aplicaciones", Memoria, IX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
15. Iturbe, R., Auvinet, G., Espinoza, J. y Muñoz, F., oct. 1980, "Recuperación del potasio de la salmuera residual de Cerro Prieto, B.C. (2da etapa)", Informe del Instituto de Ingeniería a Fertilizantes Mexicanos, S.A., proy 115, 116, 117, 118, 525. Con Anexos.
16. Moreno, E., 1969, "Estudio geotécnico, Planta Geotermoeléctrica Cerro Prieto", Informe interno, Comisión Federal de Electricidad, México
17. SARH, 1970 "Manual de mecánica de suelos", Quinta edición, México D.F.
18. Turk. L.J., 1970, "Evaporation of brine", Water Resources, Vol 6, pp. 1209-1215
19. Uppot J.O. and Stephenson R.W., jan 1989, "Permeability of Clays Under Organic Permeants", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 1, pp. 115-131.
20. Zangar C.N., apr 1953, "Theory and Problems of Water Precolation", United States Department of The Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, No. 8, Denver Colorado.

ANEXO I. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE CAMPO.

I.A. Prueba USBR E-19

a) Introducción.

Estas pruebas están regidas por la norma E-19 del U.S. Bureau of Reclamation. Mediante esta prueba es posible determinar el gasto total filtrado en un pozo sin ademe, bajo condiciones de flujo establecido y un nivel constante, que a su vez nos permite calcular el coeficiente de permeabilidad del suelo analizado. Las dimensiones del pozo deben estar comprendidas de manera que; la profundidad se encuentre entre 10 y 50 veces el radio. Las diversas condiciones posibles para la realización de esta prueba se presentan en la fig 29. (Auvinet, 1986)

El coeficiente de permeabilidad para la condición I, en la que la distancia T entre el espejo de agua y el nivel freático resulta mayor a tres veces la altura h del agua dentro del pozo, puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$k_{20} = 0.0167 \left(\frac{l}{h^2} \right) \left[\operatorname{sen} h^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) - 1 \right] \left[\frac{Q}{2\pi} \right] \left(\frac{\mu_t}{\mu_{20}} \right)$$

donde:

- k_{20} = coeficiente de permeabilidad, en m/s
- h = altura del agua dentro del pozo,
- r = radio efectivo del pozo, m.
- Q = gasto necesario para mantener la condición de flujo establecido, en m³/min
- μ_t = Viscosidad del agua a T°C.
- μ_{20} = Viscosidad del agua a 20°C.

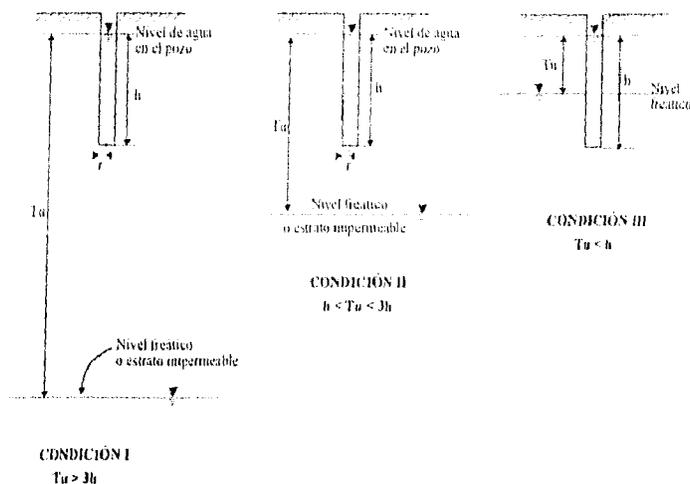


Figura 29 Condiciones posibles para la realización de las pruebas USBR E-19

Para la condición II en la que el nivel freático queda debajo del pozo pero no excede de tres veces la altura del agua dentro del mismo:

$$k_{20} = 0.0167 \left[\ln \left(\frac{h}{r} \right) \right] \left(\frac{Q}{2\pi} \right) \left(\frac{\mu_r}{\mu_{20}} \right) \left(\frac{l}{h^2} \right) \left\{ \frac{l}{\left[\frac{l}{6} + \frac{l}{3} \left(\frac{h}{T_u} \right)^{-1} \right]} \right\}$$

donde:

- T_u = distancia entre la superficie del agua en el pozo y el nivel freático, en m.

En la condición III en la que el nivel freático se encuentra arriba del fondo del pozo, la ecuación será:

$$k_{20} = 0.0167 \left[\ln \left(\frac{h}{r} \right) \right] \left(\frac{Q}{2\pi} \right) \left(\frac{\mu_r}{\mu_{20}} \right) \left(\frac{l}{h^2} \right) \left\{ \frac{l}{\left[\left(\frac{h}{T_u} \right)^{-1} - 0.5 \left(\frac{h}{T_u} \right)^{-2} \right]} \right\}$$

b) Equipo.

Para la realización de estas pruebas se utiliza el dispositivo que se muestra en la figura 30.

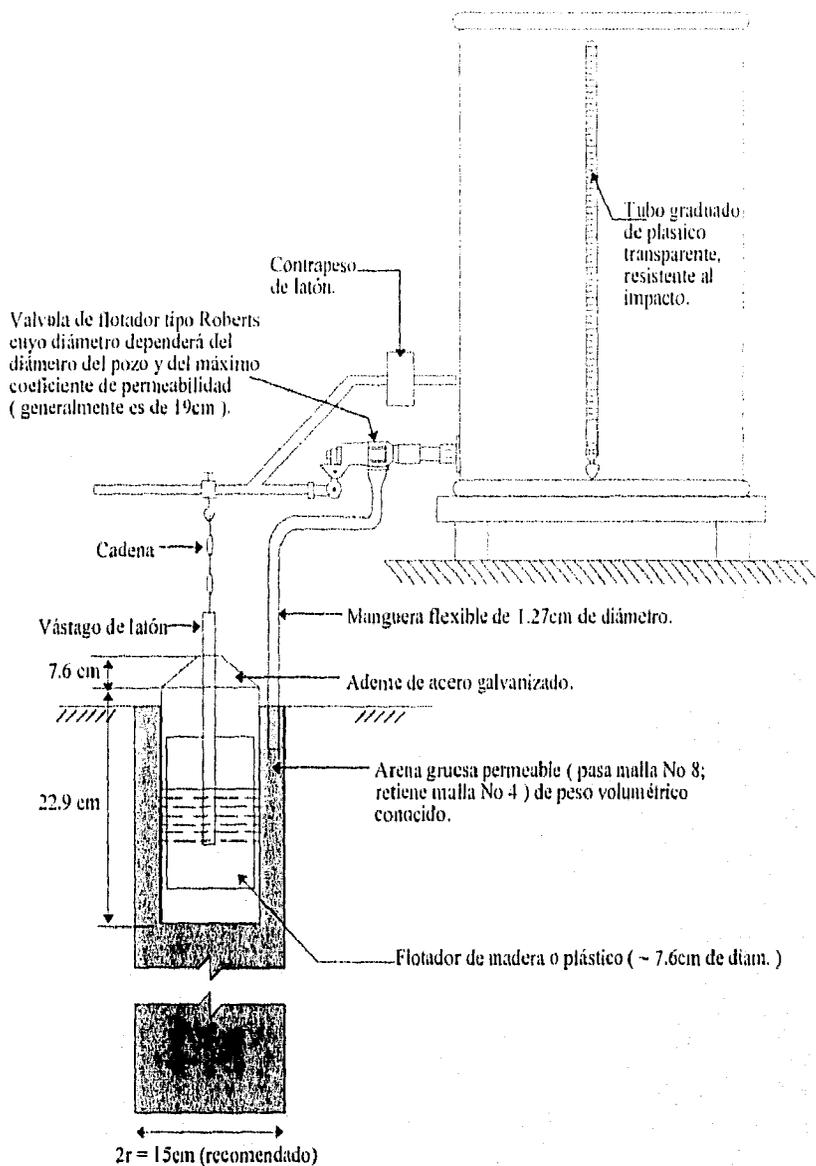


Figura 30. Dispositivo para la realización de pruebas USBR E-19.

- Báscula.
- Flexómetro.
- Cribas del No. 4 y 8.
- Termómetro.
- Cronometro

c) Procedimiento.

1. Se realiza un pozo con dimensiones predeterminadas en el lugar deseado, respetando las condiciones mencionadas con anterioridad, generalmente se le da un diámetro de 15cm. En ningún caso debe utilizarse bentonita como estabilizante, ya que alteraría la permeabilidad del suelo, sería conveniente utilizar únicamente agua.
2. Se limpian las paredes y el fondo del pozo, se llena con arena gruesa permeable de peso volumétrico conocido hasta 15cm abajo del nivel previsto para el agua, lo que evita que las paredes se desplomen al saturarse. Es necesario ir pesando la arena que es agregada al pozo para poder obtener el radio medio.
3. El ademe galvanizado que contiene el flotador se coloca sobre la superficie de la arena y se vierte arena en el espacio que queda entre el ademe y el pozo.
4. Se obtiene el radio medio del pozo con la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{W_a}{h \pi \gamma_a}}$$

en donde:

- W_a = peso de la arena vaciada en el pozo.
 - h = altura desde el fondo del pozo hasta el nivel de la arena.
 - γ_a = peso volumétrico de la arena.
5. Se coloca el flotador conectado al dispositivo descrito en la fig 30. Será necesario mover la cadena hasta que el flotador baje completamente y el agua empiece a fluir hacia el pozo. Se podrá observar que en cuanto el nivel del agua del pozo aumente y mueva el flotador, la válvula del tambor comenzara a cerrarse hasta cierto punto, en este momento se podrá comenzar a medir el gasto de absorción del suelo.

El tambor de 200 l, debe de calibrarse con anterioridad en el tubo de plástico transparente. Debe contener agua limpia sin sedimentos ni material en suspensión.

6. Se registra en la forma mostrada en la fig 31, el volumen de agua absorbido por el suelo, el tiempo transcurrido, la temperatura del agua, y se va realizando la gráfica volumen absorbido contra tiempo. En el momento en el que la pendiente de la curva

no varía, se puede decir que el flujo es establecido, y por lo tanto, se puede finalizar la prueba y calcular el gasto.

7. Se calcula el coeficiente de permeabilidad con las ecuaciones antes mencionadas.

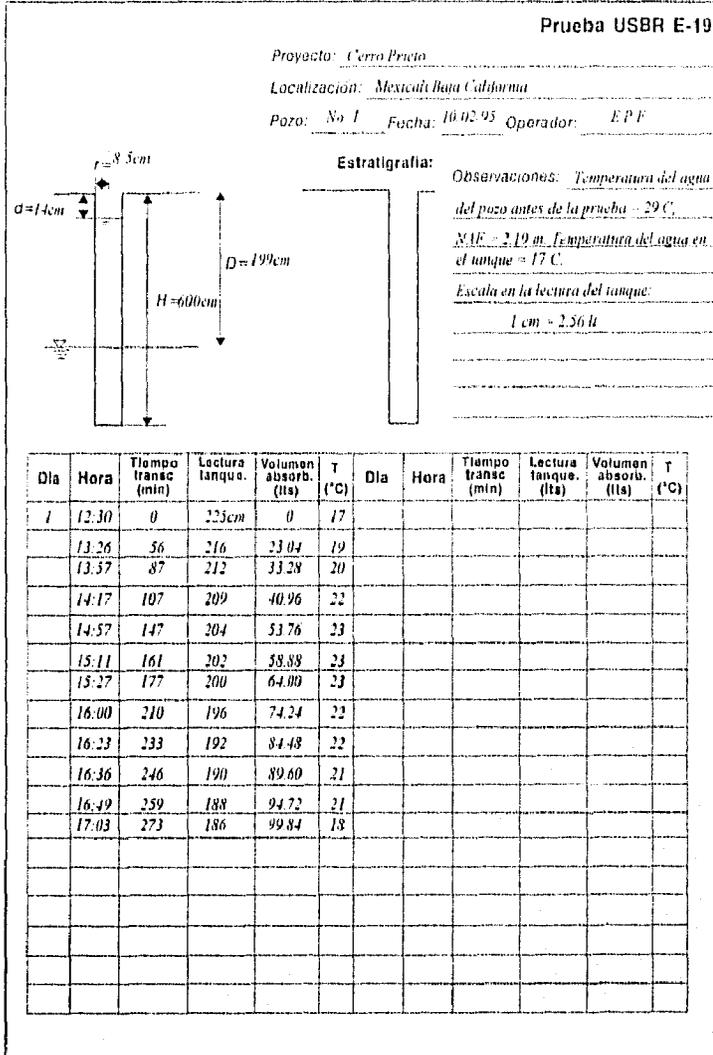


Fig 31 a. Formato para pruebas USBR E-19 (Datos)

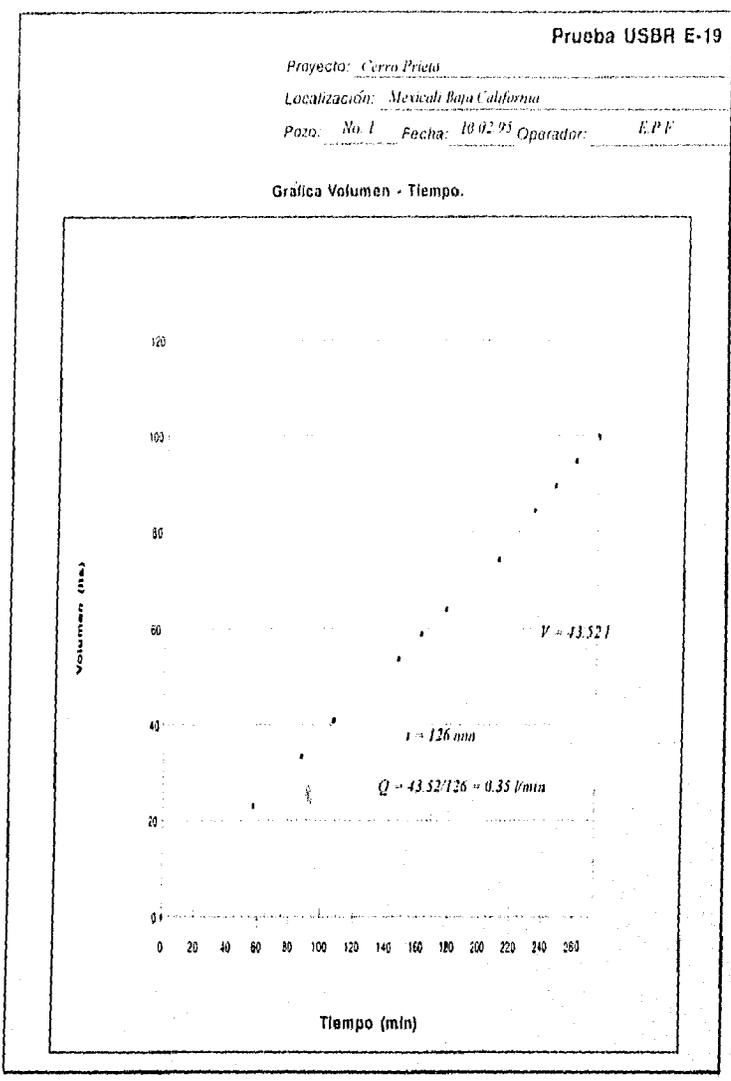


Fig 31 b. Formato para pruebas USBR E-19 (Grafica)

I.B. Pruebas Lefranc-Mandel

a) Introducción.

Mediante esta prueba es posible medir el coeficiente de permeabilidad con cierta precisión en cualquier punto de un terreno aluvial, o de una roca fisurada cuando existe un manto freático que satura el material.

La prueba consiste en inyectar agua en el terreno en un orificio de forma geométrica, situado debajo del nivel freático, con una carga pequeña y constante. La medida del gasto y de la carga que lo originan, permite calcular el coeficiente de permeabilidad, k , con bastante aproximación.

$$Q = Ck\Delta H$$

En donde ΔH , es la carga aplicada, y C es un coeficiente que tiene dimensiones de longitud y depende de la forma de la cavidad, que en este caso es:

$$C = \frac{4\pi}{\left\{ \left(\frac{2}{L} \right) \left(\text{Log} \frac{L}{r} \right) - \left(\frac{1}{2H} \right) \right\}}$$

ya que es un tubo ranurado de longitud L y radio r .

b) Equipo.

El equipo necesario para realizar este tipo de pruebas es el siguiente:

- Bomba
- Sistema de medición del gasto, incluyendo un recipiente elevado con rebosadero, una válvula de agua, un cono al que se adapta una válvula de tres pasos, un recipiente de volumen conocido y un cronometro (fig 30).
- Tubería necesaria para alcanzar la cavidad de inyección.
- Sonda eléctrica para medir el nivel de agua en la perforación.

b) Procedimiento.

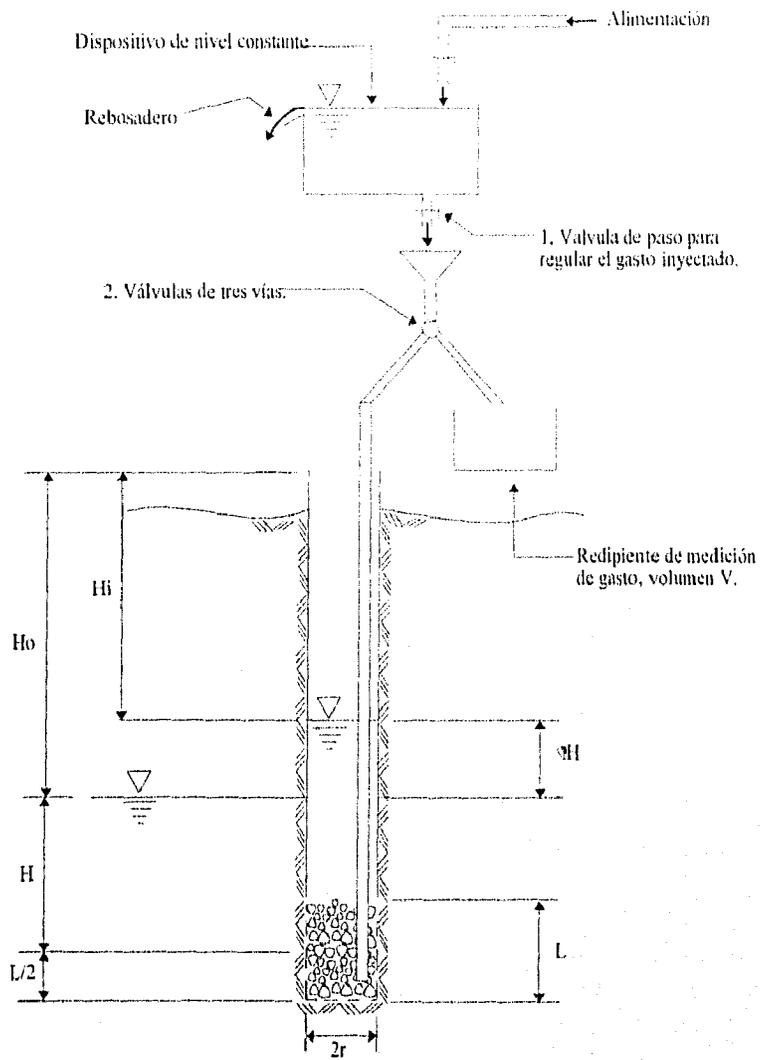


Fig 30 Prueba de permeabilidad Lefranc-Mandel

La forma más usual de efectuar la prueba es la siguiente:

1. Se realiza una perforación hasta la profundidad deseada, estabilizando las paredes mediante un ademe, el cual se rellena con grava limpia de muy alta permeabilidad (grava uniforme de 3 cm, por ejemplo) sobre una longitud igual a la deseada para la prueba, por lo general un metro. A continuación se levanta el ademe un metro, quedando la perforación lista para realizar la prueba. Se anota el diámetro del ademe.
2. Se mide la profundidad del nivel freático, H_0 , respecto a la parte superior del ademe, repitiendo esta medición a distintos tiempos para asegurarse de que el nivel se ha estabilizado.
3. Se pone en marcha la bomba que alimenta el recipiente elevado con rebosadero.
4. Al derramar el agua del recipiente, se abre la válvula 1 (fig 32) con la válvula 2 conectada a la perforación. El agua que se derrama debe canalizarse hasta cierta distancia del punto de medición, o formar un circuito cerrado con el agua para no perturbar la prueba.
5. Se mide la variación del tiempo del nivel de agua, h , en la perforación, respecto a la parte superior del ademe.
6. Cuando dicho nivel queda estabilizado durante 10 min, se anota el nivel correspondiente, H_i .
7. Se conecta la válvula 2 con el recipiente de volumen conocido, y se mide y anota el tiempo, T , necesario para llenarlo.
8. Se repite la prueba en el mismo punto, variando los gastos inyectados y midiendo los respectivos niveles estabilizados de agua en la perforación.
9. Se calcula el coeficiente de permeabilidad del material mediante la fórmula correspondiente al caso de un tubo perforado de longitud L y radio r :

$$Q = CK(H_i - H_0)$$

Por lo tanto:

$$K = \frac{Q}{C(H_i - H_0)}$$

ANEXO II. PRUEBA DE PERMEABILIDAD CON PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE

a) Material

El sistema del permeámetro de carga variable esta formada por (Fig 34)¹:

- 20 Válvulas de bola de cobre.
- 3 Reguladores de presión.
- 2 Manómetros calibrados.
- 2 Buretas graduadas.
- Dispositivo de agua desaerada para saturar el sistema.
- Dispositivo de agua desaerada para aplicar presión confinante.
- Cámara del permeámetro.
- Manguera para conectar todo el sistema.
- Aire a presión.

Para la realización de la prueba se requiere de:

- Cronómetro
- Báscula con marco de carga
- Micrómetro
- Agua destilada y desaerada.
- Anillo para labrar de acero inoxidable de 5.5cm de altura y 13cm de diámetro.

b) Procedimiento de prueba

-Colocación de la muestra dentro del permeámetro:

Una vez labrado o compactado el espécimen dentro del anillo de acero inoxidable, se procede a lo siguiente (ver fig 33):

¹. Las características y los planos detallados del permeámetro se encuentran en la tesis: *Gutiérrez E., " Pruebas de Permeabilidad en Suelos Finos Compactados "*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

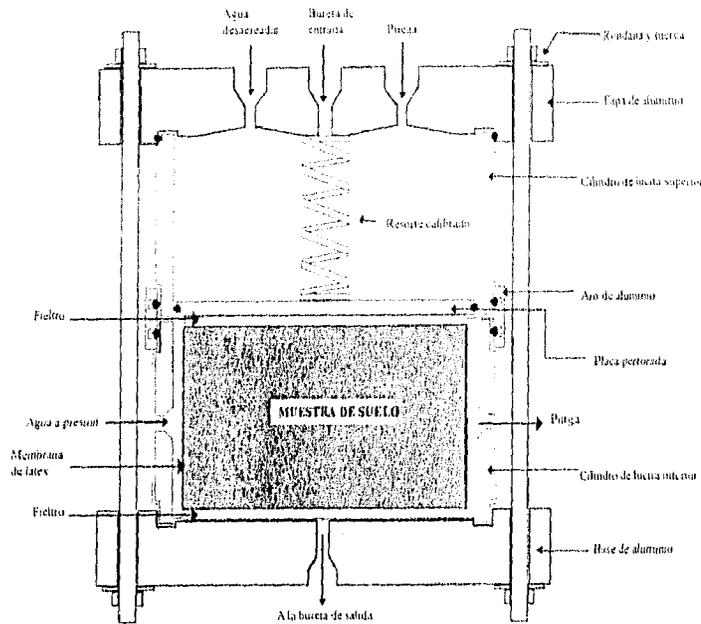


Fig 33. Permeámetro

- a. Se coloca la membrana de látex en el anillo inferior de lucita del permeámetro, abriendo la válvula de dicho anillo para realizar vacío y la membrana quede perfectamente colocada sin arrugas.
- b. Se coloca en la base del permeámetro una membrana de fieltro húmeda, e inmediatamente después, el anillo metálico que contiene la muestra. Con una placa rígida se extruye la muestra y sobre de ella se coloca otra membrana de fieltro húmeda.
- c. Se procede a colocar el anillo con la membrana de látex en la base del permeámetro procurando no tocar las paredes de la muestra; se coloca el aro de aluminio, la placa perforada, el anillo de lucita superior y el resorte bien centrado.
- d. Para cerrar la cámara, se coloca la tapa del permeámetro y las barras con sus rondanas y tuercas inferiores. Se pasa a la báscula, dentro del marco de carga, y se le coloca un micrómetro para medir la deformación del resorte y con esto poder medir la carga aplicada al espécimen. Se le aplica carga hasta que selle completamente, y por último, se colocan las rondanas y tuercas superiores.

- e. Se coloca el permeámetro en el sistema de carga variable. Antes de iniciarse el ensayo debe verificarse que todas las válvulas y los reguladores de presión estén cerrados.

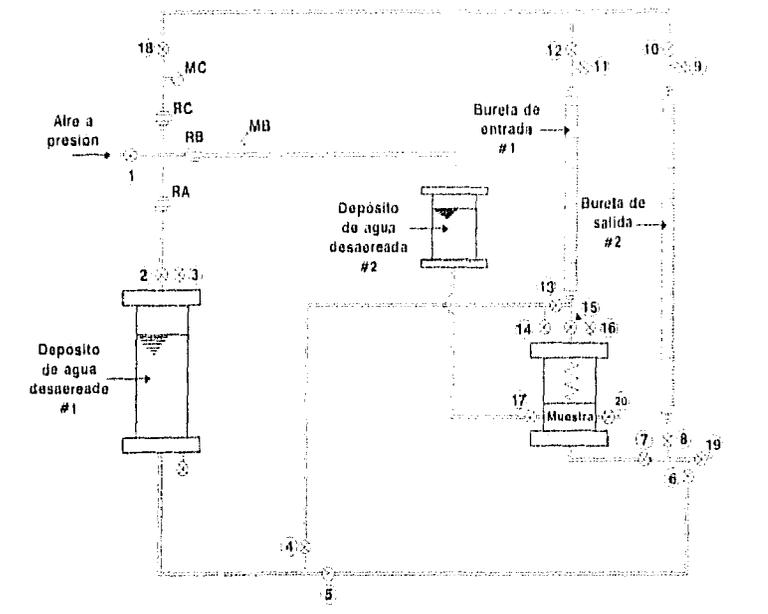


Fig 34. Identificación de válvulas y reguladores de presión

- Saturación del sistema:

- Se abren las válvulas 1, 17 y 20 (fig 34), la primera alimenta al sistema de aire a presión, la segunda permite aplicar presión confinante a la membrana y la tercera nos ayuda a saturar la membrana. Cuando deje de salir aire por la válvula 20, se cierra. Con el regulador RB se controla la presión de confinamiento, la cual se lee en el manómetro MB. La presión confinante debe aplicarse lentamente hasta alcanzar entre 50 y 100 kPa, dependiendo del tipo de suelo.
- Estando desconectada la manguera para el drenaje inferior del permeámetro, se abren las válvulas 2, 5, 6 y 7. Con el regulador RA se controla la presión que llega al depósito de agua desaireada, y cuando comience a escurrir agua por la manguera se conecta esta al permeámetro. Se cierra la válvula 7 y se abren la 8 y la 9; cuando el nivel de la bureta 2 suba un poco más de la mitad de su altura, se cierra la válvula 6, 8 y 9.
- Se abren las válvulas 4, 13 y 11, hasta que el nivel de agua en la bureta 1 este en la parte superior, se cierra entonces la 11 y la 13.

- d. Se abren las válvulas 14 y 16 para llenar el permeámetro, dejando escurrir lentamente el agua en su interior; cuando empece a salir agua por la válvula 16 deben cerrarse las mismas 14 y 16.

- Aplicación de la contrapresión:

- a. Se abren las válvulas 7, 8, 10, 12, 15 y 18, y con los reguladores RB y RC se aplican incrementos iguales de presión y contra presión dada en el punto (a) de la etapa de saturación del sistema. Se observara que los niveles de las buretas 1 y 2 bajan, debido a la expansión del recipiente; como esta expansión es mayor que el volumen que encierran las dos buretas, no deben perderse de vista estas niveles.
- b. Para alcanzar la contrapresión deseada deberán subirse los niveles de las buretas tantas veces como sea necesario.
- c. Después del ultimo llenado de las buretas, se abren las válvulas 10, 12 15 y 7 y se siguen aplicando los incrementos de presión. Al llegar a la presión de trabajo, se deja saturar la muestra (el tiempo necesario para saturarla depende de su plasticidad), hasta llegar a la condición en la cual el volumen que entra por la bureta 1 es igual al que sale por la bureta 2. En esta ultima condición, deben evitarse cambios de temperatura en el sistema con el fin de efectuar las lecturas correctamente.

- Ensayo:

Para alcanzar el gradiente deseado, los niveles de las buretas se ajustan como se indica en el punto (b) de la etapa anterior, bajando y subiendo la presión en el deposito de agua desaireada 1 con el regulador RA. Estando el sistema nuevamente en las condiciones de flujo establecido señaladas en el punto (c) de la etapa anterior, se abren las válvulas 8 y 15 al mismo tiempo que se arranca el cronometro. Los datos de la prueba se anotan en la hoja de registro que aparece en la fig 35, de donde se calcula el valor del coeficiente de permeabilidad.

INSTITUTO DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE

Muestra No. 1 Identificación de lab. MI
 Procedencia Cerro prieto Profundidad 1.00 a 1.30 m
 Localización Mexicali B.C. Fecha 12.06.95

DATOS INICIALES

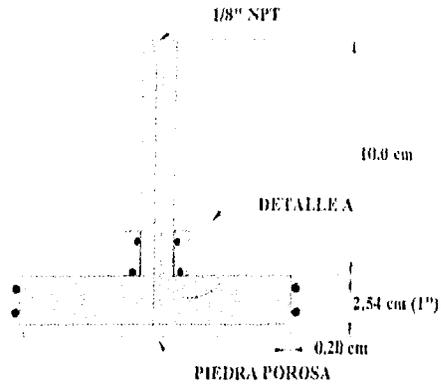
diám. del permeámetro 13.50 cm Long. de la muestra L 5.5 cm
 Diám. de la muestra D 13.00 cm Diám. de bureta d 0.65 cm
 Área de la muestra A 132.7 cm² Área de bureta a 0.332 cm²
 G_w 100 % γ_m 1.89 KN/m^3 $k = 2.3 (aL/\Delta t) \log (h_1/h_2)$

Fecha	Hora	Δt (s)	Presión confinante	Contra Presión	Nivel bureta 1	Nivel bureta 2	h_1 (cm)	h_2 (cm)	Temp. °C	k (cm/s)
12/06/95	11:58	104.99	2.3	1.5			40	30	21	3.77×10^{-3}
		310.71					40	20		3.07×10^{-3}
		633.05					40	10		3.01×10^{-3}
13/06/95	13:15	181.99	2.8	2.0			40	30	22	2.17×10^{-3}
		443.21					40	20		2.15×10^{-3}
		883.43					40	10		2.16×10^{-3}
13/06/95	14:15	202.83	3.3	2.5			40	28	22	2.42×10^{-3}
		401.64					40	20		2.37×10^{-3}
		774.67					40	10		2.46×10^{-3}
15/06/95	10:30	180.00	3.8	3.0			40	30	21	2.19×10^{-3}
		431.00					40	20		2.21×10^{-3}
		831.00					40	10		2.29×10^{-3}

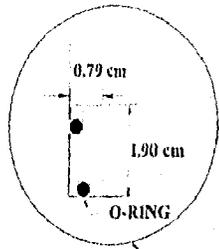
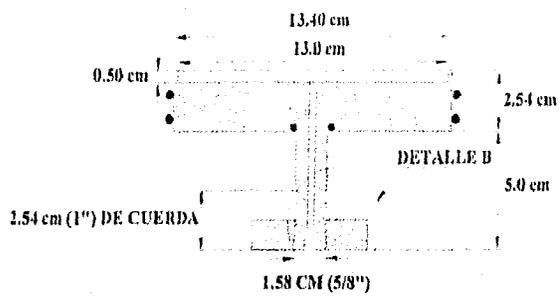
Fig 35. Formato para registro de pruebas con permeámetro
de carga variable

ANEXO III. PLANOS DEL PERMEÁMETRO PROPUESTO

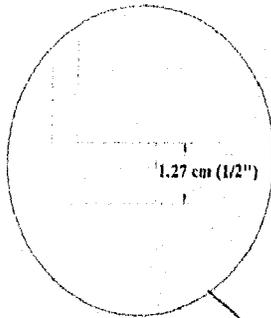
CABEZAL



BASE

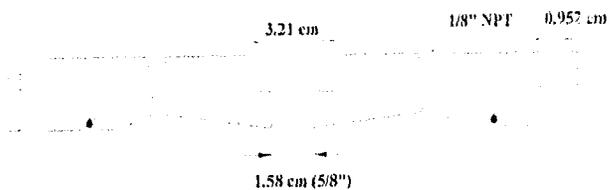


DETALLE A

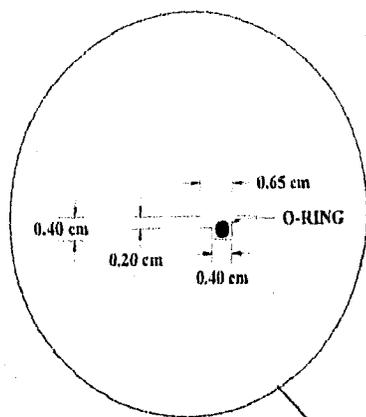
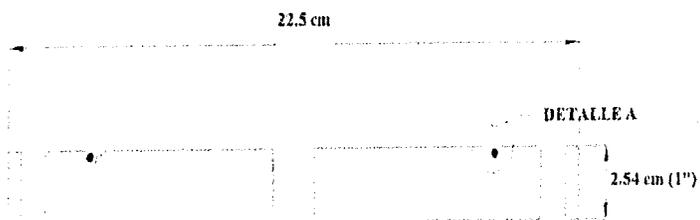


DETALLE B

TAPA SUPERIOR



TAPA INFERIOR



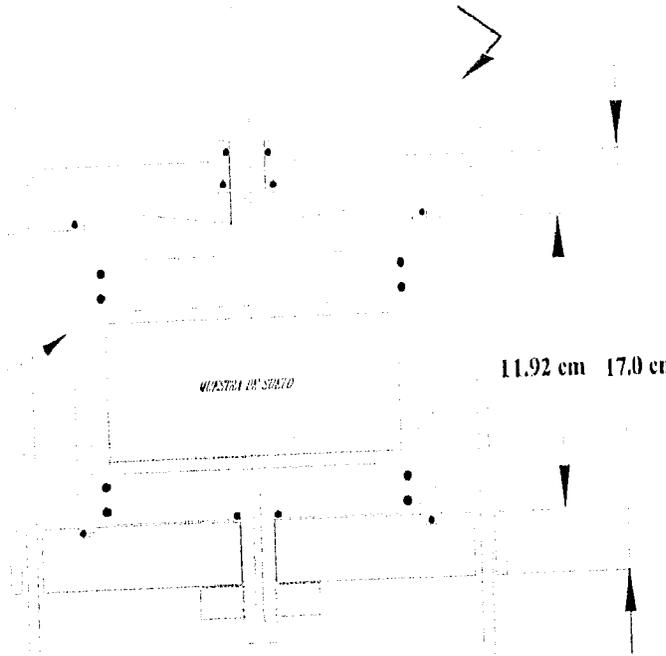
DETALLE A

BARRAS PARA
CERRAR EL PERMEÁMETRO

CILINDRO DE
LUCITA

MUESTRA IN SITU

11.92 cm 17.0 cm



ANEXO IV. ANÁLISIS QUÍMICOS

#6	POZO	LAGUNA
PH	7	6.75
T	24	16
d	1.0367	1.0246
STD	64,770	40,790
Na	17,500	12,200

#7	POZO	LAGUNA
PH	6.55	6.5
T	20	19
d	1.0267	1.0241
STD	43,342	39,064
Na	13,100	11,500

LAGUNA #4	
PH	7.55
T	23°C
d	1.0266
STD	46,066
Na	13,100

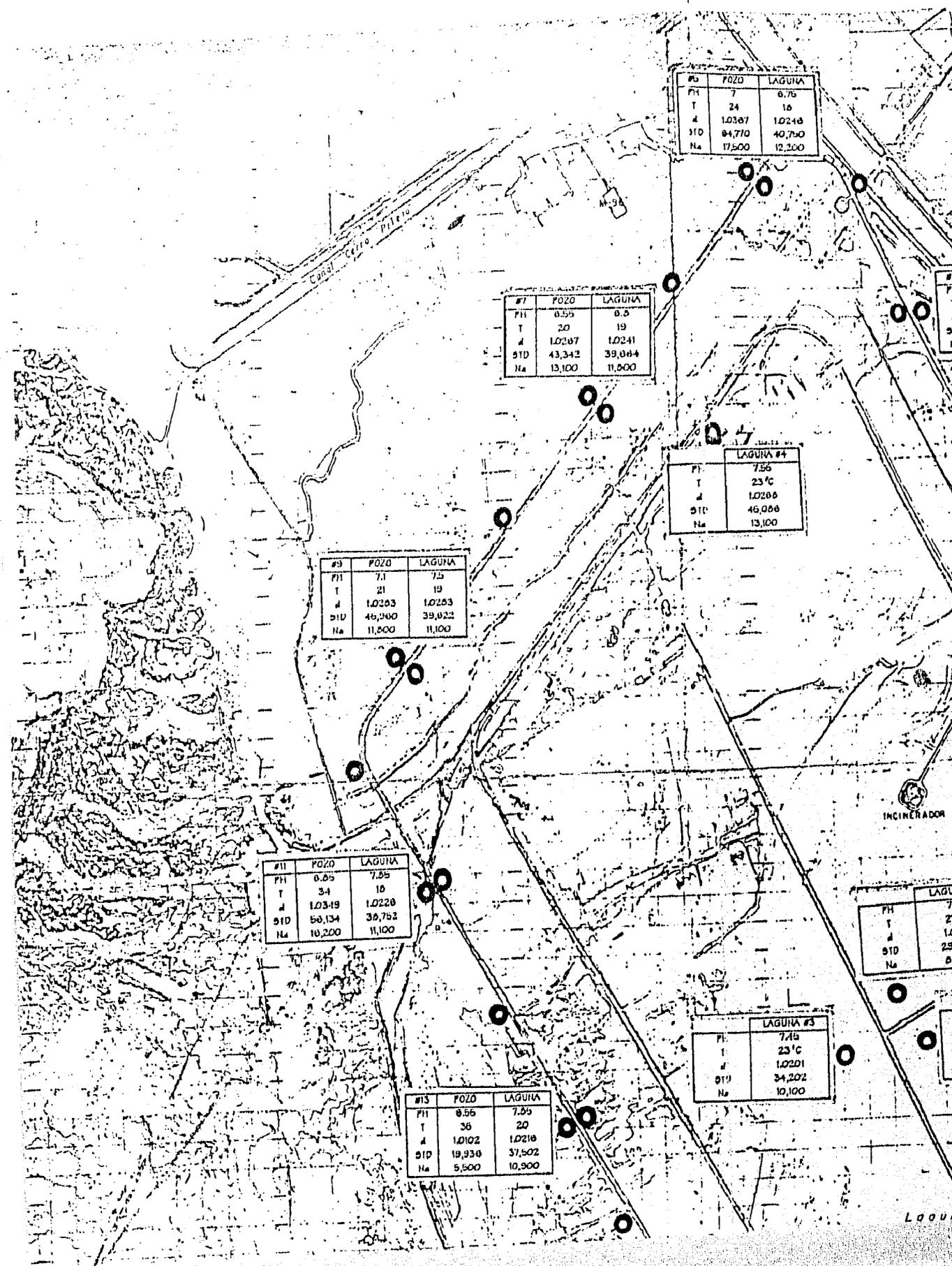
#9	POZO	LAGUNA
PH	7.1	7.5
T	21	19
d	1.0263	1.0253
STD	46,900	39,022
Na	11,600	11,100

#11	POZO	LAGUNA
PH	6.65	7.55
T	34	16
d	1.0349	1.0226
STD	60,134	36,752
Na	10,200	11,100

LAGUNA	
PH	7.15
T	27°C
d	1.0171
STD	29,300
Na	8,900

LAGUNA #3	
PH	7.45
T	23°C
d	1.0201
STD	34,202
Na	10,100

#15	POZO	LAGUNA
PH	6.55	7.55
T	36	20
d	1.0102	1.0216
STD	19,936	37,502
Na	5,500	10,900



INCINERADOR

Laguna

#6	POZO	LAGUNA
PH	7	6.75
T	24	18
d	10307	10248
STD	94,770	40,750
Na	17,500	12,200

#1	POZO	LAGUNA
PH	6.55	6.5
T	20	19
d	10287	10241
STD	43,342	39,084
Na	13,100	11,600

#3	POZO	LAGUNA
PH	7	6.95
T	28	20
d	10277	10246
STD	40,084	40,810
Na	13,600	12,100

LAGUNA #4	
PH	7.55
T	23 °C
d	10288
STD	46,068
Na	13,100

#1	POZO	LAGUNA
PH	6.95	6.5
T	22	16
d	10285	10252
STD	45,792	41,329
Na	13,900	12,400

LAGUNA	
PH	7.5
T	19
d	10283
STD	39,022
Na	11,100

#33	POZO	LAGUNA
PH	6.2	7.35
T	27	28
d	10314	10156
STD	53,472	27,814
Na	12,200	8,200

LAGUNA #1	
PH	7.15
T	27 °C
d	10173
STD	29,300
Na	8,900

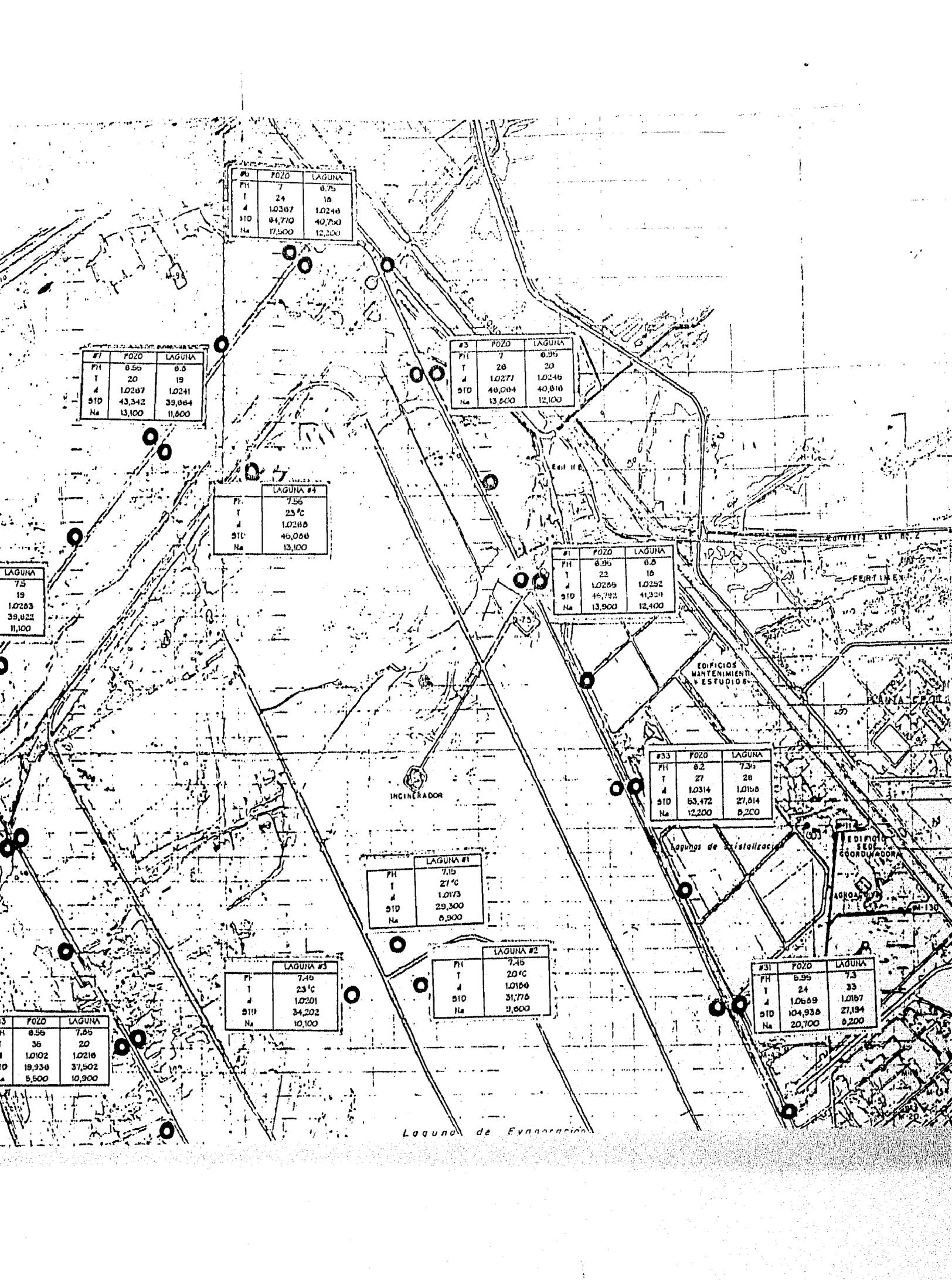
LAGUNA #2	
PH	7.45
T	20 °C
d	10180
STD	31,776
Na	9,600

LAGUNA #3	
PH	7.45
T	23 °C
d	10291
STD	34,202
Na	10,100

#31	POZO	LAGUNA
PH	6.95	7.3
T	24	33
d	10589	10167
STD	104,938	27,194
Na	20,700	8,200

#3	POZO	LAGUNA
PH	6.55	7.85
T	36	20
d	10102	10216
STD	19,938	37,502
Na	5,500	10,900

LAGUNA de Evaporación



#3	POZO	LAGUNA
PH	7	0.95
T	20	20
A	1,0277	1,0246
STD	40,004	40,018
Na	13,600	12,100

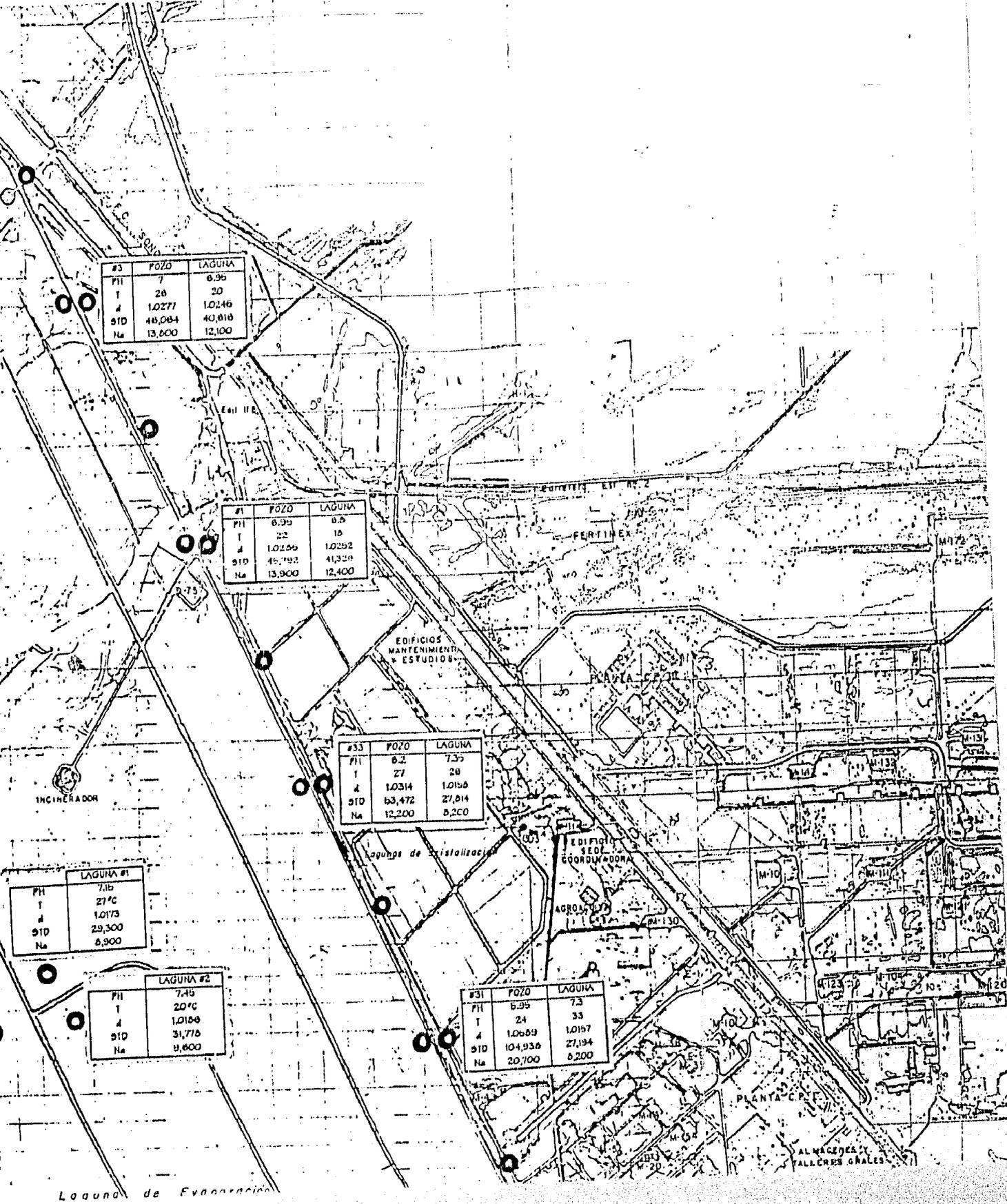
#1	POZO	LAGUNA
PH	6.95	8.5
T	22	15
A	1,0256	1,0252
STD	45,792	41,320
Na	13,900	12,400

#33	POZO	LAGUNA
PH	6.2	7.5
T	27	20
A	1,0314	1,0156
STD	53,472	27,014
Na	12,200	5,200

LAGUNA #1	
PH	7.15
T	27°C
A	1,0173
STD	29,300
Na	8,900

LAGUNA #2	
PH	7.45
T	20°C
A	1,0100
STD	31,716
Na	9,600

#31	POZO	LAGUNA
PH	6.95	7.5
T	24	33
A	1,0609	1,0157
STD	104,936	27,134
Na	20,700	5,200



LAGUNA DE EVAPORACION

#3	POZO	LAGUNA
PH	7	8,95
T	26	20
A	1,0277	1,0246
91D	40,084	40,810
Na	13,000	12,100

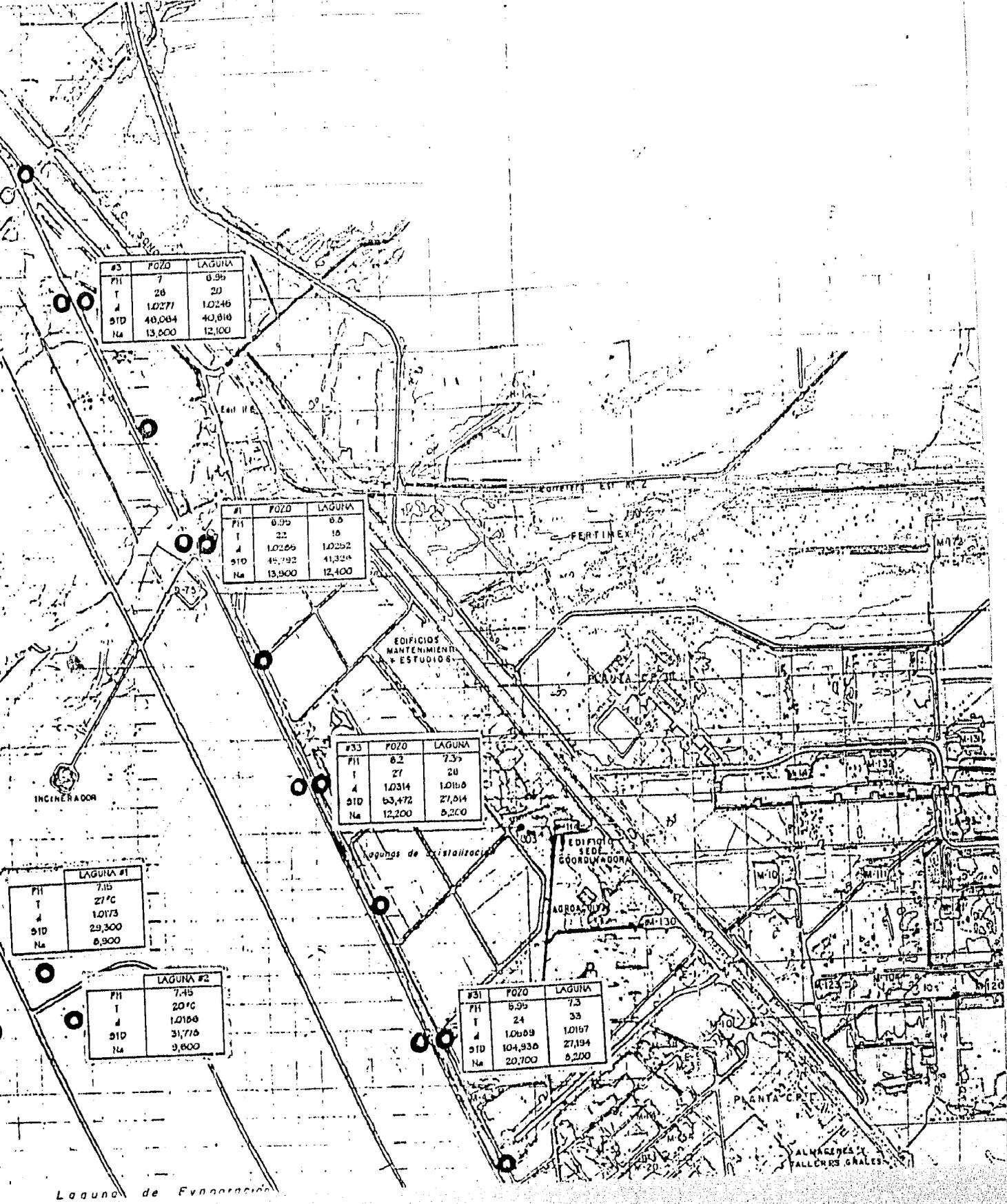
#1	POZO	LAGUNA
PH	8,95	8,8
T	22	16
A	1,0266	1,0252
91D	45,792	41,324
Na	13,900	12,400

#33	POZO	LAGUNA
PH	8,2	7,35
T	27	20
A	1,0314	1,0188
91D	63,472	27,814
Na	12,200	5,200

LAGUNA #1	
PH	7,15
T	27°C
A	1,0173
91D	29,300
Na	8,900

LAGUNA #2	
PH	7,45
T	20°C
A	1,0188
91D	31,716
Na	9,600

#31	POZO	LAGUNA
PH	8,95	7,5
T	24	33
A	1,0809	1,0157
91D	104,938	27,194
Na	20,700	8,200



Laguna de Evaporación

INCINERADOR

#11	POZO	LAGUNA
PH	8.55	7.55
T	34	15
d	1.0319	1.0228
DTD	56,134	35,752
Ha	10,200	11,100

LAGUNA #1	
PH	7.15
T	27°C
d	1.0173
DTD	29,300
Ha	6,300

LAGUNA #3	
PH	7.45
T	23°C
d	1.0201
DTD	34,202
Ha	10,100

LAGUNA #2	
PH	7.45
T	20°C
d	1.0168
DTD	31,776
Ha	9,600

#13	POZO	LAGUNA
PH	8.55	7.55
T	35	20
d	1.0102	1.0218
DTD	19,338	37,502
Ha	5,500	10,900

Laguna de Evn

#15	POZO	LAGUNA
PH	5.95	7.5
T	21	19
d	1.095	1.0207
DTD	145,828	34,168
Ha	43,750	10,500

#17	POZO	LAGUNA
PH	7.55	7.5
T	30	20
d	1.0256	1.0203
DTD	42,500	33,982
Ha	12,200	10,200

Laguna de Infiltración

#19	POZO	LAGUNA
PH	8.05	7.55
T	30	19
d	1.0124	1.0236
DTD	22,848	35,188
Ha	8,800	12,200

EQUIPOS INDUSTRIALES DE
B.C. S.A. de C.V.



GERRO PRIETO, B.C.

PLANO GENERAL

#20	POZO	LAGUNA
PH	7.35	7.35
T	15	20
A	1,022.0	1,022.0
SID	35,752	35,752
Na	11,100	11,100

#23	POZO	LAGUNA
PH	8.2	7.35
T	27	20
A	1,031.4	1,016.0
SID	53,472	27,814
Na	12,200	8,210

#1	POZO	LAGUNA #1
PH	7.15	7.15
T	27.6	27.6
A	1,017.3	1,017.3
SID	29,200	29,200
Na	6,300	6,300

#1	POZO	LAGUNA #2
PH	7.15	7.15
T	20.6	20.6
A	1,018.6	1,018.6
SID	31,716	31,716
Na	9,600	9,600

#1	POZO	LAGUNA #3
PH	7.15	7.15
T	23.6	23.6
A	1,020.1	1,020.1
SID	34,202	34,202
Na	10,100	10,100

#31	POZO	LAGUNA
PH	5.95	7.3
T	24	33
A	1,066.9	1,016.7
SID	104,936	27,194
Na	20,700	8,200

#13	POZO	LAGUNA
PH	6.55	7.35
T	36	20
A	1,010.2	1,021.0
SID	19,336	37,502
Na	5,500	10,900

#16	POZO	LAGUNA
PH	5.95	7.3
T	21	19
A	1,095	1,020.7
SID	145,828	34,468
Na	43,750	10,500

#29	POZO	LAGUNA
PH	6.05	7.75
T	24	20
A	1,014.4	1,013.9
SID	78,298	24,608
Na	17,400	7,400

#17	POZO	LAGUNA
PH	5.95	7.3
T	30	20
A	1,025.6	1,020.3
SID	42,508	33,982
Na	12,200	10,200

#19	POZO	LAGUNA
PH	6.85	7.55
T	30	19
A	1,012.4	1,023.6
SID	22,810	36,460
Na	6,800	12,200

#13	POZO	LAGUNA
PH	6.15	7.8
T	27	20
A	1,032.3	1,019.1
SID	55,760	32,220
Na	12,600	9,600

#21	POZO	LAGUNA
PH	7.15	7.85
T	22	21
A	1,016.4	1,025.2
SID	27,766	52,436
Na	6,400	12,600

INDUSTRIALES DE
SA de CV



PRIETO, B.C.
GENERAL

Laguna Volcano

INGENIERADO

#33	POZO	LAGUNA
PH	8.2	7.35
T	27	20
A	1,0314	1,018.0
STD	63,472	27,014
Na	12,200	8,200

	LAGUNA #1
PH	7.15
T	27.6
A	1,0173
STD	29,300
Na	8,300

	LAGUNA #2
PH	7.45
T	20.6
A	1,0188
STD	31,775
Na	9,800

#31	POZO	LAGUNA
PH	5.95	7.3
T	24	33
A	1,0689	1,0187
STD	104,938	27,194
Na	20,700	8,200

#29	POZO	LAGUNA
PH	8.05	7.75
T	24	20
A	1,0444	1,0139
STD	78,298	24,808
Na	17,400	7,400

#27	POZO	LAGUNA
PH	6.4	7.75
T	28	20
A	1,022	1,0141
STD	37,500	24,898
Na	12,300	7,400

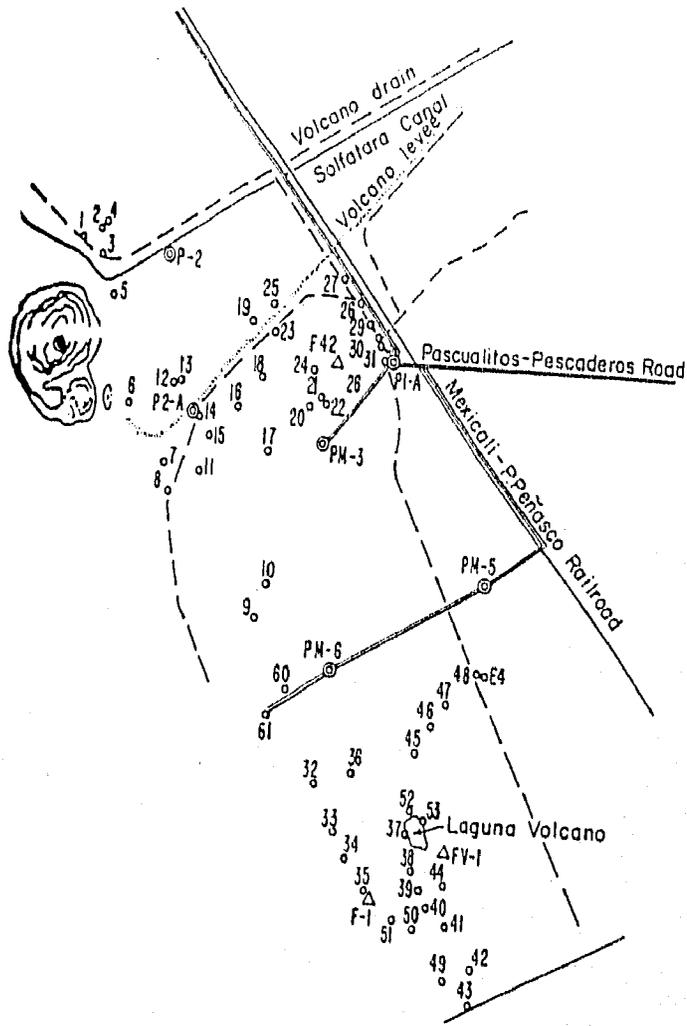
#25	POZO	LAGUNA
PH	6.4	7.75
T	21	20
A	1,0431	1,0189
STD	74,218	32,854
Na	18,300	8,900

	LAGUNA
5	7.55
19	19
24	1,0236
48	38,108
100	12,300

#35	POZO	LAGUNA
PH	6.15	7.6
T	27	20
A	1,0323	1,0191
STD	65,780	32,220
Na	12,800	9,900

#31	POZO	LAGUNA
PH	7.15	7.85
T	22	21
A	1,0184	1,0252
STD	27,788	52,438
Na	8,400	12,800

Laguna Volcano



**LOCALIZACION DE MANIFESTACIONES HIDROTHERMALES
SEPTIEMBRE 23, 1965**

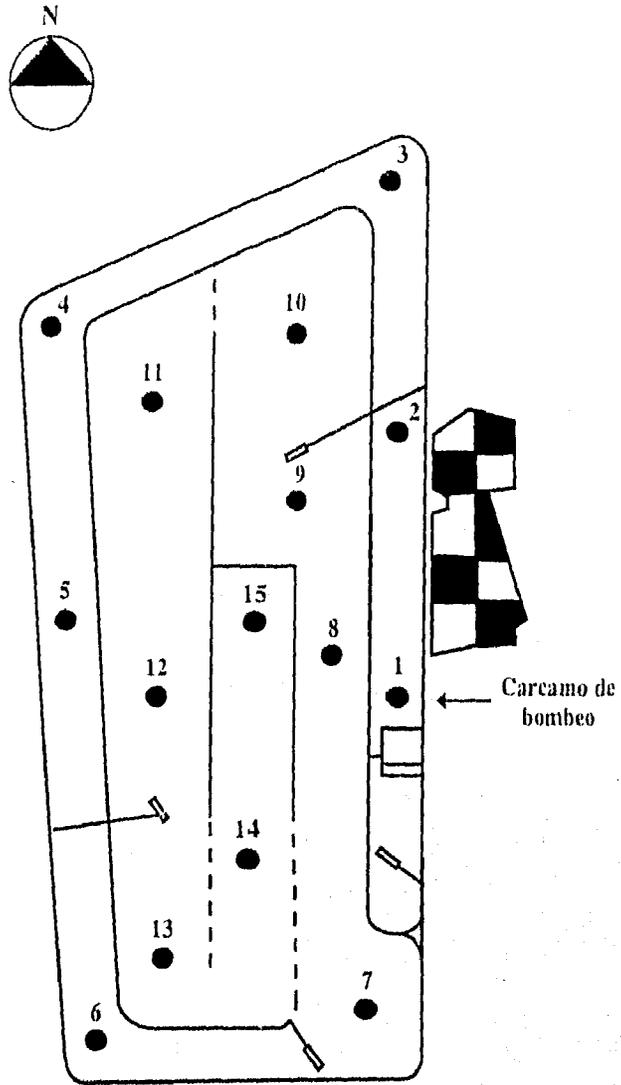
MANANTIAL	37
FUMAROLA	FV-1
POZO	PM-5

Mapa de localización de manifestaciones hidrotermales superficiales y pozos de prospección. Tomada de Mercado, 1977.

Resultados de los Analisis Fisicoquimicos de manifestaciones Hidrotermales.

MANIFESTACIONES HIDROTERMALES (Mercado, 1968)

INSI	SIII	FECH	Na	K	Ca	Mg	Li	SO ₄	Cl	CO ₃	HCO ₃	SGH	Br	pH	TO	Na/K	Na/Li	Na/Ca	Cl/SO ₄	Ca/Mg	K/SO ₄	Mg	Ca+Mg
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm										
CFE	1	1968	4050	655	359	49	12.6	123	8360	15	308	41	4.3	6.80	51	10.5	970	9.6	276.2	4.4	19.62	0.023	0.114
CFE	2	1968	4050	642	405	63	11.5	112	8640	20	3666	30	4.6	6.35	75	10.7	106.3	8.7	390.2	3.9	26.29	0.027	0.132
CFE	3	1968	4200	660	375	25	14.7	81	10000	15	290	39	6.6	6.65	94	10.5	56.2	9.8	347.4	9.1	21.42	0.010	0.104
CFE	4	1968	3300	510	459	91	12.7	93	9250	18	414	21	12.1	6.50	82	11.0	78.4	6.3	596.7	3.1	29.63	0.048	0.194
CFE	5	1968	1700	160	468	98	2.5	295	2900	410	0	225	0.0	2.00	41	18.1	205.3	3.2	17.5	2.9	0.67	0.103	0.403
CFE	6	1968	4050	622	296	53	8.5	87	9000	20	122	92	6.1	6.15	68	10.4	143.8	11.9	132.5	3.4	8.84	0.023	0.090
CFE	7	1968	3950	668	304	122	10.2	114	9050	22	98	62	25.5	7.55	93	9.8	118.9	11.3	197.7	1.5	13.63	0.053	0.133
CFE	8	1968	3830	640	329	18	10.2	120	8650	11	110	76	9.1	7.08	85	10.2	113.3	10.1	154.2	11.1	10.34	0.008	0.098
CFE	9	1968	19000	1850	2718	568	16.0	136	41000	85	244	3650	6.5	4.60	16	17.5	358.5	6.1	15.2	2.9	0.62	0.054	0.206
CFE	10	1968	3900	427	440	82	17.4	159	13760	110	0	1660	21.1	3.60	29	11.4	121.4	8.0	17.6	2.2	1.21	0.051	0.160
CFE	11	1968	7000	1044	760	206	8.3	273	6730	110	0	260		2.60	36	8.7	106.6	10.4	35.1	6.8	2.69	0.013	0.099
CFE	12	1968	2930	570	246	22		222	8500	38	6	186			74	9.6		11.1	61.9	15.3	4.89	0.005	0.067
CFE	13	1968	4170	741	327	13		253	8000	30	6	328			79	11.8		8.0	33.0	91.8	2.24	0.001	0.117
CFE	14	1968	4250	598	454	3				30	6	328			79	11.8		8.0	33.0	91.8	2.24	0.001	0.117
CFE	15	1968	79600	6890	5880	2020	250.0	36	183000	900	737	1275			16	19.7	109.5	11.8	194.4	1.8	6.64	0.046	0.126
CFE	16	1968	48000	3700	4170	1730	105.0	71	99500	230	132	3640	2.5	5.95	19	22.1	138.0	10.0	37.0	1.5	1.25	0.065	0.161
CFE	17	1968	3750	546	340	51	10.0	96	7570	30	224	88	6.9	6.05	40	11.7	112.2	9.8	116.5	4.6	7.62	0.024	0.120
CFE	18	1968	27800	2430	2680	948	69.0	81	58400	70	564	3310	3.7	5.50	20	19.5	121.6	9.0	23.9	1.7	6.90	0.061	0.167
CFE	19	1968	6400	1030	422	120	19.0	166	12340	40	122	630	21.9	5.57	45	10.6	101.7	9.0	26.5	3.1	2.01	0.052	0.134
CFE	20	1968	3140	390	392	65	8.9	130	6450	40	468	115	8.2	6.25	44	13.7	106.5	7.0	76.0	3.7	4.37	0.037	0.170
CFE	21	1968	5150	670	400	46	13.2	87	16500	15	194	130		7.02	80	13.1	117.8	11.2	109.4	5.3	6.33	0.016	0.096
CFE	22	1968	4250	535	340	24	11.6	101	8600	20	98	20	12.3	6.48	75	13.5	110.6	10.9	382.5	8.6	32.86	0.010	0.095
CFE	23	1968	4970	551	720	96	11.8	59	10050	0	352	350	14.3	6.65	80	15.2	127.1	6.0	38.9	4.5	1.95	0.034	0.190
CFE	24	1968	13200	1180	1625	292	28.2	186	26300	42	64	2960	19.0	5.05	30	19.0	141.3	7.1	12.0	3.4	0.49	0.040	0.174
CFE	25	1968	4620	695	325	39	10.9	162	9100	38	74	45	13.3	5.55	37	11.3	127.9	12.0	274.0	5.2	18.97	0.015	0.091
CFE	26	1968	4100	540	358	51	11.3	100	8040	40	452	4	11.4	6.28	76	12.9	109.5	10.0	2723.1	4.3	165.83	0.022	0.115
CFE	27	1968	4080	545	360	64	9.9	106	7900	20	368	21	8.4	6.65	66	12.7	124.4	9.9	509.6	3.4	31.88	0.026	0.121
CFE	28	1968	4270	603	410	50	10.8	121	7930	30	388	19	6.9	6.45	75	12.0	119.4	9.1	561.4	4.4	36.99	0.023	0.125
CFE	29	1968	4250	610	380	17	10.9	94	8300	0	74	13	13.0	8.15	78	11.8	117.7	9.7	861.0	13.6	57.64	0.007	0.102
CFE	30	1968	4000	537	364	19	9.5	88	7930	15	114	17	12.3	7.33	56	12.7	127.1	9.6	632.0	11.6	36.80	0.006	0.105
CFE	31	1968	4350	657	354	8	10.6	70	6400	0	36	17		8.35	63	11.3	121.6	10.7	669.4	26.8	47.47	0.003	0.069
CFE	32	1968	3770	664	394	55	11.4	134	8120	40	438	91	14	6.35	54	9.7	96.8	8.3	106.0	4.3	8.96	0.025	0.134
CFE	33	1968	3340	580	348	80	10.2	103	6490	30	438	55	1.0	6.48	60	9.9	100.0	8.5	169.7	2.6	12.95	0.041	0.148
CFE	34	1968	3850	757	325	53	10.8	114	7700	10	96	244	6.4	6.75	85	8.6	107.8	10.3	42.8	2.7	3.87	0.023	0.110
CFE	35	1968	4100	990	316	24	11.9	100	8360	10	48	102	14.6	6.75	73	7.0	104.0	11.3	111.0	8.0	11.92	0.010	0.067

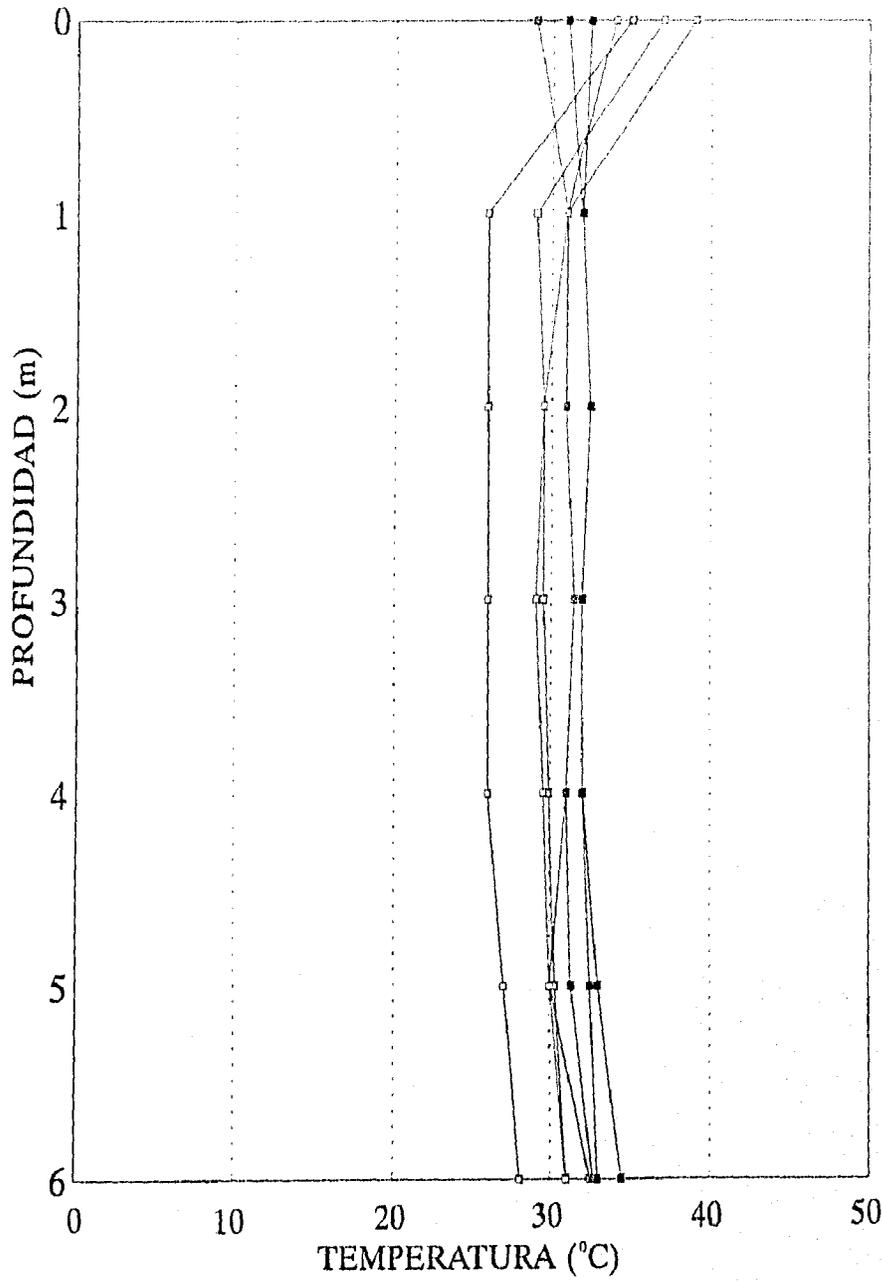


PUNTOS DE MUESTREO DE SALMUERA (1990)

ANÁLISIS QUÍMICOS DE LA LAGUNA DE EVAPORACIÓN 1990

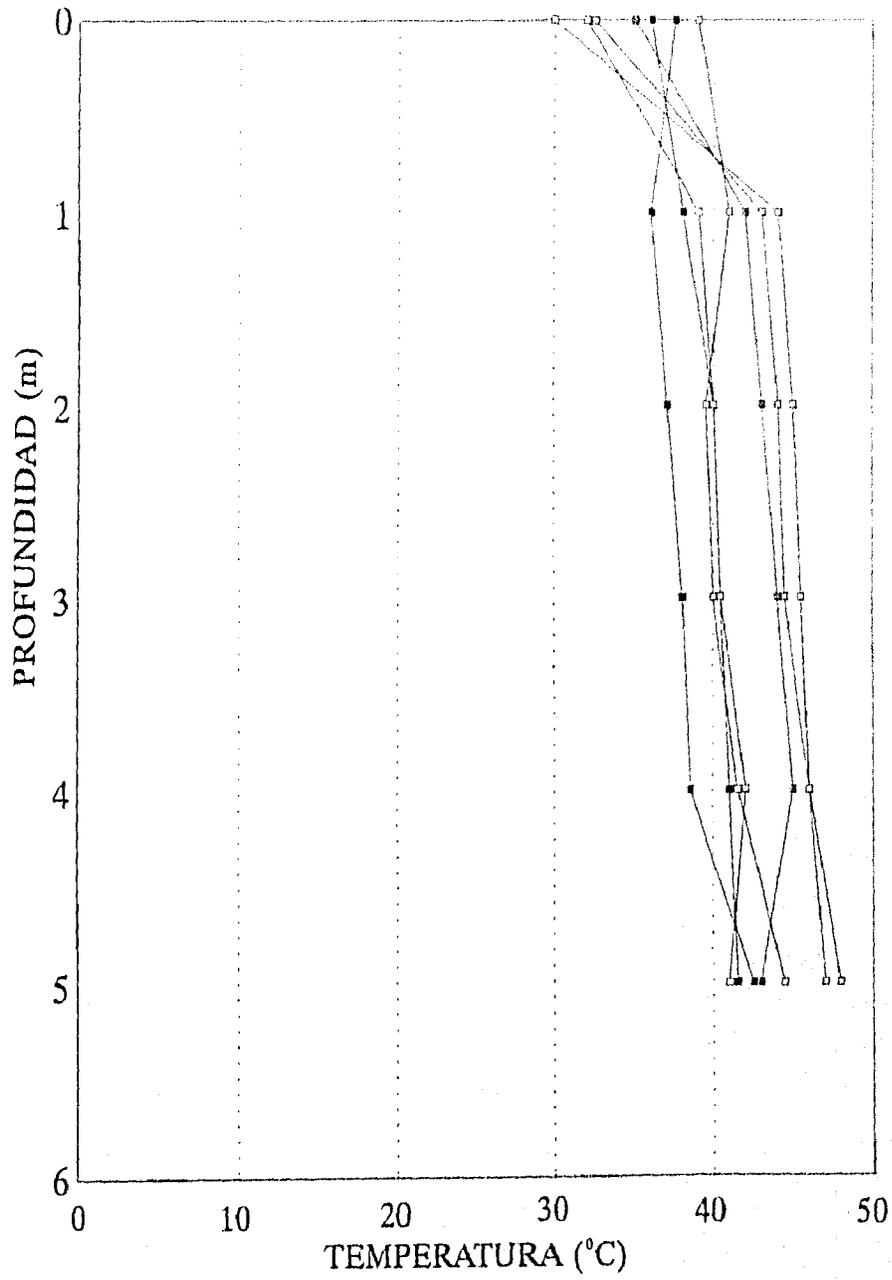
Punto No.	Fecha	Hora	Prof [m]	CONTENIDO QUÍMICO EN ppm							
				Na	k	Ca	Cl	Li	SiO ₂	d	As
1	27/05/90	6:00	0.00	8.300	2.364	391	15.862	19.9	***	19.6	0.753
1	27/05/90	6:30	1.61	8.125	2.273	391	15.421	19.4	***	18.3	0.700
1	27/05/90	7:00	3.23	8.475	2.364	401	16.082	20.4	***	18	0.872
2	24/05/90	16:00	0.00	8.650	2.364	401	16.523	20.8	406	18.1	0.836
2	24/05/90	16:20	0.83	8.650	2.364	401	16.523	20.8	367	18.3	0.828
2	24/05/90	16:40	1.65	8.650	2.409	401	16.523	20.7	403	18.2	0.823
3	24/05/90	17:30	0.00	9.700	2.591	441	18.197	22.6	223	19.9	0.903
3	24/05/90	17:50	1.00	9.700	2.591	441	18.285	22.8	223	19.9	0.869
3	24/05/90	18:10	2.00	9.700	2.591	441	18.285	22.8	220	20.2	0.881
4	24/05/90	19:00	0.00	10.225	2.773	481	19.387	24.6	129	21.2	1.077
4	24/05/90	19:20	0.90	10.225	2.773	481	19.387	24.5	134	21.5	1.104
4	24/05/90	19:40	1.80	10.225	2.773	481	19.387	24.4	135	21.9	1.036
5	25/05/90	15:45	0.00	11.775	3.212	561	22.206	28.9	117	25	0.763
5	25/05/90	16:05	0.28	11.950	3.273	566	22.559	29.2	118	24.5	1.211
5	25/05/90	16:28	0.55	11.950	3.273	571	22.559	29.6	119	26.4	1.217
6	25/05/90	17:35	0.00	14.400	3.273	721	27.141	35.4	126	29.3	0.872
6	25/05/90	17:55	0.47	14.400	3.273	716	27.141	35.1	126	29.5	1.231
6	25/05/90	18:20	0.93	14.400	3.273	721	27.141	35.4	129	29.3	1.268
7	25/05/90	19:15	0.00	13.264	3.091	601	25.273	29.3	184	24.5	0.991
7	25/05/90	19:35	1.25	13.750	3.091	601	25.872	29.4	179	26.4	1.008
7	25/05/90	20:00	2.50	14.264	3.333	641	27.069	31.7	162	27.6	1.050
8	26/05/90	8:00	0.00	11.463	2.938	541	21.580	28.0	126	27.2	0.894
8	26/05/90	8:20	1.43	11.976	3.630	581	22.638	29.4	153	28.1	0.994
8	26/05/90	8:45	2.85	11.976	3.125	581	22.977	29.8	141	32.2	0.975
9	26/05/90	10:10	0.00	10.495	2.688	481	19.853	25.4	156	25.6	0.938
9	26/05/90	10:30	0.85	11.588	2.938	536	21.784	27.6	114	29.2	0.962
9	26/05/90	11:00	1.70	11.588	3.000	561	21.784	28.4	115	26.1	0.839
10	26/05/90	13:00	0.00	14.479	3.688	721	27.668	35.1	123	32.5	1.247
10	26/05/90	13:30	0.32	14.965	3.750	721	28.587	35.4	124	32.5	1.207
10	26/05/90	14:00	0.64	14.479	3.750	726	27.668	35.3	123	33	1.254
11	26/05/90	17:00	0.00	14.750	3.750	751	28.028	36.4	125	33	1.245
11	26/05/90	17:30	0.25	14.750	3.750	757	28.028	36.4	127	33.3	1.228
11	26/05/90	18:00	0.50	14.750	3.750	751	28.028	36.4	123	33.6	1.190
12	27/05/90	8:30	0.00	14.458	3.688	714	27.668	35.6	122	36.1	1.152
12	27/05/90	8:55	1.35	14.458	3.688	714	27.668	35.6	122	35.4	1.076
12	27/05/90	9:35	2.70	14.458	3.688	724	27.668	35.8	126	37	1.169
13	27/05/90	11:00	0.00	13.750	3.438	664	26.051	33.5	136	37	1.072
13	27/05/90	11:25	0.55	13.750	3.438	664	25.872	33.2	129	37	1.048
13	27/05/90	12:10	1.10	13.750	3.500	684	26.051	33.7	130	36	1.135
14	27/05/90	14:12	0.00	13.507	3.375	654	25.452	32.7	127	33	1.017
14	27/05/90	14:36	1.22	13.507	3.375	659	25.452	33.1	129	33.6	1.001
14	27/05/90	15:20	2.44	14.167	3.563	674	26.590	34.2	117	34.7	1.043
15	27/05/90	18:30	0.00	13.507	3.375	654	25.452	32.4	129	37.7	1.021
15	27/05/90	18:50	1.63	13.507	3.375	654	25.452	32.7	130	34.4	1.343
15	27/05/90	19:20	3.27	13.993	3.438	654	26.471	33.1	131	34.7	0.968

REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 1

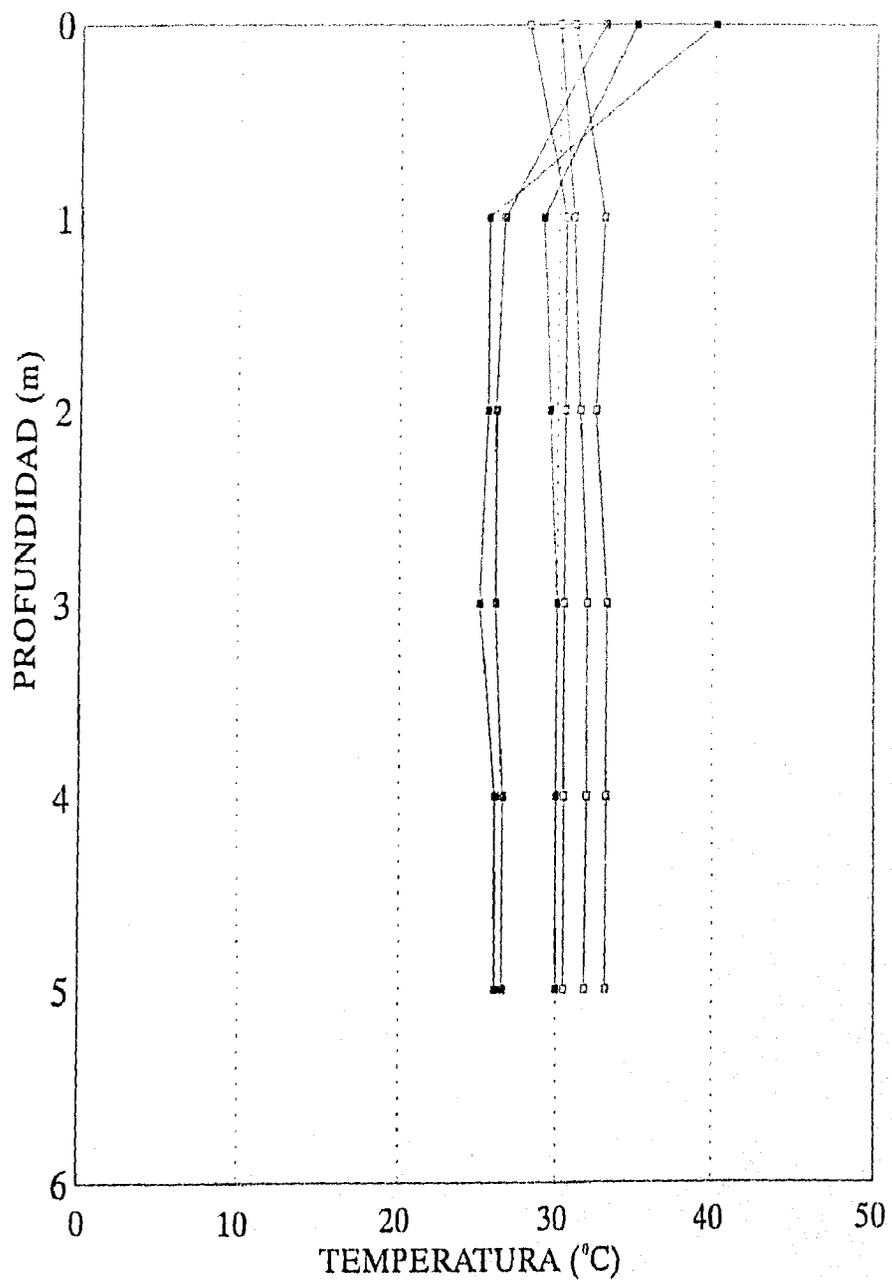


REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 3

32

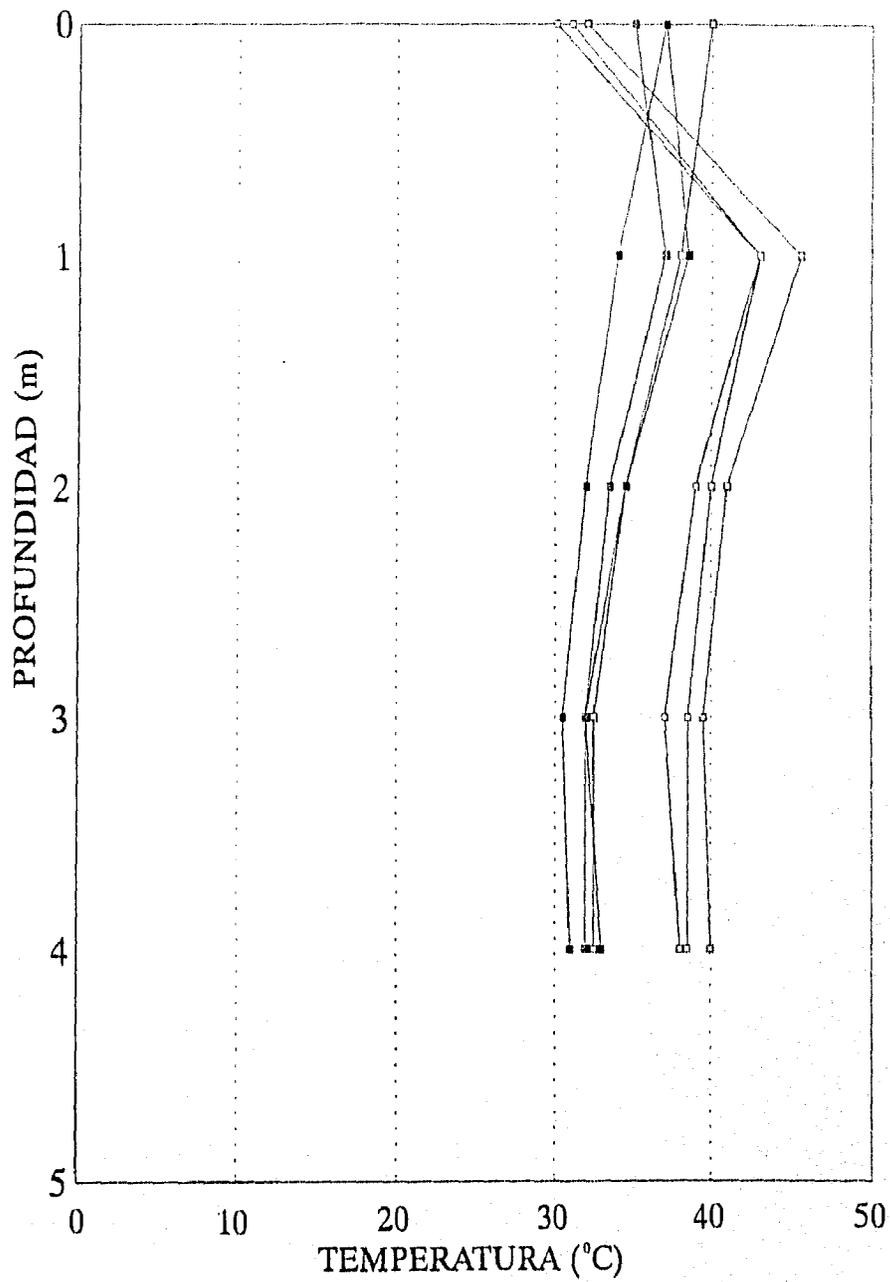


REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 5



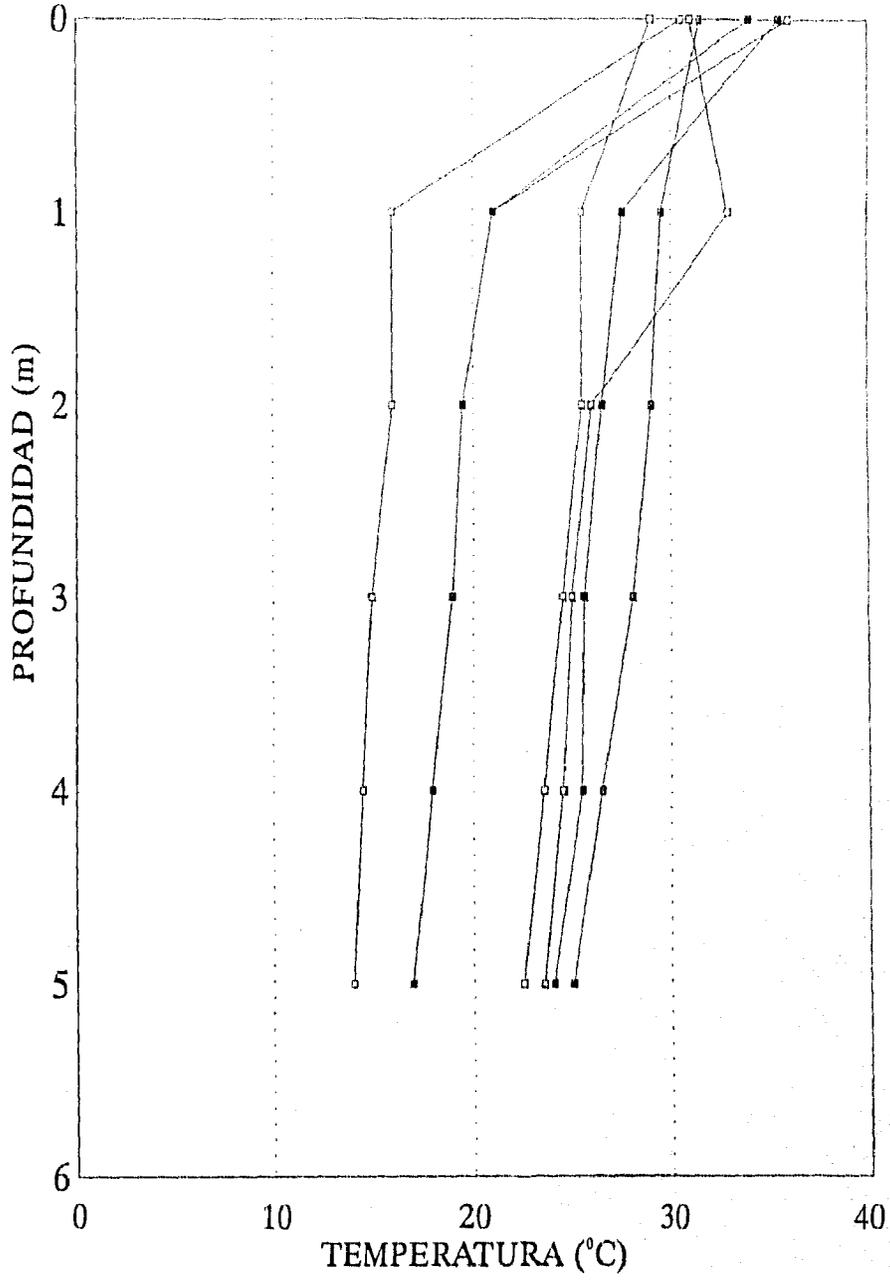
REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 7

84



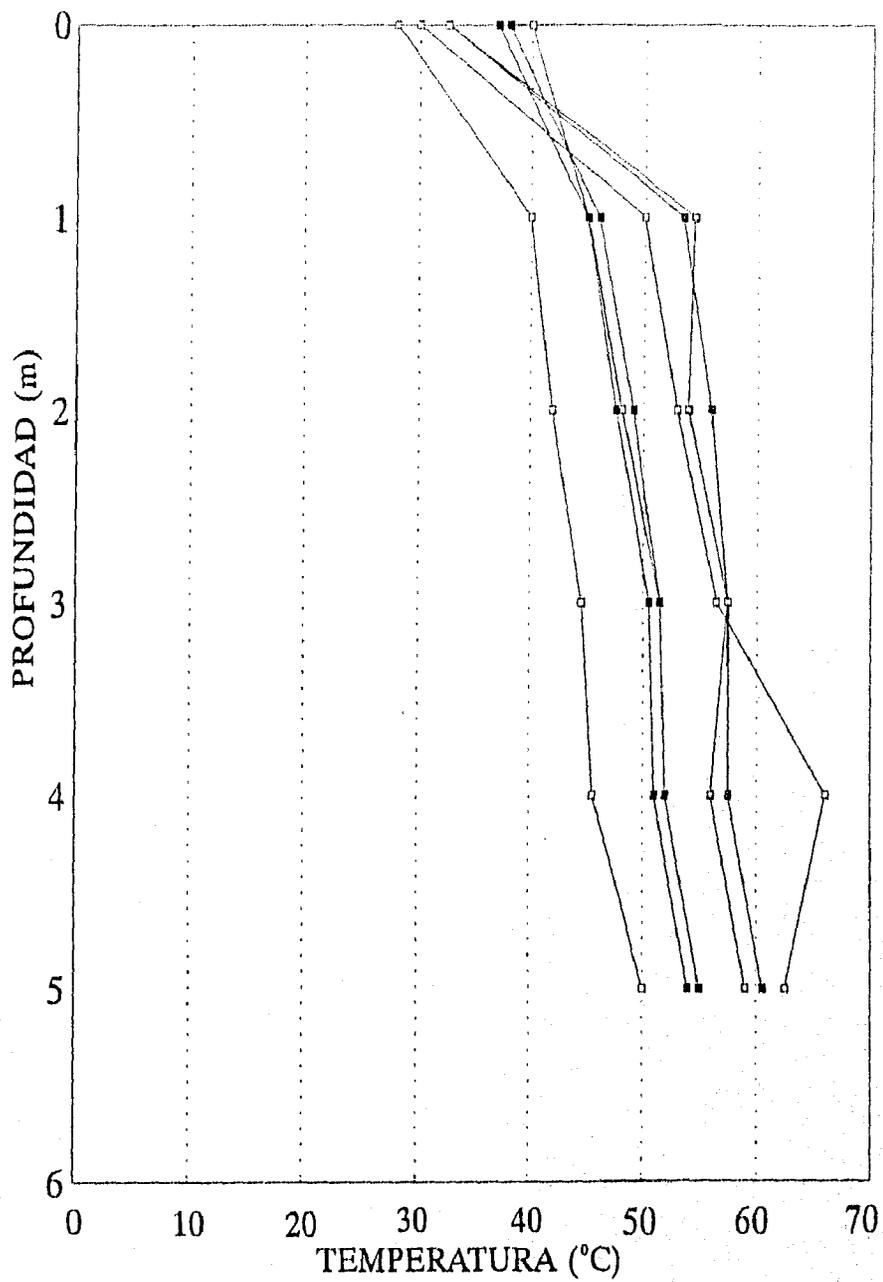
REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 9

85



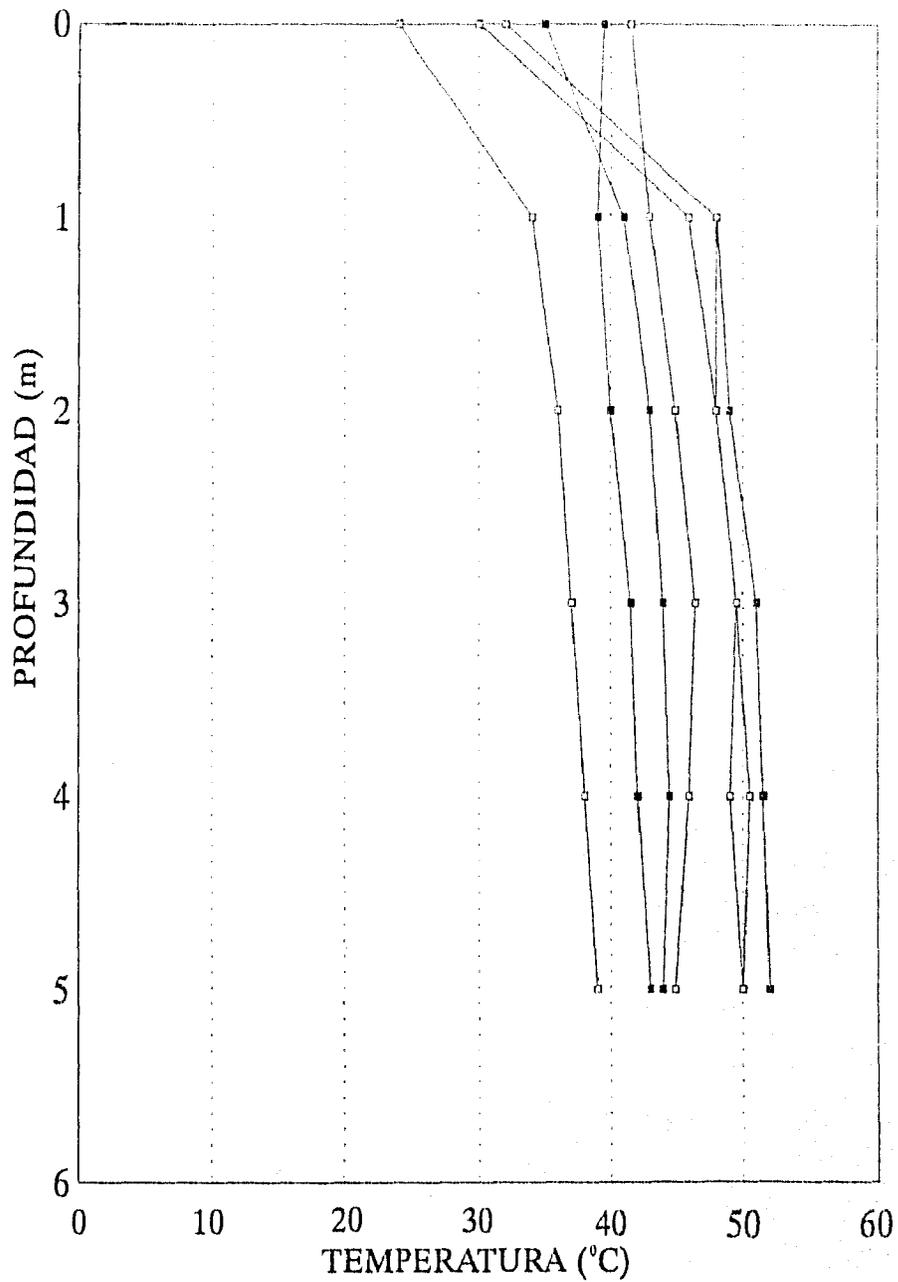
REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 11

86

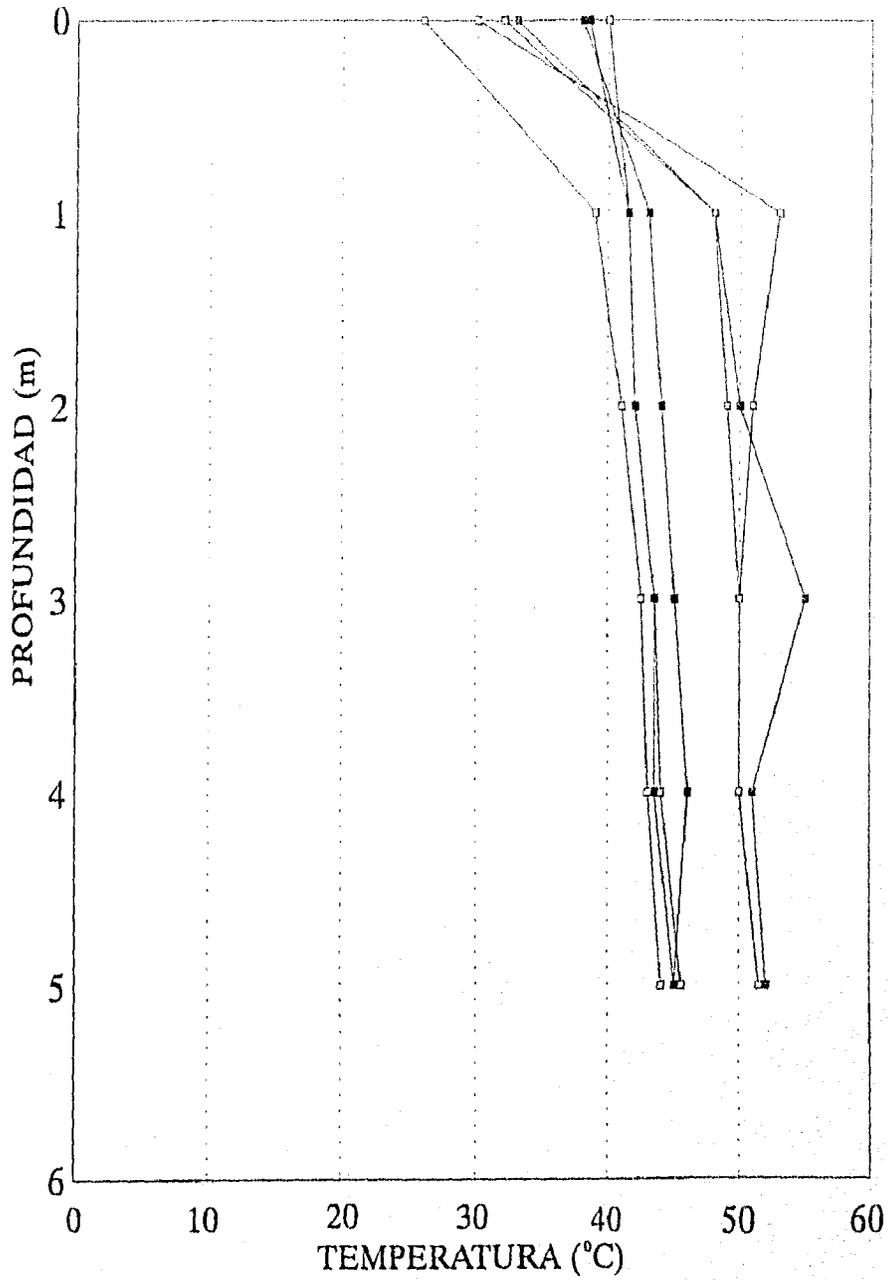


REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 12

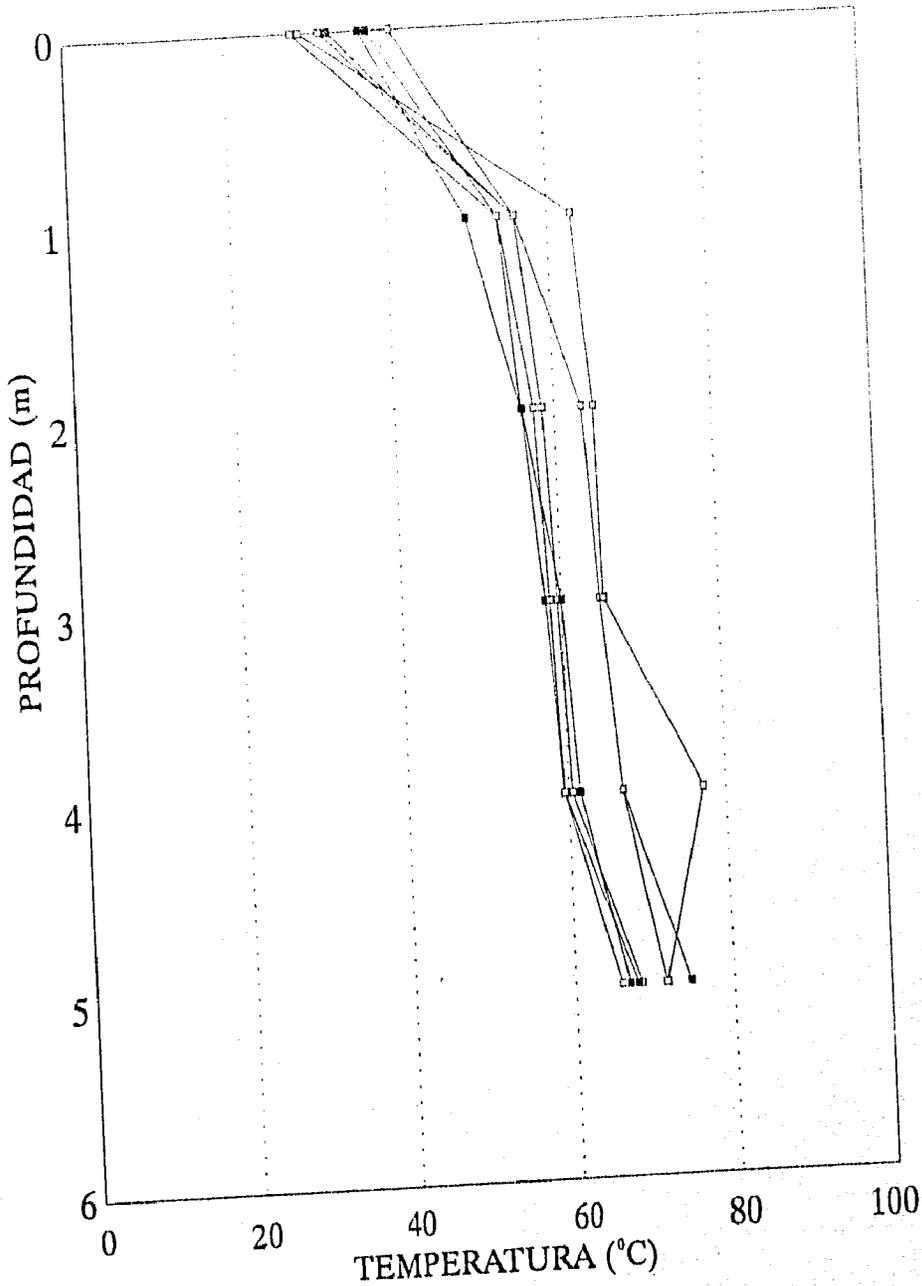
37



REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 13

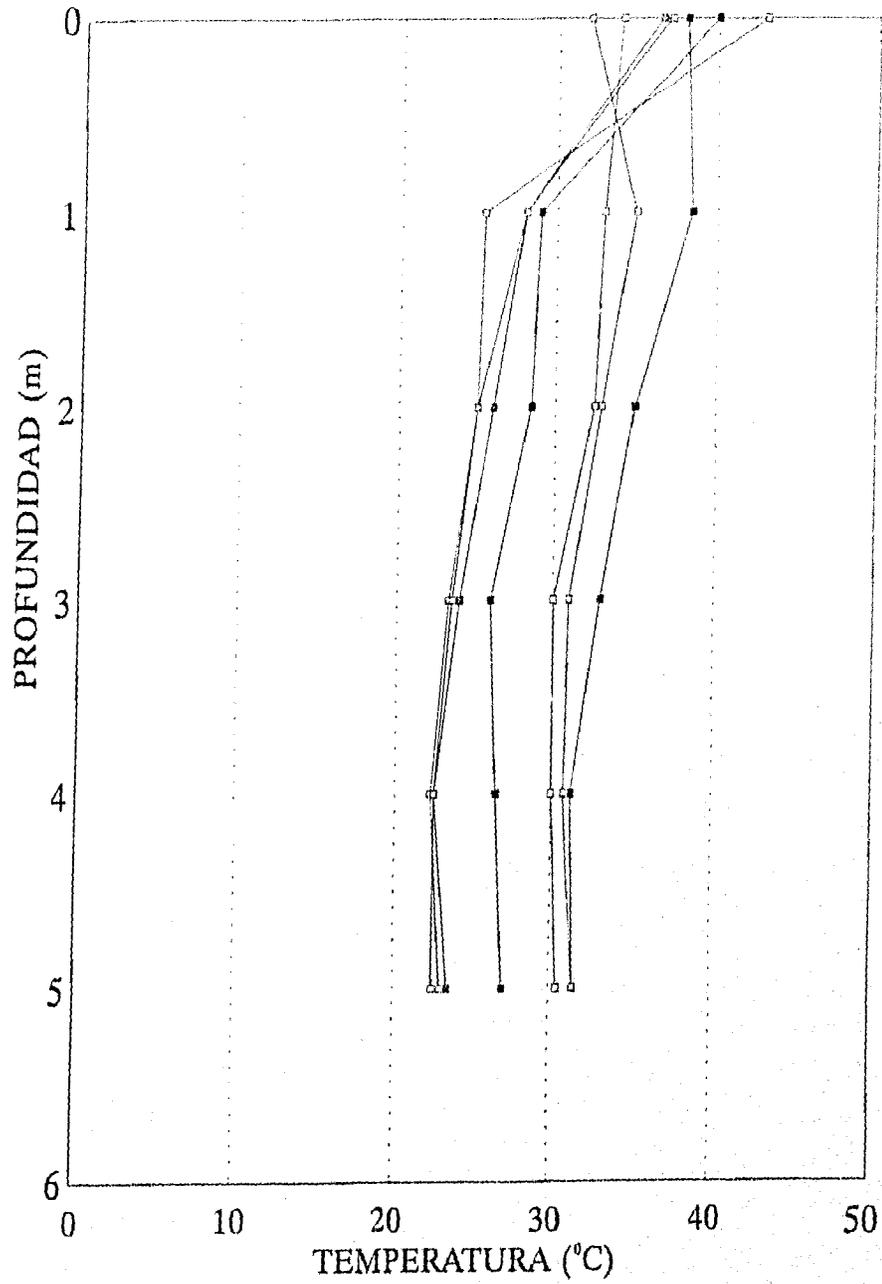


REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 14



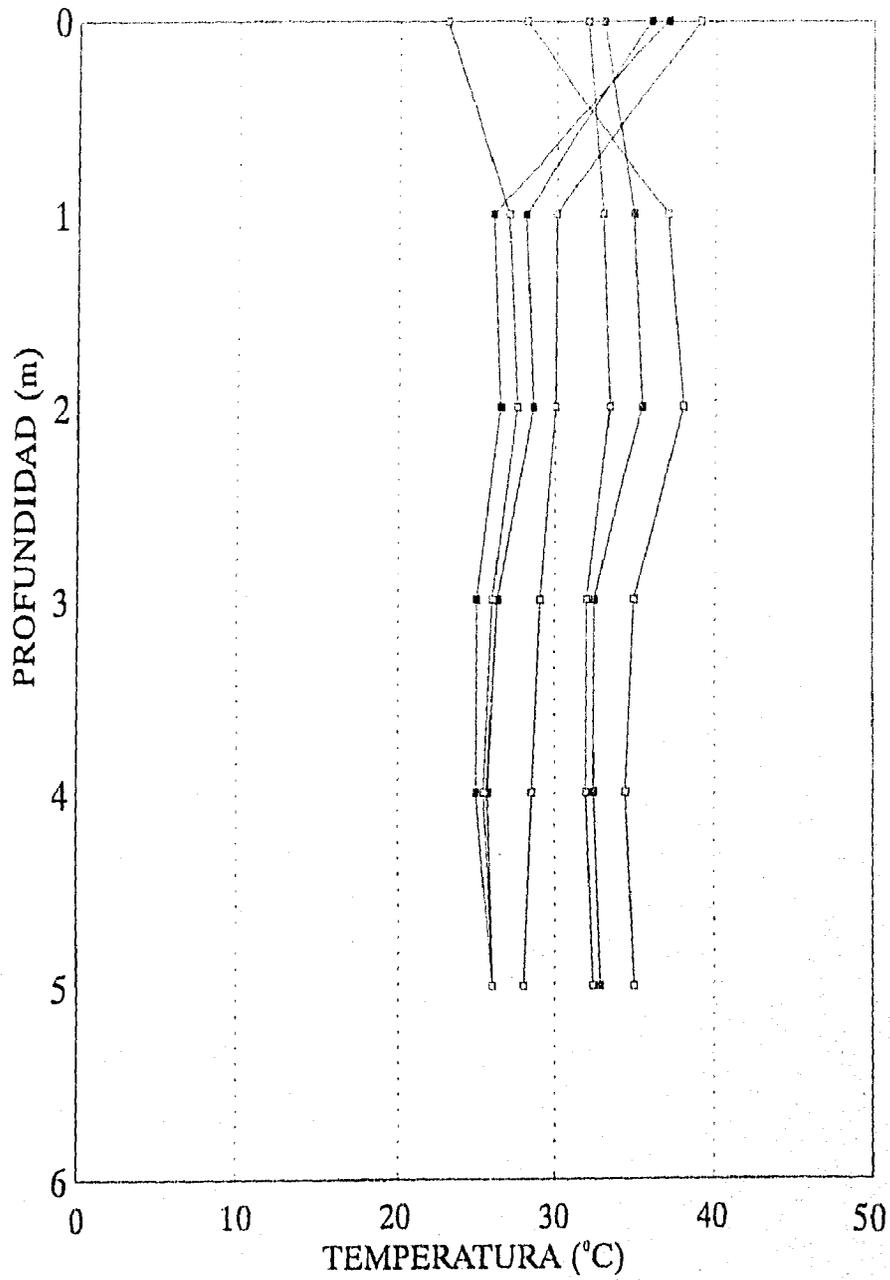
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 15



REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 16

91



REGISTRO DE TEMPERATURA EN
POZOS PERIMETRALES
POZO 17

92

